

**INTERACCIÓN FLUIDO – SÓLIDO EN EL CONJUNTO PRINCIPAL DE UN
MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA MEDIANTE UNA SIMULACIÓN 3D EN
SOLIDWORKS**

**IVAN LUIS CALDERÓN GUTIÉRREZ
LEONARDO FIDEL REDONDO GUERRA**

**UNIVERSIDAD DE LA GUAJIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
RIOHACHA – LA GUAJIRA
2022**

**INTERACCIÓN FLUIDO – SÓLIDO EN EL CONJUNTO PRINCIPAL DE UN
MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA MEDIANTE UNA SIMULACIÓN 3D EN
SOLIDWORKS**

**IVAN LUIS CALDERÓN GUTIÉRREZ
LEONARDO FIDEL REDONDO GUERRA**

**INFORME DE MONOGRAFÍA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

**GAIL ALBEIRO GUTIÉRREZ RAMÍREZ
DIRECTOR DE MONOGRAFÍA
ING. MEC. DR.-ING.
PROFESOR DE PLANTA**

**UNIVERSIDAD DE LA GUAJIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
RIOHACHA – LA GUAJIRA
2022**

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Ciudad y Fecha (día, mes, año) (Fecha de entrega)

Debido al apoyo incondicional, comprensión, consejos y motivación, dedico la consecución de este primer logro en esta nueva etapa de mi vida a Danys Gutiérrez, Stefanie, Mayra y Danna Calderón.

Ivan Luis Calderón Gutiérrez

Dedicado a mis padres Julio Castro y Marlena Guerra quienes con su amor y apoyo incondicional me han permitido lograr un sueño más. Gracias por inculcar en mí un ejemplo a seguir para mi hijo Jahil quien ha sido un pilar más para este logro. También a mis hermanas Karem y Viviana por su cariño y ayudarme a no temer a las adversidades.

Leonardo Fidel Redondo Guerra

AGRADECIMIENTOS

A Dios y su especial forma de sembrar la curiosidad en el hombre; a la vida y el destino. A los miembros del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad de La Guajira por su gestión y dirección en el proceso de formación de profesionales íntegros y competentes; al grupo de investigación DESTACAR y su semillero SEDISSES por brindarnos la oportunidad de fortalecer nuestras competencias investigativas mediante la participación en actividades de investigación tales como el proyecto *0-2755 ESTRATEGIA DE TRANSFORMACIÓN DEL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO EN EL HORIZONTE DE 2030 - ENERGETICA 2030*, al cual fuimos vinculados como estudiantes auxiliares mediante la RESOLUCION No. 0179 del año 2022 emitida por Uniguajira.

Al ingeniero Fainer Cerpa, por su amable y constante colaboración con los temas relacionados a SolidWorks y su herramienta CFD.

Finalmente, un agradecimiento especial al profesor Gail Gutiérrez y a su particular metodología de transmisión de conocimientos, que, en conjunto con su dirección y apoyo, permitió la consecución de los resultados de este trabajo para optar al título de ingenieros mecánicos.

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	21
2. OBJETIVOS	22
2.1 Objetivo general	22
2.2 Objetivos específicos	22
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	23
3.1. Definición del problema	23
4. JUSTIFICACIÓN	25
4.1. Académica.....	25
4.2. Metodológica	25
4.3. Social	25
4.4. Ambiental	25
5. MARCO TEÓRICO.....	27
5.1. Antecedentes de investigación	27
5.2. Motor de combustión interna (MCI).....	32
5.3. Clasificación	33
5.4. Ciclo de trabajo.....	34
5.4.1. Admisión.....	35
5.4.2. Compresión	35
5.4.3. Carrera de potencia.....	36
5.4.4. Escape	36
5.5. Escalas de tiempo	36
5.6. Curvas características de los MCI	37
5.6.1. Diagrama Indicado	38
5.6.2. Diagrama Amplitud de presión – Tiempo del ciclo	38
5.6.3. Diagrama Par y Potencia – Régimen de giro	39
5.6.4. Diagrama Presión – Ángulo del cigüeñal	42
5.6.5. Diagrama Temperatura – Ángulo del cigüeñal.....	43
5.7. Componentes mecánicos relevantes en el ciclo de trabajo.....	43
5.7.1. Colector de admisión	44

5.7.1.1.	Filtro de aire	45
5.7.1.2.	Válvula reguladora de la carga	45
5.7.1.3.	Válvulas de admisión.....	45
5.7.2.	Colector de escape.....	46
5.7.2.1.	Válvula de escape	46
5.7.3.	Cámara de combustión.....	46
5.7.3.1.	Pistón	47
5.8.	Fluido de trabajo.....	48
5.8.1.	Aire atmosférico.....	48
5.9.	Campos de velocidad del fluido de trabajo	49
5.9.1.	Campo Swirl	49
5.9.2.	Campo Tumble	49
5.9.3.	Campo Squish.....	50
5.10.	Enfoques de simulación de los MCI	50
5.10.1.	Simulación en estado transitorio con combustión.....	51
5.10.2.	Simulación en estado estable sin combustión	52
5.11.	<i>SolidWorks</i>	53
5.11.1.	<i>Flow Simulation</i> herramienta CFD de <i>SolidWorks (SWFS)</i>	53
5.11.2.	Capacidades y limitaciones.....	54
5.11.3.	Ecuaciones que gobiernan los procesos	55
5.11.4.	Modelo de turbulencia.....	57
5.12.	Configuración de una simulación de flujo simple en <i>SWFS</i>	58
5.12.1.	Descripción del problema.....	59
5.12.2.	Configuración preliminar del problema en el <i>Wizard</i> de <i>SWFS</i>	60
5.12.3.	Definición de los datos de entrada (<i>Input Data</i>).....	65
5.12.4.	Correr la simulación	70
5.12.5.	Resultados de la simulación.....	72
5.12.6.	Análisis de sensibilidad de los resultados frente al tipo de mallado.....	75
6.	MATERIALES Y MÉTODOS	78
6.1.	Materiales.....	78
6.1.1.	Equipo y software	78
6.1.2.	Bases de datos bibliográficas y geométricas	78

6.2.	Metodología.....	79
6.2.1.	Requerimientos para ejecutar una simulación CFD	79
6.2.1.1.	Preproceso.....	80
6.2.1.2.	Procesamiento	80
6.2.1.3.	Postproceso	81
6.2.2.	Diagrama de flujo específico para ejecutar una simulación CFD en <i>SWFS</i>	81
6.2.2.1.	Selección del modelo CAD	82
6.2.2.2.	Tratamiento del modelo CAD pre configuración de la simulación	83
6.2.3.	Escenarios de interés para la simulación CFD	87
6.2.3.1.	Variables de interés.....	88
6.2.4.	Mallado.....	90
7.	DESARROLLO DEL PROYECTO.....	95
7.1.	Sobre la simulación del colector de admisión	95
7.1.1.	Flujo de trabajo específico.....	95
7.1.2.	Resultados cualitativos.....	95
7.1.3.	Resultados cuantitativos.....	104
7.2.	Sobre la simulación de la cámara de combustión.....	106
7.2.1.	Justificación.....	106
7.3.	Sobre la simulación del colector de escape	107
7.3.1.	Flujo de trabajo específico.....	107
7.3.2.	Resultados cualitativos.....	107
7.3.3.	Resultados cuantitativos.....	111
7.4.	Validación de resultados.....	113
	CONCLUSIONES	115
	RECOMENDACIONES	116
	ANEXOS.....	117
	BIBLIOGRAFÍA.....	134

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 5.1. Antecedentes de investigación nacionales e internacionales.	32
Tabla 5.2. Capacidades que tiene SWFS como herramienta CFD.....	54
Tabla 5.3. Limitaciones que tiene SWFS como herramienta CFD.....	55
Tabla 5.4. Datos básicos para la configuración del modelo simple en Flow Simulation.....	59
Tabla 5.5. Resultados para las simulaciones con mallado simple, por defecto y complejo.	77
Tabla 6.1. Subcomponentes del modelo CAD.....	86
Tabla 6.2. Variables independientes y dependientes a considerar en los escenarios de interés.	88
Tabla 6.3. Cantidad de celdas totales, fluidos, fluidas en contacto con solido nivel 4.	92
Tabla 7.1. Magnitudes del caudal masico y coeficiente de descarga en las diferentes aperturas de válvulas, magnitudes usadas en las gráficas anteriores.	105
Tabla 7.2. Magnitudes del caudal masico a la salida del colector de escape para las diferentes aperturas <i>h_{esc}</i>	113
Tabla 7.3. Diferencias geométricas entre algunos parámetros relevantes de los modelos CAD.....	114

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 6.1. Análisis de mallado: nivel de convergencia que ofrece la opción de malla global automática de SWFS para las variables de referencia Caudal Másico – Apertura de Válvulas.....	91
Gráfica 6.2. Tiempos de cómputo para los niveles de malla 1, 2, 3, 4 y 5.	92
Gráfica 7.1. Comportamiento del caudal másico en las aperturas de válvulas $h = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ y 7 mm.....	
Gráfica 7.2. Relación entre el coeficiente de pérdida Cd y apertura válvula/diámetro válvula.....	105
Gráfica 7.3. Comportamiento de la velocidad de admisión con respecto a las aperturas de válvulas de escape h_{esc}	112
Gráfica 7.4. Comportamiento de la velocidad de escape con respecto a las aperturas de válvulas de escape h_{esc}	112
Gráfica 7.5. Comparación entre los resultados de (Scaggion, 2018) y los obtenidos en esta monografía.	113

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 5.1. Esquema básico de las pérdidas y funcionamiento de un MCI.	33
Figura 5.2. Clasificación de los MCI según el proceso de combustión, modo de realizar el ciclo, tipo de refrigeración, presión en la admisión, número y disposición de cilindros. Adaptado del trabajo de (Rovira & Muñoz, 2015).	34
Figura 5.3. Ciclo de trabajo de un MCI 4T: a) admisión, b) compresión, c) carrera de potencia, d) escape. Adaptado del trabajo de (Payri & Desantes, 2015).	35
Figura 5.4. Perfiles de traslape valvular para el ciclo de trabajo de un motor HCCI dado en 720° del cigüeñal (Puntos: valores medidos, Líneas: valores ajustados a la simulación).....	37
Figura 5.5. Diagrama ($P - V$) ciclo de trabajo de un MCI con puntos de interés EVO, IVO, EVC e IVC más caracterización del ciclo de trabajo. Adaptado del trabajo de (Cengel & Boles, 2005).....	38
Figura 5.6. Diagrama Amplitud de presión relativa – Tiempo del ciclo termodinámico con ubicación exacta del PMS. Adaptado del trabajo de (Marín A. & Toro L., 2018).	39
Figura 5.7. Diagrama de Par – Régimen de giro con unidades de Par $M=$ Kilopondio por metro.	40
Figura 5.8. Diagrama de Potencia – Régimen de giro	41
Figura 5.9. Diagrama Par y Potencia – Régimen de giro.	41
Figura 5.10. Diagrama Presión – Ángulo del cigüeñal con zona de salida de gases de combustión y zona de entrada aire con respecto a los puntos de interés EVO, IVO, EVE e IVC. Adaptado del trabajo de (Giglio & di Gaeta, 2020).	42
Figura 5.11. Diagrama Temperatura – Ángulo del cigüeñal con ciclo de trabajo A.) admisión, B.) compresión, C.) Carrera potencia y D.) escape, más la ubicación de los PMS y PMI.	43
Figura 5.12. Configuración de componentes principales y subcomponentes de interés A. Toma de admisión, B. Filtro de aire, C. Válvula reguladora de carga (tipo mariposa), D. Válvulas de admisión, E. Cilindro, F. Pistón, J. Válvulas de escape. Adaptado de (Carreras et al., 2005).....	44
Figura 5.13. Esquema básico de la cámara de combustión de un MCI. Adaptado de los trabajos (Cabascango, 2019) y (Ramirez & Arcilla, 2017).....	47
Figura 5.14. Campos de velocidad del fluido de trabajo al interior de la cámara de combustión.....	49

Figura 5.15. Comparación de la gráfica Presión – Angulo cigüeñal de una simulación CFD con combustión y sin combustión. Adaptado del trabajo de (Tian & Abraham, 2014).	50
Figura 5.16. Magnitud y vectores de velocidad del proceso de admisión en estado cuasi estable (distintos ángulos del cigüeñal con respecto al PMS) por medio de la simulación CFD. Adaptado del trabajo de (Jemni et al., 2018).	51
Figura 5.17. Simulación CFD sin combustión del campo de flujo a través de la geometría compleja compuesta por A. toma de aire, B. plenum, C. válvula mariposa, D. válvulas de admisión y E. cilindro; durante la carrera de admisión con válvula mariposa abierta (1) y cerrada (2) . Adaptado del trabajo de (Nigro et al., 2017). ..	52
Figura 5.18. Representación de los patrones de flujo (velocidad del fluido de trabajo) en el sistema de admisión de un MCI a través del colector inicial y optimizado por medio de una simulación CFD. Tomado del trabajo de (Jemni et al., 2011).	53
Figura 5.19. Geometría de tubería para ejemplo práctico con referencias dimensionales.	60
Figura 5.20. Acceso al asistente Wizard (marcado con amarillo) y a la opción Create Lips (marcado con azul) en el menú de las características de Flow Simulation. ...	60
Figura 5.21. Panel de la opción Create Lips, definición del espesor de las tapas para definir el volumen de control.	61
Figura 5.22. Cuadro de dialogo inicial, asistente Wizard.	62
Figura 5.23. Cuadro de dialogo para selección del sistema de unidades, asistente Wizard.	62
Figura 5.24. Cuadro de dialogo para selección del tipo de análisis, asistente Wizard.	63
Figura 5.25. Cuadro de dialogo para definición del tipo y características del fluido, asistente Wizard.	64
Figura 5.26. Cuadro de dialogo para la definición de las condiciones de pared, asistente Wizard.	64
Figura 5.27. Cuadro de dialogo para configuras las condiciones iniciales, asistente Wizard.	65
Figura 5.28. Panel para configuración de los datos de entrada (Input Data), refinamiento del modelo en SWFS.	66

Figura 5.29. Corte de sección, modelo del ejemplo práctico con zonas de interés: A. Límite del dominio computacional, B. Volumen del fluido reconocido por el software y C. Tapas.	66
Figura 5.30. Panel explorador de la opción Boundary Conditions para la configuración de la entrada del fluido al modelo.	67
Figura 5.31. Panel explorador de la opción Boundary Conditions para la configuración de la salida del fluido al modelo.	68
Figura 5.32. Objetivos de ingeniería incluidos en la opción Goals para la configuración del modelo.	68
Figura 5.33. Panel explorador de la opción Surface Goals.	69
Figura 5.34. Configuración del mallado en la opción Mesh. Configuración de malla por defecto.	69
Figura 5.35. Interfaz gráfica una vez la simulación se encuentra totalmente definida.	70
Figura 5.36. Cuadro de dialogo para ejecutar la simulación. Equipo: Lenovo Intel Celeron CPU 1005M @1.90 GHz 1.90GHz.	70
Figura 5.37. Información relevante del proceso de simulación.	71
Figura 5.38. Gráfico de convergencia para la variable objetivo de simulación.	71
Figura 5.39. Lista de opciones para visualizar los resultados de simulación.	72
Figura 5.40. Panel explorador de la opción Surface Parameters.	73
Figura 5.41. Tabla de resultados de la presión de entrada calculada.	73
Figura 5.42. Distribución del campo de presión mediante la opción Flow Trajectories A. extremo de entrada B. extremo de salida.	74
Figura 5.43. Distribución de los contornos de velocidad del fluido en el eje longitudinal de la geometría mediante la opción Cut Plots A. extremo de entrada B.	74
Figura 5.44. Distribución de los contornos de velocidad del fluido en el eje transversal de la geometría.	75
Figura 5.46. Configuración del mallado, mallado complejo.	76
Figura 6.1. Etapas básicas del proceso de simulación CFD general. Tomado de (Xamán & Gijón, 2015).	79
Figura 6.2. Flujo de trabajo específico del proceso de simulación CFD en SWFS.	82

Figura 6.3. Proceso de selección de un modelo CAD reconocible por SWFS.	83
Figura 6.4. Modelo CAD proveniente de GrabCAD seleccionado para los análisis CFD de esta monografía.....	84
Figura 6.5. Advertencia “Tiene que haber al menos un componente para un análisis de simulación de flujo”.	86
Figura 6.6. Interfaz de la opción Superficies de SolidWorks por medio la cual fueron tratados todos y cada uno de los subcomponentes del modelo CAD.	87
Figura 6.7. Escenarios de interés 1. Colector de admisión, 2. Cilindro (cámara de combustion) y 3. Colector de escape; vistos desde (A) plano lateral y (B) plano alzado.	88
Figura 6.8. Distribución de malla automática nivel 4 en los planos (1) , (2) y (3) que incluyen (A) colector de admisión, (B) colector de escape y (C) cilindro.	93
Figura 6.9. Distribución de malla automática nivel 4 por el colector de admisión ilustrada en diferentes planos.	93
Figura 6.10. Distribución de malla automática nivel 4 por el colector de escape ilustrada en diferentes planos.	94
Figura 6.11. Distribución de malla automática nivel 4 por zona de válvulas de admisión (A-v) y de escape (B-v)	94
Figura 7.1. Flujo de trabajo específico del proceso de simulación CFD en SWFS para el colector de admisión.	95
Figura 7.2. Planos de acción de los campos de velocidad Tumble y Swirl. Consideraciones para el presente estudio $a1 = 15 \text{ mm}$, $b1 = 10 \text{ mm}$ y $b2 = 45 \text{ mm}$	96
Figura 7.3. Desarrollo de los campos de velocidad en el plano Tumble para todo el rango de aperturas h de la válvula de admisión.	98
Figura 7.4. Desarrollo de los campos de velocidad en el plano Swirl $b1 = 10 \text{ mm}$ considerando todo el rango de aperturas h de la válvula de admisión.	100
Figura 7.5. Desarrollo de los campos de velocidad en el plano Swirl $b2 = 40 \text{ mm}$ considerando todo el rango de aperturas h de la válvula de admisión.	102
Figura 7.6. Distribución del campo de presión en la carrera de admisión para todo el rango de aperturas h de la válvula de admisión.	103
Figura 7.7. Flujo de trabajo específico del proceso de simulación CFD en SWFS para el colector de escape.	107

Figura 7.8. Distribución del campo de velocidad del flujo de aire para una apertura de válvula de admisión $h = 4 \text{ mm}$ y las aperturas de la válvula de escape $h_{esc} = 1, 4 \text{ y } 10 \text{ mm}$ 109

Figura 7.9. Campos de presión para la apertura de válvula de admisión $h = 4 \text{ mm}$ y las aperturas de la válvula de escape $h_{esc} = 1, 4 \text{ y } 10 \text{ mm}$ 111

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Configuración del Wizard de SWFS para las simulaciones.	117
Anexo 1.1. Configuración del sistema de unidades	117
Anexo 1.2. Configuración del tipo de análisis.	118
Anexo 1.3. Configuración del fluido de trabajo y las características del flujo.	118
Anexo 1.4. Configuración de las condiciones de pared.	119
Anexo 1.5. Configuración de los parámetros iniciales termodinámicos, de velocidad y turbulencia	119
Anexo 2. Configuración de las condiciones iniciales y los objetivos de simulación (<i>Input Data</i>).	120
Anexo 2.1. Definición de la condición de frontera inicial <i>presión total</i> en la entrada del colector de admisión. (Simulación del colector de admisión).	120
Anexo 2.2. Definición de la condición de frontera final <i>presión total</i> en la cara del pistón. (Simulación del colector de admisión).	120
Anexo 2.3. Definición del objetivo de simulación <i>caudal masico</i> en la entrada del colector de admisión. (Simulación del colector de admisión).	121
Anexo 2.4. Definición de la condición de frontera inicial <i>caudal masico</i> en la entrada del colector de admisión. (Simulación del colector de escape).	121
Anexo 2.5. Definición de la condición de frontera final <i>presión total</i> en la salida del colector de escape. (Simulación del colector de escape).	122
Anexo 2.6. Definición del objetivo de simulación <i>caudal masico</i> en la salida del colector de escape. (Simulación del colector de escape).	122
Anexo 2.7. Configuración de mallado automático: malla nivel 4.	123
Anexo 3. Correr la simulación.	123
Anexo 3.1. Cuadro de diálogo para ejecutar la simulación. Equipo: Lenovo Intel Celeron CPU 1005M @1.90 GHz 1.90GHz.	123
Anexo 3.2. Parámetros del proceso de simulación.	124
Anexo 3.3. Gráfico de convergencia para la variable objetivo de simulación.	124
Anexo 4. Visualización de resultados.	125
Anexo 3.3. Visualización de mallado automático escala 4 en postproceso.	125
Anexo 3.3. Configuración de los gráficos de contorno para visualizar las características de los vórtices en el plano Tumble. Con $h = 4\text{ mm}$	126

Anexo 3.3. Configuración de los gráficos de contorno para visualizar las características de los vórtices en el plano Swirl. Con $h = 4 \text{ mm}$ 126

Anexo 3.4. Configuración de los gráficos de contorno para visualizar los campos de presión. Con $h = 4 \text{ mm}$ 127

Anexo 5. Reporte que arroja SWFS sobre la simulación. Para la apertura de válvula $h = 4 \text{ mm}$ 127

NOMENCLATURA

<i>1D</i>	Una dimensión	<i>h</i>	Apertura de válvula de admisión
<i>2D</i>	Dos dimensiones	<i>h_{esc}</i>	Apertura de válvula de escape
<i>3D</i>	Tres dimensiones	<i>I</i>	Intensidad
<i>4T</i>	Cuatro tiempos	<i>IVC</i>	Cierre de válvula de admisión
<i>ATDC</i>	Después del punto muerto superior	<i>IVO</i>	Apertura de válvula de admisión
<i>BMEP</i>	Presión media efectiva al freno	<i>K</i>	Energía cinética turbulenta
<i>C_d</i>	Coefficiente de perdida	<i>L</i>	Longitud
<i>CA</i>	Angulo de cigüeñal	<i>MAP</i>	Presión absoluta en el múltiple de admisión
<i>CFD</i>	Dinámica de fluidos computacional	<i>MCI</i>	Motores de combustion interna
<i>CAD</i>	Ingeniería asistida por computadora	<i>m_{ise}</i>	Flujo masico teórico
<i>CAE</i>	Diseño asistido por computadora	<i>m_{ise}</i>	Flujo masico real
<i>CO₂</i>	Dióxido de carbono	<i>P</i>	Presión
<i>D_e</i>	Diámetro externo	<i>P₀₁</i>	Presión aguas arriba
<i>D_i</i>	Diámetro interno	<i>P₂</i>	Presión aguas abajo
<i>d_m</i>	Diámetro de válvula	<i>P_{atm}</i>	Presión atmosférica
<i>d_v</i>	Diámetro de asiento	<i>PMI</i>	Punto muerto inferior
<i>ε</i>	Tasa de disipación	<i>PMS</i>	Punto muerto superior
<i>EVC</i>	Cierre de la válvula de escape	<i>Rpm</i>	Revoluciones por minuto
<i>EVO</i>	Apertura de la válvula de escape	<i>SWFS</i>	SolidWorks Flow Simulation
<i>FF</i>	Combustibles fosiles	<i>T</i>	Temperatura
<i>GEI</i>	Gases de efecto invernadero	<i>w</i>	Velocidad angular
<i>GLP</i>	Gas licuado de petróleo	<i>θ</i>	Posición angular

GLOSARIO

Create Lips: Opción que incorpora SWFS mediante la cual se pueden crear caras o superficies que permiten delimitar el volumen interno o volumen de control de piezas o ensambles huecos.

Flow Simulation: Herramienta CFD que incorpora el software CAD/CAE SolidWorks.

Goals: Sustantivo que se refiere al grupo de objetivos de simulación con los que cuenta SWFS y que pueden ser seleccionados para cualquier simulación.

Input Data: Opción incorporada en SWFS que permite configurar parámetros claves de una simulación CFD tales como dominio computacional, subdominio del fluido, condiciones de frontera, objetivos de simulación y mallado.

SolidWorks: Programa computacional de diseño mecánico 3D e ingeniería asistida por computadora que utiliza un entorno gráfico basado en Microsoft Windows el cual integra un gran número de funciones y herramientas avanzadas que facilitan el modelado de piezas, grandes ensamblajes, planos, entre otras funciones.

Squish: Fenómeno que se presenta al final de la carrera de compresión de un MCI en el momento que la culata y la cara del pistón se acercan entre sí, cuyo efecto genera un despliegue del fluido de trabajo en el eje circunferencial del cilindro.

Swirl: Manifestación que presenta el fluido de trabajo de un MCI al entrar al cilindro en la carrera de admisión, la cual genera remolinos con eje de rotación paralelo al eje del cilindro.

Tumble: Fenómeno presente en el momento que el pistón de un MCI alcanza el PMS generando con esto flujos secundarios alrededor del eje ortogonal del cilindro.

Wizard: Sustantivo que hace referencia al asistente de configuración que SWFS incorpora para definir la etapa de preproceso de cualquier simulación CFD.

RESUMEN

En esta monografía sobre el análisis de los MCI, se reportan los alcances que ofrece SWFS como herramienta CFD en el estudio de estas máquinas; primeramente, se realizó una revisión bibliográfica que permitió comprender el funcionamiento del ciclo de trabajo de los MCI, su clasificación, curvas características, variables dependientes e independientes, relevancia de algunos componentes mecánicos, fluido de trabajo, campos de velocidad del fluido de trabajo y los enfoques de simulación. Posteriormente, se establecieron flujos de trabajos específicos adaptados a SWFS que junto con un modelo CAD del conjunto principal de un MCI, tomado de la base de datos geométricas GrabCAD, permitieron representar, en función de los campos de presión y velocidad, la interacción entre el fluido de trabajo y las geometrías del MCI durante los procesos de admisión y escape en estado cuasi - estacionario.

PALABRAS CLAVE: Dinámica De Fluidos Computacional, SolidWorks Flow Simulation, Motores De Combustion Interna, Colector De Admisión, Colector de Escape, Simulación 3D.

1. INTRODUCCIÓN

Los MCI figuran como uno de los principales dispositivos usados desde hace mucho tiempo por la humanidad para la producción directa de energía mecánica, la cual, mayormente se usa en tracción y generación de electricidad. No obstante, a dicha producción se asocian altos porcentajes de emisiones contaminantes debido al uso tradicional de los FF en estas máquinas. Con lo anterior y debido a la presión por parte de muchas organizaciones que buscan reducir los efectos del cambio climático, ha centrado a los MCI como objeto de estudio a nivel global. Los métodos y enfoques con los cuales se ha incursionado en la investigación sobre los MCI han sido numerosos, y entre estos, resalta el análisis de las características del fluido de trabajo mediante técnicas de estudio como el CFD.

Un número importante de investigaciones han encontrado relación directa entre las características del fluido de trabajo, la formación de la mezcla aire – combustible, la combustión de dicha mezcla y las prestaciones del motor; es por esto que, mediante la implementación de técnicas que permitan representar el comportamiento de los MCI en un entorno computacional, ha sido posible estudiar y mejorar el rendimiento de los motores incorporando porciones de combustibles renovables en el funcionamiento normal de los MCI, logrando sustituir porcentajes mayores al 40% de los FF y mitigando de esta manera las emisiones de gases contaminantes.

En este trabajo, se presenta con abundante detalle todo lo relacionado al montaje y ejecución de una metodología de trabajo que permitió representar, en un entorno computacional, mediante la herramienta CFD SWFS, la interacción fluido-sólido presente en el funcionamiento normal de un MCI en términos de variables como velocidad y presión; y su posterior validación.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Simular la dinámica de fluidos y su interacción en el conjunto principal de un MCI por medio de la herramienta CFD que integra el software de diseño mecánico 3D SolidWorks.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar las variables independientes y dependientes en la simulación de la dinámica de fluidos presente en cada uno de los componentes del conjunto principal de un MCI por medio de una revisión bibliográfica de estudios a fines.
- Establecer el flujo de trabajo específico para cada componente del conjunto principal de un MCI adaptados a SolidWorks Flow Simulation donde se pueda representar la interacción solido-fluido.
- Implementar un modelo CAD 3D de cada uno de los componentes del conjunto principal de un MCI en la simulación de la dinámica de fluidos y su interacción con las geometrías de dichos componentes.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1. Definición del problema

Las emisiones de CO_2 provenientes del uso de los FF son la causa principal en el crecimiento acelerado del calentamiento global. Este tipo de combustibles se usan principalmente en procesos tales como generación de energía, sistemas de propulsión, transporte entre otras actividades (Davis & Caldeira, 2010). La *Federación Internacional del Automóvil* menciona que, aunque el sector transporte no es el principal emisor, un porcentaje cercano al 22% de las 30 Gt que representan las emisiones globales de CO_2 se le atribuye a este sector. De esta proporción, el subsector transporte terrestre debido al fuerte aumento del tráfico vehicular y dependencia casi en su totalidad de los FF es culpable del 73% de las emisiones, lo cual lo ubica en un papel importante en este sentido (FIA, 2015). Al considerar que solo en Colombia, a pesar de las restricciones impuestas por el gobierno debido al COVID-19, las matrículas de vehículos y motos incrementaron un 86,6% en marzo del 2021 al comparar las cifras con el mismo mes del año 2020 (ANDEMOS, 2021).

Los MCI, intrínsecos en el sector transporte, son uno de los principales dispositivos donde los FF son usados (García Mariaca et al., 2016). Un MCI es una maquina térmica que opera en un ciclo abierto, compuesta por un conjunto de componentes mecánicos que debido a su sincronización con el estado térmico de un fluido de trabajo generado en su interior mediante el proceso de combustión, transforma la energía química del combustible en energía mecánica y calor (Rovira & Muñoz, 2015). En dicho proceso, la eficiencia está bien optimizada con aproximadamente el 98% de la energía contenida en el combustible liberada en la combustión para motores diésel y del 95% al 98% en motores a gasolina; la energía interna del combustible que se aprovecha está en el orden del 40%, mientras que el 60% restante se refleja en pérdidas térmicas y gases de escape (Roberts et al., 2014). Bajo la presión de muchas organizaciones para mitigar los efectos del cambio climático, existe un auge sobre las investigaciones de métodos y tecnologías que permitan estimar y reducir los GEI (Fujii & Managi, 2015). Lo cual ha centrado a los MCI como objeto de estudio, principalmente se busca optimizar su funcionamiento, pero estudiar sus posibles aplicaciones con la incorporación de combustibles alternativos tales como H_2 entre otros, es una alternativa de sumo interés (Fernández & Duarte, 2013), considerando que la aplicación de los MCI se expande al campo de la generación de energía eléctrica y térmica (Arango et al., 2014)

Muchas investigaciones han encontrado una relación entre aspectos como las características del fluido de trabajo, la formación de mezcla aire – combustible, la combustión de dicha mezcla y las prestaciones del motor; razón por la cual, mediante múltiples técnicas de estudio, entre ellas el CFD, se han enfocado en estudiar la interacción fluidodinámica entre las geometrías de los MCI y el flujo de combustible debido al impacto directo que estos aspectos tienen en las prestaciones del motor (E. Henao et al., 2018). Tal fue el caso de (Jemni et al., 2018), que mediante una simulación CFD, estudiaron la dinámica del mezclado de dos configuraciones de suministro de H_2 para enriquecer gas licuado de petróleo y analizar su influencia en un MCI, logrando aumentar un 17,5% la potencia del motor con respecto al funcionamiento solo con el autogás.

Debido a lo anterior, desde la Universidad de La Guajira, específicamente, del programa de Ingeniería mecánica donde sus estudiantes interactúan con *SolidWorks*, software de diseño mecánico 3D que integra un gran número de funciones avanzadas que facilitan el modelado de piezas, grandes ensamblajes, planos, entre otras funciones y que además, posee una herramienta CFD llamada *Flow Simulation* que es capaz de representar la dinámica de fluidos en un entorno computacional (Gomez, 2014); nace la necesidad de descubrir el alcance e impacto que puede llegar a tener el uso del CFD mediante SWFS en el estudio de los MCI, enfocándose en la interacción fluido-sólido presente en el funcionamiento normal de estos equipos.

4. JUSTIFICACIÓN

4.1. Académica

En el plan académico del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad de La Guajira, se encuentran asignaturas como *Dibujo Mecánico I y II*, en las cuales los estudiantes adquieren conocimientos del uso de las herramientas del software *SolidWorks*; además de las licencias, la universidad cuenta con salas especialmente adaptadas donde los aprendices interactúan con el software. Sin embargo, ni en estas asignaturas y ninguna otra a lo largo del pensum, se dimensiona un propósito similar al que tiene el objetivo del presente trabajo.

4.2. Metodológica

Debido al propósito de este trabajo, el cual busca abordar el estudio de los MCI desde el enfoque del CFD con la implementación de SWFS. Los resultados que se puedan lograr considerando las implicaciones de dicho propósito, pueden contribuir sustancialmente a las bases de futuros trabajos que se propongan desde los grupos de investigación de la Universidad de La Guajira, debido a que no se cuenta con un trabajo con objetivos similares frente al estudio de los MCI con el uso de esta herramienta CFD en Uniguajira.

4.3. Social

Los estudiantes de ingeniería mecánica de la Universidad de la Guajira conocerán la importancia que puede generar la optimización de un MCI y descubrir el valor que tiene el software *SolidWorks* para el análisis computacional de este tipo de máquina, tema central de muchos países para mitigar el impacto ambiental generado por la quema de combustibles fósiles, teniendo en cuenta que un ingeniero mecánico debe conocer estos procesos que son primordiales en el área de la ingeniería, el estudiante puede aportar conocimientos y apoyar las líneas de investigación propuestas por el grupo de investigación en Desarrollo de Estudios y Tecnologías Ambientales del Carbono (DESTACAR) y así poder enfrentar la problemática de la contaminación ambiental a causa de la utilización de combustibles fósiles en MCI.

4.4. Ambiental

La utilización indiscriminada de combustibles fósiles ha traído consigo daños de gran impacto en la sociedad, hoy en día se puede ver y sentir los efectos del

aumento de la contaminación ambiental, la generación de CO₂, los fenómenos naturales y el cambio climático entre otros aspectos repercutidos por la utilización necesaria de este tipo de combustible. Esta monografía busca formar conocimientos en el estudiante de ingeniería mecánica para la búsqueda de nuevas rutas que puedan subsanar el daño generado por el manejo de combustible fósil, y una ruta para ello es implementar nuevas tecnologías que puedan mejorar esta problemática.

5. MARCO TEÓRICO

A continuación, se describen conceptos relacionados con los MCI, su funcionamiento, ciclo de trabajo, componentes y subcomponentes, fluido de trabajo, diagramas que describen su funcionamiento en función de parámetros de operación y variables claves; se toca también las bases numéricas integradas en la herramienta CFD que se usara en este trabajo, sus alcances y limitaciones entre otros aspectos relevantes.

