

Metodologías para la simulación de la fluidodinámica en un motor de combustión interna mediante SolidWorks

Methodologys for the simulation of fluid dynamics in an internal combustion engine through SolidWorks

Calderón Gutiérrez, Ivan Luis; Redondo Guerra, Leonardo; Macías Naranjo, Robert; Cerpa Olivera, Fainer; Gutiérrez Ramirez, Gail

Ivan Luis Calderón Gutiérrez
icalderon@uniguajira.edu.co
Universidad de La Guajira, Colombia

Leonardo Redondo Guerra
lfredondo@uniguajira.edu.co
Universidad de La Guajira, Colombia

Robert Macías Naranjo
rjmacias@unal.edu.co
Universidad Nacional, Colombia

Fainer Cerpa Olivera
fcerpa@uniguajira.edu.co
Universidad de La Guajira, Colombia

Gail Gutiérrez Ramirez
galbeirog@uniguajira.edu.co
Facultad de Ingeniería, Colombia

Ciencia e Ingeniería
Universidad de La Guajira, Colombia
ISSN-e: 2389-9484
Periodicidad: Semestral
vol. 10, núm. 1, e8091885, 2023
revistas@uniguajira.edu.co

Recepción: 11 Octubre 2022
Aprobación: 15 Febrero 2023

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/690/6904624007/>

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8091885>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.

Resumen: La representación computacional de los efectos fluidodinámicos durante la interacción entre el aire como fluido de trabajo y las diferentes geometrías que conforman las carreras de admisión y escape en un Motor de Combustión Interna (MCI) mediante simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) usando inéditamente SolidWorks Flow Simulation (SWFS) es reportada en este trabajo. Para lo cual se necesitó comprender los requerimientos del proceso de configuración de SWFS, adaptar las condiciones iniciales y de frontera propuestas en antecedentes bibliográficos y usar una geometría del MCI albergada en una base de datos geométrica de acceso libre. En los resultados fue posible exponer las características del fluido de trabajo al interior del cilindro para varias aperturas de válvula de admisión y escape en términos de variables claves como presión, flujo másico y campos de velocidad denominados Swirl y Tumble; mediante la validación fue posible evidenciar que las metodologías propuestas representan la fluidodinámica del aire con un alto nivel de convergencia según trabajos reportados en la literatura.

Palabras clave: Dinámica de fluidos computacional, Ecuaciones de Navier Stokes, Motores de combustión interna alternativos, Carrera de admisión, Carrera de escape.

Abstract: The computational representation of the fluid dynamic effects during the interaction between air as a working fluid and the different geometries that make up the intake and exhaust strokes in an Internal Combustion Engine (ICE) by means of Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations using previously unpublished SolidWorks Flow Simulation (SWFS) is reported in this work. For which it was necessary to understand the requirements of the SWFS configuration process, adapt the initial and boundary conditions proposed in bibliographic precedents, and use an ICE geometry housed in a freely accessible geometric database. In the results it was possible to expose the characteristics of the working fluid inside the cylinder for various intake and exhaust valve openings in terms of key variables such as pressure, mass flow and speed fields called Swirl and Tumble; through validation it was possible to show that the proposed methodologies represent the fluid dynamics of air with a high level of convergence according to works reported in the literature.

Keywords: computational fluid dynamic, Navier Stokes equations, alternative internal combustion engine, intake stroke, exhaust stroke.

INTRODUCCIÓN

Los motores de combustión interna (MCI) cumplen un papel crucial en diversas aplicaciones tales como transporte y generación de energía para la sociedad. Sin embargo, estas máquinas están ligadas al uso tradicional de combustibles fósiles (FF) generadores de gases nocivos tales como los óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO) entre otros gases contaminantes, que en conjunto con las ineficiencias asociadas a las pérdidas térmicas, mecánicas y de flujo que presentan estos equipos en su funcionamiento normal; reflejan la necesidad de actividades de investigación y desarrollo (I+D) que busquen un modo de operación eficiente y sostenible de los MCI (Lalwani et al., 2019).

Técnicamente, un MCI es un conjunto de componentes mecánicos que permiten transformar la energía química de un combustible líquido o gaseoso en energía térmica mediante la combustión y a través de la expansión del fluido de trabajo (mezcla aire – combustible), convierte la energía térmica en trabajo mecánico (Jacobs, 2020). En el funcionamiento normal de los MCI existen algunos factores previos a la combustión, los cuales influyen directamente en las prestaciones, la eficiencia y la formación de emisiones contaminantes del motor, dichos factores se dan durante el proceso de formación del fluido de trabajo y son los patrones de rociado del combustible, el movimiento del fluido de trabajo en el cilindro y las características físicas de la mezcla (Chinnamuthu et al., 2021); debido a lo anterior, investigadores aseguran que una forma de abordar el estudio y comprender la fenomenología de estos factores claves es mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD) (Hsieh et al., 2021). Esta técnica de estudio combina la mecánica de fluidos moderna, con métodos numéricos e informática, por lo que una simulación CFD bajo ciertas condiciones y parámetros dados es equivalente a un experimento numérico, escatimando de esta forma tiempo y recursos ante alternativas analíticas y experimentales (Liu, 2021).

En la literatura hay diversos trabajos que reportan el uso de la CFD en el análisis de las características fluidodinámicas previas a la combustión en los MCI mediante muchos programas que integran esta técnica de estudio y según la revisión bibliográfica, SolidWorks Flow Simulation (SWFS) ha sido poco explorado en este campo. Esta herramienta CFD es un complemento integrado al software de diseño asistido por computadora SolidWorks, la cual permite obtener soluciones parciales de las leyes de conservación de masa, momento y energía, conocidas también como las ecuaciones de Navier Stokes, que en conjunto con la ecuación de continuidad gobiernan el movimiento de los fluidos (Matsson, 2021). Los pocos trabajos existentes con SWFS se enfocan en el estudio de cómo influye el diseño del colector de admisión en las características del fluido de trabajo y las prestaciones de un MCI diesel transformado a gas licuado de petróleo (GLP) (Jemni et al., 2011); el enriquecimiento de Hidrógeno (H₂) y su impacto en las características fluidodinámicas en el cilindro, las prestaciones del MCI y las emisiones de escape de un motor que normalmente funciona con GLP (Kacem et al., 2016); el análisis de las características del fluido de trabajo en el cilindro con estrategias innovadoras de admisión para un MCI multiválvulas (Nigro et al., 2017) y en la influencia de la ubicación de la inyección de H₂ en las características fluidodinámicas, el rendimiento y las emisiones de un MCI que funciona con GLP (Jemni et al., 2018).

Cabe resaltar que la CFD no solo aborda el estudio de los MCI, se expande a muchos escenarios y entre ellos la medicina cardiovascular, donde se usa como método *in silico* no invasivo para caracterizar flujos sanguíneos en el sistema cardiovascular en condiciones fisiológicas o patológicas con aplicaciones potenciales en la toma de decisiones clínicas, planificación, estrategias de terapia, diseño y optimización de dispositivos médicos (Totorean et al., 2022).

En este orden de ideas, al considerar que la técnica CFD es una herramienta poderosa que puede ser usada en muchos escenarios de interés para las distintas comunidades científicas y que el uso de SWFS, según la revisión bibliográfica, es poco reportado en estudios sobre la interacción entre el fluido de trabajo y las diversas geometrías que conforman a un MCI. El objetivo de este trabajo apuntó a la representación computacional de la fluidodinámica presente en la interacción del aire como fluido de trabajo durante las carreras de admisión y escape con las geometrías que conforman un MCI mediante una simulación CFD en el entorno de SWFS y la documentación del proceso tras dicha representación, el cual incluyó la identificación de las condiciones iniciales y de frontera, la adaptación de estas a los requerimientos de SWFS, en donde destacó un diferencial de presión para hacer fluir el aire a través de las geometrías del motor; el análisis de mallado y el postprocesamiento de resultados en función de variables como flujo másico, presión y los campos de velocidad (Swirl y Tumble); la validación de resultados para los procesos de admisión y escape se realizó con trabajos afines reportados en la literatura.