5.1. Antecedentes de investigación

ANTECEDENTES INTERNACIONALES

<i>Referencia</i>	<i>Objetivo de investigación</i>	<i>Materiales y método</i>	<i>Resultados</i>
(Tian & Abraham, 2014)	Informar el desarrollo de un modelo CFD en 2D del ciclo de trabajo completo de un MCI 4T SI en base a la geometría y tutorial de la simulación en frío (cold flow simulation) del mismo motor, se compara la combustión de Heptano (C_7H_{16}) con la simulación del flujo de aire sin combustión del motor.	Usaron el software ANSYS Fluent 14.0 para simular el ciclo de trabajo del motor dado en dos rotaciones del cigüeñal ($\pm 720^\circ$), refinaron las condiciones de frontera e iniciales de la guía, la trayectoria del fluido de trabajo fue interconectada por una malla dinámica para todo el ciclo, el modelo estándar K- ϵ fue usado para manejar la turbulencia en el cilindro y se utilizó un modelo de película de pared en las cercanías de la válvula de admisión.	Obtuvieron graficas de presión y temperatura con respecto al ángulo del cigüeñal de todo el ciclo del motor, se evidenció que ambas simulaciones proporcionan información detallada del campo de fluido interno, lo que facilite la comprensión de los efectos combinados de reacciones químicas, transporte de partículas, patrones de flujo y distribución de temperatura de los MCI.
(Schiffmann et al., 2016)	Presentar el proceso de	Se uso el software GT-Power para	Ambas simulaciones

	<p>caracterización de los campos de flujo al interior del sistema: colector admisión, cámara combustión y colector escape; de un MCI 4T óptico que funciona a 800 RPM, 1300 RPM y distintas MAP ubicado en los laboratorios de la Universidad de Michigan, USA. mediante las simulaciones CFD en 1D y LES (Large-Eddy Simulation).</p>	<p>configurar el modelo 1D del motor TCC – III óptico con técnica de cold flow simulation; las simulaciones LES se ejecutaron en el software CONVERGE, se tuvieron en cuenta 20 ciclos del motor para cada condición de funcionamiento; se utilizó PIV (Particle image velocimetry) con pasos de 5° AC para la evaluación de las fortalezas y debilidades de ambos enfoques de simulación.</p>	<p>tienden a predecir los campos de flujo del sistema en términos del flujo medio y de los campos de velocidad RMS (Root Mean Square) resaltando que la técnica LES presento mejores resultados para las carreras de admisión y compresión; se facilita el acceso a información detallada para futuros estudios CFD: https://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/108382</p>
<p>(Jemni et al., 2018)</p>	<p>Describir el proceso de aplicación del CFD en 3D para determinar los efectos de la ubicación de inyectores de H_2 y el enriquecimiento de H_2 en las características de flujo al interior del cilindro de un MCI 4T de SI que normalmente usa GLP durante el proceso de admisión a 2500 rpm sin efectos de combustión</p>	<p>SolidWorks para construir la geometría y SWFS para estudiar las configuraciones de suministro planteadas en condiciones de motor cuasi-estables e inestables; se analiza el cilindro N°1; se analizó la velocidad, estructura turbulenta y difusión de H_2 en la mezcla; ecuaciones de Navier-Stokes promediadas para predecir el flujo en la entrada y $(K - \epsilon)$ con un 3% de flujo medio, la velocidad del pistón</p>	<p>Se mejoró el rendimiento del motor con la adición del H_2 al GLP, se obtuvieron graficas de temperatura con respecto a la velocidad del motor para ambos enfoques con un error máximo ($< 1\%$), la técnica de inyección de GLP - H_2 por separado aumenta la velocidad de flujo en el cilindro y mejora la difusión de H_2.</p>

	y su posterior validación experimental con combustión.	como límite de salida, se usó un banco de pruebas con el motor Clio2 de 1,2 L para validar y diferentes mezclas de GLP - H_2 .	
(Scaggion, 2018)	Trabajo de investigación que mediante simulaciones CFD tanto estáticas (sin pistón y con varias aperturas de válvula) como dinámicas (incluyen movimiento del pistón y de las válvulas de admisión y escape) presenta el análisis del paso del fluido por la válvula y de la fase de llenado del cilindro durante el ciclo de funcionamiento del motor 4T CBR 600 RR usado en la formula SAE, esto con el fin de encontrar puntos débiles y proponer mejoras que se reflejen en el rendimiento de dicho motor.	Partiendo de un modelo CAD recreado en SolidWorks y condiciones de contornos de un trabajo anterior; mediante ANSYS Fluent para los análisis estáticos se impuso una diferencia de presión constante entre entrada (ducto admisión) y salida (cabeza pistón) que oblige a pasar el flujo a través de las diferentes aperturas de la válvula considerando como variables dependientes el caudal masico y coeficiente de perdida; en cuanto a los análisis dinámicos se creó una malla dinámica para simular el movimiento del pistón y las válvulas durante el ciclo de operación del motor.	Los resultados de los análisis estáticos destacaron la excelente relación entre el conjunto ducto-válvula admisión gracias a los valores muy elevados para el coeficiente de perdida, además la apertura máxima de válvula se fijó en 7.5mm ya que para aperturas superiores dicho coeficiente permanece casi constante; los análisis dinámicos mostraron la existencia de reflujos del fluido, con base en esto, se implementó una ley de elevación de válvula que reduce dichos reflujos mejorando así el coeficiente de llenado del motor.
(Giglio & di Gaeta, 2020)	Presentar un nuevo modelo predictivo de combustión basado en la	Se configuro un modelo 1D del motor en el software GT-Power, los ciclos de	El modelo predice de forma satisfactoria el comportamiento de

<p>función de Wiebe y la comparación de sus capacidades predictivas frente a un modelo de combustión turbulenta más alto por medio de la simulación fluido dinámica 1D del ciclo de trabajo de un MCI SI de 1,6 L con 4 cilindros de aspiración normal en las condiciones de funcionamiento que van de 1500 a 4000 rpm y presiones en el colector admisión de 550 a 1000 mbar.</p>	<p>presión del motor se procesaron en sentido contrario para obtener la fracción de masa quemada y los parámetros se correlacionaron con las principales variables de funcionamiento al inicio de combustión, se configuro y valido el modelo en las mismas condiciones de base de datos experimental, se compararon los modelos en función de BMEP, consumo de combustible específico del freno y emisiones de Monóxido de carbono.</p>	<p>la combustion turbulenta porque se reproduce BMEP en todo el rango explorado con una diferencia porcentual de 10,4% a 2500 rpm, se comprobó la precisión del modelo 1D frente a los sistemas admisión/escape al comparar los perfiles de presión experimentales y simulados por medio de gráficas.</p>
--	--	---

ANTECEDENTES NACIONALES

Referencia	Objetivo de investigación	Materiales y método	Resultados
(Olarte S. & Rios Q., 2011)	<p>Presentar el desarrollo de una herramienta computacional mediante el uso de métodos numéricos la cual puede modelar el comportamiento del ciclo de gases en función del modelo de entrega finita de calor de un MCI SI esto con el fin de proporcionar a los estudiantes de la</p>	<p>Se usó el método numérico <i>Runge-Kutta</i> de cuarto orden para solucionar el modelo diferencial que simula la adición de calor en el ciclo de potencia provocada por la combustión, de lo anterior y con la revisión bibliográfica se diseñó y escribió el algoritmo en el software MATLAB, se construyó una interfaz gráfica y se obtuvo la</p>	<p>La herramienta logro describir el comportamiento del motor, los diagramas que esta arroja demuestran que el modelo de entrega finita de calor se aproxima al del ciclo de gas ideal, la interfaz facilita el trabajo del programador y la comprensión de la influencia de los parámetros</p>

	<p>facultad de ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana un objetivo nuevo de aprendizaje.</p>	<p>herramienta computacional MATISSE 1.0, se ingresaron parámetros geométricos del motor y características descriptivas del proceso de combustión, se validó con una aplicación similar.</p>	<p>operativos sobre el comportamiento del ciclo de gases y sobre el motor en sí; se elaboró el manual del usuario.</p>
<p>(Torres M et al., 2018)</p>	<p>Reportar el montaje experimental de un MCI mono cilíndrico que funciona con diésel en condiciones normales de operación y diferentes velocidades (1500, 2000 y 2500 rpm); para capturar señales de interés con el fin de estudiarlas y diagnosticar el estado del motor.</p>	<p>Se instrumenta el motor CHANGFA 186 F con los sensores experimentales, se transmitieron los datos a un computador mediante tarjetas y un módulo de adquisición cada 5s, se procesan los datos por medio de algoritmos desarrollados en el software MATLAB con base en la transformada rápida de Fourier y Regresión Rígida, se identifican los ciclos de combustión para cada prueba.</p>	<p>Se diagnosticó el estado del motor a partir de las señales con una precisión de ($\approx 98\%$), se comparó la curva reconstruida con la señal de presión objetivo obtenida por el sensor de presión y se validó el caso, se identificó la presión en los cilindros como uno de los parámetros más relevantes en el monitorio de condiciones de MCI y se determinaron parámetros de funcionamiento.</p>
<p>(Marín A. & Toro L., 2018)</p>	<p>Caracterizar las curvas de presión, potencia, par y consumo de combustible del ciclo de con combustión de un MCI SI mono cilíndrico a gasolina para dos puntos de</p>	<p>Se hizo un análisis de varianza para el diseño de experimento con el software estadístico IBM SPSS; se manipularon las variables de interés para la adquisición de las señales del motor que se hicieron por</p>	<p>Se demostró que los dos factores estudiados influyen significativamente sobre la variable de respuesta, con las señales de presión y velocidad se construyeron graficas de presión</p>

carga (0,5 y 1,5 A) y velocidades en el intervalo de 1200 a 3500 rpm por medio de señales adquiridas a partir de un montaje experimental del motor.	medio de un código ejecutado en el software LabVIEW durante 10s y se procesaron por medio de MATLAB; se hicieron pruebas con combustión y de arrastre sin combustión para medir presión en cámara, fuerza en celda de carga, posición angular cigüeñal y consumo combustible.	vs velocidad estándar que describen el comportamiento del ciclo completo del motor; el motor presento mayor potencia a mayor velocidad de rotación de cigüeñal y mayor carga.
---	---	---

Tabla 5.1. Antecedentes de investigación nacionales e internacionales.

Con base a la revisión bibliográfica, es posible concluir que, a nivel nacional, las instituciones consultadas, aunque tienen trabajos donde se analizan los MCI, no han contemplado el potencial que puede albergar la herramienta SWFS frente al estudio de los MCI mediante la técnica computacional CFD, ya que no fue posible encontrar un trabajo con el uso de SolidWorks y su herramienta CFD SWFS.

5.2. Motor de combustión interna (MCI)

Un MCI, visto desde la termodinámica se puede definir como un conjunto de elementos mecánicos, que permiten obtener energía mecánica partiendo del estado térmico de un combustible obtenido en el proceso de combustión tradicional o por reacción nuclear (Callejón et al., 2020). Dicho estado térmico inicia con la interacción entre una fuente de calor provocada al interior del motor y el propio fluido de trabajo (mezcla aire-combustible), razón por la cual se denominan motores de combustión interna. Un MCI se podría clasificar como adiabático, pero por razones de índole mecánica este carácter se pierde, de igual forma, la interacción entre el fluido de trabajo que evoluciona y el medio ambiente se realiza a través de la temperatura, el flujo del fluido de trabajo también sufre pérdidas antes de su alteración química al intervenir en la combustión y generación de calor que, posteriormente se convierte en un flujo de trabajo, ver **Figura 5.1.**, el cual puede ser usado en tracción o generación de electricidad.

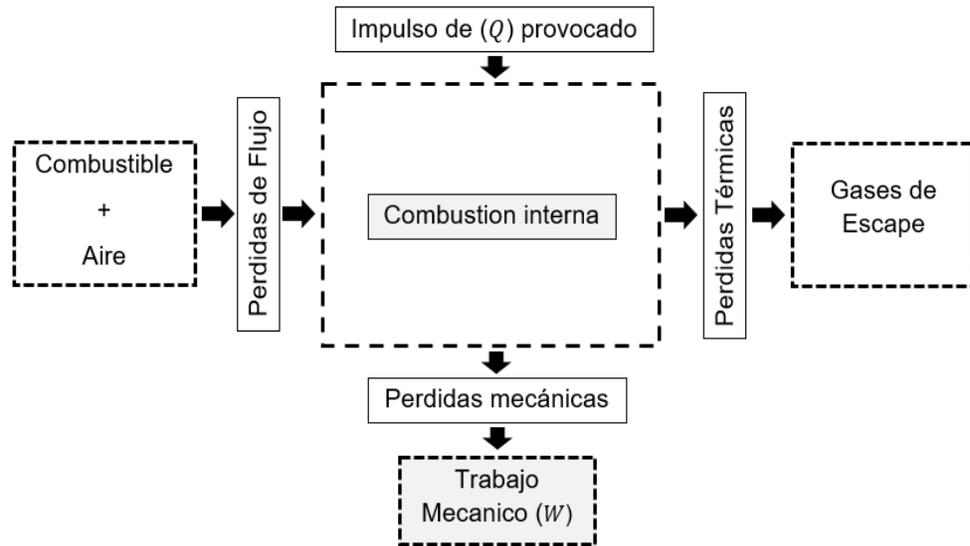


Figura 5.1. Esquema básico de las pérdidas y funcionamiento de un MCI. Adaptado del trabajo de (Callejón et al., 2020).

5.3. Clasificación

Según (Rovira & Muñoz, 2015) los MCI se pueden clasificar según el proceso de combustión, la forma en como realizan el ciclo de trabajo, el tipo de refrigeración, la presión de admisión, por el número y disposición de cilindros. En la **Figura 5.2.** se evidencia dicha clasificación con más detalle.

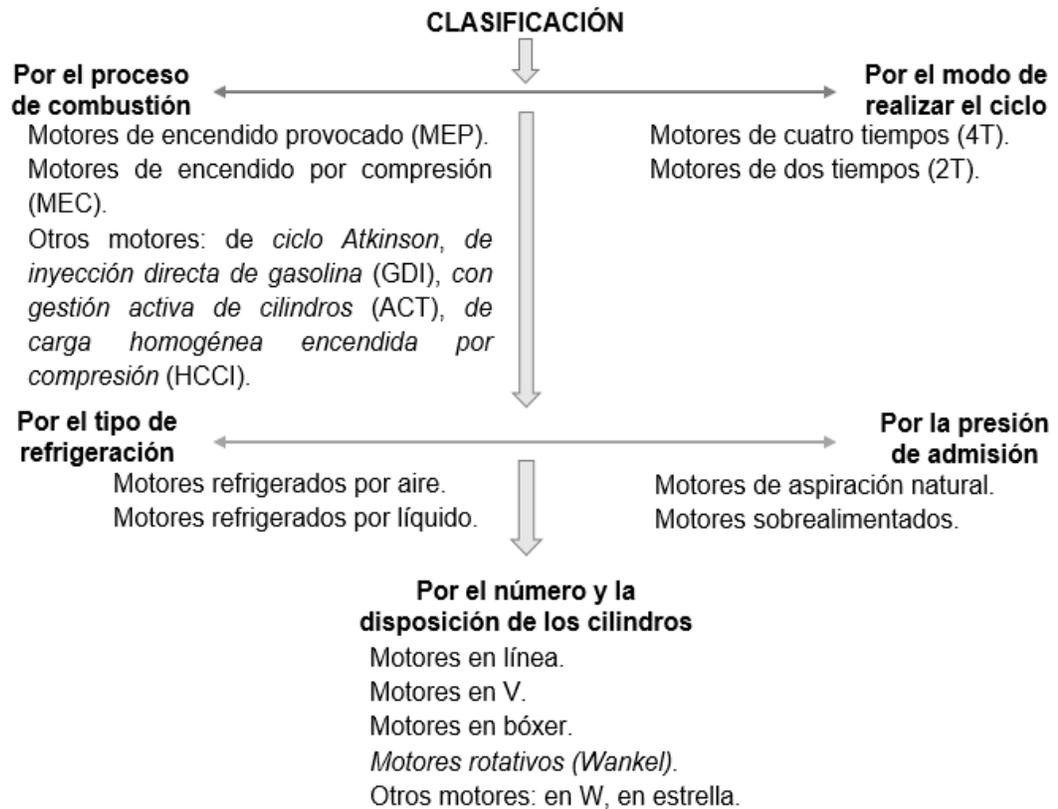


Figura 5.2. Clasificación de los MCI según el proceso de combustión, modo de realizar el ciclo, tipo de refrigeración, presión en la admisión, número y disposición de cilindros. Adaptado del trabajo de (Rovira & Muñoz, 2015).

En la clasificación según el proceso de combustión, se incluyó el tipo de motores de *ciclo Atkinson* (É. Henao et al., 2018) y el significado de las siglas GDI, ACT y HCCI; las cuales se refieren a *motores de inyección directa de gasolina* (Llanes & Leguísamo, 2018), *motores con gestión activa de cilindros* (Liu et al., 2021) y *motores de carga homogénea encendida por compresión* (Prince et al., 2018), respectivamente. De igual forma, en la clasificación de acuerdo al número y disposición de cilindros se incorporó el tipo de *motores rotativos Wankel* (Noguera, 2012).

5.4. Ciclo de trabajo

Al interior de un MCI el fluido de trabajo experimenta una serie de procesos complejos, en el trabajo de (Payri & Desantes, 2015) describen el ciclo de trabajo de un MCI y resaltan que se debe tener en cuenta que el flujo es reactivo, no estacionario y turbulento y que, además, en los distintos

procesos se intercambia trabajo, calor y masa con el entorno. De este modo, el motor se comporta de forma alternativa como un sistema abierto, donde se intercambia masa con el exterior. También mencionan que, debido a la compresibilidad del aire y a que la combustión no puede producirse a volumen constante, los procesos ilustrados en la **Figura 5.3.** no coinciden con el PMS y el PMI, sino que se producen con adelantos y retrasos respecto a estos puntos.

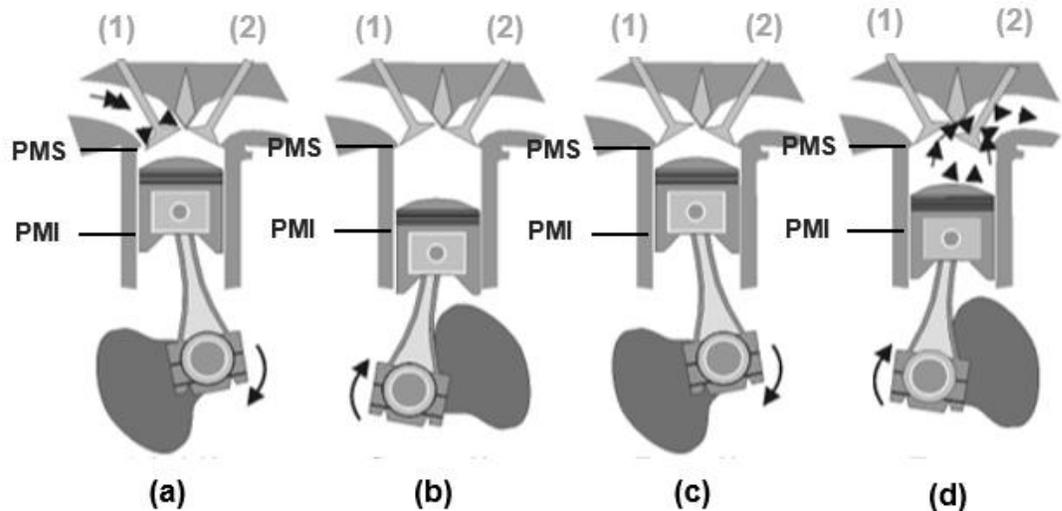


Figura 5.3. Ciclo de trabajo de un MCI 4T: a) admisión, b) compresión, c) carrera de potencia, d) escape. Adaptado del trabajo de (Payri & Desantes, 2015).

5.4.1. Admisión

La 1ª carrera inicia con la apertura de la válvula de admisión **(1)** mientras que la de escape **(2)** permanece cerrada. El pistón parte del PMS hasta el PMI, lo cual permite la entrada del fluido de trabajo a través del ducto de admisión por inducción debido a la diferencia de presión entre el entorno y la cámara de combustión. Estos gases de forma general son: aire o una mezcla de aire-combustible, dependiendo del motor. Una vez el embolo se desplaza hasta el PMI la válvula de admisión se cierra e inicia la siguiente carrera.

5.4.2. Compresión

En la 2ª carrera, las válvulas de admisión y escape se encuentran cerradas, mientras el embolo sigue su recorrido partiendo del PMI hasta el PMS cuya

acción comprime el fluido contenido en la cámara de combustión. En las cercanías del PMS se produce una chispa eléctrica para motores cuyo encendido es provocado o se inyecta el combustible para motores de encendido por compresión.

5.4.3. Carrera de potencia

Dentro de los efectos generados por la 3^a carrera, se encuentra la combustión, proceso que involucra reacciones químicas muy exotérmicas mediante las cuales se genera el estado térmico del fluido de trabajo (altas presiones y temperatura); debido al aumento de la presión de los gases contenidos en el cilindro, el pistón se desplaza desde el PMS hasta el PMI, siendo esta la acción responsable de la producción del trabajo mecánico.

5.4.4. Escape

En la 4^a carrera, la válvula de escape comienza a abrirse en el PMI mientras que el embolo se desplaza hasta el PMS expulsando los gases quemados hacia el ducto del múltiple de escape. Una vez el embolo llega al PMS se cierra la válvula de escape e inicia nuevamente el ciclo de los diferentes procesos.

5.5. Escalas de tiempo

El ciclo de trabajo de un MCI es un fenómeno naturalmente transitorio que incluye diversas escalas de tiempo, entre estas se cuentan los momentos donde ocurre la chispa, ignición, propagación de llama, traslape valvular entre otras; al momento de llevar el ciclo de trabajo de un MCI a una simulación computacional se debe tener en cuenta que esta se relaciona con los grados de giro del cigüeñal, por lo que fijar un paso o escala de tiempo adaptativo que sea capaz de replicar los procesos y subprocesos del ciclo de trabajo es un aspecto fundamental en la simulación de motores (Mora & Mantilla, 2017). En la imagen de la **Figura 5.4.** se muestran los perfiles del traslape de las válvulas de admisión y escape medidos experimentalmente y ajustados al paso temporal, dicho paso no es más que la medida en grados desde la punta de la leva de admisión hasta que la válvula de escape inicia su apertura, el cual se estableció de $0.25^\circ CA$ para la simulación de la combustión de un motor HCCI y sus emisiones realizadas por (Heredia Quintana, 2020).

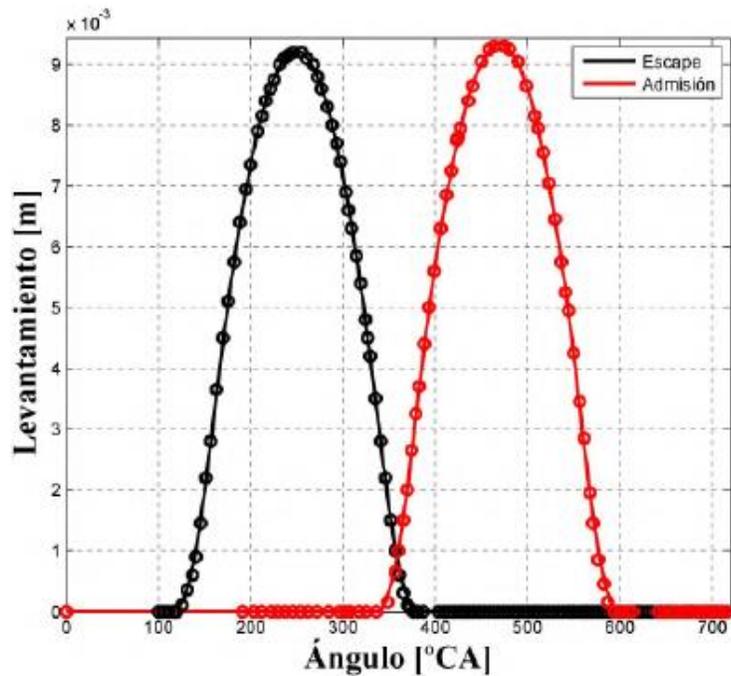


Figura 5.4. Perfiles de traslape valvular para el ciclo de trabajo de un motor HCCI dado en 720° del cigüeñal (Puntos: valores medidos, Líneas: valores ajustados a la simulación).

5.6. Curvas características de los MCI

Una forma de conocer el cómo se comportan los MCI es por medio del análisis de las curvas características de estas máquinas, las cuales brindan información gráfica del comportamiento de algunos parámetros relevantes en el funcionamiento de estas máquinas con base en las condiciones de operación y además sirven para el mantenimiento basado en las condiciones (Marín A. & Toro L., 2018). Entre las variables más representativas para la construcción de estas curvas y las de interés en esta monografía se encuentran: presión en el cilindro, volumen del cilindro, velocidad del ciclo de trabajo, temperatura del ciclo de trabajo y ángulo de giro del cigüeñal; cabe mencionar que un ciclo de trabajo en un MCI 4T se completa con dos rotaciones del cigüeñal o lo que es lo mismo, 720° de giro (Tian & Abraham, 2014) lo cual se corroborará a continuación, teniendo presente lo anterior, las curvas se describen a continuación.

5.6.1. Diagrama Indicado

El diagrama indicado o presión – volumen ($P - V$), ilustra el comportamiento de la presión media indicada con respecto a la variación de volumen al interior del cilindro (Cengel & Boles, 2005) ver **Figura 5.5**.

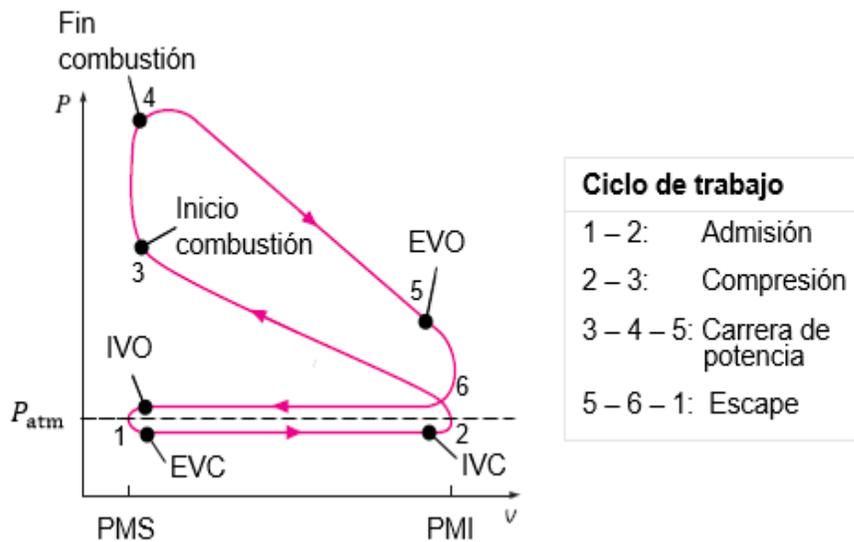


Figura 5.5. Diagrama ($P - V$) ciclo de trabajo de un MCI con puntos de interés EVO, IVO, EVC e IVC más caracterización del ciclo de trabajo. Adaptado del trabajo de (Cengel & Boles, 2005) y (Heywood, 1988).

5.6.2. Diagrama Amplitud de presión – Tiempo del ciclo

En el trabajo de (Marín A. & Toro L., 2018) se encuentran los diagramas de la **Figura 5.6.**, **Figura 5.7.**, **Figura 5.8.** y **Figura 5.9.**

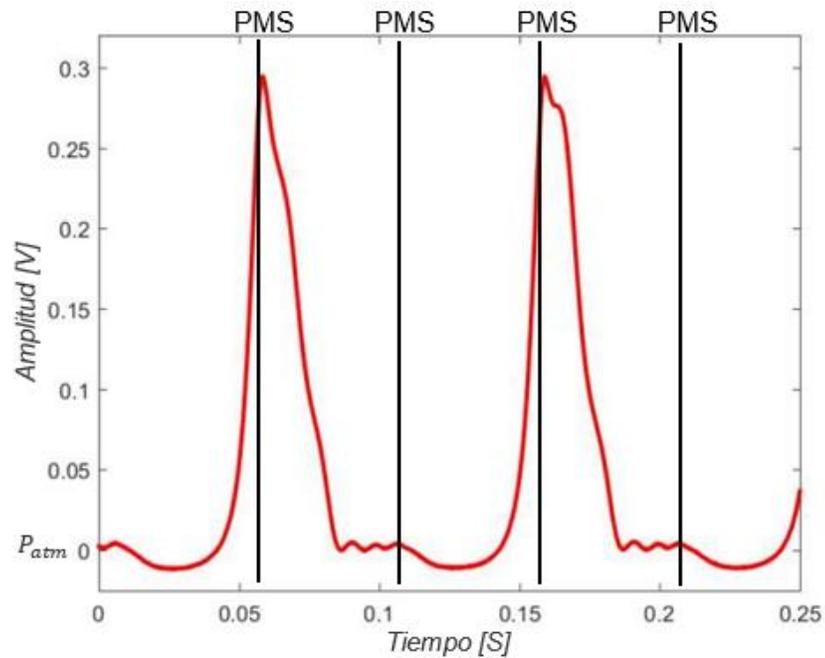


Figura 5.6. Diagrama Amplitud de presión relativa – Tiempo del ciclo termodinámico con ubicación exacta del PMS. Adaptado del trabajo de (Marín A. & Toro L., 2018).

El diagrama de la figura anterior muestra la amplitud de la presión relativa al interior de la cámara de combustión con una magnitud de referencia igual a 86 kPa para la presión atmosférica en función del tiempo necesario para completar un ciclo termodinámico; esta grafica fue creada con base en señales de presión relativa en la cámara de combustión y la velocidad de rotación captadas por sensores que también permitieron caracterizar el momento exacto cuando el embolo llega al PMS (*líneas negras verticales, señal captada por el sensor de velocidad de rotación*) en un experimento sobre un MCI que funcionaba en el intervalo de 1200 a 3500 rpm.

5.6.3. Diagrama Par y Potencia – Régimen de giro

La curva de *Par – Régimen de giro* se caracteriza por estar dividida por la zona flexible y no flexible, **Figura 5.7.** ambas partes limitadas por los rpm que puede ofrecer el motor en el máximo par, es decir, en el momento de la ignición del combustible.

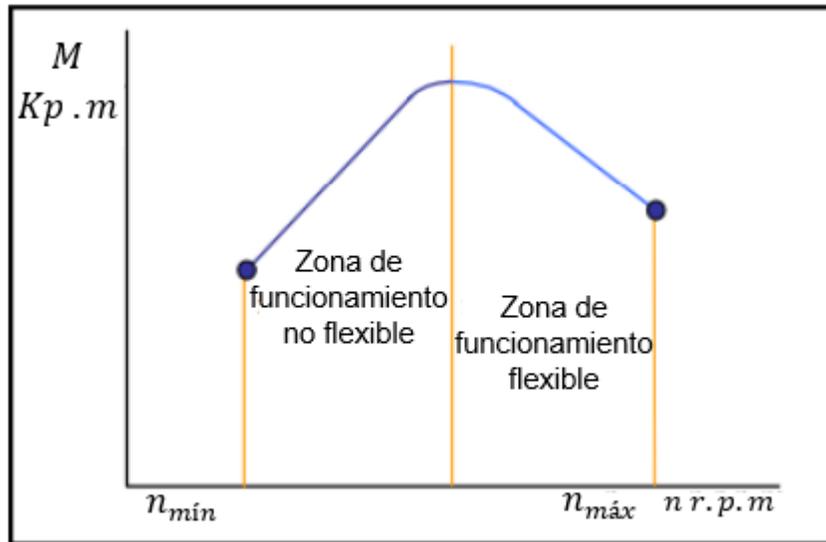


Figura 5.7. Diagrama de Par – Régimen de giro con unidades de Par $M = \text{Kilopondio por metro}$.

El par es una variable que depende de la potencia que se puede generar en la cámara de combustión y del número de rpm a las que gira el motor en un momento determinado, la magnitud de esta variable es positiva durante el proceso de expansión de los gases y negativa el resto del tiempo durante cada dos vueltas del cigüeñal. En MCI el concepto de potencia indica la cantidad de trabajo que el motor puede realizar en una unidad de tiempo, en la **Figura 5.8.** se puede ver que la potencia al freno es proporcional al régimen de giro, lo cual solo ocurre a la velocidad nominal de la máquina pero que por seguridad del motor el regulador disminuye la entrada de combustible y entonces, a partir de dicho régimen la potencia disminuye hasta llegar a un valor que resulta bajo para un alto régimen de giro.

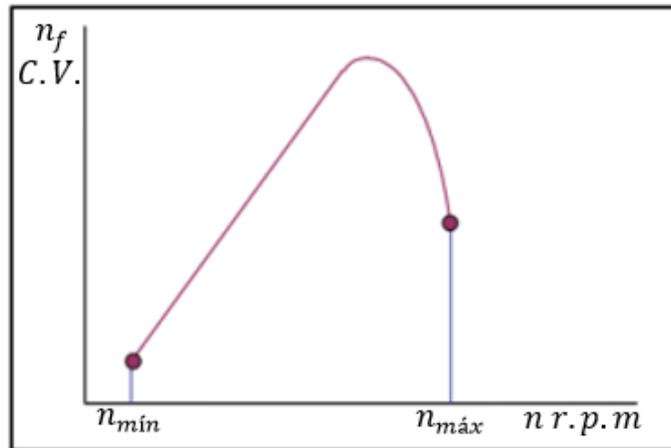


Figura 5.8. Diagrama de Potencia – Régimen de giro

Si se observa el diagrama de Par y Potencia – Régimen de giro **Figura 5.9.** se puede ver que la potencia máxima no se da con el par máximo del motor, en muchos motores, esta se da en aproximadamente el 70% de la velocidad nominal.

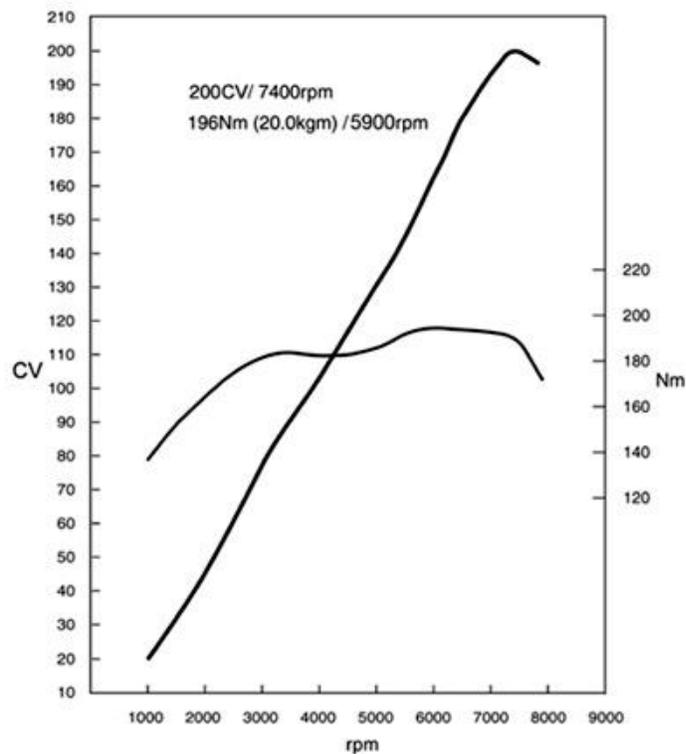


Figura 5.9. Diagrama Par y Potencia – Régimen de giro. Tomado del trabajo de (Marín A. & Toro L., 2018).

5.6.4. Diagrama Presión – Ángulo del cigüeñal

En el trabajo realizado por (Giglio & di Gaeta, 2020), el cual resalta la precisión de los resultados que se obtuvieron frente a las carreras de admisión y escape, **Figura 5.10.** se muestra cómo se comporta la presión al interior del cilindro en función de la posición del ángulo de giro del cigüeñal, se puede apreciar que el ciclo de trabajo requiere de 720° de giro para completarse, tal como se mencionó al inicio de este apartado.

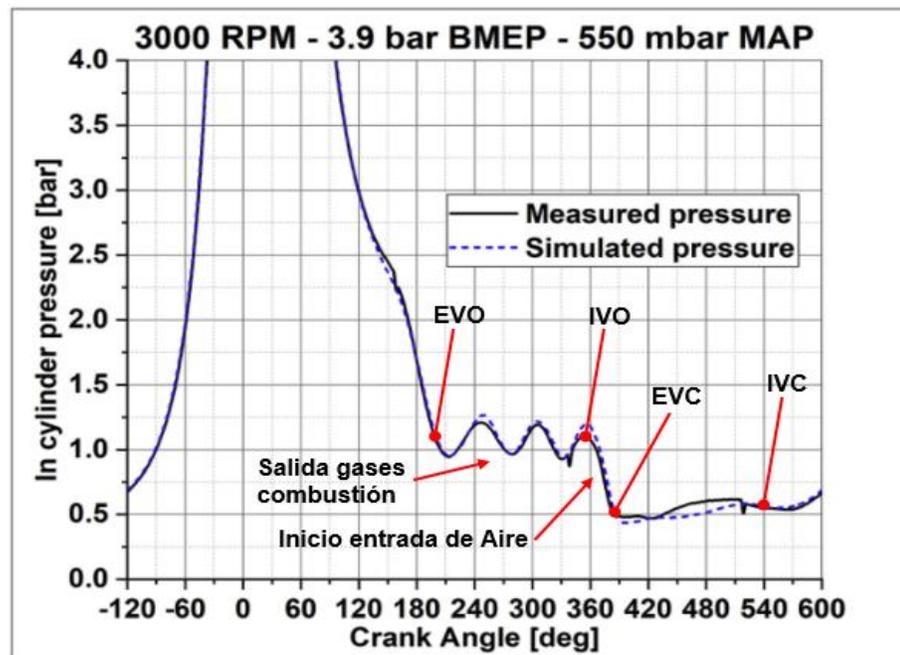


Figura 5.10. Diagrama Presión – Ángulo del cigüeñal con zona de salida de gases de combustión y zona de entrada aire con respecto a los puntos de interés EVO, IVO, EVE e IVC. Adaptado del trabajo de (Giglio & di Gaeta, 2020).

En esta gráfica, se comparan los perfiles de presión simulados y experimentales de un MCI en condiciones especificadas, con esta gráfica y haciendo énfasis en las carreras antes mencionadas se puede caracterizar un ciclo de trabajo más preciso, si se tiene en cuenta que, cada proceso se da en 180° aproximadamente, por lo que se puede ver con claridad la salida de los gases de combustión entre los 180° y 360° pasado el punto EVO, seguida de la depresión requerida para que inicie el ingreso del fluido de trabajo a la cámara desde los 360° a los 420° entre los puntos IVO y EVC, seguida de las carreras de compresión y potencia en el rango 540°-0°-180° respectivamente.

5.6.5. Diagrama Temperatura – Ángulo del cigüeñal

Estos perfiles de temperatura fueron construidos en el trabajo de (Tian & Abraham, 2014) la gráfica de la **Figura 5.11.** corresponde a los perfiles de temperatura de un MCI en función del ángulo de giro del cigüeñal, como se puede observar se tienen dos perfiles, uno con el enfoque de simulación del ciclo de trabajo con combustión (línea roja sobre negra) y el otro sin combustión (línea negra), tema relevante para esta monografía el cual se abordará más adelante.

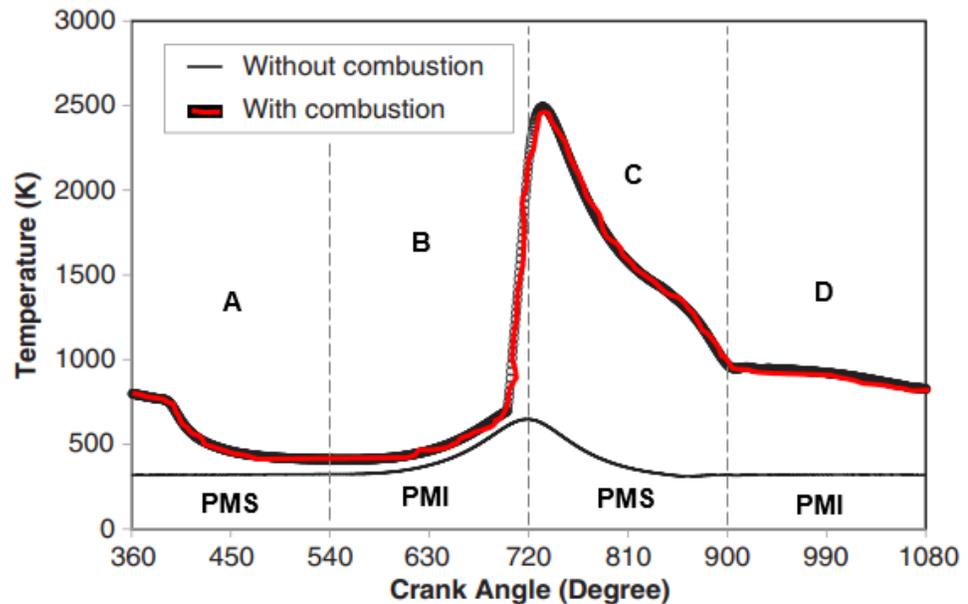


Figura 5.11. Diagrama Temperatura – Ángulo del cigüeñal con ciclo de trabajo A.) admisión, B.) compresión, C.) Carrera potencia y D.) escape, más la ubicación de los PMS y PMI.