METODOLOGÍA

Para la consecución del objetivo planteado en este trabajo, fue necesario comprender los requerimientos tras el proceso de configuración de una simulación CFD en el entorno de SWFS, el cual se compone por las etapas básicas de preproceso, procesamiento y postproceso, ilustradas en la Figura 1.

Figura 1. Requerimientos generales de las etapas básicas de preproceso, procesamiento y postproceso para una simulación CFD en SWFS.

Este diagrama de flujo general se estableció debido a la revisión de trabajos como el de Rojas & Huaraz (2018) y Tordini (2019), manuales técnicos de SWFS (Dassault Systemes, 2021) y la interacción que se tuvo con el software SWFS, lo cual permitió identificar algunos requerimientos claves al momento de configurar una simulación CFD tales como la selección del modelo o diseño geométrico asistido por computadora (CAD), el establecimiento de las condiciones iniciales y de frontera, tipo de análisis, tipo y características del fluido de trabajo, configuración de mallado y la selección de los objetivos de la simulación; los cuales se tratan de forma específica en las siguientes subsecciones.

Modelo CAD

El modelo CAD seleccionado para este estudio se ilustra en la Figura 2, este cuenta con los siguientes componentes de un MCI: múltiples de admisión/escape, válvulas de admisión/escape, cilindro y pistón. Este modelo se encuentra disponible para fines académicos en la base de datos (GrabCAD, 2021).

Figura 2. Modelo CAD ilustrado en las vistas (A) derecha, (B) isométrica, (C) superior, (D) frontal (admisión) y (E) posterior (escape).

Condiciones iniciales y de frontera

Para estos requerimientos se tomó como punto de partida las condiciones reportadas en el trabajo de (Scaggion, 2018) encontrado en la revisión bibliográfica, las condiciones iniciales y los objetivos para el proceso de admisión se listan en la Tabla 1.

TABLA 1
 Condiciones iniciales variables independientes y objetivos variables dependientes del proceso de admisión donde es un diferencial de presión apertura de válvula de admisión y la temperatura para todo el sistema

Proceso de admisión Condiciones iniciales = 5.000 Pa (con respecto a la presión atmosférica) = 1,2, 3, 4, 5, 6 y 7 mm = 313 K	Objetivos de simulación Campos de velocidad del fluido Campos de presión Flujo másico
---	--

Debido a que interesa conocer como es el comportamiento fluidodinámico del fluido de trabajo al interior del motor, específicamente en el cilindro, se tienen en cuenta las siguientes consideraciones para las simulaciones: el fluido de trabajo es aire, no se intercambia calor con el entorno y las paredes se consideran con rugosidad cero, la presión atmosférica se toma como 1 atm. en cuanto a las condiciones iniciales de turbulencia y concentración, se trabaja con la configuración predeterminada de SWFS.

Para la simulación del proceso de escape, se tomó en cuenta como condición de frontera en el múltiple de admisión la magnitud del flujo másico admitido cuando = 4 mm y la presión atmosférica a la salida del colector de escape; la válvula de admisión tuvo una apertura constante de 4 mm mientras que la de escape () variará según el rango de aperturas = 1,4 y 10 mm; las variables dependientes para este escenario serán flujo másico a la salida del colector de escape, velocidad de admisión y de escape, campos de velocidad y presión.

Análisis de mado

SWFS integra la opción de malla automática, la cual permite definir su escala entre 1, que representa el nivel de malla con celdas más grandes y 7, el nivel de malla con celdas más pequeñas (Scott Wallace, 2017). Para efectos de este estudio, en la Figura 3, se comparan los resultados de flujo másico reportados por Scaggion (2018) y los obtenidos mediante la opción de mado automático para tres aperturas de .

Figura 3. Comparación de los resultados de flujo másico para = 1,4 y 7 mm obtenidos con los niveles de malla automática 1, 2, 3, 4, 5 y 6 con los reportados por Scaggion (2018).

Debido al alto costo computacional que requiere la malla nivel 7 para esta simulación, no fue posible obtener los resultados para dicha malla. No obstante, en la gráfica es posible apreciar el comportamiento de las variables consideradas para las configuraciones de malla posibles con respecto a la referencia. Se puede ver que todos los niveles de malla tienden a converger en = 1 mm a excepción de la malla 1; posteriormente se aprecia cierto nivel de divergencia en las magnitudes del flujo másico cuando . = 4 y 7 mm. Al analizar los tiempos de cómputo para las cinco primeras configuraciones de malla ilustrados en la Figura 4, se puede decir que, de todos los niveles de mallas ilustrados, la que más se acerca al comportamiento de referencia es la malla 4, cuyo tiempo de cómputo oscila entre los 0,5 y 3,0 minutos.

Figura 4. Tiempos de cómputo para las configuraciones de mallas automáticas 1, 2, 3, 4 y 5. Análisis desarrollado en ordenador Lenovo con procesadores Intel Celeron 1.90 Gigahertz y 4 Gigabyte de RAM.

La configuración de malla seleccionada es la malla 4, la cual cuenta con un promedio de 27,128 celdas totales, 12,333 celdas fluidas, 14,795 celdas sólidas y 7,843 celdas parciales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Simulación del proceso de admisión

Con base a los requerimientos generales para una simulación CFD en SWFS, las variables dependientes e independientes y las consideraciones antes mencionadas; la Figura 5, expone el diagrama de flujo específico propuesto para representar computacionalmente la fluidodinámica al interior del cilindro en estado cuasi estacionario durante la carrera de admisión mediante SWFS.

Figura 5. Diagrama de flujo específico para la simulación CFD del proceso de admisión de un MCI.

Campos de velocidad y presión en admisión

En la Figura 6, se muestran los planos de acción que se usarán para ilustrar los campos de velocidad en función de fenómenos como Swirl y Tumble, cuyos ejes de rotación son paralelo y perpendicular al cilindro respectivamente (El-Adawy et al., 2021).

Figura 6. Campos de velocidad (A) Tumble y (B) Swirl. Plano Swirl: A. = 15 mm; Tumble B. = 10 mm y B. = 40 mm.

A continuación, la Figura 7, muestra cómo se desarrollan los campos de velocidad desde el plano Tumble A. para todo el rango de . Es posible apreciar cómo se intensifican los efectos del fenómeno Tumble con la aparición de varios vórtices cuando la apertura de la válvula que permite admisión de aire se vuelve mayor, se puede ver como estos remolinos reducen las regiones de velocidad baja ayudando que la distribución del aire al interior del cilindro abarque todo el eje longitudinal.

Figura 7. Distribución del campo de velocidad Tumble en el plano A. para el rango de apertura de la válvula de admisión = 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 mm.

Los campos de velocidad Swirl en los planos B. y B. ubicados a 10 y 40 mm del PMS, se ilustran en la Figura 8, teniendo en cuenta la ubicación de la válvula en admisión que se ilustra en = 1 mm se hace evidente el aumento de la velocidad del fluido de trabajo cerca de las paredes del cilindro en base a la aparición de los vórtices.

Figura 8. Distribución de los campos de velocidad Swirl en los planos B. = 10 mm y B. = 40 mm y para el rango de aberturas de la válvula de admisión = 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 mm.