Esta grafica permite conocer el comportamiento de la temperatura en cada proceso del ciclo de trabajo dado en 720° de giro del cigüeñal con cada enfoque de simulación y tener noción de la ubicación del pistón con respecto a los PMS y PMI.

5.7. Componentes mecánicos relevantes en el ciclo de trabajo

Para que los MCI puedan obtener trabajo útil en un eje con base en la energía liberada durante el proceso de combustión de un fluido motor al

interior de estos, requieren de una serie de elementos mecánicos que combinados entre si permiten la obtención de dicho trabajo. Algunos de estos elementos se ligan, de forma íntima, factores como el rendimiento volumétrico (n_v), que es la relación entre la masa de aire que entra al cilindro durante el proceso de admisión y la que podría haber, respecto al volumen de esta cavidad y la presión atmosférica; así mismo, se liga el proceso de renovación de la carga para un nuevo ciclo de producción, a continuación, con base en conceptos expuestos en el trabajo de (Carreras et al., 2005) se definen algunos componentes y subcomponentes de interés en esta monografía ilustrados en la **Figura 5.12**.

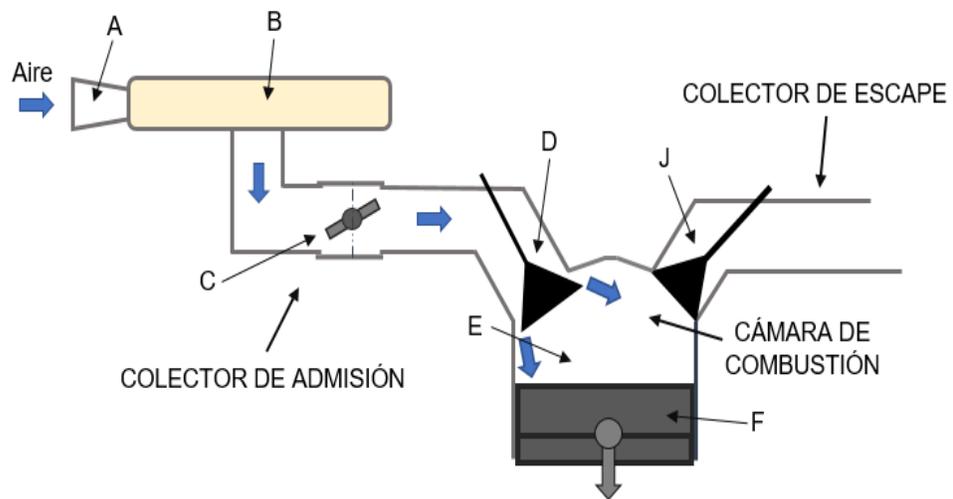


Figura 5.12. Configuración de componentes principales y subcomponentes de interés A. Toma de admisión, B. Filtro de aire, C. Válvula reguladora de carga (tipo mariposa), D. Válvulas de admisión, E. Cilindro, F. Pistón, J. Válvulas de escape. Adaptado de (Carreras et al., 2005).

5.7.1. Colector de admisión

Este es uno de los componentes más determinantes en el rendimiento volumétrico de un MCI, está conformado por un ducto (motores monocilindro) o configuración de ductos (motores multi-cilindros) que permiten la mezcla y entrada del fluido motor a la cámara o cámaras de combustión debido a la depresión que se genera cuando el embolo se traslada del PMS al PMI. Estos ductos se fabricaban en fundición de aluminio, hoy día se usan plásticos especiales en su fabricación, tales como poliamidas, material capaz de soportar las vibraciones, choques y otras exigencias a las que se

somete este componente mecánico, el cual debe garantizar el mayor flujo posible de fluido motor hacia la cámara de combustión (*cuanto mejor el llenado, mayores las prestaciones del motor*), debe mantener la mezcla homogénea y estable, lo que requiere que la alimentación y distribución de la mezcla sea igual en todos los cilindros.

A este componente mecánico se liga el fenómeno de resonancia de ondas de presión al interior del mismo, es un fenómeno fluido-dinámico de gran importancia que depende del tamaño y longitud de sus conductos, cuando este fenómeno es utilizado correctamente el colector recibe el nombre de colector sincronizado.

5.7.1.1. Filtro de aire

El filtro de aire se encuentra ubicado después de la toma de admisión, su función principal es retener las partículas contaminantes que puedan acceder al sistema de admisión y perjudicar la salud del proceso, razón por la cual se ubica al inicio de dicho sistema, este filtrado debe garantizar la mínima pérdida de carga porque está relacionado con el rendimiento volumétrico del motor. Normalmente estos filtros se constituyen por una lámina de papel grueso plegada, una lámina metálica perforada y la geometría puede variar en función del modelo de motor.

5.7.1.2. Válvula reguladora de la carga

Esta válvula se encarga de controlar la cantidad de fluido que aspira el motor por lo que supone una pérdida puntual en el fluido de trabajo seguida de una menor densidad de este en el recinto del motor al final del proceso de admisión **Figura 5.17.**, del buen funcionamiento de esta válvula depende en gran medida la respuesta tanto a media como a plena carga. Existen muchos tipos y modelos de válvulas reguladoras de carga, pero una de las más usadas es la válvula de mariposa la cual está conformada por una lámina de forma cilíndrica (mariposa) ubicada sobre un eje que la atraviesa de forma perpendicular y al centro el conducto de admisión; otro tipo son las de guillotina y diafragma cuyo principio es el mismo, cabe resaltar que este tipo de elemento se asocia a los MEP.

5.7.1.3. Válvulas de admisión

La función de este elemento es permitir la entrada del fluido de trabajo proveniente del ducto de admisión al interior del cilindro, las temperaturas

de trabajo a las que esta válvula se somete son menores que las de la válvula de escape por lo tanto, son fabricadas al Cromo – Silicio, Cromo – Níquel o al Acero al Carbono materiales que dotan a este elemento de una mayor resistencia a la fatiga; también cuentan con un mayor diámetro de cabeza, menor diámetro de tallo y menor longitud de guía que la de escape.

5.7.2. Colector de escape

Este colector, al igual que el de admisión; en conjunto con todo el sistema de escape, que además de minimizar las pérdidas de carga a lo largo del recorrido, conseguir niveles de contaminación y ruido, acordes con normas vigentes, debe apuntar a mejorar el rendimiento volumétrico del MCI facilitando la evacuación de los gases que resultan de la combustión y mejorando el proceso de renovación de la carga al interior de la cámara de combustión. Y aunque lo anterior no solo depende del colector de escape, este es una pieza clave en todo este proceso.

Dentro de las funciones que tiene este colector están facilitar la rápida salida de los gases, minimizar la cantidad de gases residuales del ciclo anterior; mejorar, en conjunto con el colector de admisión, el proceso de renovación de la carga. Además, debe contar con una alta resistencia mecánica, tenacidad y elasticidad para soportar las condiciones de trabajo que normalmente involucran altas temperaturas y vibraciones, por lo que, normalmente suele fabricarse en fundición gris o de acero.

5.7.2.1. Válvula de escape

Además de las diferencias geométricas entre las válvulas de admisión y escape antes mencionadas, otro aspecto a destacar es el orificio del conducto que abren/cierran y la combinación de estas acorde al tipo de motor, ya que se pueden tener de dos a tres válvulas de admisión y dos de escape por cilindro. Estos elementos están relacionados con el proceso de renovación de la carga porque son los encargados de permitir el acceso del fluido de trabajo, asegurar su estanqueidad para su procesamiento y permitir la salida de los productos de la combustión.

5.7.3. Cámara de combustión

La cavidad al interior de un MCI donde el fluido de trabajo evoluciona y da lugar al proceso de combustión, recibe el nombre de cámara de combustión; por lo que esta parte es de vital importancia en el funcionamiento del motor.

El volumen que entra a la cámara de combustión por inducción en el ciclo de admisión es igual al volumen del cilindro (V_C) y generalmente se puede calcular multiplicando el área transversal del pistón (P) por la carrera o recorrido (S) de este, partiendo del PMS hasta el PMI (Cabascango, 2019) como se puede ver en la **Figura 5.13**. el volumen de la cámara de combustión (V_{CC}) se asocia con la relación de compresión (R_C), la cual da razón de la cantidad de veces que se ha comprimido la mezcla aire-combustible al interior de la cámara, esta viene dada por la suma entre el V_C y el V_{CC} , y cuyo producto se divide con V_{CC} ; teniendo en cuenta que para cada combustible existe una relación de compresión adecuada, la variación de la R_C modifica la presión en la cámara de combustión, la potencia, el par y consigo la eficiencia del motor porque de este parámetro depende si se aprovecha o no de forma óptima la energía del combustible (Ramirez & Arcilla, 2017).

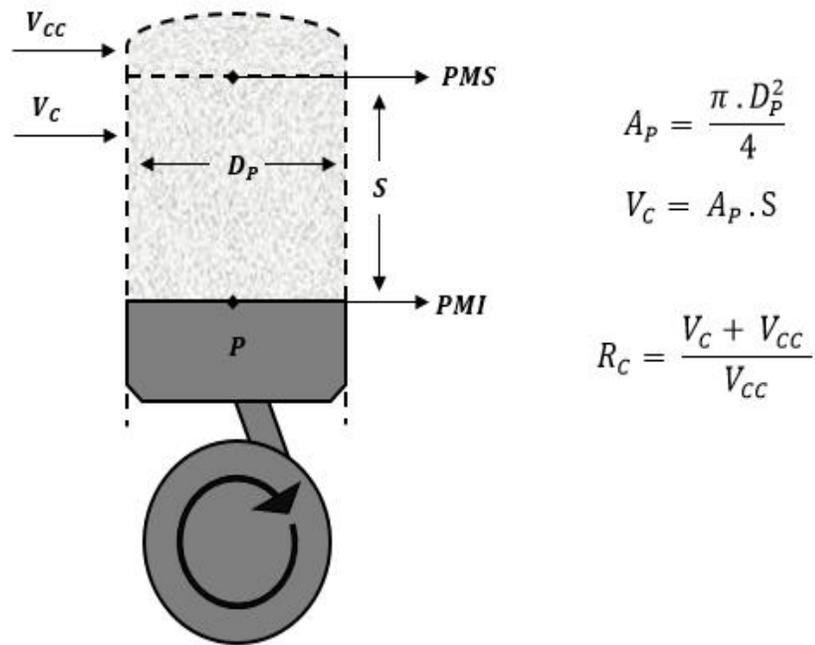


Figura 5.13. Esquema básico de la cámara de combustión de un MCI. Adaptado de los trabajos (Cabascango, 2019) y (Ramirez & Arcilla, 2017).

5.7.3.1. Pistón

Este elemento se encarga de transmitir por medio de la biela, el trabajo producido en la carrera de potencia; el diseño del pistón influye

determinantemente en la eficiencia del motor ya que dentro de sus funciones las más relevantes son el aseguramiento de la estanqueidad en conjunto con las válvulas de admisión/escape, absorción y transmisión de calor hacia el cilindro, transmisión de potencia entre otras; debido a esto, aunque las dimensiones y formas del pistón sean ajustadas a las prestaciones y características de cada motor, la modificación geométrica de la cabeza del pistón o (Bowl) puede ser un parámetro influyente en el proceso de combustión y consiguiente en la eficiencia del motor (Shafie & Said, 2017).

5.8. Fluido de trabajo

Como ya se ha mencionado anteriormente, la interacción entre el fluido de trabajo que transita por el conjunto principal de un MCI y las geometrías de los componentes mecánicos es un factor determinante en el rendimiento y las emisiones del motor (Martinas et al., 2015). Es por esto que se debe conocer un poco a cerca de este fluido de trabajo; el cual, normalmente está conformado por aire atmosférico o la mezcla de aire atmosférico y combustible; esta mezcla, en el transcurso del ciclo operativo y sobre todo, debido al proceso de combustión, sufre una transformación química de la cual se obtiene vapor de agua (H_2O), cuyo comportamiento es permanente en el proceso, CO_2 y Nitrógeno (N_2), este último actúa como un gas inerte contenido en el aire que no interviene en el proceso de combustión; entre otros productos de la combustión donde se encuentran porciones de otros gases tales como Monóxido de carbono (CO), H_2 , Metano (CH_4) y Oxígeno (O_2), especialmente cuando la combustión es incompleta (Rea, 2011).

5.8.1. Aire atmosférico

El aire es una mezcla de gases compuesta por un 78% de N_2 , 21% de O_2 y pequeñas cantidades de otros gases menos comunes en los que se encuentran el CO_2 , Argón (Ar) y H_2O cuya proporción varía en función de las condiciones del entorno; si contiene una parte de vapor de agua o humedad (lo que es normal en la atmosfera) se le conoce como aire atmosférico de lo contrario, se le conoce como aire seco (Cengel & Boles, 2005).

5.9. Campos de velocidad del fluido de trabajo

El flujo del fluido de trabajo que entra a los cilindros de un MCI y posteriormente pasa al proceso de combustión, naturalmente es turbulento debido a las altas velocidades presentes en el ciclo de procesos que gobiernan el funcionamiento de estas máquinas (Verdú, 2017), lo anterior da lugar a la generación de vórtices por el movimiento aleatorio de las partículas del fluido en el cilindro favoreciendo así a la calidad de la mezcla del fluido motor y consigo al proceso de combustión; los principales efectos de este fenómeno en los MCI se conocen como *Swirl*, *Tumble* y *Squish*; **Figura 5.14.** es importante resaltar que entre mayor es la velocidad del motor, mayor será la tasa de flujo y consigo la evolución de los efectos antes mencionados; lo cual incrementa la tasa de evaporación del fluido de trabajo y consigo la eficiencia del motor (Quora, 2015).

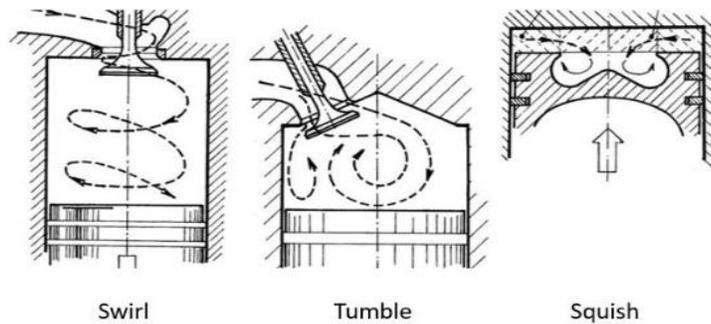


Figura 5.14. Campos de velocidad del fluido de trabajo al interior de la cámara de combustión. Tomado del trabajo de (Verdú, 2017).

5.9.1. Campo Swirl

El efecto del campo Swirl, se da cuando el fluido de trabajo al ingresar a la cámara de combustión toma la forma de remolino con eje de rotación paralelo al eje del cilindro. Este efecto también se puede dar de forma tangencial si se modifican los perfiles del colector de admisión, los puertos de válvulas y caras de los pistones.

5.9.2. Campo Tumble

El efecto Tumble tiene lugar cuando el pistón alcanza el PMS ya que se genera un flujo secundario alrededor del eje ortogonal del cilindro en el

plano YZ o XZ siendo Z el eje del cilindro por el movimiento de aplastamiento.

5.9.3. Campo Squish

Este efecto se percibe al final de la carrera de compresión exactamente cuando la culata y la cara del pistón se acercan entre sí, en este caso el movimiento del fluido de trabajo se da desde el perímetro circunferencial del motor hacia el Bowl gracias a la geometría especial del pistón.

5.10. Enfoques de simulación de los MCI

La descripción de los procesos que se dan al interior de un MCI por medio de los análisis clásicos basados en la termodinámica se ha venido reemplazando por el uso de códigos informáticos, y uno de estos, es el CFD, un código capaz de resolver las ecuaciones de *Navier Stokes* en una malla numérica que sigue la geometría cambiante del motor durante cada proceso del ciclo de trabajo (Reitz, 2013). Ante esta innovación, es posible analizar el ciclo de potencia de un motor de forma muy realista incluyendo la combustión o enfocarse solo en los patrones de flujo durante el ciclo sin combustión **Figura 5.15.** en esa decisión, influyen muchos aspectos y entre ellos la capacidad que ofrece el software para brindar una solución ante el problema CFD.

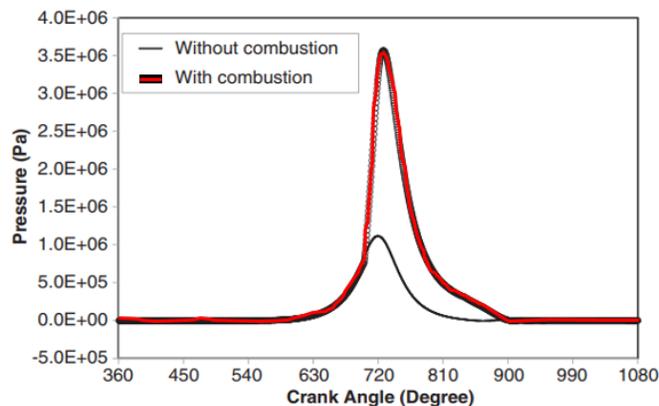


Figura 5.15. Comparación de la gráfica Presión – Angulo cigüeñal de una simulación CFD con combustión y sin combustión. Adaptado del trabajo de (Tian & Abraham, 2014).

5.10.1. Simulación en estado transitorio con combustión

El proceso de combustión normalmente se da en estado transitorio con un flujo turbulento de número Mach bajo, compresible, multifase, el cual incluye un alto número de Reynolds, reacciones químicas, transferencia de calor y se da en una geometría que varía en el tiempo (Giménez et al., 2021); es por esto, que la integración y sincronización entre las entradas/salidas de los fluidos y la naturaleza cambiante de las geometrías al interior de un motor durante el ciclo de trabajo, sobre todo en los procesos de compresión y expansión, más la evolución química del fluido de trabajo, resultan ser aspectos muy relevantes si se quiere llegar a una representación realista en un entorno computacional de los MCI, y existen herramientas CFD, que aunque tengan la capacidad de analizar los patrones de flujo **Figura 5.16.**, no pueden validar simulaciones que incluyan reacciones químicas con mallas dinámicas para geometrías móviles (3Dvision, 2009).

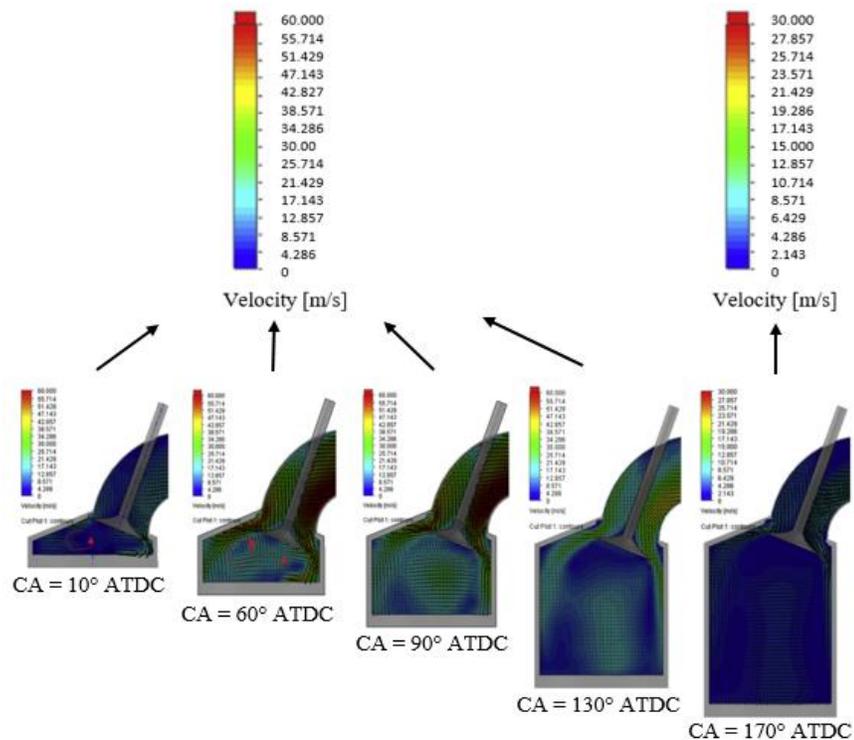


Figura 5.16. Magnitud y vectores de velocidad del proceso de admisión en estado cuasi estable (distintos ángulos del cigüeñal con respecto al PMS) por medio de la simulación CFD. Adaptado del trabajo de (Jemni et al., 2018).

5.10.2. Simulación en estado estable sin combustión

Las operaciones reales de los MCI incluyen temperaturas y presiones características del proceso de combustión interna, si se quiere comprender a fondo el funcionamiento de estas máquinas es necesario incluir la combustión en los análisis CFD (Tian & Abraham, 2014); no obstante, analizar el movimiento del campo de flujo a través de geometrías relevantes en MCI permite comprender el impacto significativo que la dinámica de fluidos tiene sobre el funcionamiento y la eficiencia de los motores en función de parámetros como la velocidad del fluido de trabajo y los efectos de sus campos de acción, turbulencia, flujo de aire inducido, presión, temperatura entre otros (Shafie & Said, 2017), ver **Figura 5.17**.

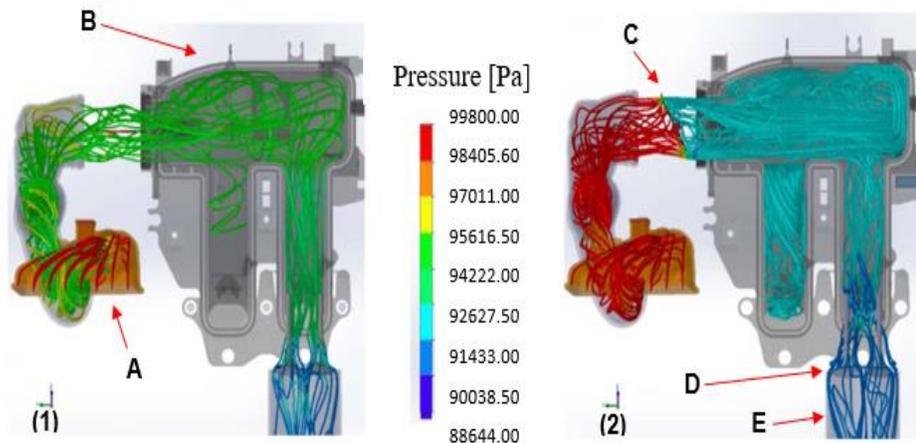


Figura 5.17. Simulación CFD sin combustión del campo de flujo a través de la geometría compleja compuesta por A. toma de aire, B. plenum, C. válvula mariposa, D. válvulas de admisión y E. cilindro; durante la carrera de admisión con válvula mariposa abierta (1) y cerrada (2). Adaptado del trabajo de (Nigro et al., 2017).

El CFD tiene un gran alcance en el análisis y representación de las propiedades cualitativas y cuantitativas de los campos de flujos de los MCI y brinda la posibilidad de no tener en cuenta reacciones químicas y geometrías variables (Nigro et al., 2017); bajo este enfoque se pueden llevar a cabo simulaciones capaces de mejorar el funcionamiento de un motor, como fue el caso del trabajo de (Jemni et al., 2011) **Figura 5.18**. donde se configuró una simulación CFD para estudiar la influencia de la geometría del colector de admisión en un MCI, obtuvieron información detallada de las estructuras de los patrones de flujo en el sistema de admisión a través de

dos diseños de colector, validaron experimentalmente y mejoraron las prestaciones del motor.

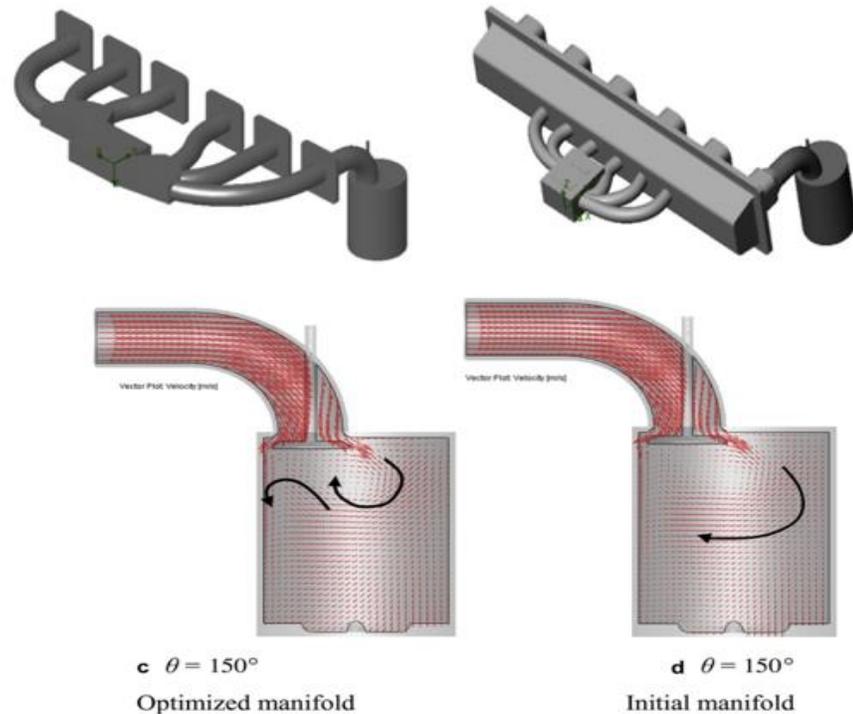


Figura 5.18. Representación de los patrones de flujo (velocidad del fluido de trabajo) en el sistema de admisión de un MCI a través del colector inicial y optimizado por medio de una simulación CFD. Tomado del trabajo de (Jemni et al., 2011).

5.11. SolidWorks

SolidWorks es un software de uso ingenieril basado en Microsoft Windows el cual integra el paquete de diseño e ingeniería asistida por computadora (CAD/CAE), este facilita el diseño mecánico en un entorno computacional permitiendo modelar piezas, realizar grandes ensamblajes, planos, entre otras funciones en 2D y 3D (Gomez, 2014).

5.11.1. Flow Simulation herramienta CFD de SolidWorks (SWFS)

SolidWorks dispone de una gama de herramientas que permiten efectuar el análisis del comportamiento físico interno o externo de piezas o ensamblajes

determinados, una de estas herramientas se denomina *Flow Simulation* y es el complemento CFD integrado en el entorno (CAD/CAE) de *SolidWorks*; a continuación, se mencionan las capacidades y limitaciones de esta herramienta CFD, se describen las ecuaciones que gobiernan los procesos y el modelo de turbulencia que esta emplea.

5.11.2. Capacidades y limitaciones

SWFS es una excelente herramienta de rango medio, cuyo campo de estudio involucra aplicaciones relacionadas con operaciones de válvulas; calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC); aplicaciones médicas y automotrices/aeroespaciales; análisis del flujo de fluidos y transferencia de calor, entre otras. A continuación, en la **Tabla 5.2.** se listan las capacidades y en la **Tabla 5.3.** las limitaciones que posee SWFS a partir del año 2009 según (3Dvision, 2009).

<i>Lo que SWFS puede hacer</i>	
Flujos viscosos incomprensibles (líquido o gas) o comprimible (gas) con regímenes subsónicos, transónicos y supersónicos.	Un componente o hasta diez especies independientes: mezclas líquido-líquido o mezclas gas-gas.
Flujos externos y/o internos.	Convección forzada, libre o mixta – transferencia de calor.
Flujos no newtonianos (fluidos viscosos como la sangre).	Transferencia de calor conjugada (líquido, sólido), conducción y convección.
Flujos con regímenes laminar/turbulento y con transición.	Flujos de fluidos en estado estacionario y transitorio (dependiente del tiempo).
Modelo de rugosidad en paredes.	Medios porosos.
Flujos giratorios y abanicos (curvas de abanico)	Enfriadores TEC/emuladores de disipadores de calor/termostatos.
Radiación.	Cavitación.
Humedad relativa.	Marcos de referencia giratorios.

Tabla 5.2. Capacidades que tiene SWFS como herramienta CFD.

<i>Lo que SWFS no puede hacer</i>	
Cambio de fase: no puede manejar materiales que se enfrían y se transforman de gas a líquido o de	Coexistencia de diferentes fases: no puede simular un líquido y un gas en la misma cavidad. Por

<p>líquido fundido a sólido. De manera similar, no puede manejar materiales que se calientan de sólido a líquido fundido o de líquido a gas. Esto requiere formulaciones complejas y no lineales especiales de gama alta específicamente para modelar la entropía y los cambios químicos/moleculares para tener en cuenta el enfriamiento, etc. Por ejemplo: el flujo de plástico lanza un molde de inyección a medida que se enfría y solidifica.</p>	<p>ejemplo, el agua que sale de una boquilla hacia el aire (ya que el agua y el aire existen en la misma cavidad después de que sale el agua). Del mismo modo, los aerosoles (donde se rocían burbujas de líquido en el aire). Diferentes fluidos (líquidos/gases) pueden coexistir en una simulación de flujo si existen en diferentes cavidades o volúmenes.</p>
<p>Fenómenos de superficie libre: no puede simular la capa superior de un líquido que se encuentra en un tanque abierto. Esto nuevamente requiere fórmulas altamente no lineales y complejas que son características de los paquetes de alta gama.</p>	<p>Cuerpos en movimiento: no puede simular cuerpos que se mueven y desplazan fluidos a medida que se mueven. Esto requiere paquetes especiales enfocados de alta gama que puedan manejar la interacción de estructura de fluidos (FSI).</p>
<p>Partículas/suspensiones: no puede simular suspensiones sólidas/líquidas en un fluido donde las suspensiones pueden influir en el patrón/parámetros del flujo. Dado que SWFS no puede tener dos fases diferentes en el mismo volumen, no admite partículas sólidas en una corriente de fluido/partículas líquidas en una corriente de fluido/gas atrapado en una corriente de líquido, etc.</p>	<p>Combustión: no puede realizar reacciones químicas para dar cuenta de la combustión.</p>

Tabla 5.3. Limitaciones que tiene SWFS como herramienta CFD.

5.11.3. Ecuaciones que gobiernan los procesos

Los procesos como evaporación de combustible líquido, mezcla aire – combustible, fricción en una interfaz gas – sólido, transferencia de calor entre gas y las paredes de la cámara de combustión; son considerados procesos de velocidad, debido a que la masa, el momento y la energía se transfieren de un punto a otro (Heywood, 1988). Con base en lo anterior, las ecuaciones que gobiernan la dinámica de los patrones del flujo de trabajo

que interactúa con las geometrías relevantes del conjunto principal de un MCI y con las cuales cuenta la herramienta SWFS, son las ecuaciones de conservación de masa, conservación de la cantidad de movimiento y la ecuación de conservación de energía o las ecuaciones de *Navier Stokes* (Jemni et al., 2011), las cuales se pueden escribir como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i; \quad i = 1,2,3 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial \rho}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H \quad (3)$$

$$H = h + \frac{u^2}{2}$$

Dónde:

(S_i) fuerza externa distribuida en masa por unidad de masa.

(h) entalpía térmica.

(Q_H) fuente de calor o disipador por unidad de volumen.

(τ_{ij}) tensor de esfuerzo cortante viscoso.

(q_i) flujo de calor difusivo.

Los subíndices representan la suma sobre las tres direcciones de coordenadas.

Para los flujos con ondas de choque y alta velocidad, la ecuación de energía se escribe de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i (E + \frac{p}{\rho})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H \quad (4)$$

$$E = e + \frac{u^2}{2}$$

Donde:

(e) es la energía interna.

5.11.4. Modelo de turbulencia

Los flujos en régimen laminar se caracterizan por tener valores bajos del número de Reynolds, cuando su magnitud supera cierto valor crítico el flujo pasa a régimen turbulento; *SWFS* es capaz de considerar ambos en sus simulaciones, para predecir el flujo turbulento utiliza las ecuaciones de *Navier Stokes* con promedio de *Favre*, estas tienen en cuenta los efectos ponderados del tiempo en el que ocurre la turbulencia del flujo en los parámetros del mismo; mientras que los fenómenos dependientes del tiempo se tienen en cuenta directamente. A este procedimiento se ligán términos adicionales tales como las tensiones de Reynolds por lo que, para cerrar el sistema de ecuaciones, *SWFS* emplea el *modelo (K – ε)* con las ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta (*K*) y su tasa de disipación (*ε*). A continuación, se escriben las leyes de conservación de turbulencia que conforman el modelo modificado de turbulencia (*K – ε*) propuesto por *Lam y Bremhorst*; este describe los flujos laminares, turbulentos y la transición de fluidos homogéneos (Sobachkin & Dumnov, 2014).

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \mu_t P_B, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \varepsilon u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left(f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + C_B \mu_t P_B \right) - f_2 C_{\varepsilon 2} \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

$$\tau_{ij} = \mu S_{ij}; \quad \tau_{ij}^R = \mu_t S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}; \quad S_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \quad (7)$$

$$P_B = - \frac{g_i}{\sigma_B} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (8)$$

Donde $C_\mu=0,09$; $C_{\varepsilon 1}=1,44$; $C_{\varepsilon 2}=1,92$; $\sigma_k=1$; $\sigma_\varepsilon=1,3$; $\sigma_B=0,9$; $C_B=1$ si $P_B>0$; $C_B=0$ si $P_B<0$. A partir de la siguiente expresión se determina la viscosidad turbulenta:

$$\mu_t = f_\mu \cdot \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

En cuanto a la función de amortiguamiento de *Lam* y *Bremhorst* f_μ se determina a partir de:

$$f_\mu = (1 - e^{-0.025R_y})^2 \cdot \left(1 + \frac{20.5}{R_t}\right) \quad (10)$$

Donde:

$$R_y = \frac{\rho\sqrt{ky}}{\mu}; \quad (11)$$

$$R_t = \frac{\rho K^2}{\mu\varepsilon}; \quad (12)$$

y es la distancia que existe del punto a la pared y las funciones de amortiguamiento de *Lam* y *Bremhorst* f_1 y f_2 se determinan a partir de:

$$f_1 = 1 + \left(\frac{0.05}{f_\mu}\right)^3; \quad f_2 = 1 - e^{R_t^2} \quad (13)$$

Las funciones de amortiguamiento de *Lam* y *Bremhorst* f_μ , f_1 , f_2 son capaces de reducir la viscosidad turbulenta y la energía de turbulencia, pero también aumentan la capacidad de disipación de la turbulencia cuando el número de Reynolds R_y basado en la velocidad media de las fluctuaciones y la distancia desde la pared es demasiado pequeño. Cuando $f_\mu = 1$, $f_1 = 1$, $f_2 = 1$ el enfoque vuelve al modelo $k - \varepsilon$ original.

El flujo de calor se define por:

$$q_i = \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_c}\right) \frac{\partial h}{\partial x_i}; \quad i = 1,2,3 \quad (14)$$

Aquí, la constante $\sigma_c = 0,9$, Pr es el número de Prandtl y h la entalpía térmica.

5.12. Configuración de una simulación de flujo simple en SWFS

A continuación se describe el proceso de configuración de un modelo simple para calcular la caída de presión del agua y conocer la distribución de los

patrones de flujo a través de una tubería, tomando como fuente el ejemplo realizado por (Colangelo, 2016), esto con el fin de conocer a detalle el cómo se configura una simulación con el asistente (Wizard) que ofrece la herramienta SWFS al momento de definir una simulación; es pertinente mencionar que dicho proceso resulta ser el mismo para cualquier tipo de simulación, difiriendo en aspectos tales como naturaleza del problema, geometrías y finalidad de la simulación, los cuales pueden ser modificados o ajustados acorde a el problema al momento de configurar el Wizard. Esta sección se complementó con información tomada de un manual de SWFS (SolidWorks, 2011).

5.12.1. Descripción del problema

En la **Tabla 5.4.** se presenta la información básica requerida para poder programar la simulación en la herramienta CFD.

Geometría	Condiciones iniciales	Metas
$L = 1200 \text{ in}$	$Q = 1152 \text{ in}^3/\text{s}$	ΔP
$D_e = 4.5 \text{ in}$	$P_{atm} = 14.7 \text{ psi}$	Patrones de flujo
$D_i = 4 \text{ in}$	$P_{atm} = 68.09 \text{ }^\circ\text{F}$...

Tabla 5.4. Datos básicos para la configuración del modelo simple en Flow Simulation.

La descripción del problema en base a aspectos como la geometría, variables independientes y dependientes es sumamente necesario para llevar a cabo cualquier tipo de simulación en SWFS. En la imagen de la **Figura 5.19.** se muestra a detalle la geometría de la tubería en el entorno computacional de SolidWorks.

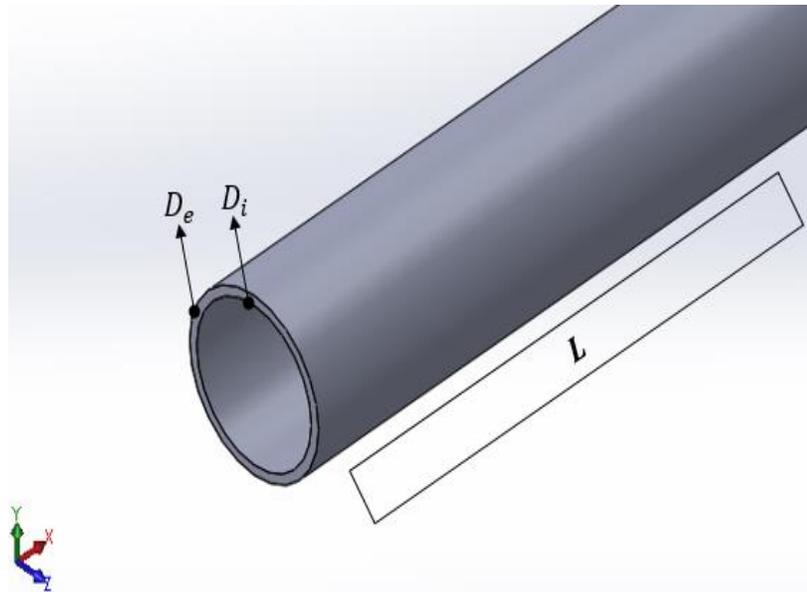


Figura 5.19. Geometría de tubería para ejemplo práctico con referencias dimensionales.