Los fenómenos Tumble y Swirl antes ilustrados, se originan durante la carrera de admisión y sus efectos se hacen evidentes al interior del cilindro influyendo en aspectos como formación de la mezcla, guiado de la mezcla y en las condiciones de turbulencia del fluido de trabajo; es importante resaltar que los efectos Swirl tienden a incrementar en las proximidades del Punto Muerto Inferior (PMI) (Vázquez & De la Morena, 2019), por lo cual en el campo B. se tienen unas características de flujo más ordenadas. La Figura 9, permite apreciar los campos de presión para todo el rango con base a la diferencia de presiones que se configuró como condición de frontera.

Figura 9. Comportamiento de los campos de presión en el rango de aberturas de válvula de = 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 mm.

Resultados cuantitativos en admisión

Considerando que el flujo másico admitido se seleccionó como una variable dependiente en la simulación de la carrera de admisión, es decir como un objetivo de la simulación, en la Tabla 2 se muestran las magnitudes calculadas para todo el rango de aberturas .

TABLA 2
Magnitudes del flujo másico admitido para todo el rango de aperturas

Rango aperturas (mm)	Colector admisión: flujo másico (kg.s-1)
1	0,0072
2	0,0131
3	0,0194
4	0,0248
5	0,0282
6	0,0314
7	0,0339

Se evidencia un incremento del flujo másico a medida que se hace más grande, este aumento se da porque el área mínima de paso del flujo de aire crece cuando la apertura de válvula aumenta y la limitación geométrica que limita el paso del flujo de aire disminuye, permitiendo de esta manera dicho incremento.

Simulación del proceso de escape

Para la simulación de la carrera de escape se ajustó el flujo de trabajo ilustrado en la Figura 10, en dicho flujo de trabajo se pueden apreciar las condiciones iniciales, de frontera, consideraciones y objetivos de simulación anteriormente mencionados para este escenario en la subsección condiciones iniciales y de frontera.

Figura 10. Diagrama de flujo específico para la simulación CFD del proceso de escape de un MCI.

Campos de velocidad y presión en escape

Los *campos de velocidad* se ilustran en la Figura 11, estos muestran la admisión y posterior escape del flujo de aire mientras al mantener la abertura en admisión = 4 mm y variar las aberturas de escape según el rango = 1,4 y 10 mm. Con base a estas condiciones es posible observar las características del flujo de aire mientras transita por el modelo CAD y sus respectivas variaciones. La Figura 12, muestra los campos de presión, con base en estos es posible identificar el proceso de transferencia de masa de un punto a otro considerando que dicho proceso se presenta de zonas con altas presiones a las zonas de bajas presiones hasta llegar a un equilibrio entre las presiones en cuestión (Cengel et al., 2019).

Figura 11. Campos de velocidad del flujo de aire para las condiciones geométricas = 4 mm y = 1,4 y 10 mm.

Figura 12. Campos de presión para las condiciones geométricas = 4 mm y = 1,4 y 10 mm.

Resultados cuantitativos en escape

En la Figura 13. se ilustra el comportamiento de las velocidades de admisión y escape con base a las magnitudes calculadas de esta variable en función del rango de apertura .

Figura 13. Velocidades de admisión y escape en función de las aberturas de escape = 1,4 y 10 mm.

La velocidad de admisión incrementa a medida que aumenta, se puede decir que a partir de = 4 mm, la velocidad de admisión muestra un comportamiento constante, lo cual se debe a que el área de paso de la geometría en la zona de admisión con la apertura de válvula = 4 mm no permite admitir más aire representado de esta manera una limitante geométrica. En cuanto a la velocidad de escape esta muestra el comportamiento contrario y se debe a que el área de paso del flujo de aire en la zona de escape aumenta, representado una caída de velocidad a medida que disminuye.

Finalmente, en la Tabla 3. se muestran las magnitudes del flujo másico calculadas en la salida del colector de escape.

TABLA 3
Magnitudes del flujo másico medido a la salida del colector de escape en función del rango de aperturas 14 y 10 mm

Rango apertura (mm)	Colector escape: flujo másico (kg.s ⁻¹)
1	-0,0248
4	-0,0248
10	-0,0248

Validación de resultados

Se graficaron los resultados del flujo másico reportados por la literatura referencia y los obtenidos en este estudio para el rango de aberturas de admisión = 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 mm lo cual se ilustra en la Figura 14.