5.12.2. Configuración preliminar del problema en el *Wizard* de *SWFS*

Una vez la geometría definida, lo siguiente es llevar el modelo CAD al entorno de la herramienta CFD. La imagen de la **Figura 5.20.** muestra el menú de las características que ofrece *SWFS*. Para ingresar a este menú se debe acceder a complementos de *SolidWorks* y seleccionar *Flow Simulation*.

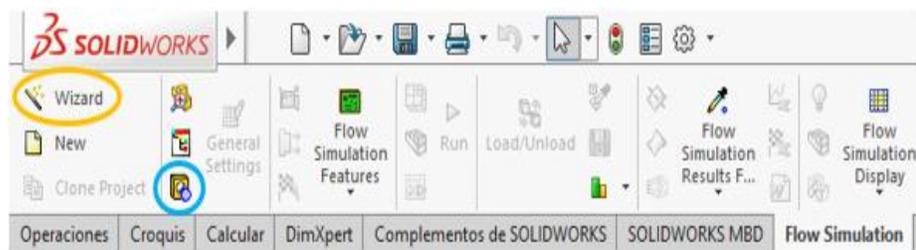


Figura 5.20. Acceso al asistente *Wizard* (marcado con amarillo) y a la opción *Create Lips* (marcado con azul) en el menú de las características de *Flow Simulation*.

Es importante definir el volumen del fluido ya que toda simulación en *SWFS* debe darse sobre algún volumen contenido, existen varias formas de definir dicho volumen y la opción *Create Lids* es una de ellas, al ingresar a esta se despliega el panel explorador de la **Figura 5.21**. aquí se deben seleccionar las caras a tapar y asignar un espesor para las tapas, en este caso dichas tapas estarán en los extremos de la tubería.

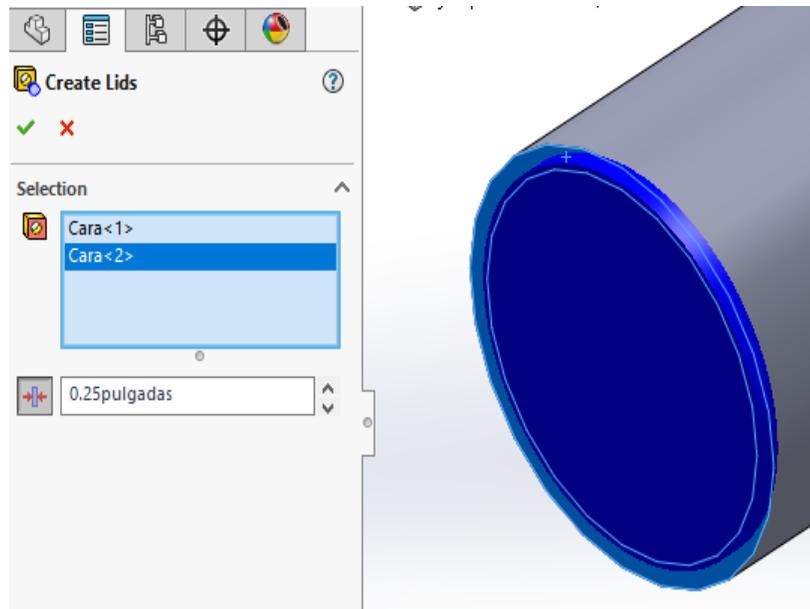


Figura 5.21. Panel de la opción *Create Lids*, definición del espesor de las tapas para definir el volumen de control.

Una vez definido el volumen de estudio ya es posible ingresar al asistente *Wizard*, el cual permite especificar información preliminar tal como nombre del proyecto, sistema de unidades, si el análisis será interno o externo, tipo y características del fluido de trabajo, condiciones de pared y las condiciones con la cual inicia el estudio. Seleccionada esta opción en el menú de las características de *SWFS* se debe desplegar la ventana de la **Figura 5.22**. al lado izquierdo de dicha venta, se puede observar una serie de opciones para la entrada de datos y resultados, lo cual se abordará en los apartados *Definición de los datos de entrada (Input Data)* y *Resultados de la simulación*.

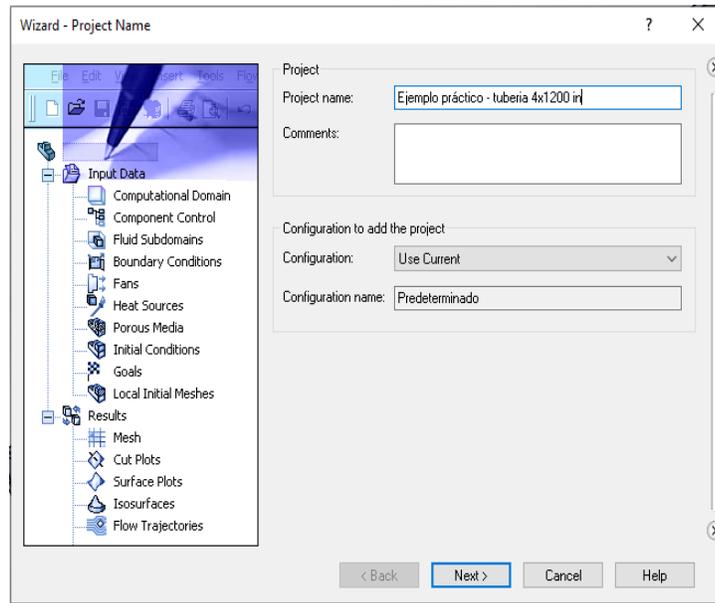


Figura 5.22. Cuadro de dialogo inicial, asistente Wizard.

En esta sección inicial se puede asignar un nombre, hacer comentarios entre otras configuraciones al proyecto; al dar clic en la opción *Next>* se debe desplegar el cuadro de dialogo de la **Figura 5.23**. en el cual se puede seleccionar el sistema de unidades, en este caso se selecciona el sistema de unidades inglés.

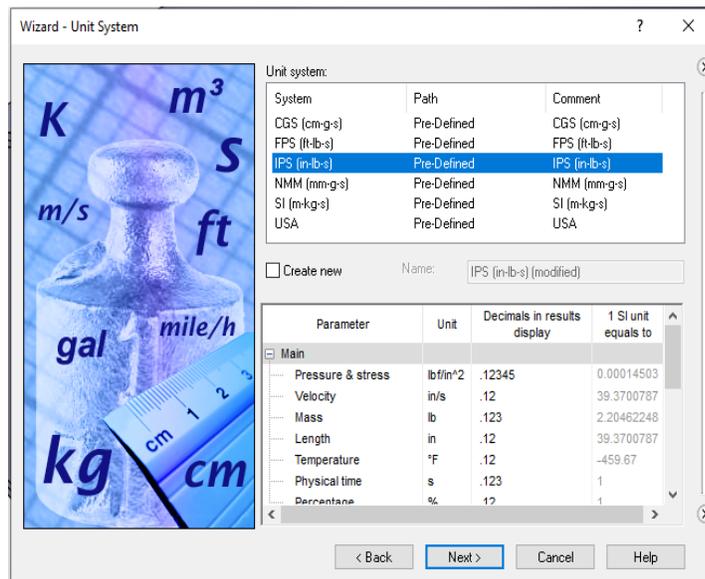


Figura 5.23. Cuadro de dialogo para selección del sistema de unidades, asistente Wizard.

El cuadro de dialogo siguiente, permite seleccionar el tipo de análisis que se quiere realizar **Figura 5.24.**, la selección hace parte de la naturaleza del problema y la geometría influye en demasía en dicha selección, este ejemplo responde a la opción de análisis interno ya que el fluido está limitado por las paredes de la tubería, un ejemplo del caso contrario sería el estudio del flujo de aire sobre el ala de un avión, de cualquier manera, para ambos casos es posible especificar características físicas avanzadas tales como transferencia de calor en sólidos, radiación, dependencia del tiempo, gravedad y rotación.

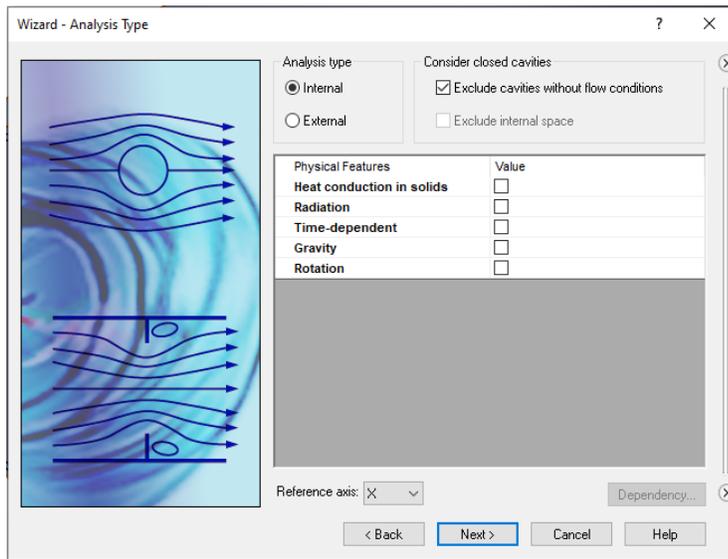


Figura 5.24. Cuadro de dialogo para selección del tipo de análisis, asistente Wizard.

En el cuadro de dialogo de la **Figura 5.25.** se puede seleccionar el fluido de trabajo, para el ejemplo se seleccionó agua con características predeterminadas, pero también es posible hacer mezclas de fluidos y establecer caracterizas de flujo.

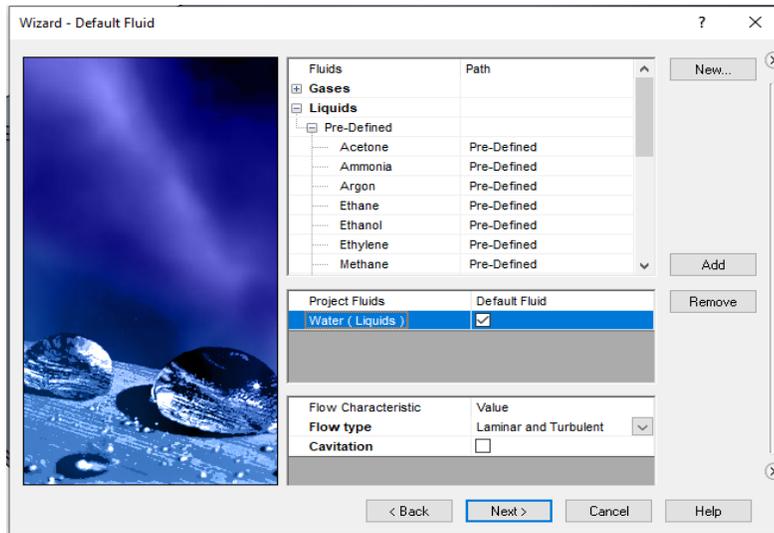


Figura 5.25. Cuadro de dialogo para definición del tipo y características del fluido, asistente Wizard.

En el siguiente cuadro de dialogo **Figura 5.26.** se puede especificar el valor de la rugosidad de la pared y la condición térmica de la pared, en este ejemplo no se ocupa esta opción por lo que se sigue con la configuración predeterminada.

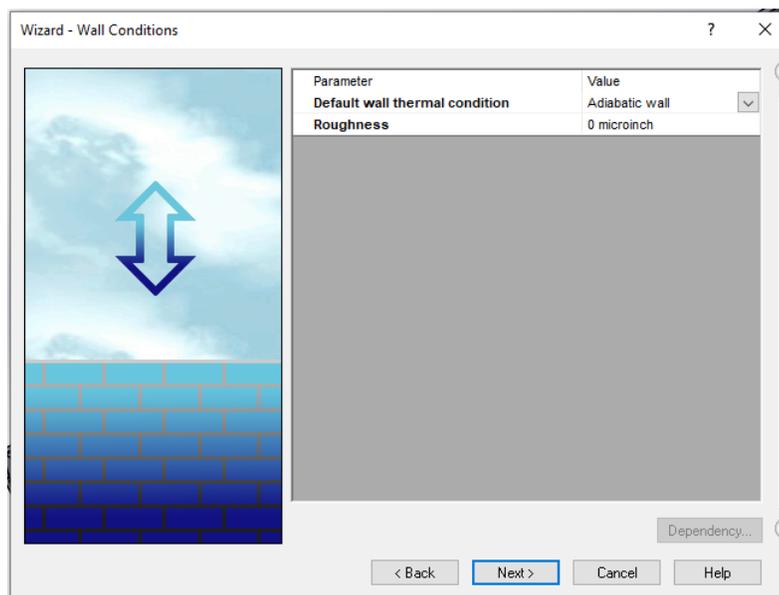


Figura 5.26. Cuadro de dialogo para la definición de las condiciones de pared, asistente Wizard.

En la **Figura 5.27.** se muestra el cuadro de dialogo donde se pueden especificar las condiciones iniciales, el software posee una configuración predeterminada la cual se ajusta a las condiciones iniciales de temperatura y presión de este ejemplo, por lo que aquí culmina la configuración preliminar de la simulación.

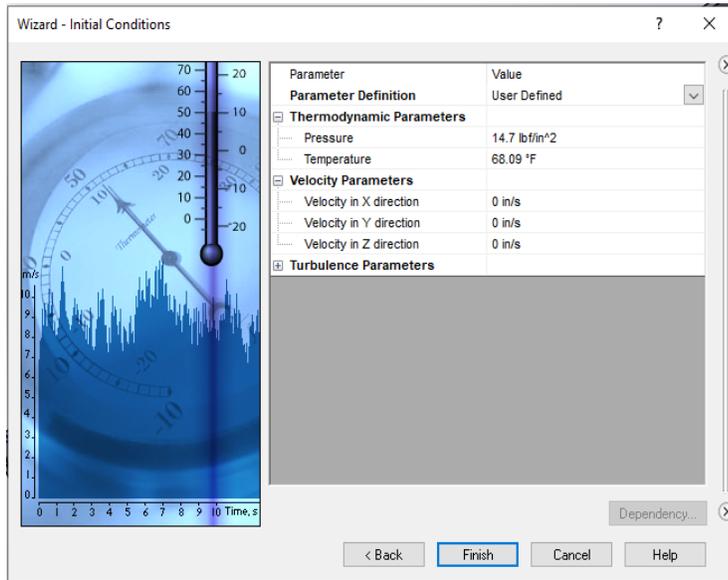


Figura 5.27. Cuadro de dialogo para configuras las condiciones iniciales, asistente Wizard.

5.12.3. Definición de los datos de entrada (*Input Data*)

Al finalizar la configuración preliminar mediante el *Wizard*, en la interfaz gráfica se debe mostrar la serie de opciones que incorpora *SWFS* para definir algunos datos de entrada (*Input Data*) tales como el dominio computacional, subdominio del fluido, condiciones de frontera, objetivos de simulación y mallado; los cuales permiten refinar la simulación, dicho panel se señala en la **Figura 5.28.**

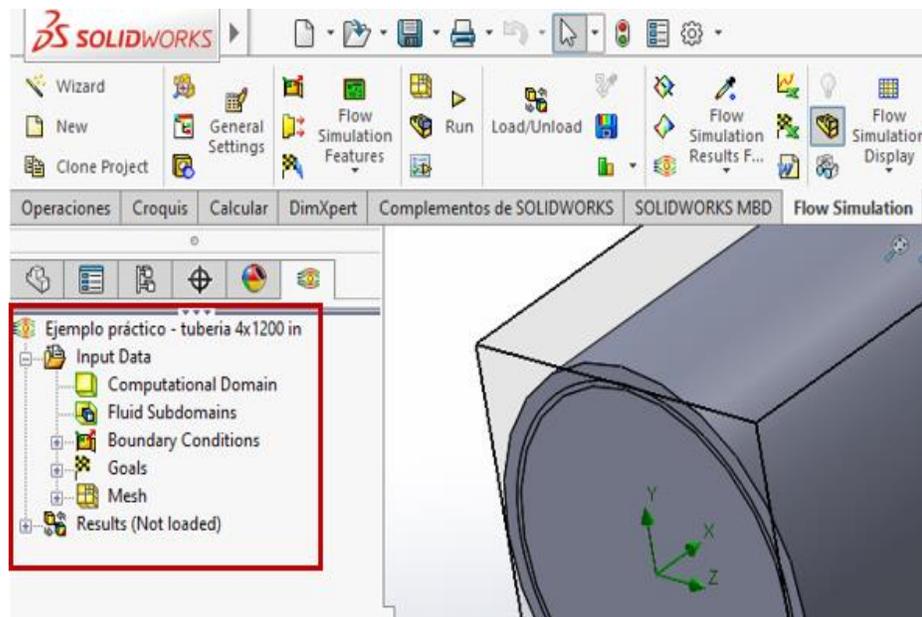


Figura 5.28. Panel para configuración de los datos de entrada (*Input Data*), refinamiento del modelo en SWFS.

El dominio computacional no es más que el límite matemático del problema, es decir donde el software realizará la solución de las ecuaciones de *Navier Stokes*; este como mínimo debe envolver el volumen definido para el fluido de trabajo. En la imagen de la **Figura 5.29**. se muestra un corte de sección de la geometría en el cual se puede apreciar el dominio computacional, subdominio del fluido (limitado por la geometría) y las tapas generadas mediante la opción *Create Lips* para definir el volumen de estudio. Tanto el dominio computacional como el dominio del fluido son generados automáticamente por el software y también es posible modificarlos, en este caso se continuo con los predefinidos.

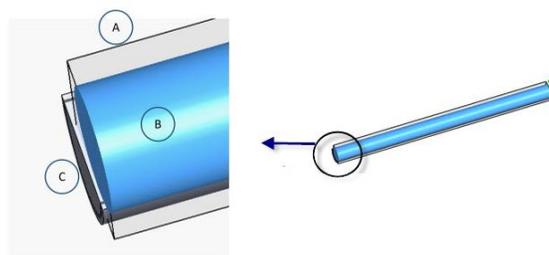


Figura 5.29. Corte de sección, modelo del ejemplo práctico con zonas de interés: A. Límite del dominio computacional, B. Volumen del fluido reconocido por el software y C. Tapas.

Al seleccionar la opción *Boundary Conditions* con clic derecho, se despliega el cuadro de dialogo de la **Figura 5.30**. donde se pueden especificar las condiciones de frontera.

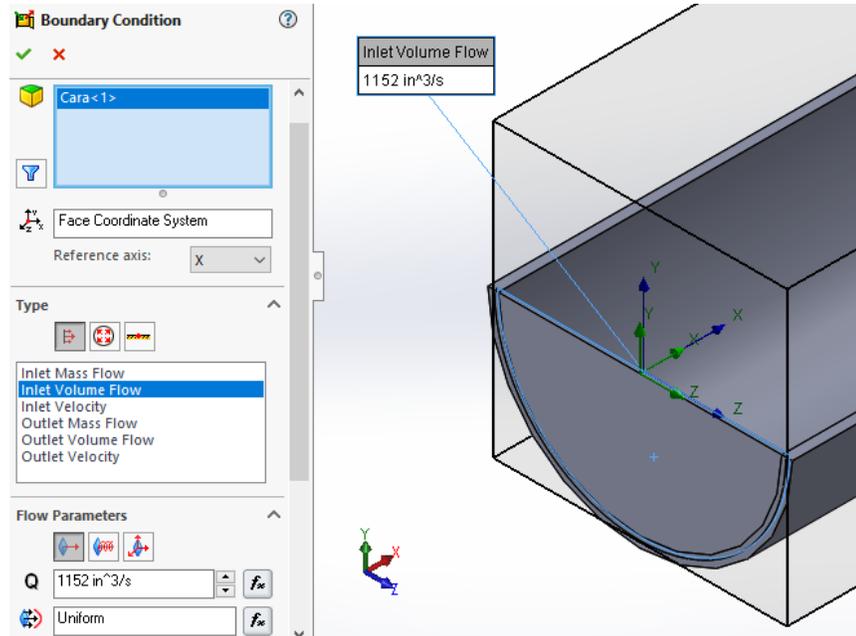


Figura 5.30. Panel explorador de la opción *Boundary Conditions* para la configuración de la entrada del fluido al modelo.

Para indicarle al software cual será la condición de entrada del fluido ($1152 \text{ in}^3/\text{s}$), se debe seleccionar el interior de una de las tapas agregadas para crear el volumen del fluido, es importante que la cara de la tapa coincida con la zona donde se encuentra el fluido de lo contrario habrá un error al aplicar la condición de frontera.

Ahora es necesario indicarle al software sobre las condiciones de salida del fluido para el modelo, para lo cual se especifican las condiciones de presión y temperatura ambientales en la cara interna de la tapa del otro extremo de la tubería, tal como se ilustra en la **Figura 5.31**.

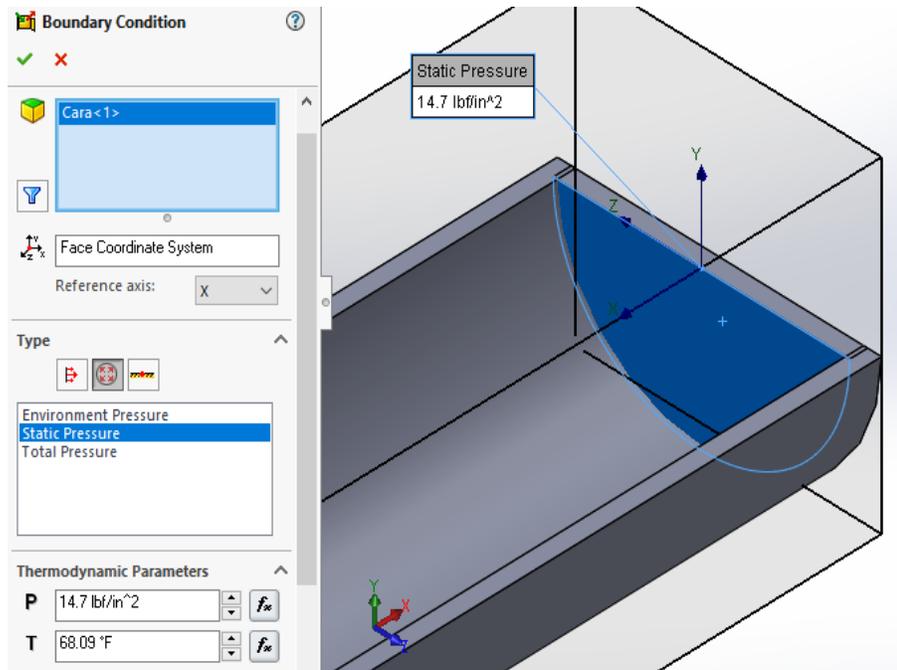


Figura 5.31. Panel explorador de la opción *Boundary Conditions* para la configuración de la salida del fluido al modelo.

En este punto es necesario agregar metas u objetivos a la configuración del modelo, en la imagen de la **Figura 5.28.** al seleccionar la opción *Goals*, se despliega la ventana de la **Figura 5.32.** frente a los objetivos de ingeniería que *Flow Simulation* ofrece al programador para que este brinde mayor orientación al software sobre sus requerimientos o necesidades de simulación.

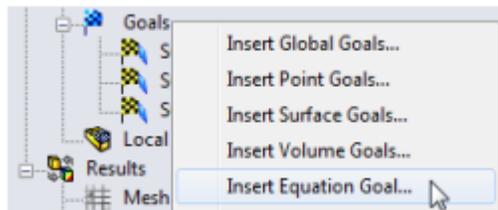


Figura 5.32. Objetivos de ingeniería incluidos en la opción *Goals* para la configuración del modelo.

Como en el ejemplo es de interés conocer la caída de presión, se debe seleccionar la opción *Insert Surface Goals* y se despliega el cuadro de opciones de la **Figura 5.33.** en la entrada de la tubería, (seleccionando la

superficie interna) se le indica al software que calcule los valores de presión estática.

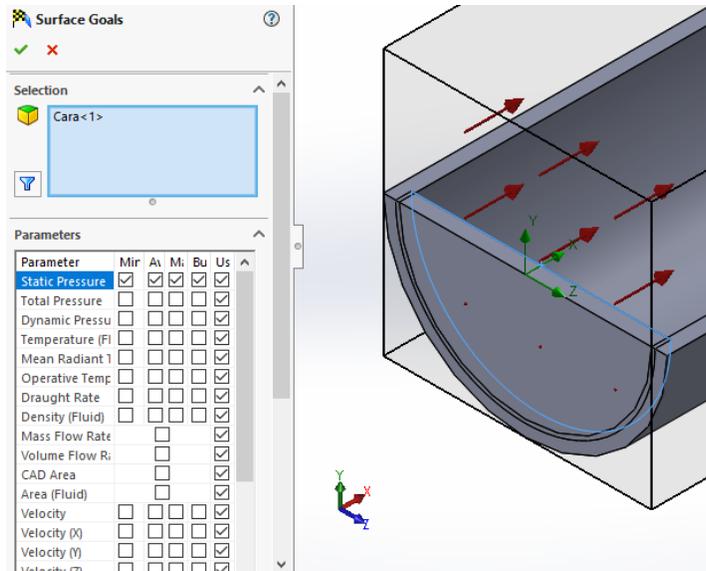


Figura 5.33. Panel explorador de la opción Surface Goals.

SWFS viene equipado con una configuración de malla automática por defecto que permite configurar la escala de mallado de forma manual, ver **Figura 5.34.**, la literatura resalta que esta opción de malla funciona muy bien para la mayoría de los problemas de simulación de flujo (Colangelo, 2016).

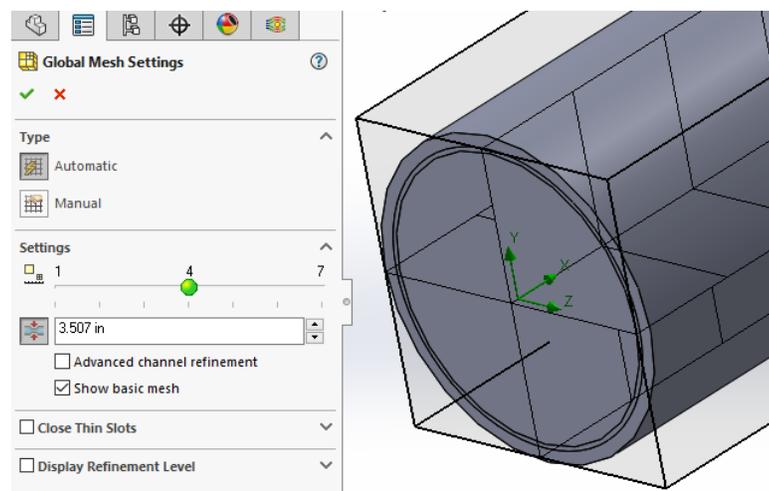


Figura 5.34. Configuración del mallado en la opción Mesh. Configuración de malla por defecto.

5.12.4. Correr la simulación

En este punto el proceso de configuración del modelo ya se tiene totalmente definido **Figura 5.35.**, por lo que el siguiente paso es ejecutar la simulación seleccionando la opción *Run* marcada con un círculo rojo y se despliega el cuadro de diálogo de la **Figura 5.36.**

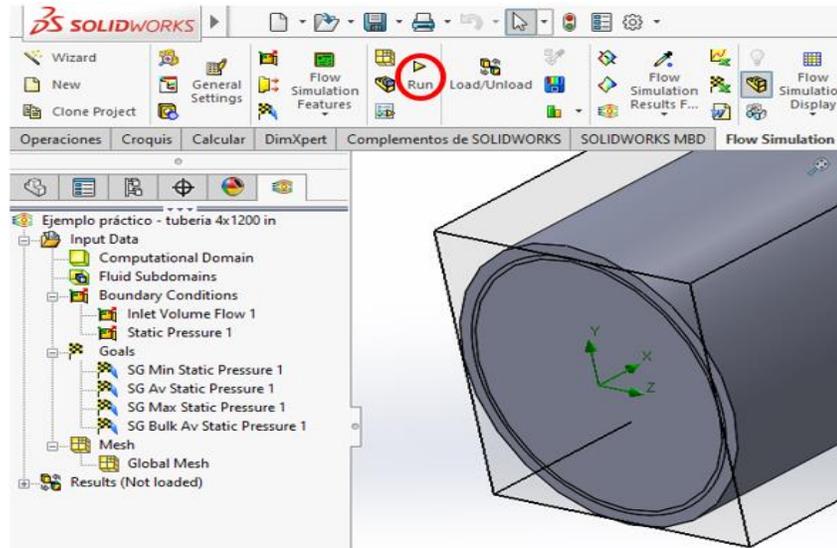


Figura 5.35. Interfaz gráfica una vez la simulación se encuentra totalmente definida.

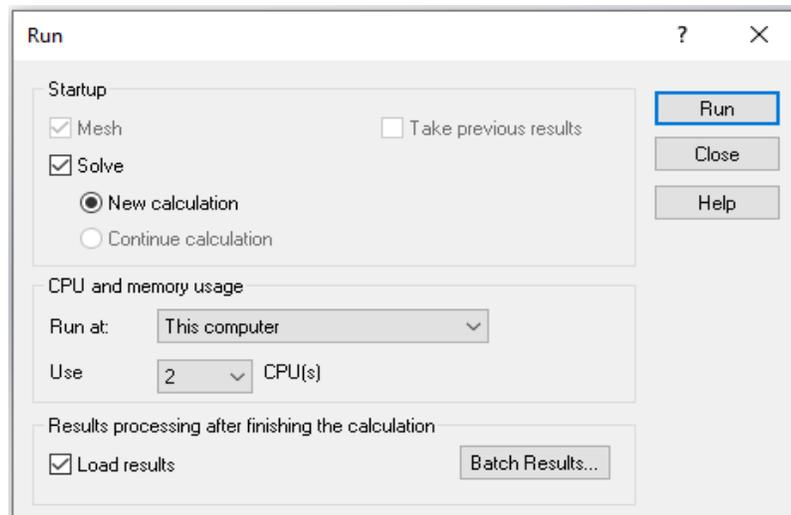


Figura 5.36. Cuadro de diálogo para ejecutar la simulación. Equipo: Lenovo Intel Celeron CPU 1005M @1.90 GHz 1.90GHz.

Al ejecutar la simulación es posible conocer detalles como el tiempo de cómputo, el número total de celdas, iteraciones entre otros datos que arroja el software **Figura 5.37.**, en el caso del ejemplo, se está resolviendo la presión de entrada como objetivo de simulación, al seleccionar la gráfica de objetivos de la simulación se muestra la convergencia en el tiempo de esta variable con respecto a las interacciones **Figura 5.38.**

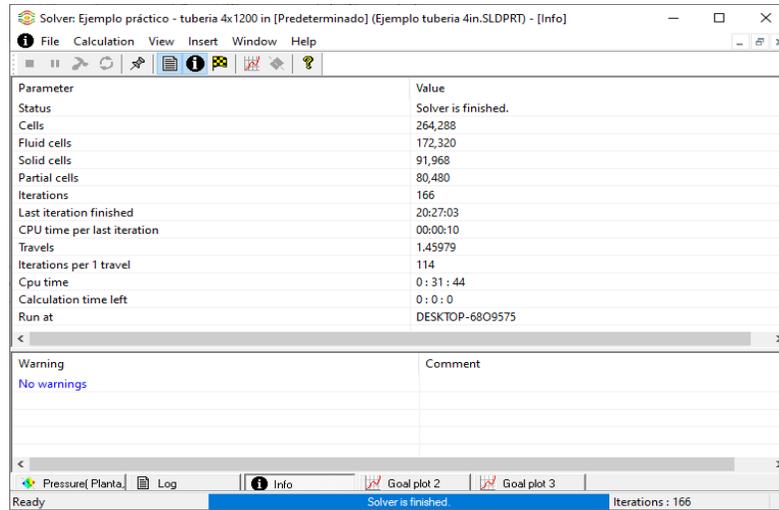


Figura 5.37. Información relevante del proceso de simulación.

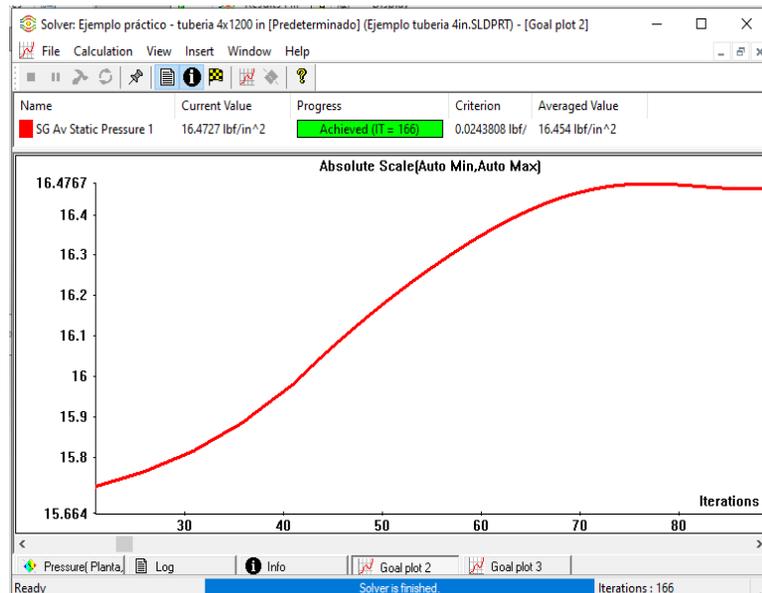


Figura 5.38. Gráfico de convergencia para la variable objetivo de simulación.

5.12.5. Resultados de la simulación

Dentro de las metas de este ejemplo se encuentran la caída de presión entre las secciones de entrada/salida de la tubería y la distribución de los patrones de flujo, existen múltiples opciones para consultar y poder ver los resultados de la simulación **Figura 5.39.** en este caso se usarán las trayectorias de flujo (*Flow Trajectories*), los contornos (*Cut Plots*) y los parámetros de superficie (*Surface Parameters*).

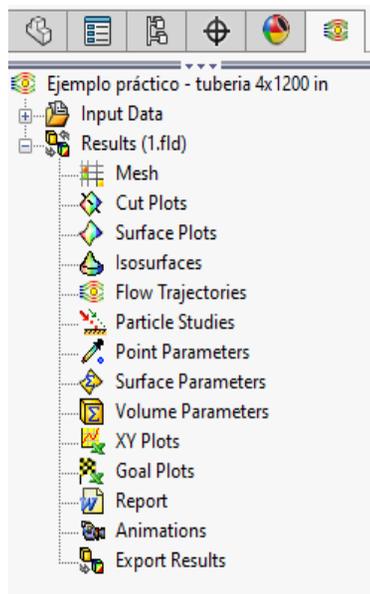


Figura 5.39. Lista de opciones para visualizar los resultados de simulación.

Para conocer los resultados de la simulación, primeramente, se debe seleccionar la cara/superficie de entrada, luego la opción *Surface Parameters* y seguir la secuencia que se ilustra en la **Figura 5.40.**, con lo cual se mostrará la tabla de resultados de la **Figura 5.41.** que corresponde al calculo que hizo el software frente a la caída de presión entre las secciones de entrada y salida de la tubería.

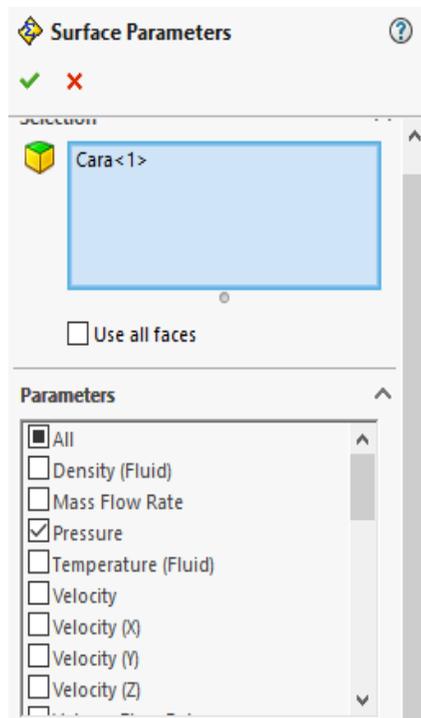


Figura 5.40. Panel explorador de la opción *Surface Parameters*.

Local Parameter	Minimum	Maximum	Average	Bulk Average	Surface Area [in ²]
Pressure [lbf/in ²]	16.47190	16.47404	16.47272	16.47272	12.4

Figura 5.41. Resultados de la presión de entrada calculada.

En cuanto a la distribución de las trayectorias de flujo, se debe seleccionar la opción *Flow Trajectories* en el panel de opciones de la **Figura 5.39.** y luego seleccionar la cara interna del extremo de entrada; la distribución del campo de velocidad se ilustra en la **Figura 5.42.** en la cual se puede apreciar que dicho campo está representado por líneas rectas cuya única diferencia en la magnitud de la variable en cuestión a lo largo de la geometría; en la **Figura 5.43.** se representa el campo de velocidad del fluido.

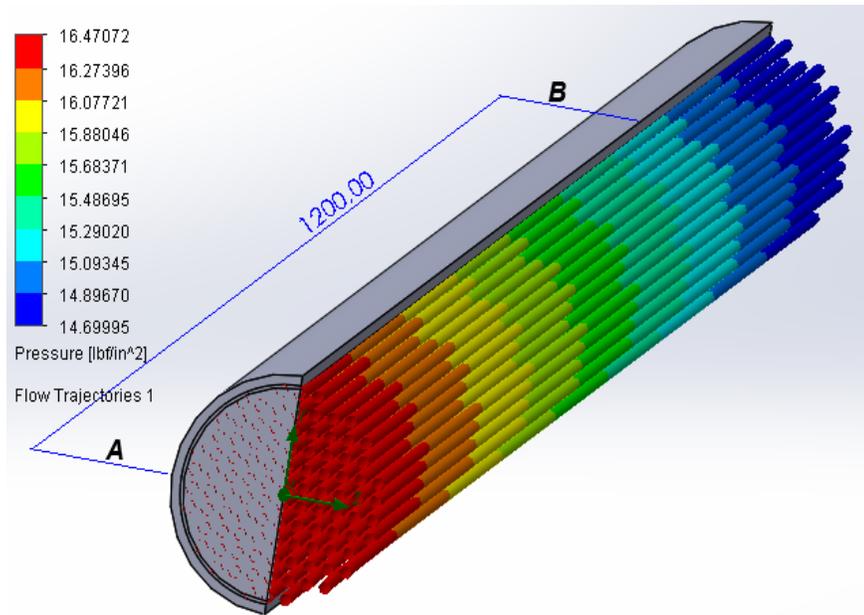


Figura 5.42. Distribución del campo de presión mediante la opción Flow Trajectories **A.** extremo de entrada **B.** extremo de salida.