Figura 14. Comparación de los resultados obtenidos mediante SWFS y los reportados por Scaggion (2018).

Para las aperturas = 1 y 2 mm se puede ver que los resultados convergen en cierto grado y a partir de = 3 mm divergen aumentando dicho nivel hasta llegar a = 7 mm. Sin embargo, esta discrepancia se debe a las diferencias geométricas existentes entre el modelo CAD usado por Scaggion (2018) y el usado en este estudio, las cuales se listan en la Tabla 4.

TABLA 4
Diferencias geométricas entre los modelos CAD usados

Parámetros	Scaggion (2018)	SWFS
Ángulo de inclinación de válvula admisión	11,50°	19,90°
Ángulo de inclinación válvula escape	12,00°	19,90°
Radio válvula admisión	13,75 mm	13,65 mm
Radio válvula escape	11,0 mm	11,6 mm
Abertura máx. válvula admisión	8,3 mm	7,0 mm
Abertura máx. válvula escape	7,2 mm	10,0 mm
Radio del cilindro	33,50 mm	35,95

Para la validación del proceso de escape se aplicó el principio de conservación de masa reportado por (Cengel et al., 2019), concluyendo que el flujo másico que entra al cilindro fue el mismo que salió para todo el rango considerado; por lo tanto, se puede decir que esta geometría no retiene gases de escape.

CONCLUSIONES

Fue posible representar la fluidodinámica del aire al interior del cilindro en términos de campos de velocidad y presión en condiciones cuasi estacionarias para todo el rango considerado de aperturas, especialmente la visualización de fenómenos Tumble y Swirl los cuales pueden favorecer significativamente a la homogeneización del fluido de trabajo en todo el cilindro durante la carrera de admisión e igualmente al proceso de transferencia de masa.

La fluidodinámica presente en la carrera de escape indica que el modelo CAD usado en este estudio es viable para análisis futuros debido a que no retiene gases de escape en todo el rango de aperturas.

La validación de resultados pone en evidencia que las metodologías permiten la representación de la fluidodinámica del flujo de aire en el cilindro con un alto nivel de convergencia. Lo cual indica que SWFS es una herramienta CFD con capacidad para el estudio de factores claves como las cualidades de la formación de la mezcla aire/combustible y el movimiento de esta mezcla al interior del cilindro en el funcionamiento de los motores y que podría usarse en el estudio de procesos innovadores como el Blending con la inclusión de combustibles renovables en los MCI.

AGRADECIMIENTOS

Los autores extienden sus agradecimientos a la Universidad de La Guajira por el apoyo financiero mediante la Resolución Rectoral No. 0179 del 2022 y al proyecto O-2755 “Estrategia de transformación del sector energético colombiano en el horizonte de 2030 - Energética 2030”, direccionado por la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

NOTAS

LITERATURA CITADA Cengel, Y. A., Boles, M. A., & Kanoglu, M. (2019). *Termodinámica* (9a edición). McGraw-Hill Interamericana de España S.L.

Chinnamuthu, N., Ganapathy, S. C., Malaiperumal, V., Varuvel, E. G., Raman, V., Boologarajan, P., & Kannan, A. (2021). Computational analysis of turbulence enhancement in a compression ignition engine with modified inlet design. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(26), 33866–33879. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10157-9>

Dassault Systemes. (2021). *SolidWorks Flow Simulation - Technical reference*. <https://help.solidworks.com/HelpProducts.aspx>

El-Adawy, M., Heikal, M. R., Rashid, A., & Adewale Opatola, R. (2021). Stereoscopic particle image velocimetry for engine flow measurements: Principles and applications. *Alexandria Engineering Journal*, 60(3), 3327–3344. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.01.060>