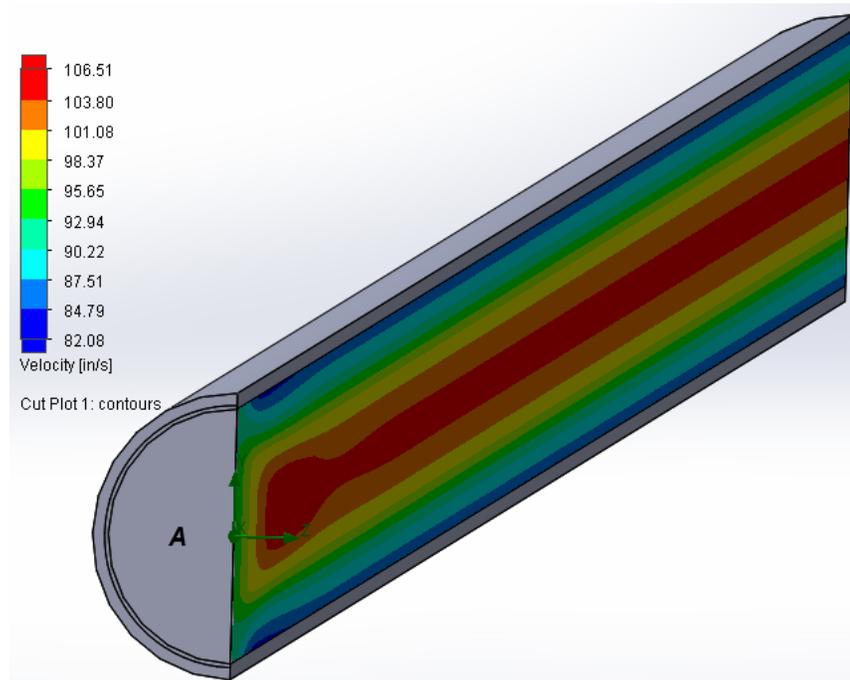


Figura 5.43. Distribución de los contornos de velocidad del fluido en el eje longitudinal de la geometría mediante la opción Cut Plots **A.** extremo de entrada **B.**

Como se puede ver en la imagen, la distribución del campo de velocidad del fluido lo representan también líneas rectas cuyo origen se da en el extremo **A**; estas líneas responden a intervalos de velocidad distribuido en el plano transversal de la geometría **Figura 5.44.**, en esta imagen se pueden apreciar los campos de baja, media y alta velocidad del fluido de trabajo que fluye por esta tubería, los cuales se encuentran representados por colores en la escala de intervalos de dicha variable.

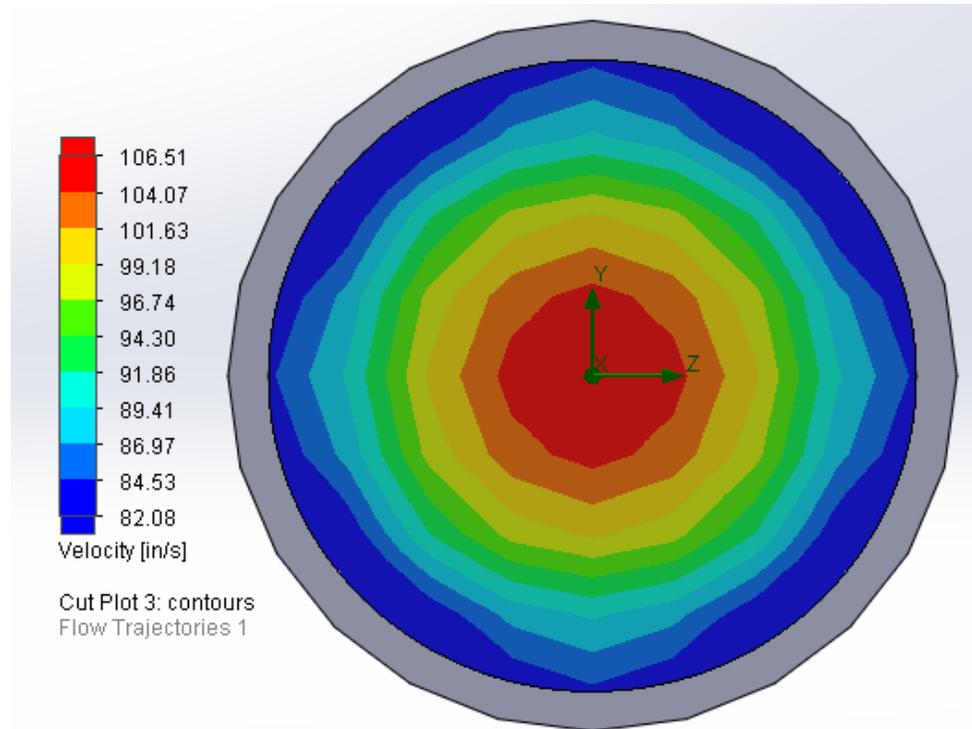


Figura 5.44. Distribución de los contornos de velocidad del fluido en el eje transversal de la geometría.

5.12.6. Análisis de sensibilidad de los resultados frente al tipo de mallado

En este apartado se prueba que tan sensible son los resultados obtenidos al correr la simulación utilizando un mallado nivel 1 **Figura 5.45.** y un mallado nivel 6 **Figura 5.46.** solo alterando el tamaño y consigo la cantidad de cuadrículas de la malla.

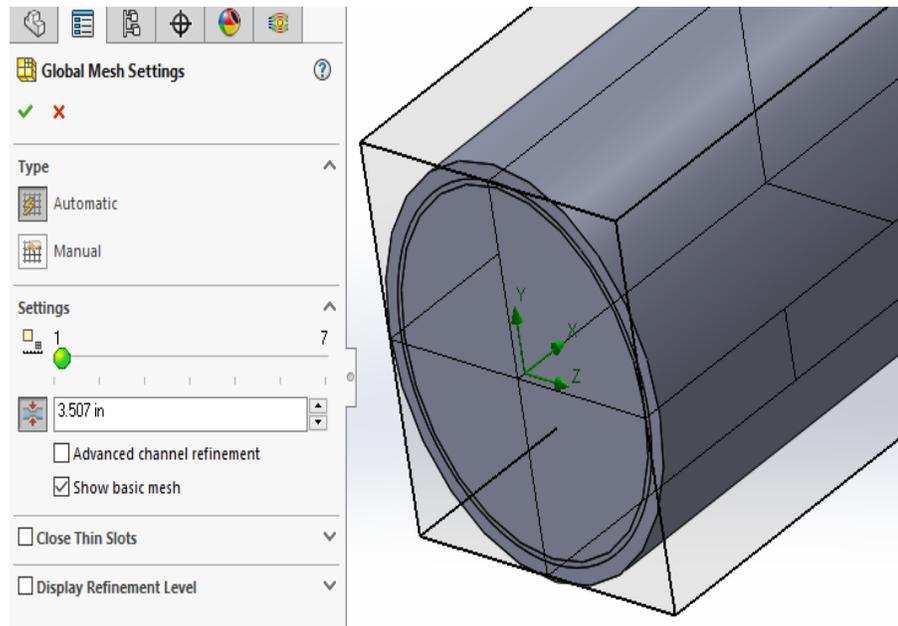


Figura 5.45. Configuración del mallado, mallado simple.

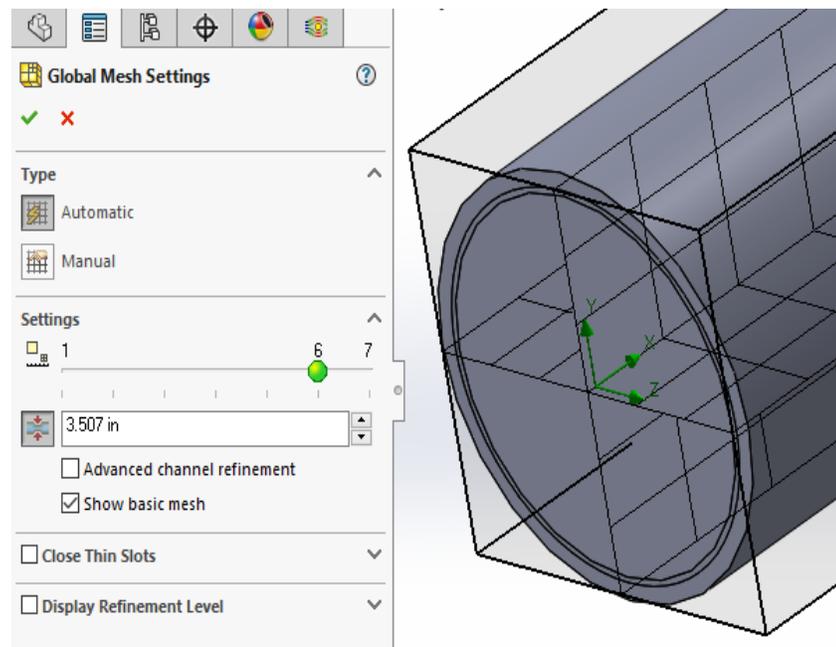


Figura 5.46. Configuración del mallado, mallado complejo.

En la **Tabla 5.5.** se muestran los resultados para la caída de presión de ambas simulaciones, el tiempo de cómputo, número de celdas e iteraciones.

Tipo de mallado	ΔP	Tiempo de computo	Numero de celdas	Iteraciones
Simple	5.5 <i>psi</i>	0: 0: 11	2,264	40
Por defecto	1.78 <i>psi</i>	0: 31: 44	264,288	166
Complejo	1.74 <i>psi</i>	12: 36: 9	1,207,128	204

Tabla 5.5. Resultados de las simulaciones con mallado simple, por defecto y complejo.

En la **Tabla 5.5.** se puede ver que la caída de presión de la simulación con el mallado por defecto fue de (1.78 *psi*), resultado con mayor proximidad a la validación teórica (1.81 *psi*) realizada por medio de la técnica propuesta por (Serrano et al., 2021) y aunque los resultados con el mallado complejo se ajustan también a los resultados teóricos, necesitaron de mucho más tiempo de cómputo para obtenerse.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Materiales

A continuación, se mencionan los materiales usados en el desarrollo de este proyecto y algunas de sus características más representativas.

6.1.1. Equipo y software

El equipo donde se ejecutaron las simulaciones fue un Lenovo con procesador Intel® Celeron® CPU 1005M @1.90 GHz 1.90GHz que cuenta con 4,00 GB de RAM instalada y cuyo sistema operativo es Windows 10 Pro de 64 bits. En cuanto al software SolidWorks, la universidad de la Guajira obtuvo mediante el distribuidor certificado ARON S.A.S., las licencias oficiales para la versión 2019-2020 con las cuales se trabajó.

Otras herramientas computacionales usadas fueron el gestor bibliográfico Mendeley Desktop versión 1.19.8; la Herramienta Recortes de Windows; el editor de imágenes Pixlr y algunos programas del paquete de Microsoft Office 2016 tales como Word y Excel.

6.1.2. Bases de datos bibliográficas y geométricas

La bibliografía consultada se encontró en línea mediante el uso de bases de datos como *ScienceDirect*, *Scopus*, *Springer*, *Taylor y Francis*, a las cuales tienen acceso todos estudiantes de la Universidad de La Guajira, también se consultaron fuentes de libre acceso como Google Académico y Microsoft Académico; igualmente, se consultaron algunos repositorios institucionales de Universidades como la Tecnológica de Pereira, la Pontificia Bolivariana, la de Antioquia, entre otras a nivel internacional.

El modelo CAD del MCI se tomó de la base de datos geométricas gratuita GrabCAD, la cual cuenta con una librería donde millones de usuarios pueden administrar, ver y compartir modelos CAD enfocados a muchas áreas de ingeniería.

6.2. Metodología

En este apartado se mencionan los aspectos concernientes al método que se empleara para poder ejecutar los requerimientos planteados en el objetivo de esta monografía.

6.2.1. Requerimientos para ejecutar una simulación CFD

Según el libro escrito por (Xamán & Gijón, 2015), una simulación CFD debe estar compuesta al menos por tres etapas básicas, las cuales son: Preproceso, Solver o Procesamiento y Postproceso; estas se ilustran en la **Figura 6.1.** junto a sus subetapas que, más adelante, se profundiza un poco sobre ellas.

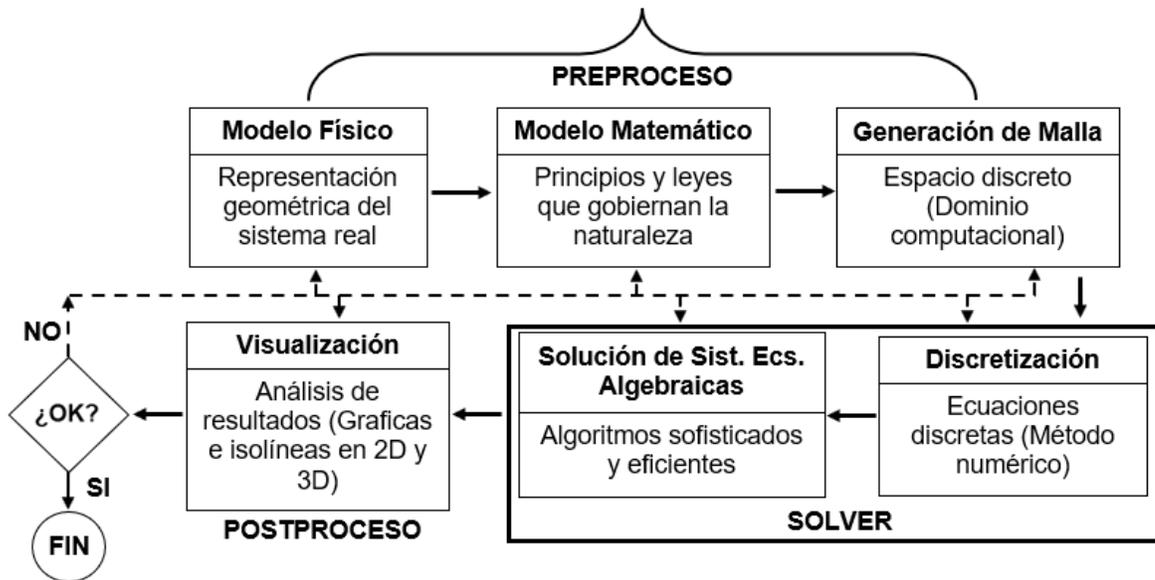


Figura 6.1. Etapas básicas del proceso de simulación CFD general. Tomado de (Xamán & Gijón, 2015).

Estas etapas permiten al programador preparar los datos de entrada, configurarlos en un software CFD y visualizar los resultados del problema, se debe mencionar que, si al final del proceso de simulación el programador o usuario no se encuentra satisfecho con los resultados, algunos softwares permiten rectificar o modificar datos en cualquier punto de dicho proceso.

6.2.1.1. Preproceso

Esta etapa está compuesta por las subetapas del modelo físico, modelo matemático y generación de la malla; prácticamente es la etapa donde se debe definir los datos de entrada en los términos que el software exige; se debe resaltar que esta etapa está sujeta a los requerimientos del software CFD por lo tanto puede presentar variaciones dependiendo del software con el que se trabaja.

En la subetapa del **modelo físico** se debe definir una geometría lo más realista posible, la cual se usará para estudiar detalladamente su comportamiento bajo ciertas circunstancias que también deben establecerse. La subetapa del **modelo matemático** está compuesta por el conjunto de ecuaciones que describe el fenómeno o fenómenos que se pretenden estudiar; en esta subetapa se deben establecer las condiciones de frontera, las condiciones iniciales y las propiedades físicas del medio en cuestión. En cuanto a la última subetapa **generación de la malla**, una malla numérica se define como un conjunto de puntos discretos o nodos cuya distribución sobre el modelo físico permiten la solución numérica de un grupo de ecuaciones diferenciales parciales, existen técnicas que permiten generar una malla adecuada para problemas en específico al igual que software que incorporan esta opción en automático.

6.2.1.2. Procesamiento

Esta etapa se asocia con la forma en cómo el software da solución al modelo matemático; en esta etapa intervienen conceptos de disciplinas como análisis numérico, fundamentos de matemáticas discretas y desarrollo de algoritmos. Una vez definida la etapa de pre proceso en términos que el software que se usa requiera, el programador solo debe dar la orden de ejecución y esperar los resultados, el tiempo de cómputo depende de factores como complejidad del modelo a resolver, recursos computacionales y puede tomar de horas a días.

La primera subetapa trata del **proceso de discretización**, en esta el software sustituye las ecuaciones diferenciales que describen el fenómeno de estudio por expresiones algebraicas mediante la aplicación

de técnicas numéricas tales como diferencias finitas, volúmenes finitos, elementos finitos, entre otras; con lo cual el modelo matemático se integra sobre la zona de estudio en la geometría (dominio de interés) formando así un sistema de ecuaciones algebraicas que posteriormente el software CFD soluciona en la siguiente subetapa **solución del sistema de ecuaciones algebraicas**.

6.2.1.3. Postproceso

En esta etapa del CFD el software arroja los datos de resultado, dependiendo de la capacidad de resolución que posea el visualizador se tendrán mejores condiciones para que el programador tenga un mejor entendimiento del fenómeno que se estudia, en esta etapa el software debe poder representar gráficamente la malla numérica, mapas de contornos de isolíneas, campos de velocidad, campos de presión, etc.

6.2.2. Diagrama de flujo específico para ejecutar una simulación CFD en SWFS

Anteriormente, en el apartado 5.13. se configuro una simulación de flujo simple en SWFS, lo cual, junto a la revisión de trabajos como (Rojas & Huaraz, 2018), (Tordini, 2019) sentaron las bases para crear el diagrama de flujo específico que se muestra en la **Figura 6.2.** donde se ilustra los requerimientos de las etapas de preproceso, procesamiento y postproceso que esta herramienta CFD tiene junto a sus subetapas y sus respectivos componentes.

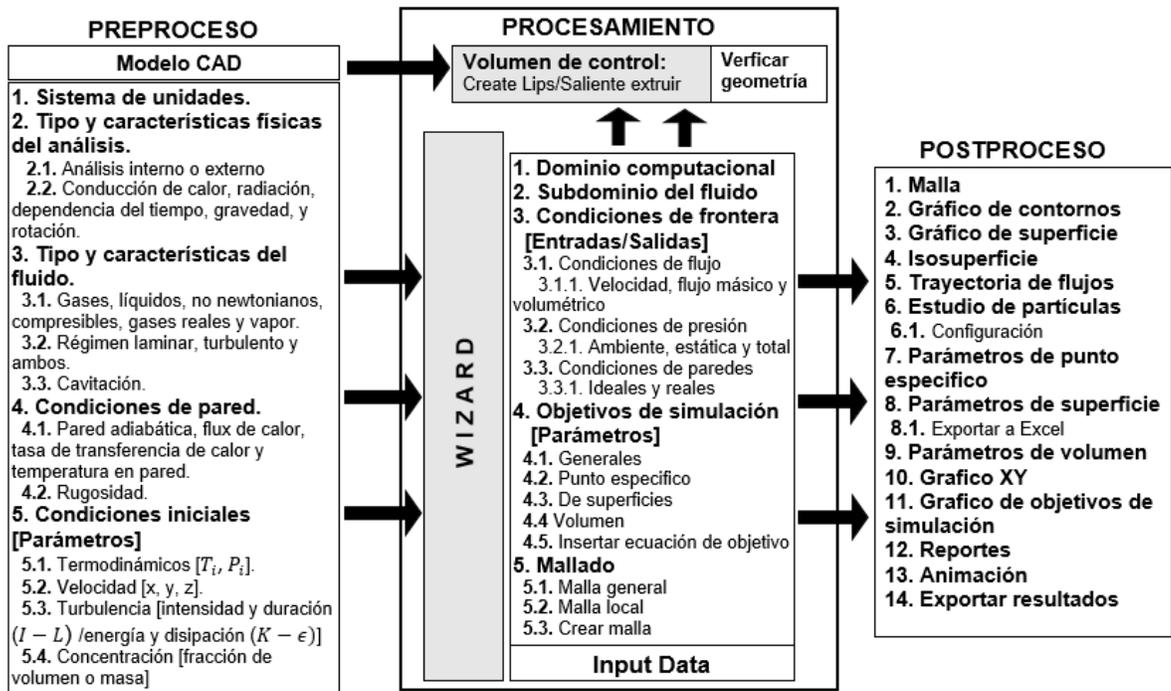


Figura 6.2. Flujo de trabajo específico del proceso de simulación CFD en SWFS.

6.2.2.1. Selección del modelo CAD

El uso de la base de datos geométricas GrabCAD como medida para evitar la etapa de modelado en este trabajo, trae consigo algunos desafíos que se relacionan con la compatibilidad de las extensiones de los modelos CAD y su posterior tratamiento en el entorno de SolidWorks, ya que algunas de dichas extensiones (STL, IGES, STEP, SLDPRT, entre otras) pueden ser reconocidas por este software independientemente de su fuente de creación (GrabCAD, 2021). En la **Figura 6.3.** se presenta un diagrama de flujo que ilustra el proceso de selección del modelo CAD y su posterior importación a la herramienta CFD de SolidWorks.

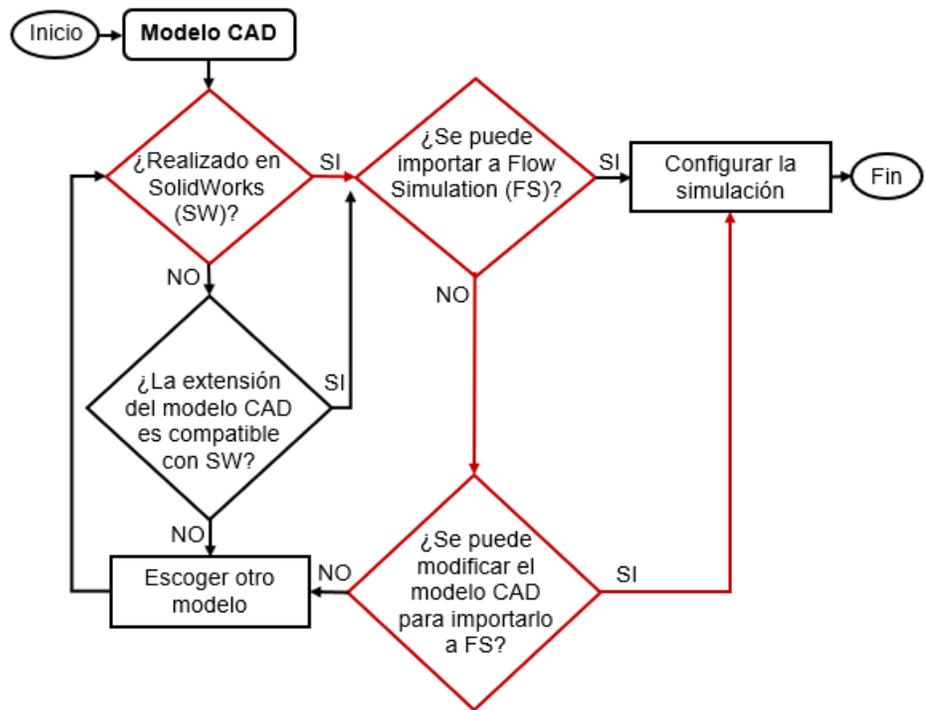


Figura 6.3. Proceso de selección de un modelo CAD reconocible por SWFS.

El modelo CAD seleccionado en esta monografía siguió la secuencia marcada con rojo, la dificultad que no permitió la importación directa al entorno de SWFS se presenta a continuación junto con su respectiva solución.

6.2.2.2. Tratamiento del modelo CAD pre configuración de la simulación

El modelo CAD que se ilustra en la **Figura 6.4.** se encontró en la base geométrica GrabCAD, este fue elaborado en la versión de SolidWorks 2021 y se encuentra disponible en las extensiones IGS, STEP, SLDPRT e imágenes PNG. No obstante, una vez superado el tema de la compatibilidad se presentó un inconveniente de reconocimiento al momento de importar el modelo al entorno de SWFS.

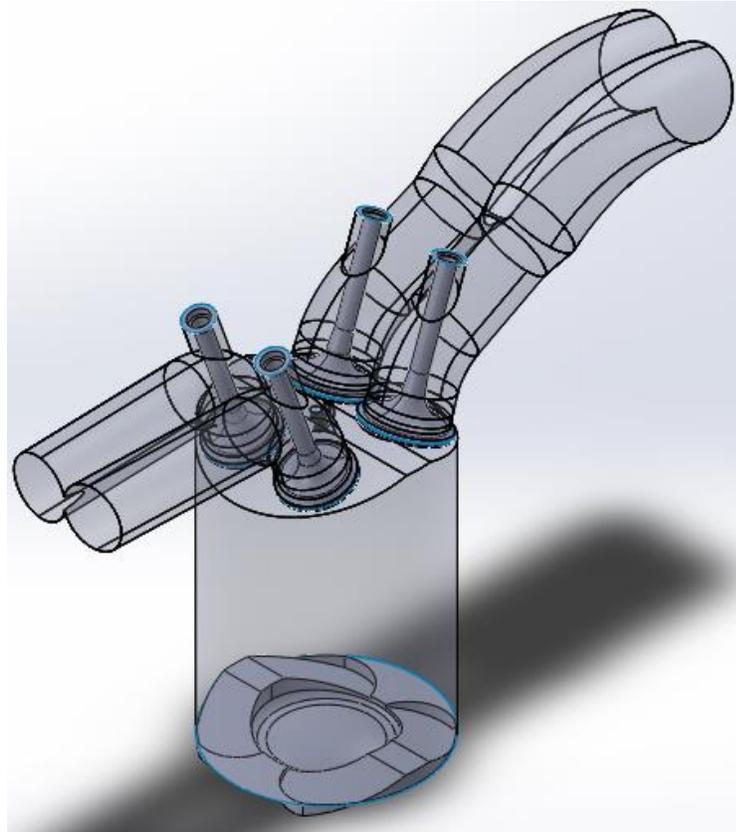
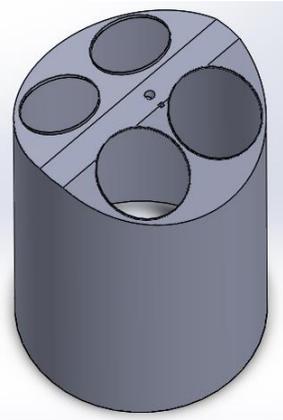
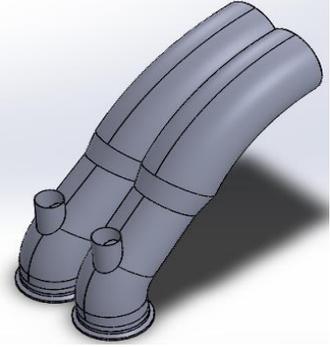
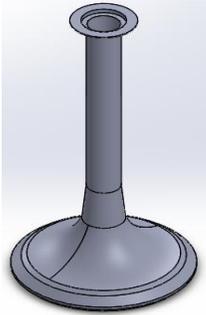
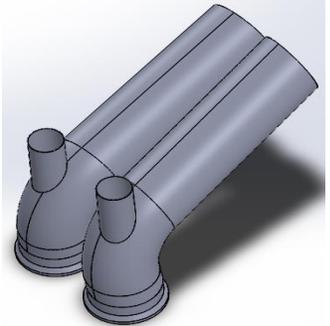
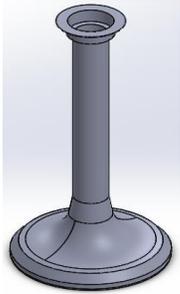


Figura 6.4. Modelo CAD proveniente de GrabCAD seleccionado para los análisis CFD de esta monografía.

Este modelo CAD cuenta con seis subcomponentes, los cuales están listados en la **Tabla 6.1.**

<p>Cilindro $L = 105,48 \text{ mm}$ $D_e = 71,90 \text{ mm}$</p>	
--	---

<p>Puerto de entrada (admisión)</p>	
<p>Válvulas de admisión $L = 51,89 \text{ mm}$ $d_m = 27,30 \text{ mm}$</p>	
<p>Puerto de salida (escape)</p>	
<p>Válvulas de escape $L = 51,19 \text{ mm}$ $d_m = 23,20 \text{ mm}$</p>	

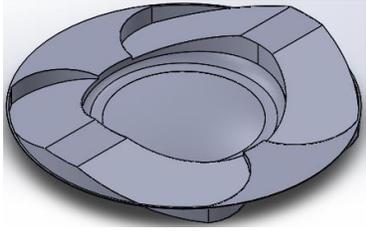
<p>Cabeza del pistón $D_e = 71,89 \text{ mm}$</p>	
---	--

Tabla 6.1. Subcomponentes del modelo CAD.

Cuando se intentó importar el modelo al entorno de SWFS, el software arrojó la advertencia de la **Figura 6.5**.

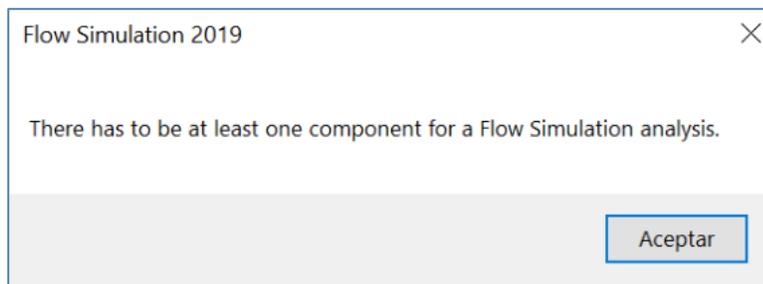


Figura 6.5. Advertencia “Tiene que haber al menos un componente para un análisis de simulación de flujo”.

La solución a este inconveniente, fue darle un valor de espesor (*que en este caso fue 0.15 mm*) a las paredes de todos y cada uno de los subcomponentes del modelo mediante la opción “*Superficies*” que incorpora SolidWorks dentro de sus herramientas, tal como se ilustra en la **Figura 6.6**. el espesor fue dado proporcionalmente a las dimensiones originales de los subcomponentes del modelo por lo que sus dimensiones funcionales no resultaron afectadas en este proceso.

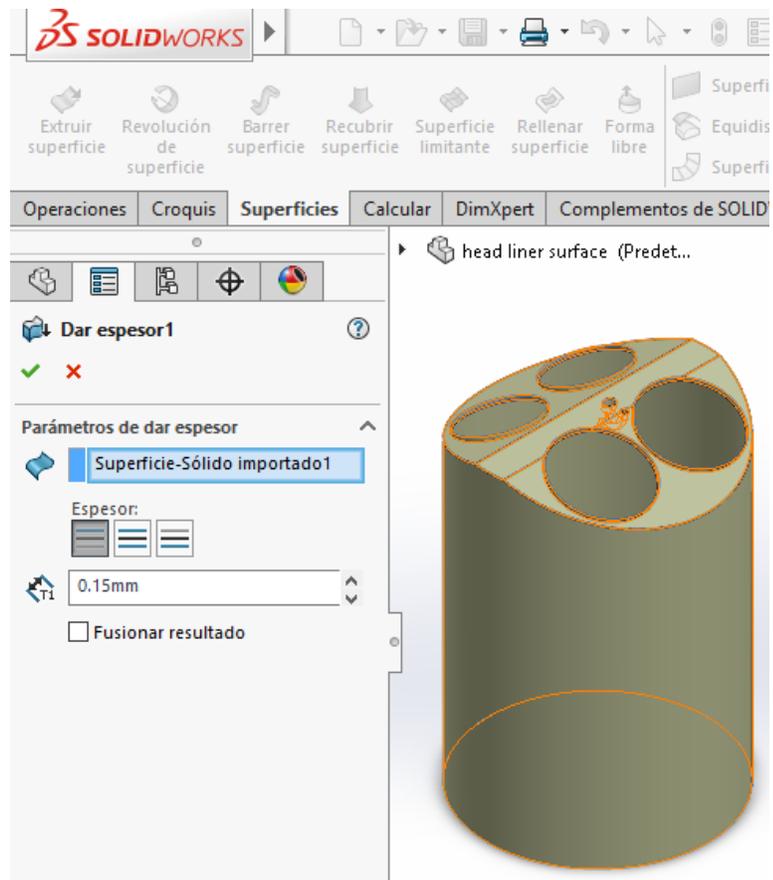


Figura 6.6. Interfaz de la opción Superficies de SolidWorks por medio la cual fueron tratados todos y cada uno de los subcomponentes del modelo CAD.

6.2.3. Escenarios de interés para la simulación CFD

Ya se cuenta con una descripción conceptual de los escenarios de interés en el apartado 5.7. los cuales son colector de admisión, cámara de combustión y colector de escape. En la **Figura 6.7.** se ilustra lo que sería la representación gráfica de cada uno de estos en el modelo CAD.

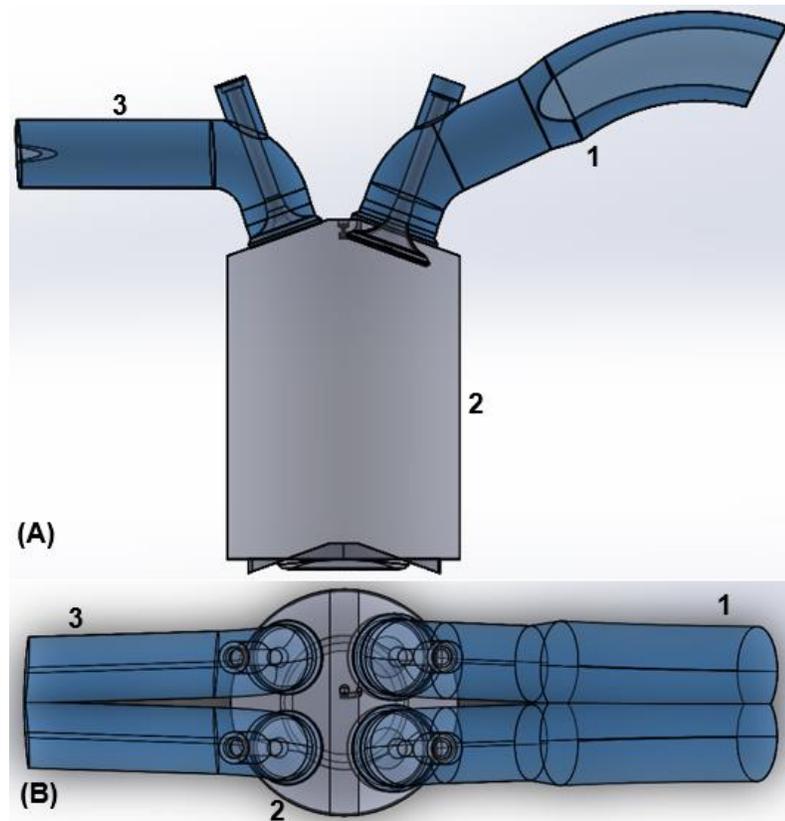


Figura 6.7. Escenarios de interés 1. Colector de admisión, 2. Cilindro (cámara de combustión) y 3. Colector de escape; vistos desde (A) plano lateral y (B) plano alzado.

En la imagen de la figura anterior, es posible ubicar los planos de los campos de velocidad Swirl (plano lateral) y Tumble (plano alzado), fenómenos que fueron descritos en la sección 5.9., debido a la influencia que tienen dichos campos en las prestaciones del motor, estos planos pueden facilitar la comprensión de su fenomenología (Quora, 2015).

6.2.3.1. Variables de interés

Teniendo en cuenta los requerimientos del flujo de trabajo específico del proceso de simulación CFD en *SWFS* y considerando el trabajo de (Scaggion, 2018) como guía, las variables dependientes e independientes a considerar en esta monografía se listan en la **Tabla 6.2.**

Variables Independientes	Colector admisión	Cámara combustión	Colector escape
($\Delta P = 5000 \text{ pa}$) con respecto a la presión atmosférica	X		
Apertura de válvulas ($h = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \text{ y } 7 \text{ mm}$)	X		
Apertura de válvulas ($h_{esc} = 1, 5 \text{ y } 10 \text{ mm}$)			X
Temperatura ($T = 313 \text{ K}$)	X		X
Variables dependientes	Colector admisión	Cámara combustión	Colector escape
Campos de velocidad del fluido	X		X
Campos de presión	X		X
Flujo másico	X		X
Coeficiente de descarga C_d	X		

Tabla 6.2. Variables independientes y dependientes a considerar en los escenarios de interés.

El C_d no figura como un objetivo de simulación en el entorno de SWFS, por lo que debe ser calculado manualmente mediante la ecuación 15, este coeficiente permite conocer la eficiencia entre el desempeño de las válvulas y el proceso de renovación de la carga, cuyos efectos repercuten en las prestaciones del motor, dicho coeficiente esta dado por la relación entre el flujo masico \dot{m}_{real} , el cual se calculará mediante la simulación en SWFS y el flujo masico \dot{m}_{is} , que será calcula de forma manual.

$$C_d = \frac{\dot{m}_{real}}{\dot{m}_{is}} = \frac{\dot{m}_{real}}{\left[A_{ref} \cdot \rho_{01} \cdot \alpha_{01} \cdot \phi \frac{P_2}{P_{01}} \right]} \quad (15)$$

Donde:

$\rho_{01} = 1.156 \text{ kg/m}^3$ (densidad del aire).

$\alpha_{01} = 354 \text{ m/s}$ (velocidad del sonido).

P_{01} : Presión aguas arriba.

P_2 : Presión aguas abajo.

A_{ref} es el área de referencia y se expresa mediante la ecuación 16, dicha área varía según la apertura h de la válvula; d_m representa el diámetro de la válvula.

$$A_{ref} = \pi d_m h \quad (16)$$

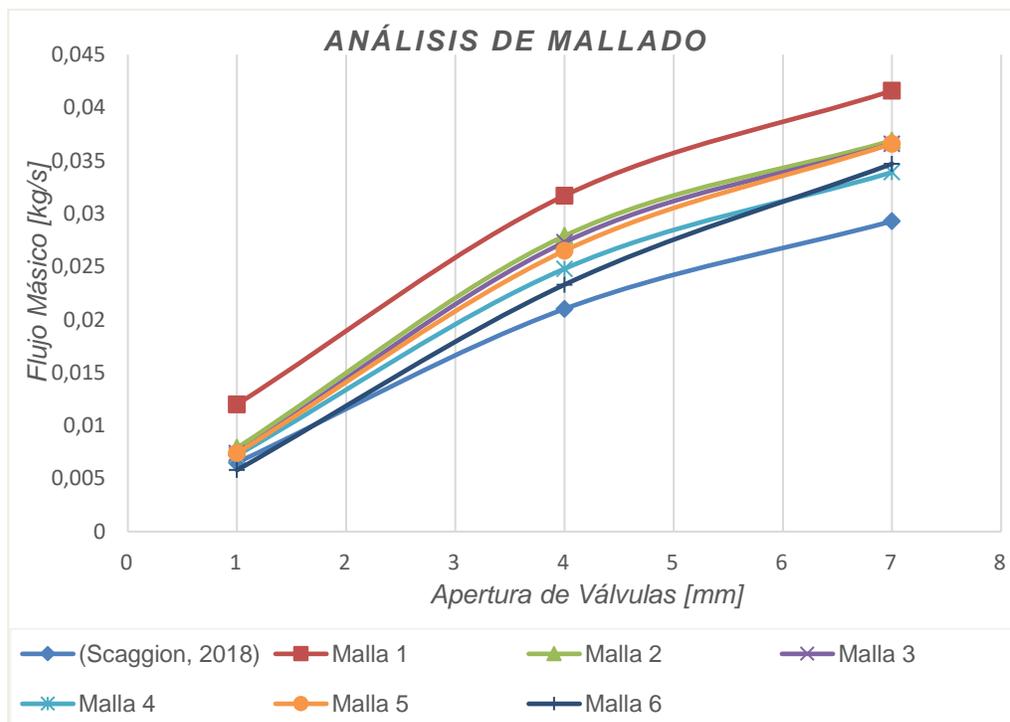
$\phi \frac{P_2}{P_{01}}$ es la función de flujo compresible y esta expresada como se ve en la ecuación 17, donde k es la relación de calores específicos y es igual a 1.4 (Cengel & Boles, 2005).

$$\phi \frac{P_2}{P_{01}} = \sqrt{\frac{2}{k-1} \left(\frac{P_2}{P_{01}}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_{01}}\right)^{\frac{k+1}{k}}} \quad (17)$$

6.2.4. Mallado

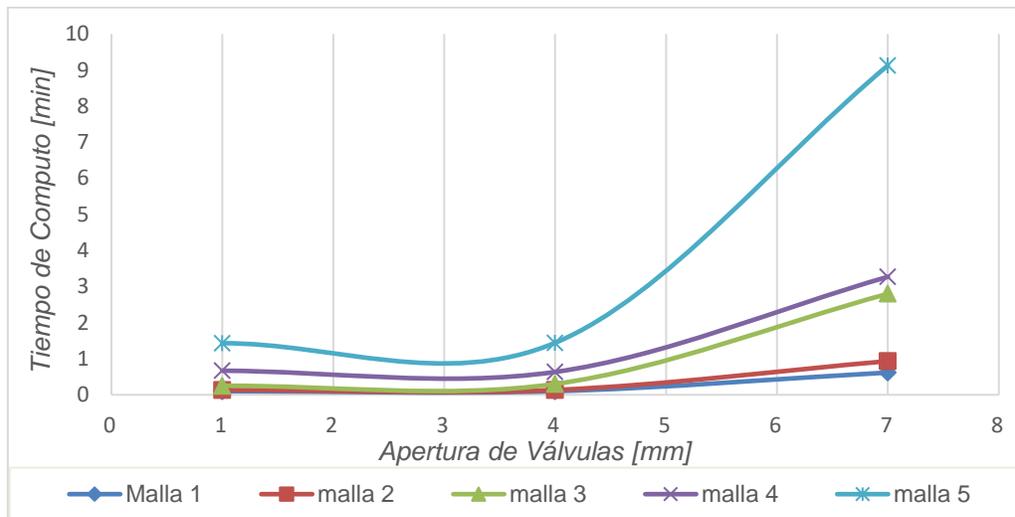
El mallado en SWFS se puede aplicar de dos formas, la primera es global, la cual incluye todo el dominio computacional y es posible definir su escala entre 1 (celdas más grandes) y 7 (celdas más pequeñas) y la segunda, es local e igualmente su escala es definible, esta opción consta de una malla que incluye una región específica de dicho dominio, siendo este mallado más avanzado que el global, debido a su uso principalmente en áreas claves de flujos de fluidos o en geometrías de modelos sumamente complejos (Scott Wallace, 2017)

Según lo mencionado por (Colangelo, 2016), la opción de mallado automático resulta suficiente para la mayoría de las simulaciones de flujo en esta herramienta CFD; no obstante, para fines prácticos, se decidió poner a prueba el nivel de convergencia que puede ofrecer la opción de mallado global automático que incorpora SWFS, al comparar los resultados de caudal másico para varios niveles de malla con los resultados de esta variable obtenidos por (Scaggion, 2018) con las aperturas de válvulas $h = 1, 4$ y 7 mm , lo cual se ilustra en la **Gráfica 6.1**.



Gráfica 6.1. Análisis de mallado: nivel de convergencia que ofrece la opción de malla global automática de SWFS para las variables de referencia Flujo Másico – Apertura de Válvulas.

Tal como se observa, todas las configuraciones de malla tienden a converger para $h = 1 \text{ mm}$ (excepto la malla 1), divergiendo luego, de forma significativa, para las aperturas de válvula $h = 4 \text{ y } 7 \text{ mm}$ a excepción de la malla 6, donde la magnitud de flujo masico para $h = 1 \text{ mm}$ está por debajo de la referencia. No obstante, la configuración de **malla 4** es la que mejor se ajusta a los resultados de referencia, por lo que se decide trabajar con dicha configuración. En la **Gráfica 6.2.** se ilustran los tiempos de cómputo para los niveles de malla 1, 2, 3, 4 y 5, en cuanto al nivel de malla 6, no fue posible graficarlo debido al tiempo que este requiere, el cual oscila entre los 57 min y 223 min ; SWFS incluye también, un nivel de malla 7, el cual requiere de mucho tiempo y recursos computacionales, pero con base al nivel de convergencia y tiempo de cómputo del mallado nivel 6 se puede concluir que un mayor tiempo de cómputo no es sinónimo de en mayor grado de convergencia para este caso.



Gráfica 6.2. Tiempos de cómputo para los niveles de malla 1, 2, 3, 4 y 5.

El tiempo de cómputo para el mallado 4 es aceptable para el nivel de convergencia que este ofrece. En la **Tabla 6.3.** se especifica la cantidad de celdas que tiene el mallado nivel 4, y en las **Figuras 6.8, 6.9, 6.10, y 6.11** se ilustra la distribución del mallado seleccionado por zonas de interés en el modelo CAD.

Apertura de válvulas [mm]	Malla nivel 4, cantidad de celdas
1	Totales: 27,052; Fluidas:12,162; Solidas:14,890; Parciales:7,861.
4	Totales: 27,159; Fluidas:12,354; Solidas:14,805; Parciales:7,861.
7	Totales: 27,175; Fluidas:12,485; Solidas:14,690; Parciales:7,807.
<i>Celdas promedio,</i> Totales: 27,128; Fluidas:12,333; Solidas:14,795; Parciales:7,843.	

Tabla 6.3. Cantidad de celdas totales, fluidos, fluidos en contacto con solido; malla nivel 4.

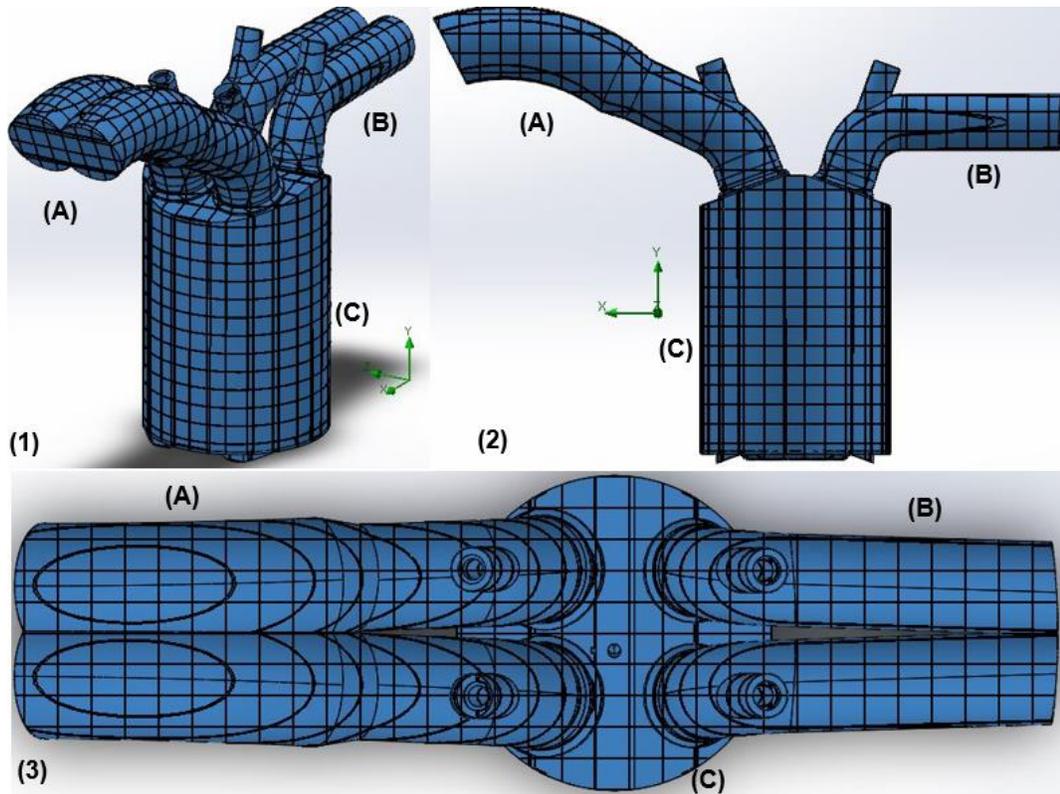


Figura 6.8. Distribución de malla automática nivel 4 en los planos (1), (2) y (3) que incluyen (A) colector de admisión, (B) colector de escape y (C) cilindro.

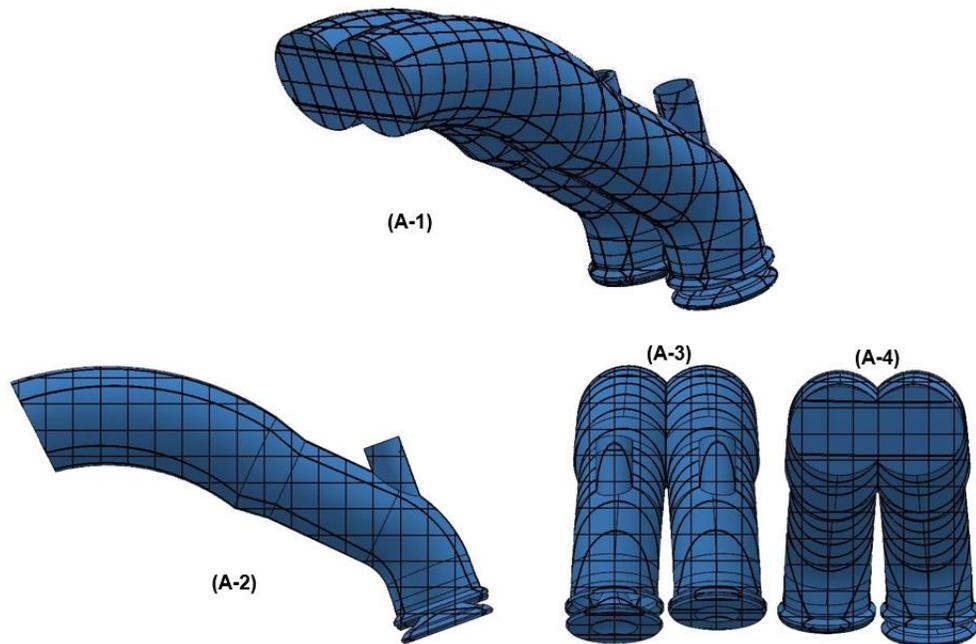


Figura 6.9. Distribución de malla automática nivel 4 por el colector de admisión ilustrada en diferentes planos.

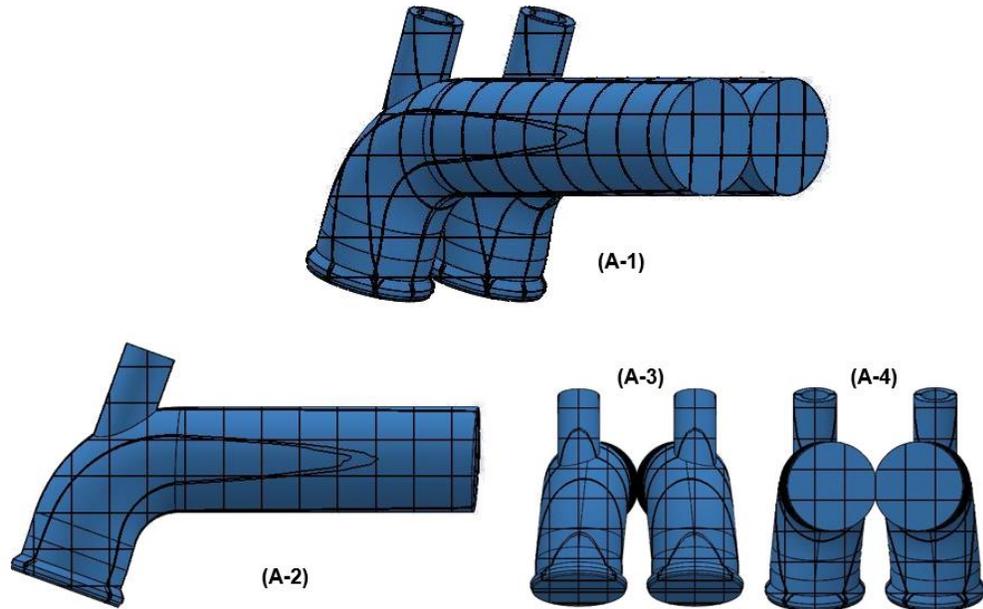


Figura 6.10. Distribución de malla automática nivel 4 por el colector de escape ilustrada en diferentes planos.

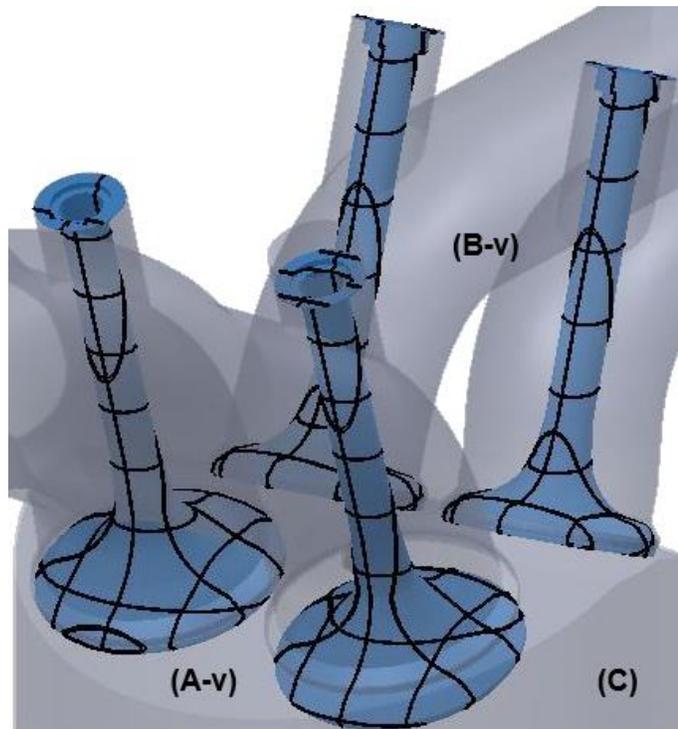


Figura 6.11. Distribución de malla automática nivel 4 por zona de válvulas de admisión (A-v) y de escape (B-v).

7. DESARROLLO DEL PROYECTO

A continuación, se compilan los resultados más significativos de este trabajo de con relación a los escenarios planteados.

7.1. Sobre la simulación del colector de admisión

Siguiendo la misma secuencia de configuración en SWFS ilustrada en la sección 5.12. y considerando el flujo de trabajo específico del proceso de simulación para el colector de admisión en Flow Simulation, a continuación, se ilustran los resultados obtenidos.

7.1.1. Flujo de trabajo específico

El la **Figura 7.1.** se ilustra el flujo de trabajo construido con base en el trabajo de (Scaggion, 2018), con el cual, se ejecutó la simulación concerniente al escenario del colector de admisión.

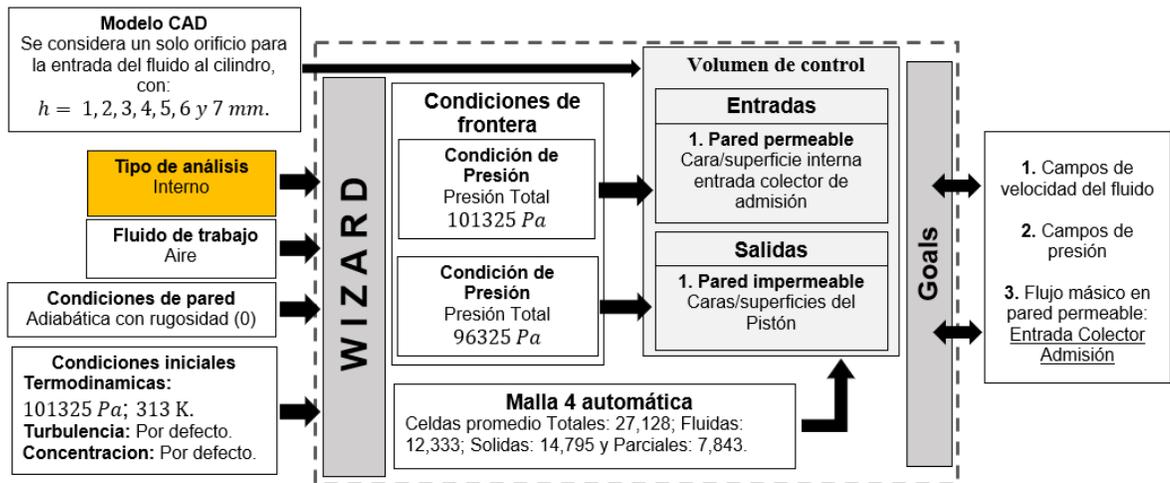


Figura 7.1. Flujo de trabajo específico del proceso de simulación CFD en SWFS para el colector de admisión.

7.1.2. Resultados cualitativos

Para la representación de los **campos de velocidad** y considerando los fenómenos descritos en el apartado 5.9, en la imagen de la **Figura 7.2.** se ilustra el plano de acción del campo *Swirl* (**b**), cuyo eje de rotación es paralelo al eje del cilindro y el plano de acción del campo *Tumble* (**a**), que se da de forma perpendicular al eje del cilindro (El-Adawy et al., 2021). Para

efectos del presente estudio, el plano Tumble a_1 se considerará a 15 mm del punto de referencia. En cuanto a los planos Swirl b_1 y b_2 estarán a 10 mm y 45 mm de la referencia.

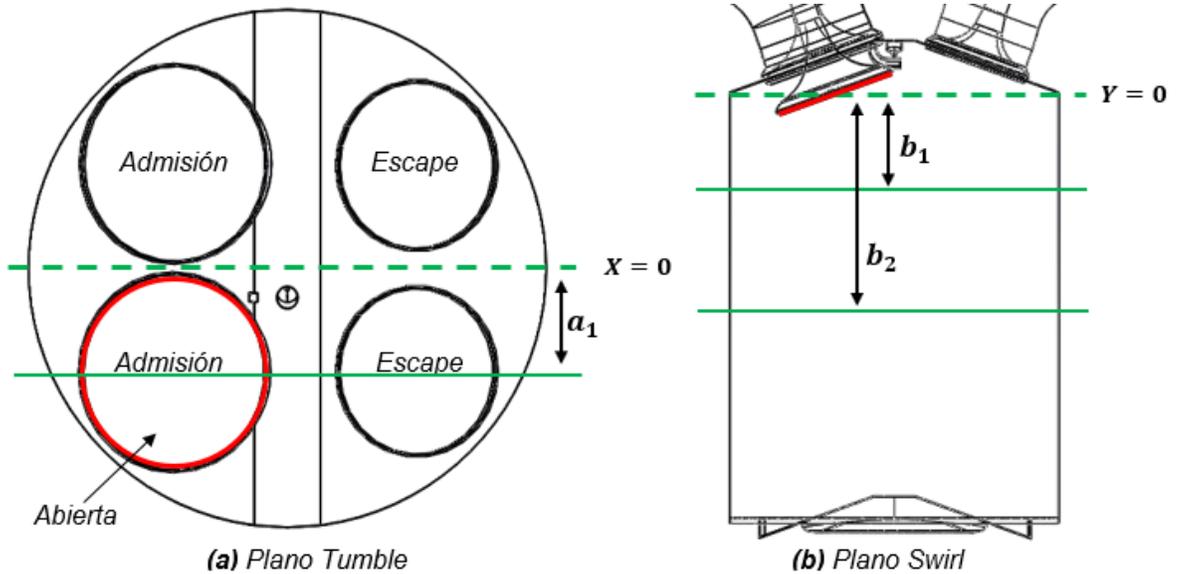
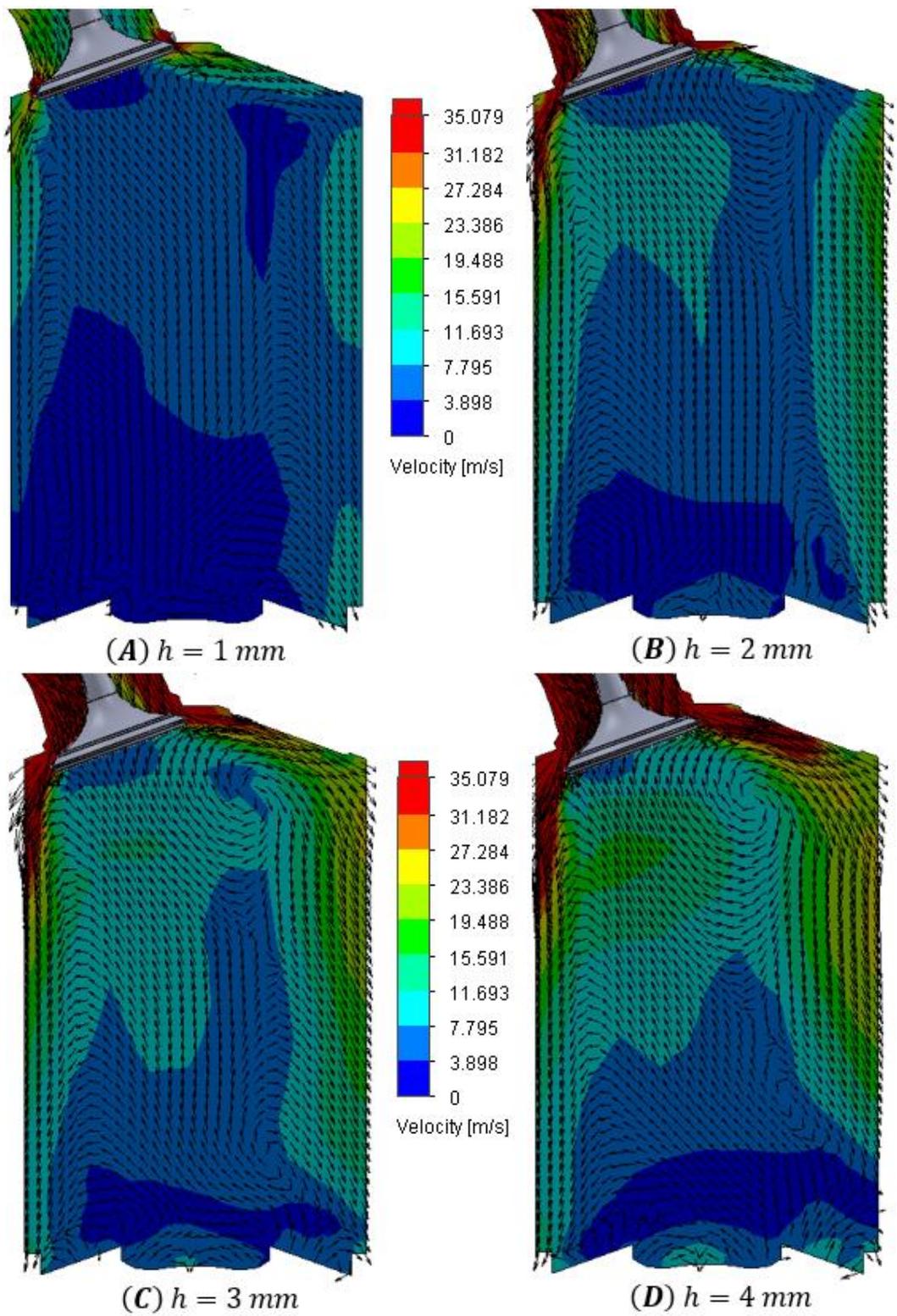


Figura 7.2. Planos de acción de los campos de velocidad Tumble y Swirl. Consideraciones para el presente estudio $a_1 = 15 \text{ mm}$, $b_1 = 10 \text{ mm}$ y $b_2 = 45 \text{ mm}$.

La evolución de los campos de velocidad en el plano Tumble se ilustran en la **Figura 7.3**. para todo el rango de apertura de la válvula de admisión; es evidente el aumento del efecto Tumble a medida que la apertura de válvula es mayor; en las aperturas (A) $h = 1 \text{ mm}$, (B) $h = 2 \text{ mm}$, (C) $h = 3 \text{ mm}$, (D) $h = 4 \text{ mm}$ y (E) $h = 5 \text{ mm}$ se evidencia el desarrollo de un vórtice en las cercanías del PMS y un segundo vórtice, este de menor intensidad, cerca al *Bowl* del pistón el cual se va trasladando hacia el centro del cilindro hasta desvanecerse en la apertura (F) $h = 6 \text{ mm}$, en esta última apertura de válvula, se observa cómo se desarrolla un tercer vórtice en la parte izquierda superior del cilindro, de igual intensidad que el primero en desarrollarse, en cuanto a la apertura de válvula (G) $h = 7 \text{ mm}$ se puede ver como estos vórtices favorecen a la distribución del fluido de aire por todo el cilindro reduciendo así la zona de baja velocidad.



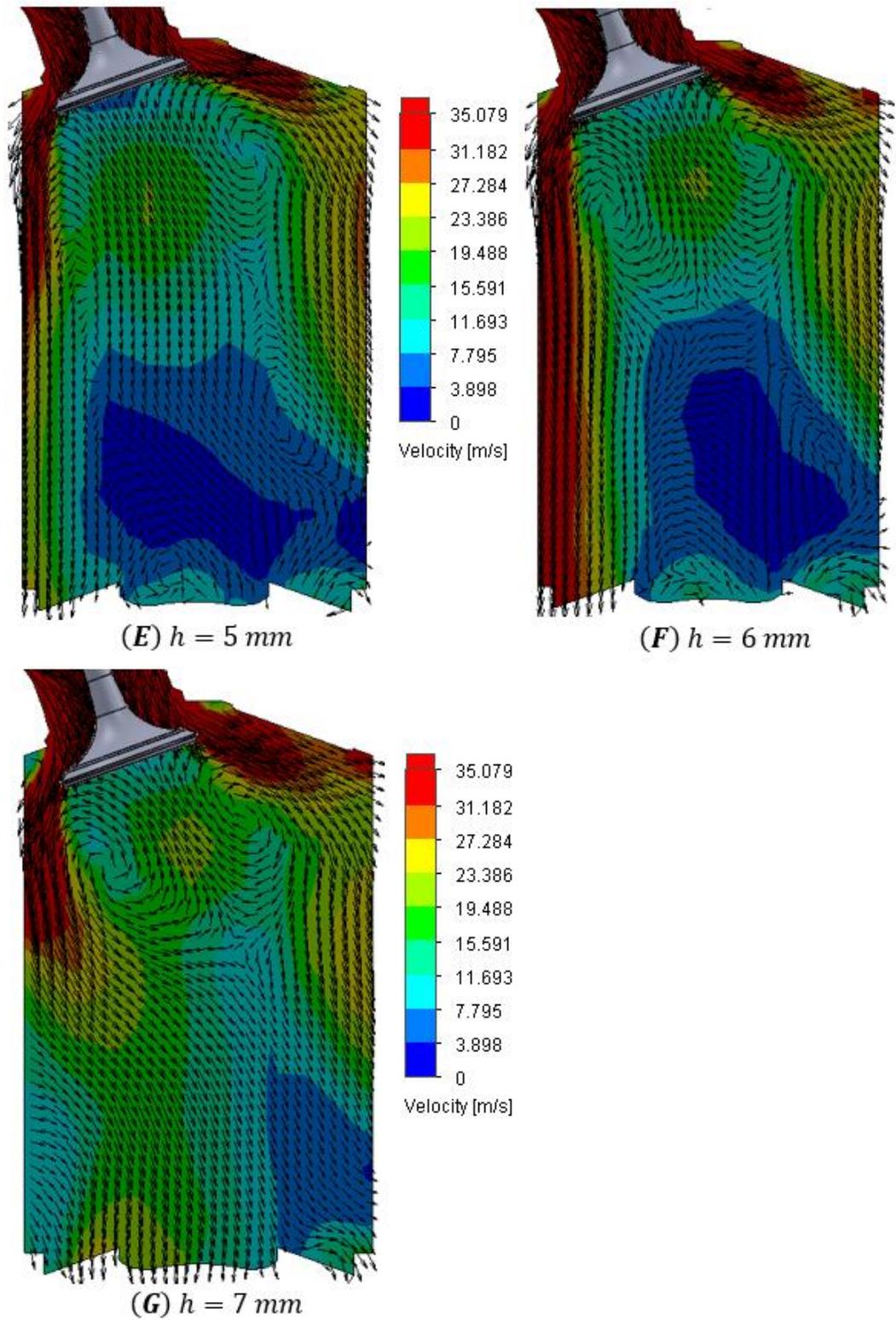
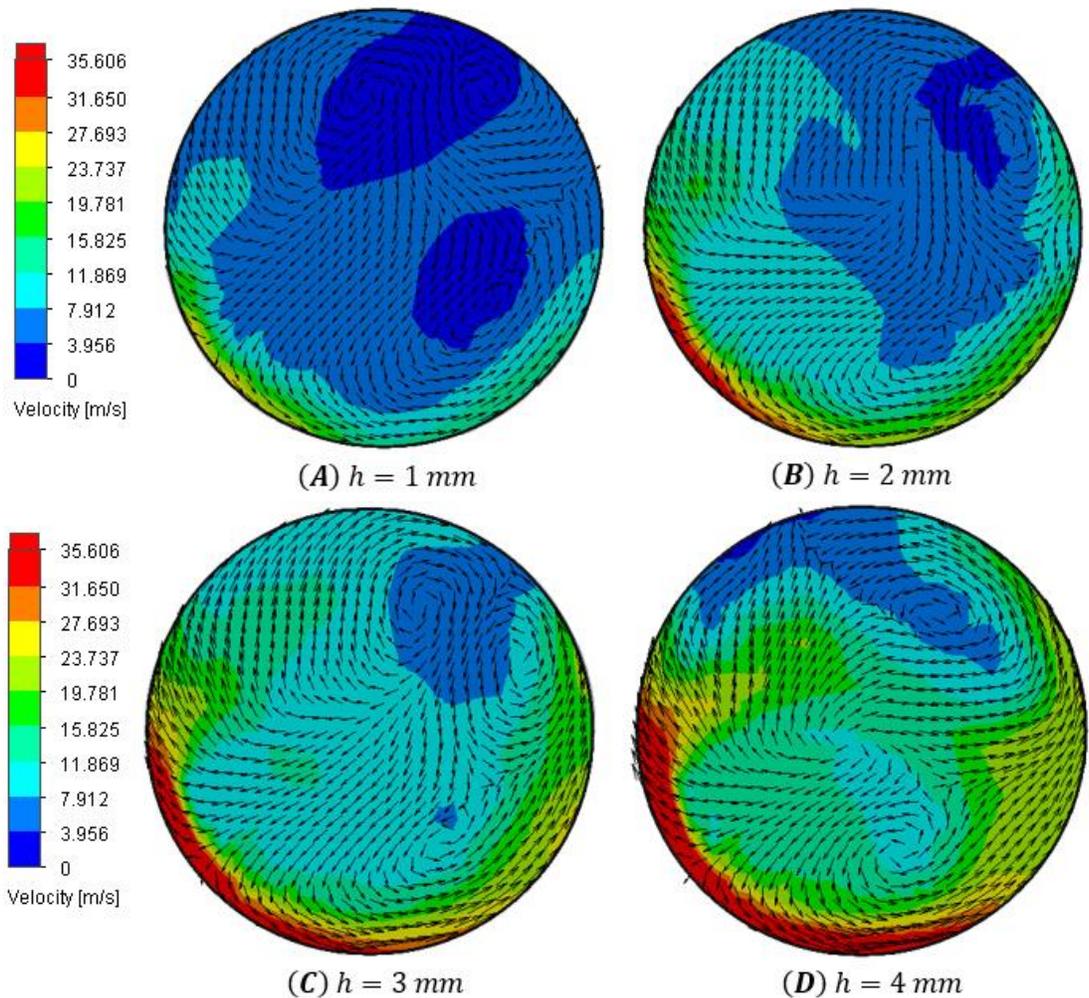


Figura 7.3. Desarrollo de los campos de velocidad en el plano Tumble para todo el rango de aperturas h de la válvula de admisión.

En la **Figura 7.4.** se reflejan los efectos del campo de velocidad en el plano Swirl ubicado a 10 mm del PMS, considerando la ubicación de la válvula de admisión abierta, es posible apreciar el aumento de velocidad en esa parte a medida que la apertura h se hace más grande, también se puede evidenciar la formación de vórtices más definidos en las zonas de baja velocidad para $h = 1, 2, 3$ y 4 mm en cuanto a las demás aperturas de válvulas, es posible ver como los vórtices de mayor intensidad se desplazan por el eje longitudinal del cilindro, eliminando por completo las zonas de baja velocidad para $h = 7$ mm y contribuyendo a la homogeneización de la mezcla.