GrabCAD. (2021). *GrabCAD: Design Community, CAD Library, 3D Printing Software*. GrabCAD. <https://grabcad.com/>

Hsieh, C. F., Chen, K. T., & Johar, T. (2021). Fluid flow characteristics of two types rotary engines. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(80), 40154–40174. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.250>

Jacobs, T. J. (2020). *Internal Combustion Engines, Developments in*. In *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology Series: Vol. II* (pp. 133–184). https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9763-3_430

Jemni, M. A., Kantchev, G., & Abid, M. S. (2011). Influence of intake manifold design on in-cylinder flow and engine performances in a bus diesel engine converted to LPG gas fuelled, using CFD analyses and experimental investigations. *Energy*, 36(5), 2701–2715. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.02.011>

Jemni, M. A., Kassem, S. H., Driss, Z., & Abid, M. S. (2018). Effects of hydrogen enrichment and injection location on in-cylinder flow characteristics, performance and emissions of gaseous LPG engine. *Energy*, 150, 92–108. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.120>

Kacem, S. H., Jemni, M. A., Driss, Z., & Abid, M. S. (2016). The effect of H₂ enrichment on in-cylinder flow behavior, engine performances and exhaust emissions: Case of LPG-hydrogen engine. *Applied Energy*, 179, 961–971. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.075>

Lalwani, A., Awate, S., Chowdhury, A., & Sreedhara, S. (2019). Conversion of a single-cylinder internal combustion engine to dual-mode homogeneous charge compression ignition engine. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21(1), 23–37. <https://doi.org/10.1007/s10098-018-1613-4>

Liu, P. (2021). *Computational Fluid Dynamics*. In *A General Theory of Fluid Mechanics* (pp. 297–332). https://doi.org/10.1007/978-981-33-6660-2_4

Matsson, J. E. (2021). *An Introduction to SOLIDWORKS Flow Simulation 2021*. In SDC publications.

Nigro, A., Algieri, A., De Bartolo, C., & Bova, S. (2017). Fluid dynamic investigation of innovative intake strategies for multivalve internal combustion engines. *International Journal of Mechanical Sciences*, 123(June 2016), 297–310. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.02.018>

Rojas, S. B., & Huaraz, M. A. (2018). *Caracterización del Atomizado de Etanol y Propano en Inyectores Tipo Y Mediante SolidWorks Flow Simulation [Universidad Nacional Del Santa]*. <http://repositorio.uns.edu.pe/handle/UNS/3045>

- Scaggion, L. (2018). *Analisi fluidodinamica tramite cfd e ottimizzazione del processo di riempimento nei motori di formula sae*. UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA.
- Scott Wallace, J. (2017). *Investigation of SolidWorks flow simulation as a valid tool for analyzing airfoil performance characteristics in low Reynolds number flows*. Oklahoma State University.
- Tordini, D. (2019). *Diagnosing an Engine With SOLIDWORKS Flow Simulation*. *Mechanical Design, Simulation & Analysis*. <https://hawkridgesys.com/blog/diagnosing-an-engine-with-solidworks-flow-simulation>
- Totorean, A. F., Bernad, S. I., Ciocan, T., Totorean, I. C., & Bernad, E. S. (2022). *Computational Fluid Dynamics Applications in Cardiovascular Medicine—from Medical Image-Based Modeling to Simulation: Numerical Analysis of Blood Flow in Abdominal Aorta*. In D. Zeidan, L. T. Zhang, E. G. Da Silva, & J. Merker (Eds.), *Advances in Fluid Mechanics. Forum for Interdisciplinary Mathematics*. Springer, Singapore (pp. 1–42). https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-19-1438-6_1
- Vázquez, C., & De la Morena, J. (2019). *Análisis del desarrollo de la combustión bajo condiciones de carga homogénea mediante el uso de la máquina de compresión y expansión rápida* [Universitat Politècnica de València, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Centro de Motores Térmicos]. https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/98604/44877508_TFG_15184617546657028284912265978353.pdf?sequence=2