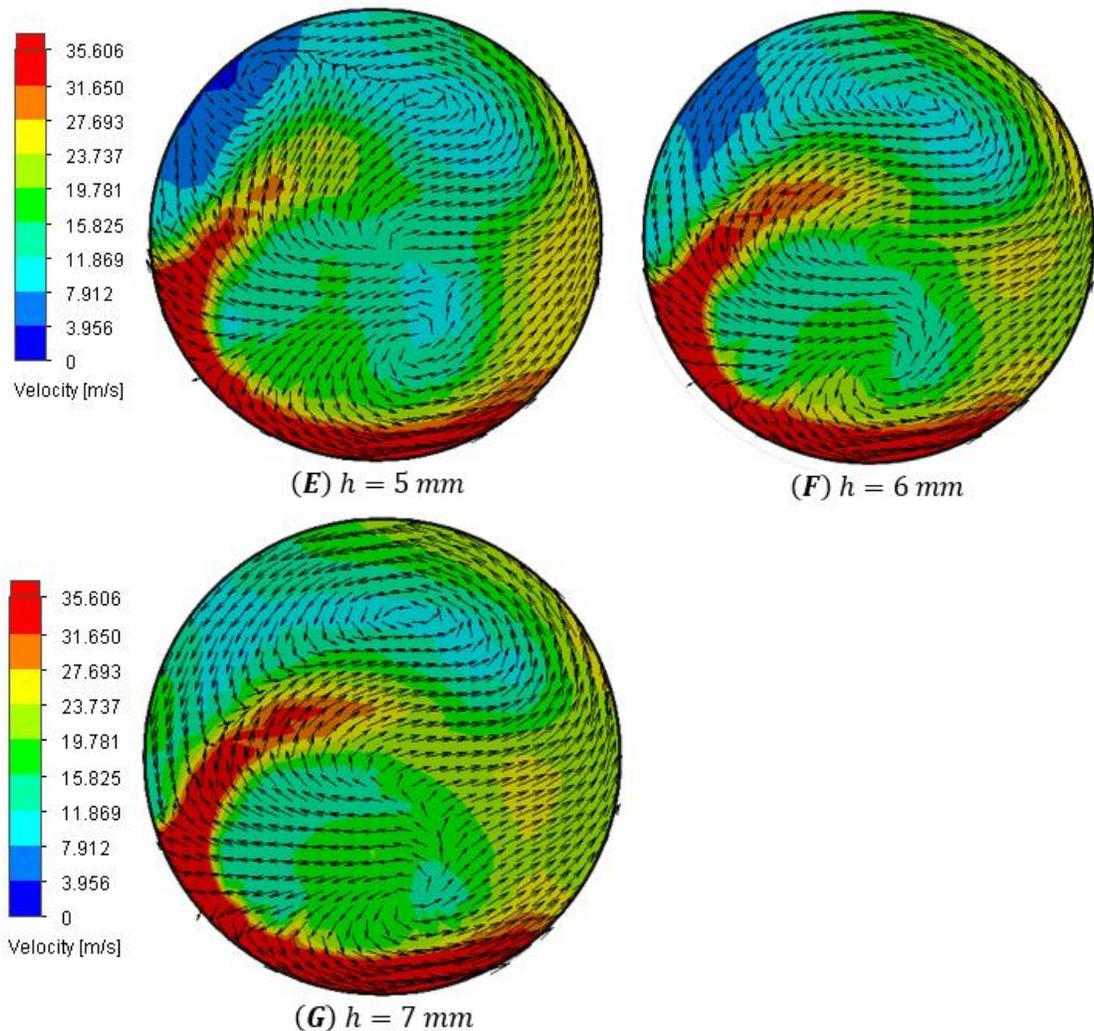
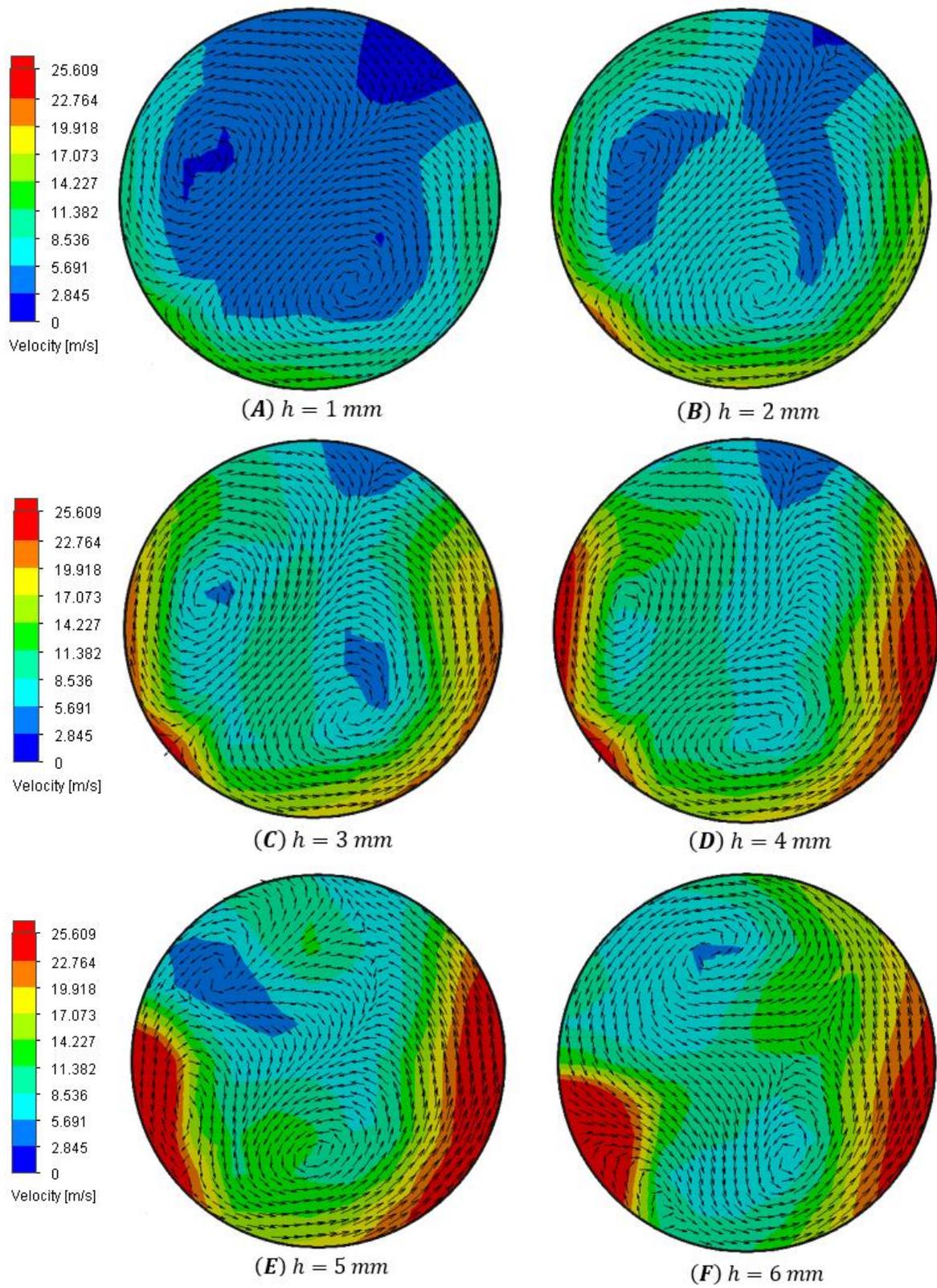


Figura 7.4. Desarrollo de los campos de velocidad en el plano Swirl $b_1 = 10 \text{ mm}$ considerando todo el rango de aperturas h de la válvula de admisión.

La **Figura 7.5.** ilustra el desarrollo del campo de velocidad en el plano Swirl a 40 mm del PMS, aunque el rango de velocidad disminuye en este caso, la formación de estructuras de flujo es más ordenada que en el plano $b_1 = 10 \text{ mm}$ para las cuatro primeras aperturas, para las aperturas $h = 5, 6$ y 7 mm con el incremento de la velocidad en el flujo del fluido se aprecia como los vórtices existentes desplazan las zonas de baja velocidad contribuyendo a la distribución del flujo de aire en todo el eje longitudinal del cilindro.



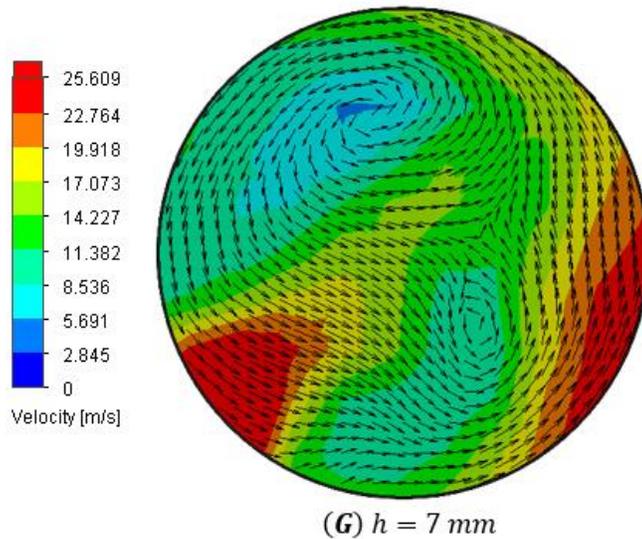


Figura 7.5. Desarrollo de los campos de velocidad en el plano Swirl $b_2 = 40 \text{ mm}$ considerando todo el rango de aperturas h de la válvula de admisión.

La presencia de estos fenómenos al interior del cilindro, juega un papel dominante en aspectos como la formación de la mezcla, el guiado de la mezcla hacia la bujía y la turbulencia del flujo; ambos fenómenos se originan en la carrera de admisión, el Tumble es capaz de mejorar la turbulencia en las proximidades de la bujía y a su vez, permite homogeneizar el campo de velocidad turbulenta, lo cual se pudo apreciar en la **Figura 7.3.**; mientras que el Swirl mejora la distribución de la mezcla aumentando la velocidad de propagación en las cercanías de las paredes del cilindro, ilustrado en las **Figura 7.4. y 7.5.**; este último efecto, tiende a aumentar su intensidad en las cercanías del PMI, razón por la cual, en la **Figura 7.5.** se pudieron apreciar la formación de estructuras de flujo más ordenas en todo el eje longitudinal del cilindro (Vázquez & De la Morena, 2019).

Aunque para este escenario no fue posible incluir el movimiento del pistón, el cual, al trasladarse del PMS al PMI genera una depresión (inducción) que permite la entrada del fluido al cilindro a través del ducto de admisión; en la **Figura 7.6.** se pueden apreciar los efectos de **los campos de presión** gracias a la diferencia de presiones que se pudo configurar para esta simulación; estas graficas ilustran el ingreso del aire al cilindro.

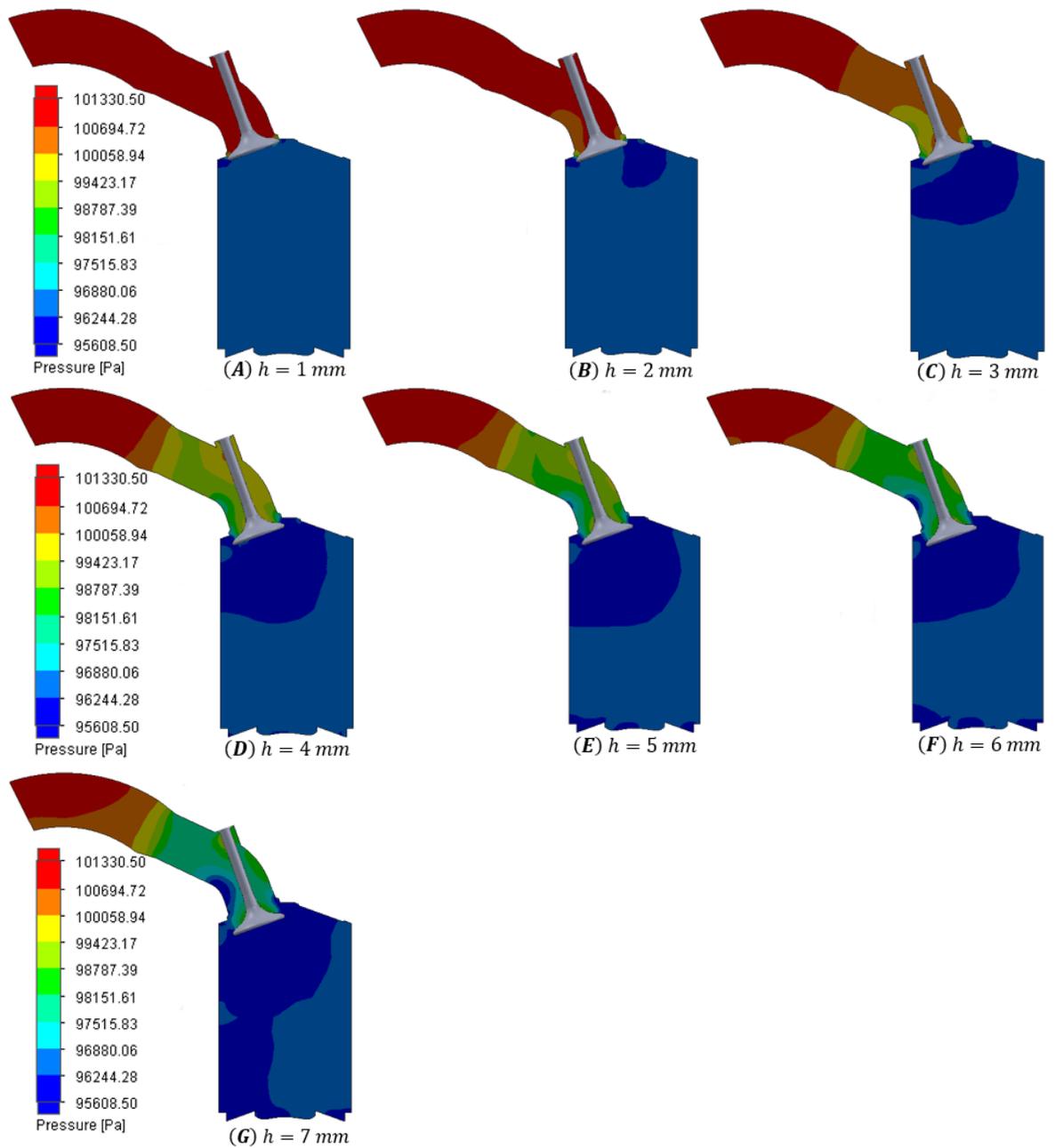
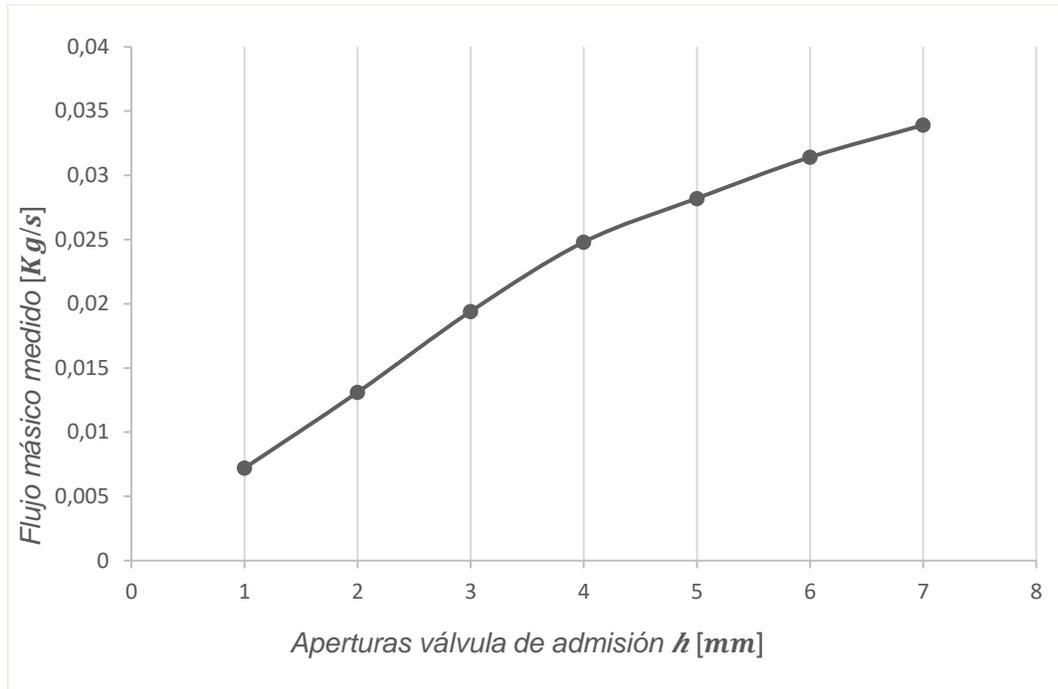


Figura 7.6. Distribución del campo de presión en la carrera de admisión para todo el rango de aperturas h de la válvula de admisión.

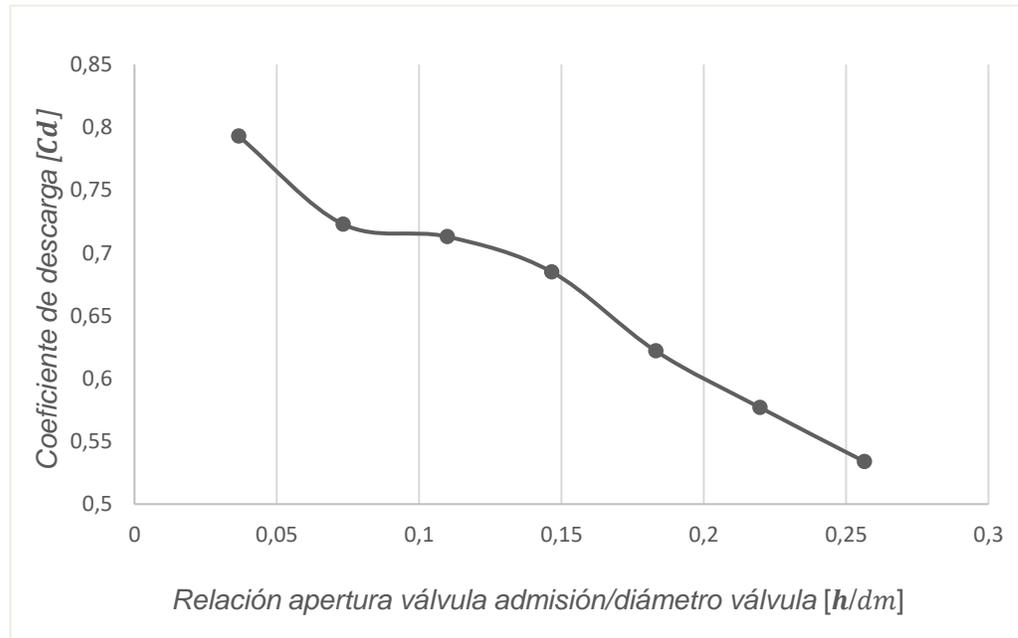
7.1.3. Resultados cuantitativos

Las variables dependientes seleccionadas para este escenario fueron el **flujo másico** y el **coeficiente de descarga**, en la **Gráfica 7.1.** se puede observar el comportamiento del caudal másico a medida que la apertura de válvula crece.



Gráfica 7.1. Comportamiento del flujo másico medido en las aperturas de válvulas $h = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ y 7 mm.

El aumento del flujo de aire se da debido a que el área mínima de paso crece a medida que aumenta la apertura de válvula y la obstrucción que dificulta el paso del fluido disminuye. En la **Gráfica 7.2.** se ilustra la relación existente entre el coeficiente C_d , la apertura de válvulas h y el diámetro d_m .



Grafica 7.2. Relación entre el coeficiente de pérdida C_d y apertura válvula/diámetro válvula.

Al graficar esta relación, es posible apreciar la tendencia a disminuir que presenta el C_d cuando aumenta la apertura h , lo cual es producto del aumento que presenta el área de referencia según (Scaggion, 2018). La **Tabla 7.1.** reporta las magnitudes del caudal masico a la entrada del colector obtenidas mediante la simulación en SWFS y también, las magnitudes del coeficiente de descarga C_d calculadas mediante la ecuación (15) con respecto a cada apertura de válvula considerada.

Aperturas válvula de admisión h [mm]	Flujo másico [Kg/s]	Coefficiente de descarga [C_d]
1	0,0072	0,793
2	0,0131	0,723
3	0,0194	0,713
4	0,0248	0,685
5	0,0282	0,622
6	0,0314	0,577
7	0,0339	0,534

Tabla 7.1. Magnitudes del flujo masico medido y coeficiente de descarga en las diferentes aperturas de válvulas, magnitudes usadas en las gráficas anteriores.

7.2. Sobre la simulación de la cámara de combustión

7.2.1. Justificación

Partiendo de lo mencionado en el apartado 5.11.2 *Capacidades y Limitaciones* de SWFS, esta herramienta CFD se puede categorizar en un rango medio, ya que su campo de aplicación es limitado. Considerando que el proceso de combustión en los MCI es de naturaleza transitoria e incluye flujos turbulentos de número de Mach bajo, compresibles, de múltiples fases, con un alto número de Reynolds, reacciones químicas, transferencia de calor y que, además, se da en una geometría que varía en el tiempo (Giménez et al., 2021), SWFS presenta tres principales limitaciones por las cuales no es posible simular el escenario que involucra el proceso de combustión en esta herramienta CFD, estas se mencionan a continuación:

- **Cuerpos en movimiento:** no es posible simular cuerpos que se mueven y desplazan fluidos a partir de su movimiento (malla dinámica).
- **Combustión:** no homologa las reacciones químicas para dar cuenta del proceso de combustión.
- **Coexistencia de fases:** no puede simular un líquido y un gas en la misma cavidad, tampoco el efecto aerosol donde se rocían burbujas de líquido en el aire.

Y aunque SolidWorks posee otras herramientas poderosas, tal como *SolidWorks Motion*, que podría simular el movimiento cinemático de cuerpos sólidos (Gomez, 2014), seguiría sin poderse ejecutar la simulación del escenario que involucra el proceso de combustión, que, a su vez, incluye las carreras de compresión y expansión (ciclo de potencia) del ciclo de trabajo de los MCI. Esto debido a que los estudios CFD y de movimiento cinemático no comparten módulo en este software, por lo que no pueden estudiarse simultáneamente (Quintero et al., 2015).

7.3. Sobre la simulación del colector de escape

7.3.1. Flujo de trabajo específico

En la **Figura 7.7.**, se muestra el diagrama de flujo específico empleado en la simulación del colector de escape, para dicha simulación, se consideró un solo orificio del colector de admisión con apertura de válvula $h = 4 \text{ mm}$ y la magnitud del caudal másico calculado anteriormente para dicha apertura; en cuanto al colector de escape las aperturas de válvula consideradas fueron $h_{esc} = 1, 4 \text{ y } 10 \text{ mm}$.

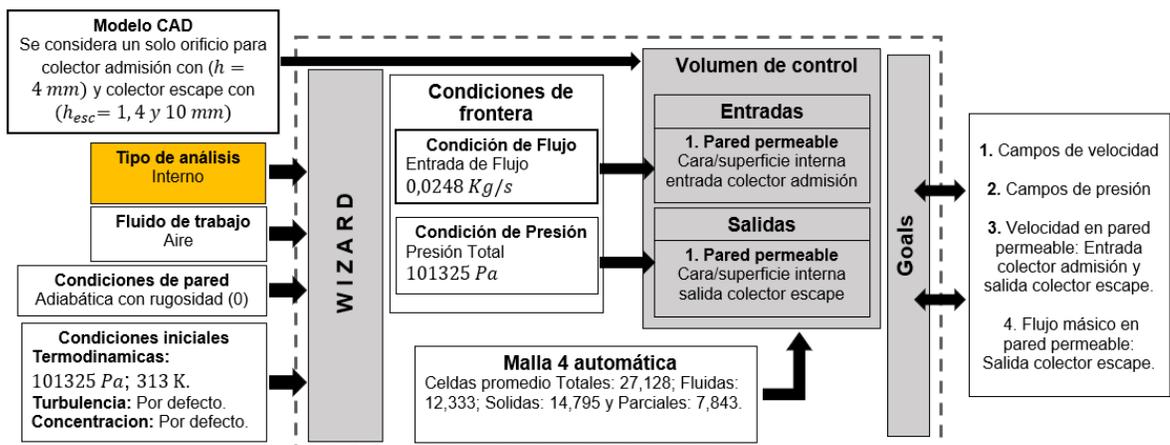
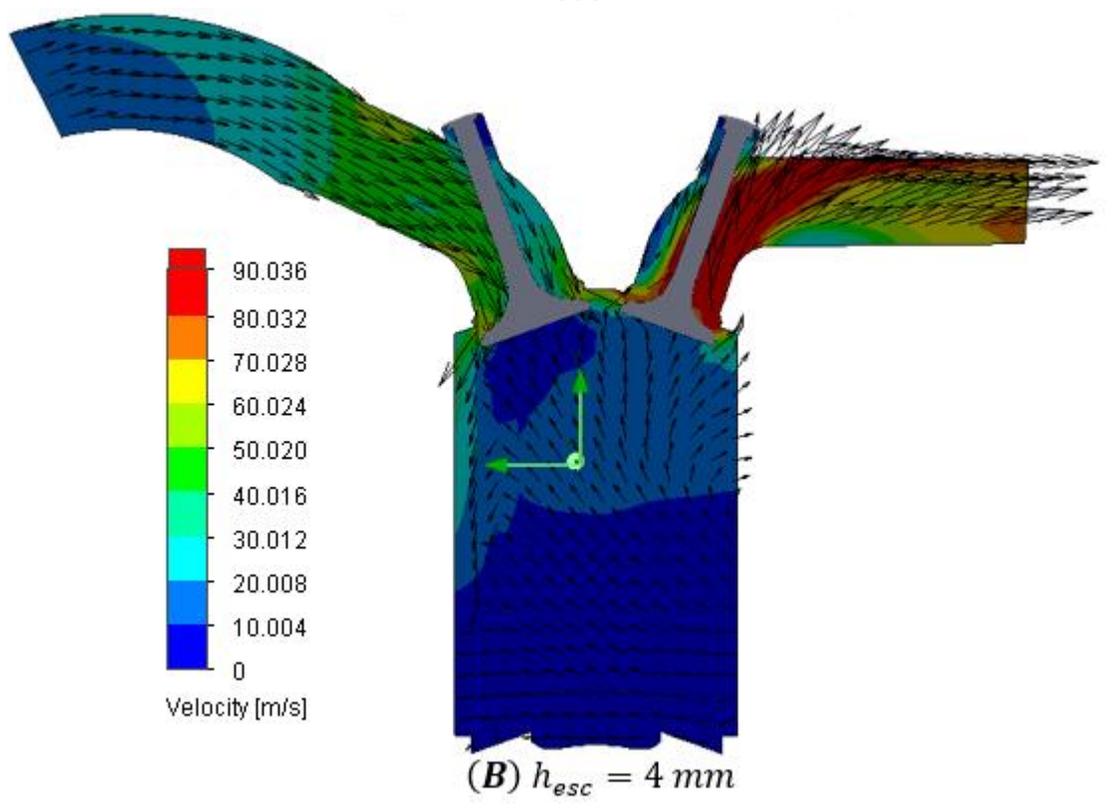
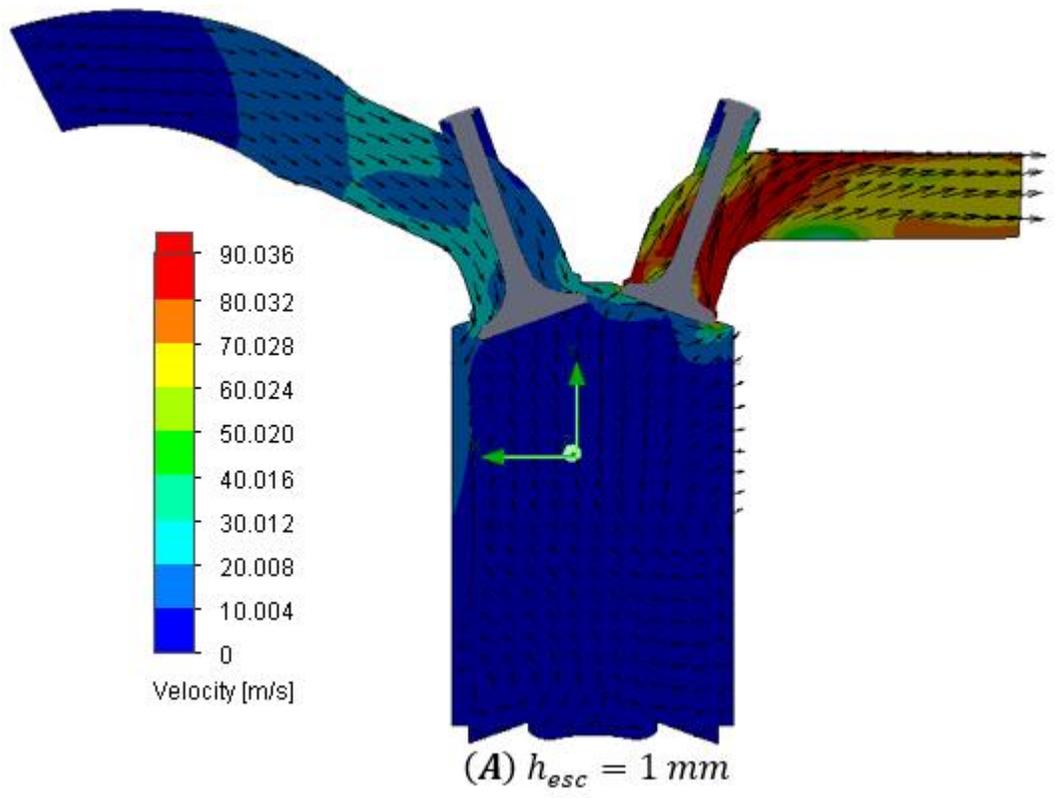


Figura 7.7. Flujo de trabajo específico del proceso de simulación CFD en SWFS para el colector de escape.

7.3.2. Resultados cualitativos

Los **campos de velocidad** para este escenario se muestran en la **Figura 7.8.**, los cuales ilustran la entrada y salida del flujo de aire al cilindro por medio del colector de admisión mientras que la válvula de admisión se mantiene con una apertura constante y para la válvula de escape se consideran las aperturas $h_{esc} = 1, 4 \text{ y } 10 \text{ mm}$. Dadas estas condiciones iniciales, es posible apreciar como los vectores que representan el movimiento del flujo de aire incrementan su tamaño en los ductos del colector de admisión y escape a medida que la apertura de la válvula de escape se hace mayor.



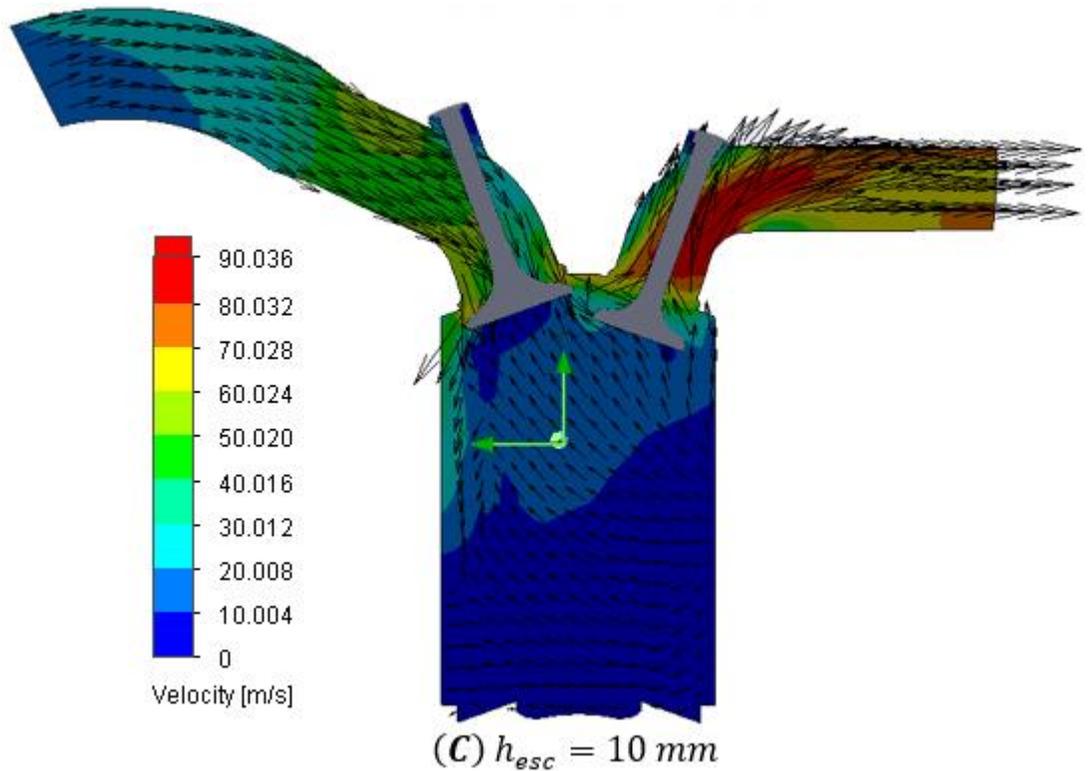
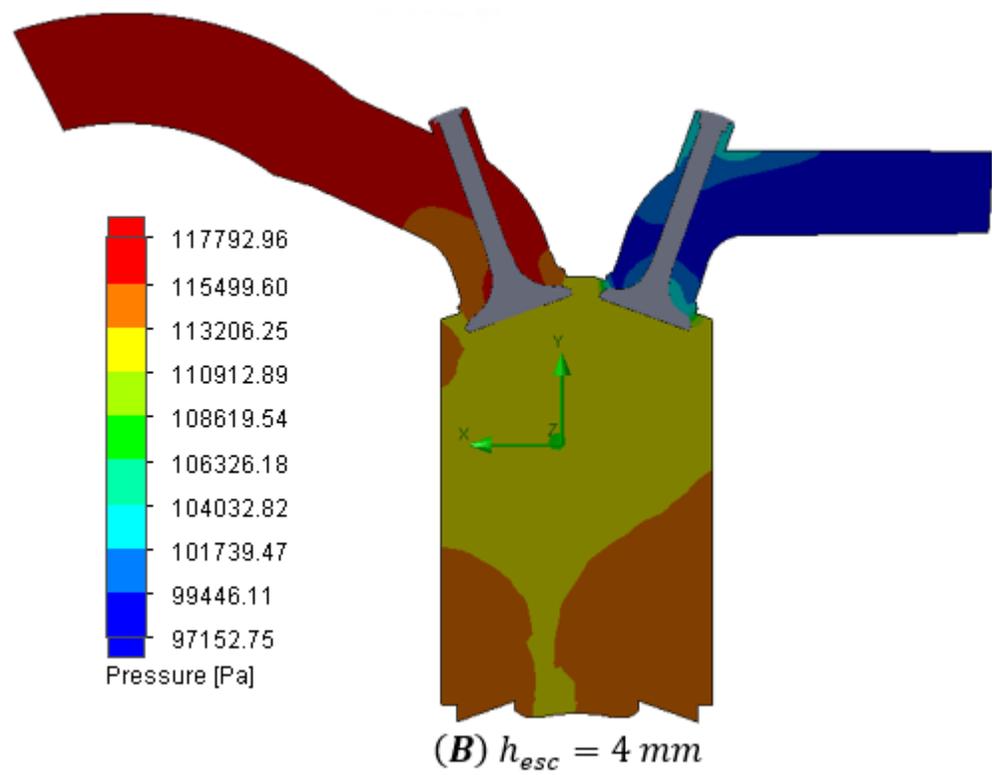
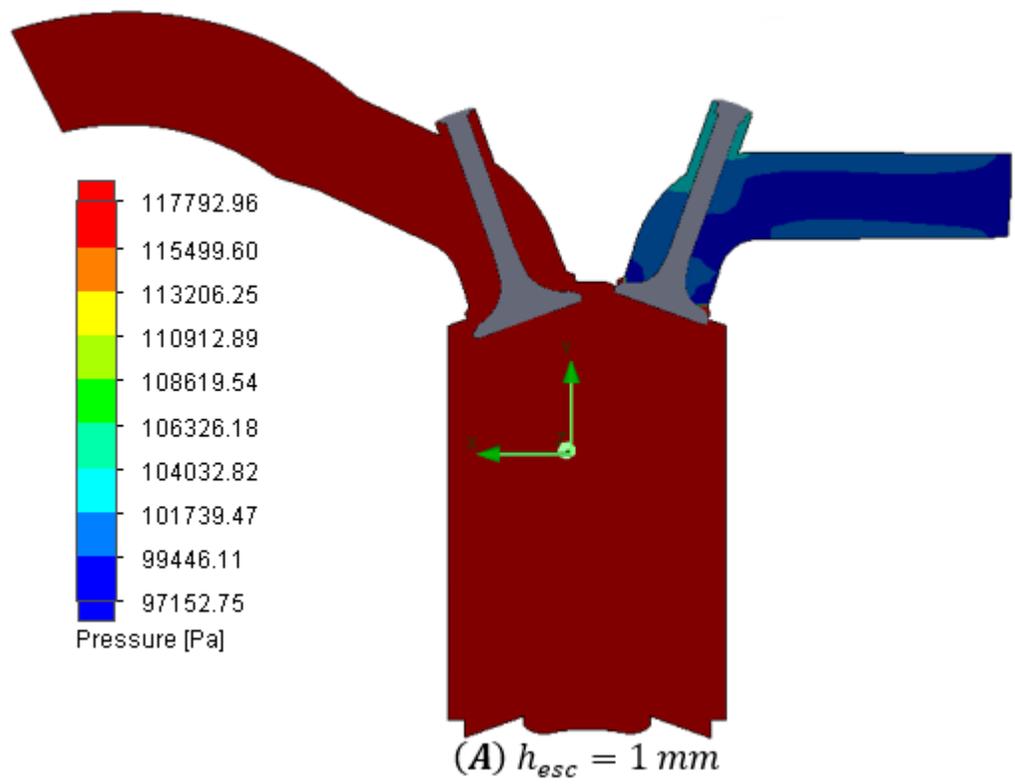


Figura 7.8. Distribución del campo de velocidad del flujo de aire para una apertura de válvula de admisión $h = 4 \text{ mm}$ y las aperturas de la válvula de escape $h_{esc} = 1, 4$ y 10 mm .

El incremento de dichos vectores tanto para el colector de admisión como el de escape, refleja el aumento de la velocidad del flujo de aire mientras este transita por estas zonas. Según los **campos de presión** ilustrados en la **Figura 7.9.** este aumento de velocidad, se puede atribuir a la diferencia de presión existente entre el colector de admisión y el de escape; considerando que, la transferencia de masa, si se involucra la presión atmosférica, se da entre las zonas que presentan altas presiones a las zonas de bajas presiones, buscando de esta manera un equilibrio entre las presiones involucradas (Cengel & Boles, 2005).



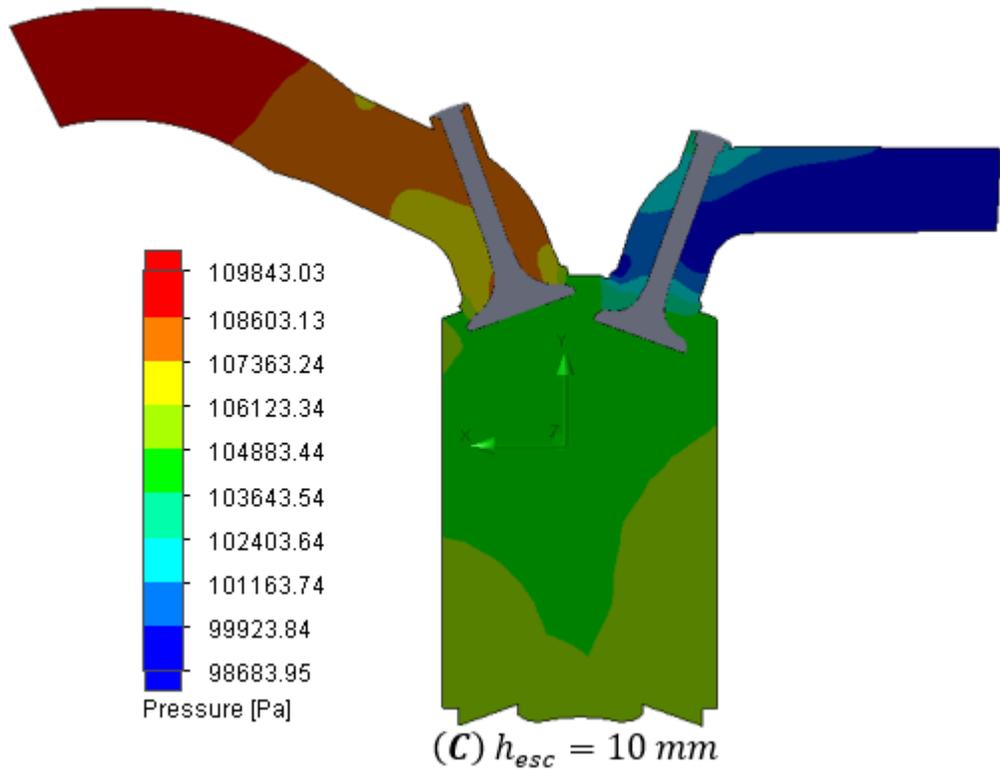
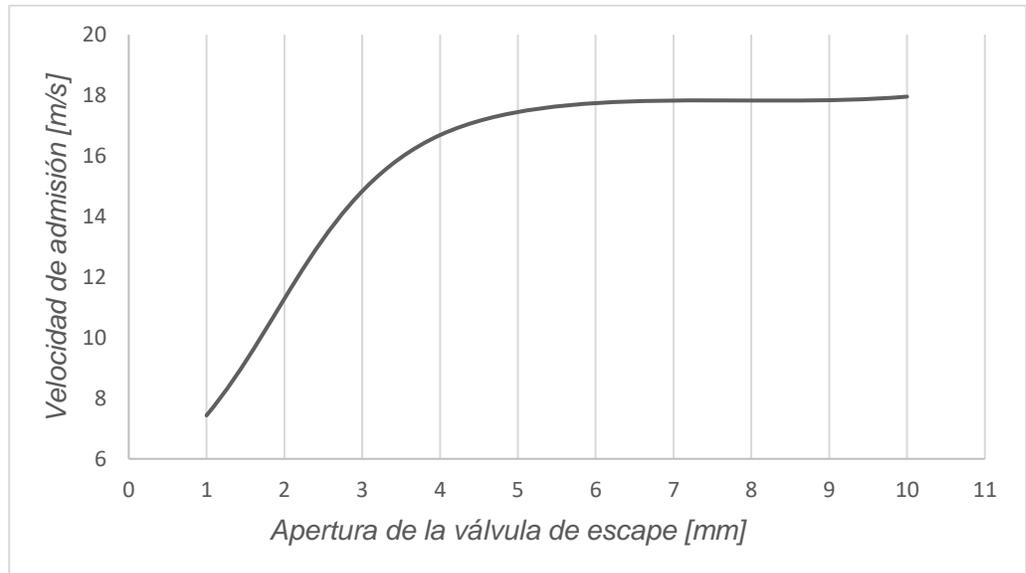


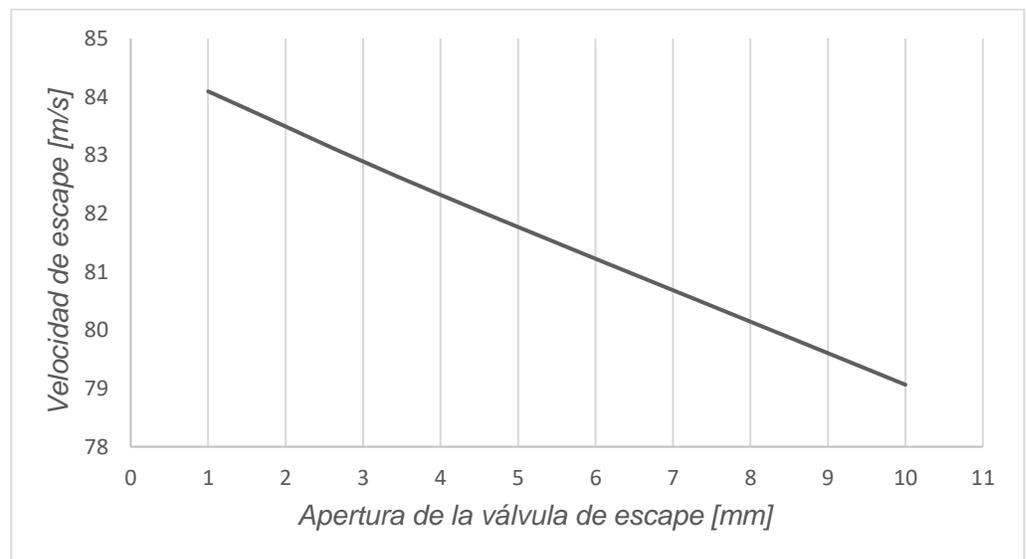
Figura 7.9. Campos de presión para la apertura de válvula de admisión $h = 4 \text{ mm}$ y las aperturas de la válvula de escape $h_{esc} = 1, 4 \text{ y } 10 \text{ mm}$.

7.3.3. Resultados cuantitativos

En la **Grafica 7.3.** se ilustran las magnitudes de la velocidad máxima en la entrada del colector de admisión con respecto a las aperturas h_{esc} consideradas, tal como se mencionó anteriormente, la velocidad de admisión aumenta a medida que la apertura de la válvula de escape se hace mayor; mientras que la velocidad de escape, la cual se ilustra en la **Grafica 7.4.**, disminuye a medida que la apertura de la válvula de escape se hace menor, lo cual explica el incremento del tamaño en los vectores de los campos de velocidad que representan el flujo de aire que interactúa con la geometría del modelo CAD en el apartado anterior.



Grafica 7.3. Comportamiento de la velocidad de admisión con respecto a las aperturas de válvulas de escape h_{esc} .



Grafica 7.4. Comportamiento de la velocidad de escape con respecto a las aperturas de válvulas de escape h_{esc} .

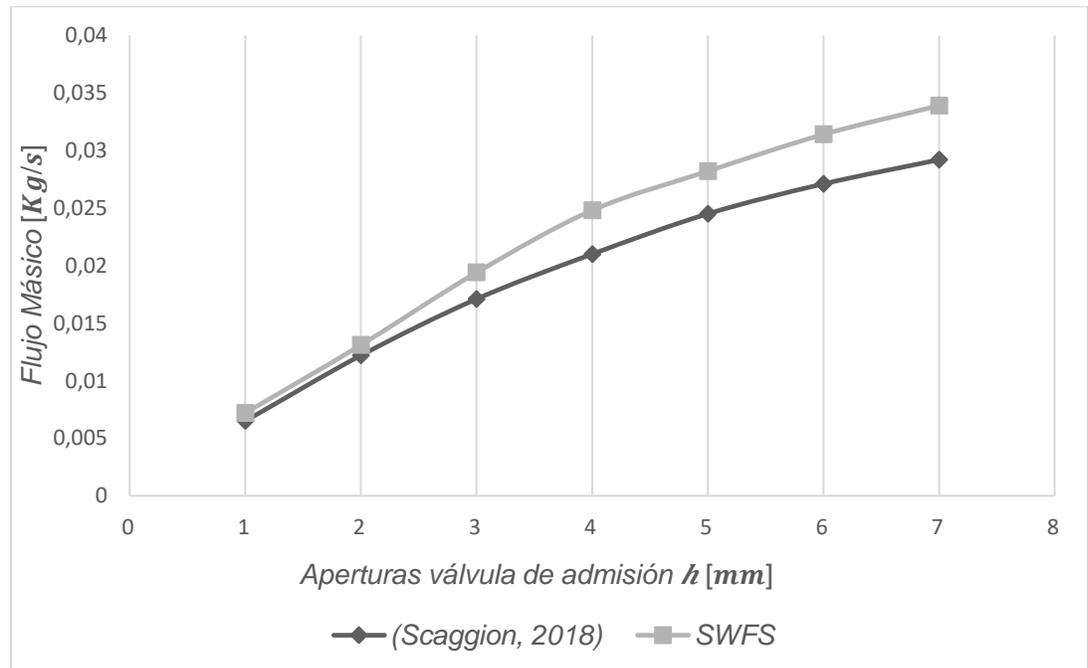
En cuanto a las magnitudes del caudal másico, en la **Tabla 7.2.** se muestra su comportamiento constante para el rango de aperturas de válvula de escape consideradas.

Apertura válvulas de escape [mm]	Flujo másico a la salida del colector de escape
1	-0,0248
4	-0,0248
10	-0,0248

Tabla 7.2. Magnitudes del flujo masico medido a la salida del colector de escape para las diferentes aperturas h_{esc} .

7.4. Validación de resultados

Para la validación de resultados del colector de admisión, se compararon las magnitudes del flujo másico en el rango de aperturas de válvula $h = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ y 7 mm obtenidas por (Scaggion, 2018) y las reportadas en este trabajo para el mismo escenario en la **Gráfica 7.5**.



Gráfica 7.5. Comparación entre los resultados de (Scaggion, 2018) y los obtenidos en esta monografía.

Como es posible apreciar, los resultados para las aperturas de válvula $h = 1$ y 2 mm muestran un mayor nivel de convergencia que las demás aperturas que, a partir de $h = 3 \text{ mm}$ comienza a divergir ampliando su nivel hasta $h = 7 \text{ mm}$, lo cual puede atribuirse a las diferencias geométricas entre los modelos CAD usados en ambos estudios, entre ellos el diámetro de válvula d_m . En la

Tabla 7.3. se enlistan algunas de las diferencias más notables entre ambos modelos.

Parámetros	Modelo CAD, (Scaggion, 2018)	Modelo CAD tomado de (GrabCAD, 2021)
<i>Angulo de inclinación de la válvula de admisión</i>	11,5 °	19,90 °
<i>Angulo de inclinación de la válvula de escape</i>	12,0 °	19,90 °
<i>Diámetro de válvula admisión</i>	27,5 mm	27,3 mm
<i>Diámetro de válvula escape</i>	22,0 mm	23,2 mm
<i>Apertura máxima válvula admisión</i>	8,3 mm	7,0 mm
<i>Apertura máxima válvula escape</i>	7,2 mm	10 mm
<i>Diámetro del cilindro</i>	67 mm	71,90 mm

Tabla 7.3. Diferencias geométricas entre algunos parámetros relevantes de los modelos CAD.

En cuanto al colector de escape, debido a la falta de información necesaria para validar los resultados, se decidió aplicar el principio de conservación de masa " $(\dot{m}_{entrada} - \dot{m}_{salida} = dm_{VC}/dt)$ " para un volumen de control, reportado por (Cengel & Boles, 2005), con base en esto, se tiene que el caudal másico de aire que entró al cilindro para una apertura de válvula de admisión $h = 4 \text{ mm}$ fue el mismo que salió del cilindro para las aperturas de válvula de escape $h_{esc} = 1,4 \text{ y } 10 \text{ mm}$, con lo que se puede concluir que el modelo CAD no retiene gases de escape.

CONCLUSIONES

- Mediante la revisión bibliográfica se pudo identificar aspectos claves del funcionamiento de los MCI tales como el ciclo de trabajo; las curvas características, la cuales permiten conocer la relación entre variables como presión, volumen, tiempo del ciclo de trabajo, régimen de giro, temperatura entre otros, que resultan relevantes y brindan información valiosa del comportamiento de los MCI; igualmente la relevancia que tienen componentes mecánicos como el colector de admisión, válvulas de admisión, cilindro, pistón, válvulas de escape y colector de escape en el funcionamiento normal de los MCI y el papel que estos cumplen en la sincronización fluido – solido durante el ciclo de trabajo; la importancia que tiene la presencia de los fenómenos como Swirl y Tumble en las características de flujo al interior del cilindro en términos de formación de mezcla.
- Con base al alcance que ofrece SWFS como herramienta CFD se establecieron los flujos de trabajo específicos para ejecutar las simulaciones de los procesos de admisión y escape con el fin de representar los efectos de los fenómenos Swirl y Tumble en estado cuasi estacionario; en cuanto a los procesos de compresión y expansión no fue posible establecer el flujo de trabajo debido a que requieren de una malla dinámica que represente el movimiento sincronizado del pistón y las válvulas mientras se da el proceso de combustion, lo cual representa una limitación para SWFS en el estudio de los MCI, ya que este no cuenta con mallas dinámicas y no puede realizar reacciones químicas para dar cuenta de la combustión.
- Se identificó e implemento un modelo CAD con el cual se pudo representar las características fluidodinámicas de las carreras de admisión y escape considerando el rango de aperturas de válvula de admisión $h = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ y 7 mm y $h_{esc} = 1, 5$ y 10 mm para la carrera de escape, la validación de los resultados del colector de admisión mostro un nivel de convergencia aceptable con respecto a los resultados de un trabajo anterior para el rango de aperturas h considerado; mientras que para el colector de escape al aplicar el principio de conservación de masa para el rango de aperturas h_{esc} se pudo determinar que el modelo CAD no retiene gases de escape.

RECOMENDACIONES

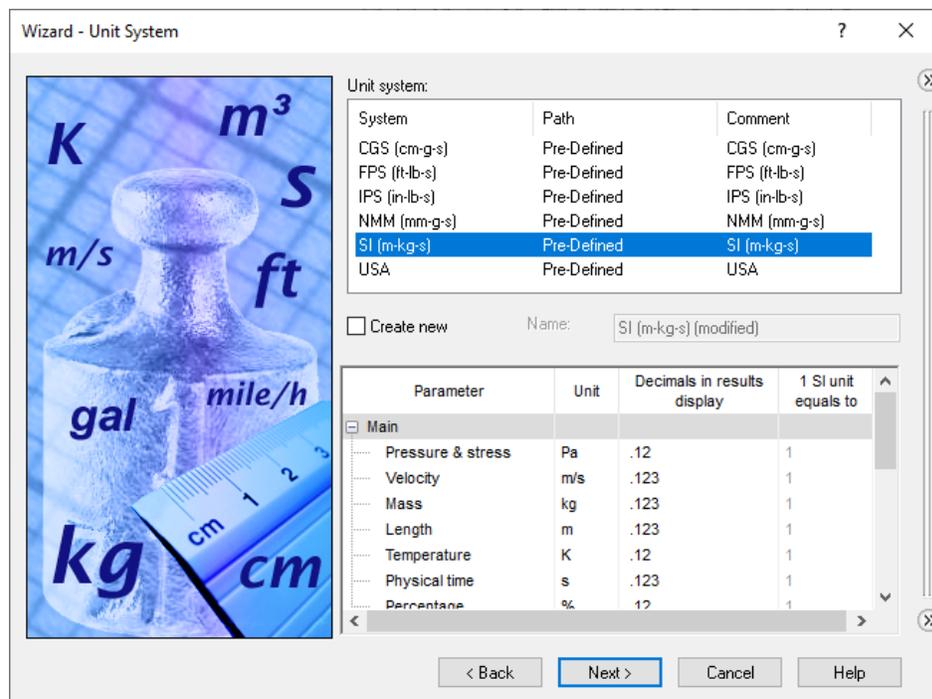
- Reestructurar el flujo de trabajo específico del colector de escape con base a un antecedente que aborde específicamente dicho proceso.
- Validar el nivel de convergencia entre los resultados obtenidos con el que pueda tener la implementación de la opción de mallado complejo que incorpora SWFS.
- Indagar y poner a prueba metodologías diferentes a la propuesta en esta monografía que permitan representar computacionalmente la interacción fluido-sólido presente en el funcionamiento normal de los MCI con la inclusión de combustibles renovables mediante la herramienta CFD SWFS.
- Explorar el alcance e impacto que pueda tener SWFS como herramienta CFD en otras áreas de investigación propuestas desde la Universidad de La Guajira.

ANEXOS

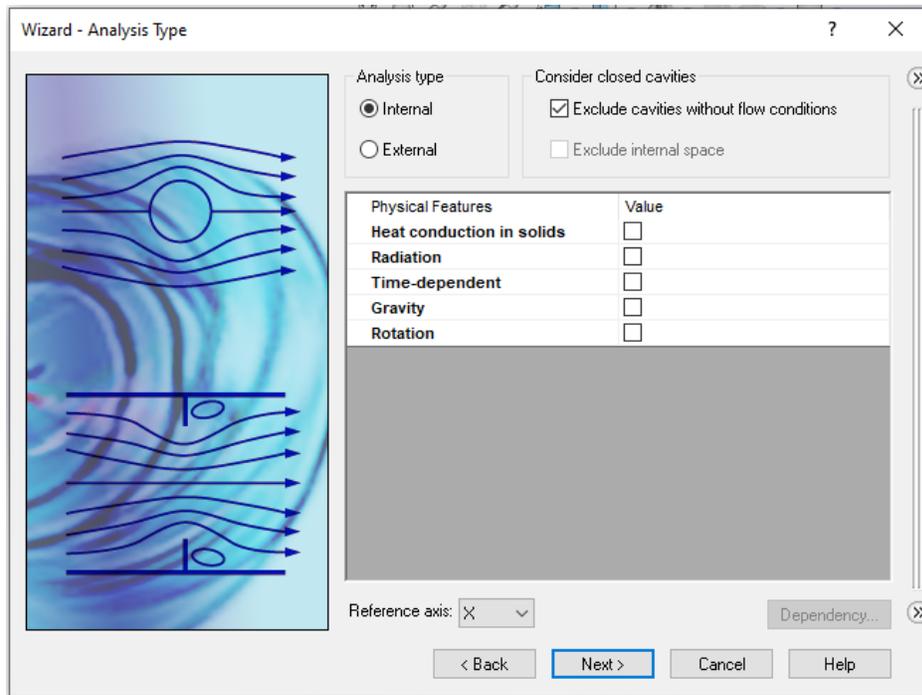
A continuación, se listan los anexos pertinentes al proceso de configuración de las simulaciones CFD en la herramienta SFWS, los cuales están ordenados de la siguiente manera.

1. Configuración del Wizard de SWFS para las simulaciones.
2. Configuración de las condiciones iniciales y los objetivos de simulación (*Input Data*).
3. Correr la simulación.
4. Visualización de resultados.
5. Reporte que arroja SWFS sobre la simulación.

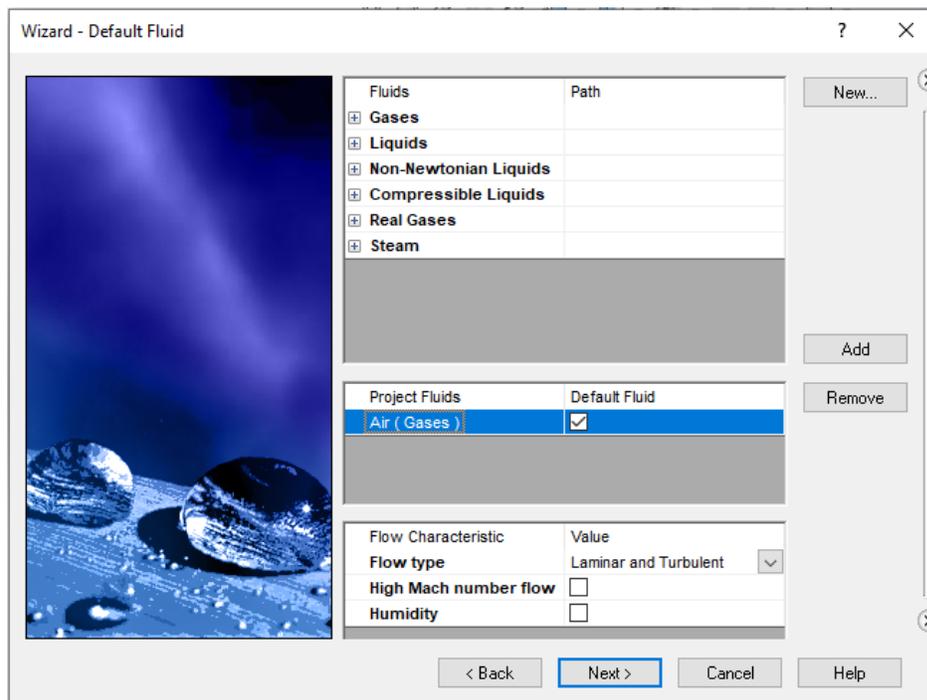
Anexo 1. Configuración del Wizard de SWFS para las simulaciones.



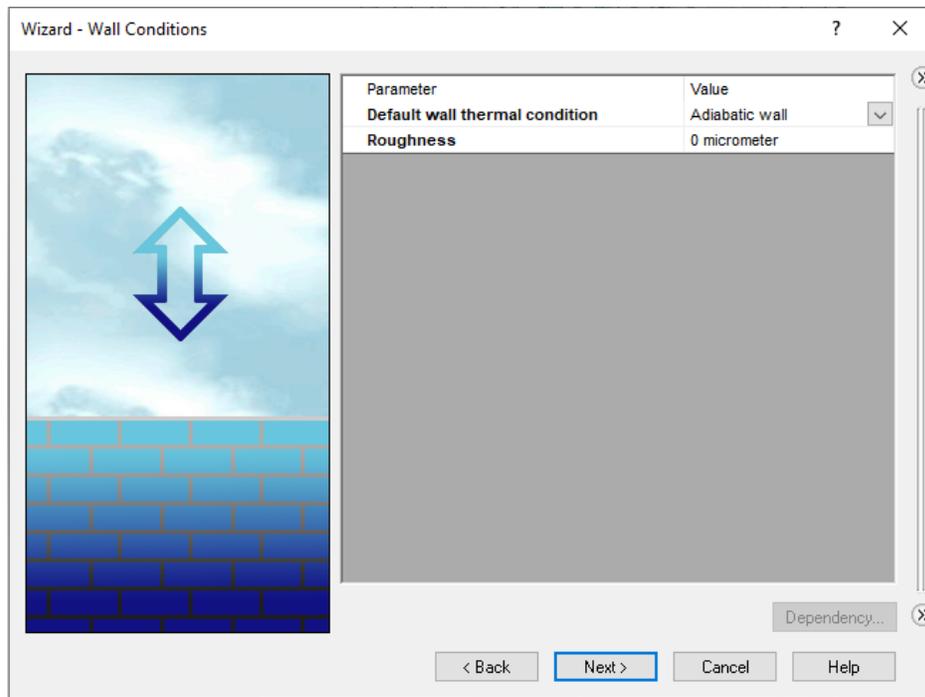
Anexo 1.1. Configuración del sistema de unidades



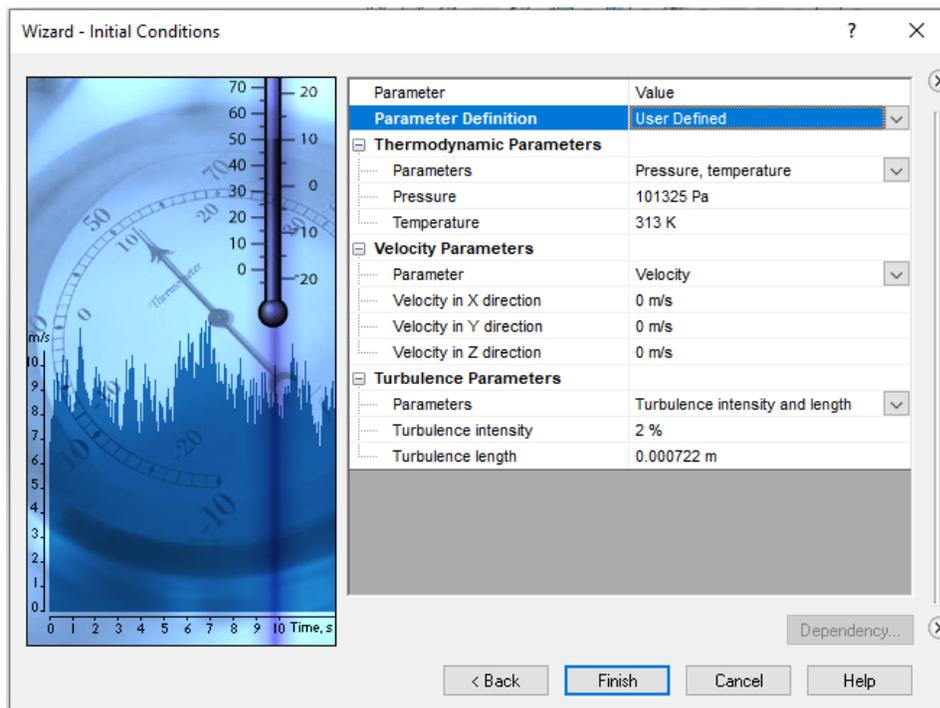
Anexo 1.2. Configuración del tipo de análisis.



Anexo 1.3. Configuración del fluido de trabajo y las características del flujo.

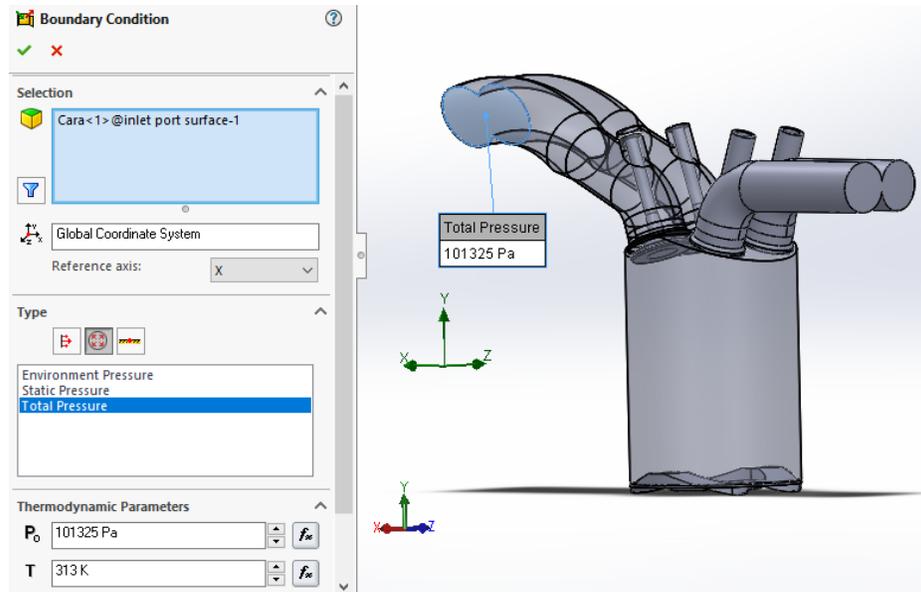


Anexo 1.4. Configuración de las condiciones de pared.

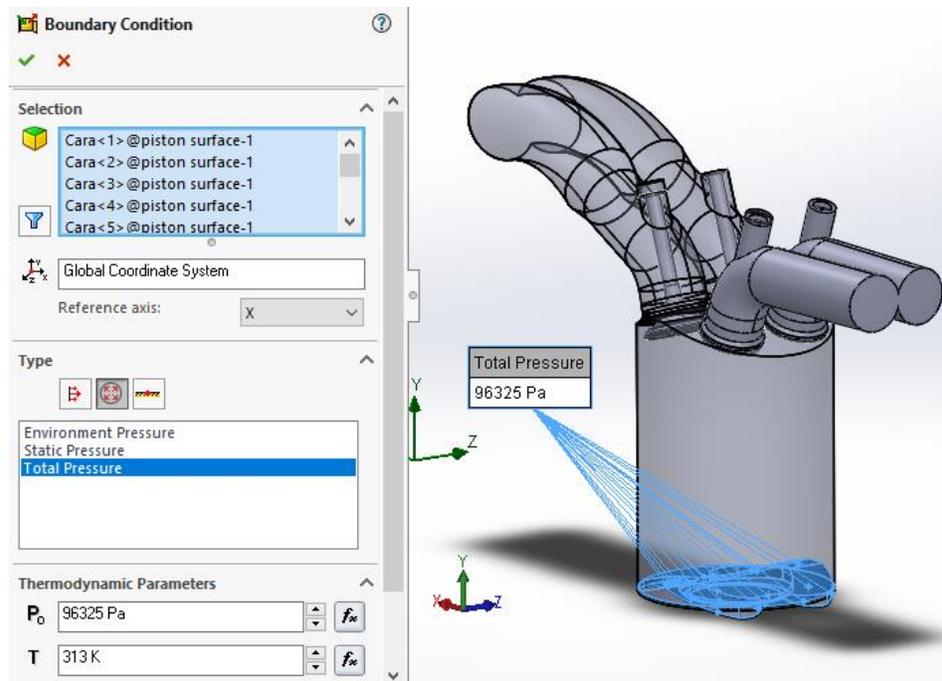


Anexo 1.5. Configuración de los parámetros iniciales termodinámicos, de velocidad y turbulencia.

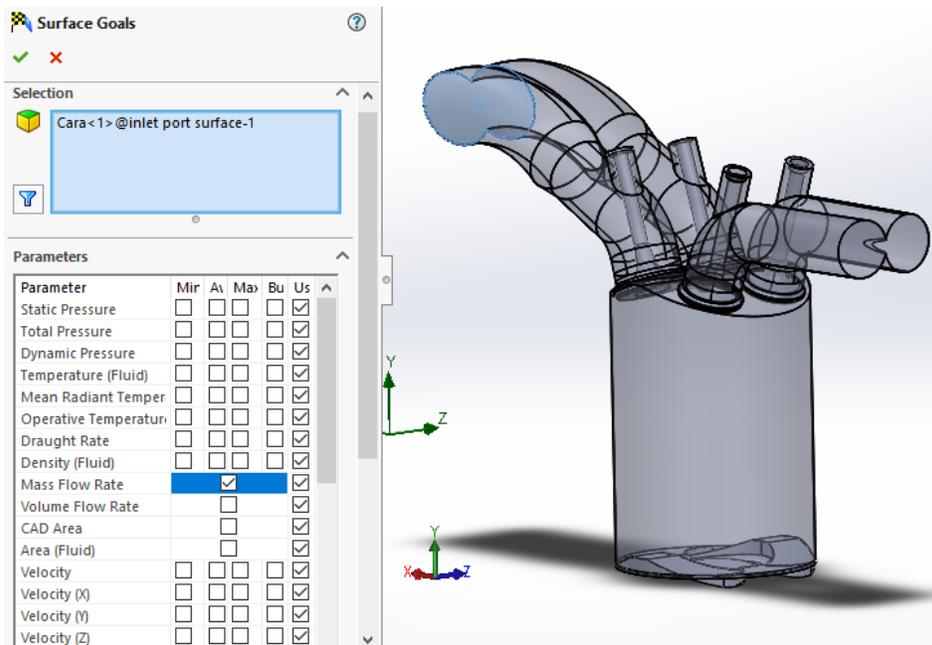
Anexo 2. Configuración de las condiciones iniciales y los objetivos de simulación (*Input Data*).



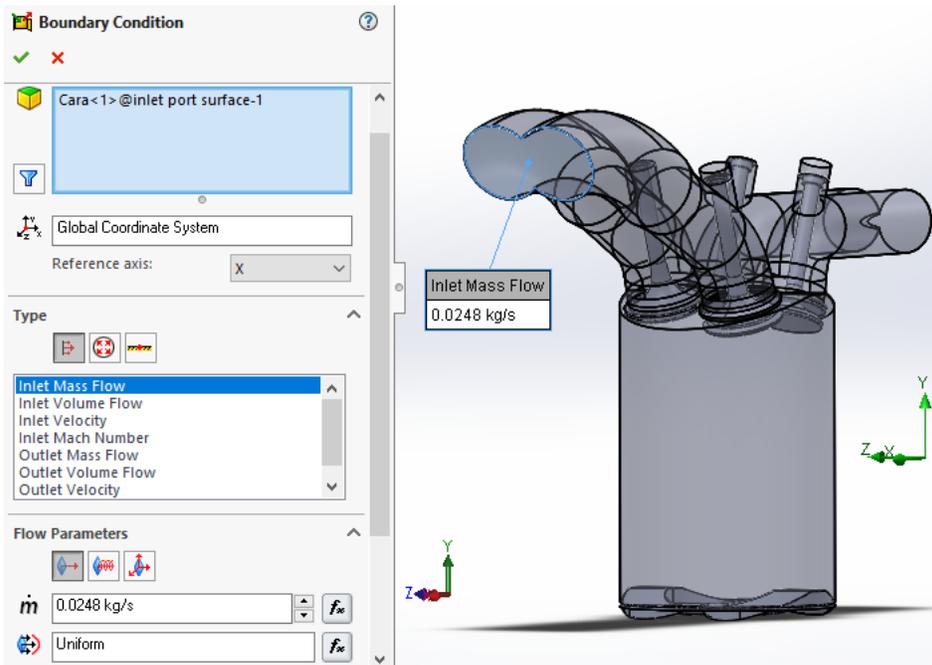
Anexo 2.1. Definición de la condición de frontera inicial *presión total* en la entrada del colector de admisión. (Simulación del colector de admisión).



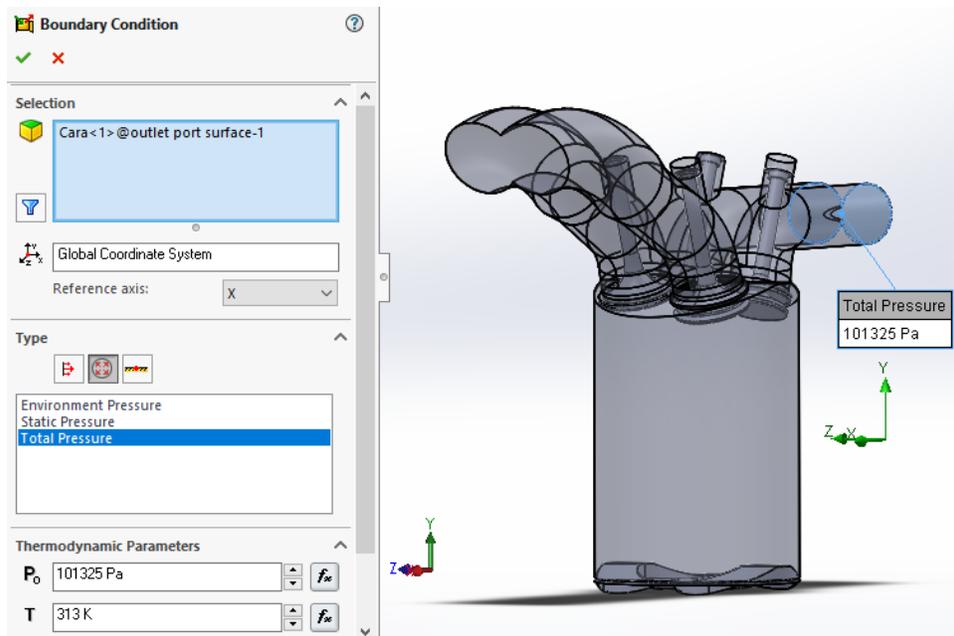
Anexo 2.2. Definición de la condición de frontera final *presión total* en la cara del pistón. (Simulación del colector de admisión).



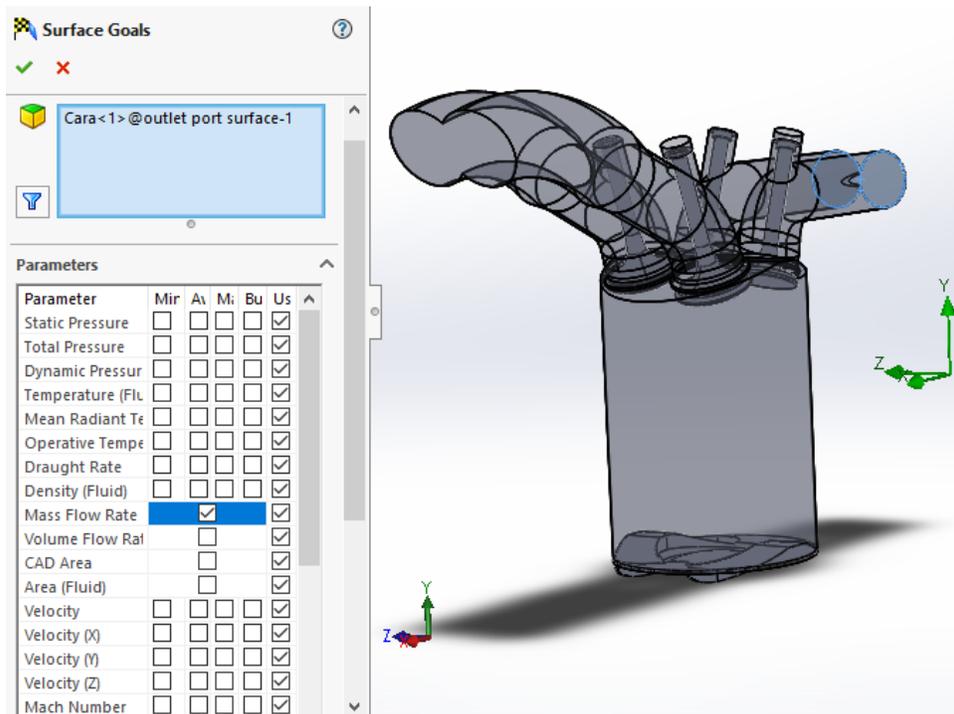
Anexo 2.3. Definición del objetivo de simulación *caudal masico* en la entrada del colector de admisión. (Simulación del colector de admisión).



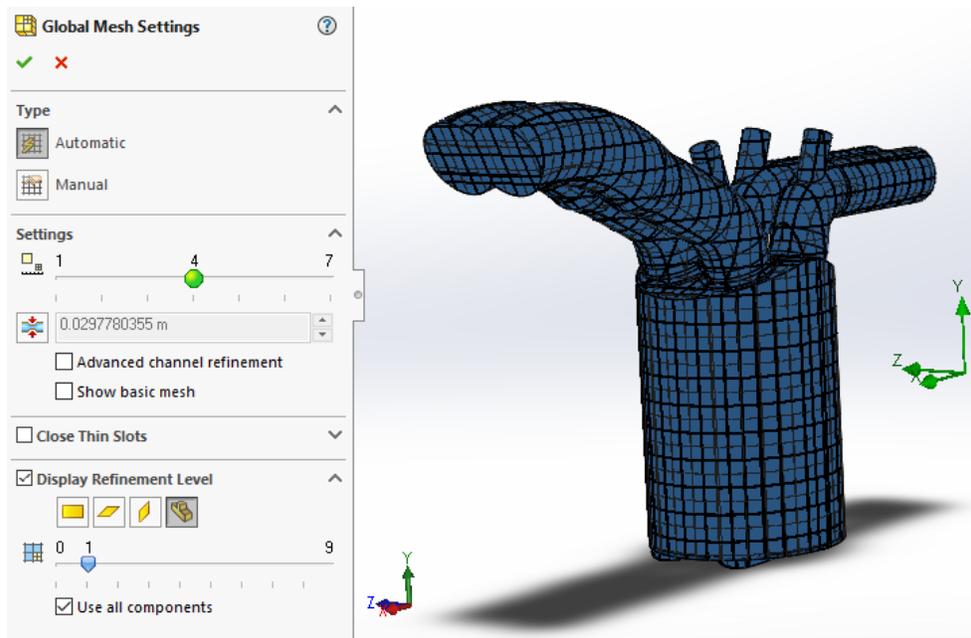
Anexo 2.4. Definición de la condición de frontera inicial *caudal masico* en la entrada del colector de admisión. (Simulación del colector de escape).



Anexo 2.5. Definición de la condición de frontera final *presión total* en la salida del colector de escape. (Simulación del colector de escape).

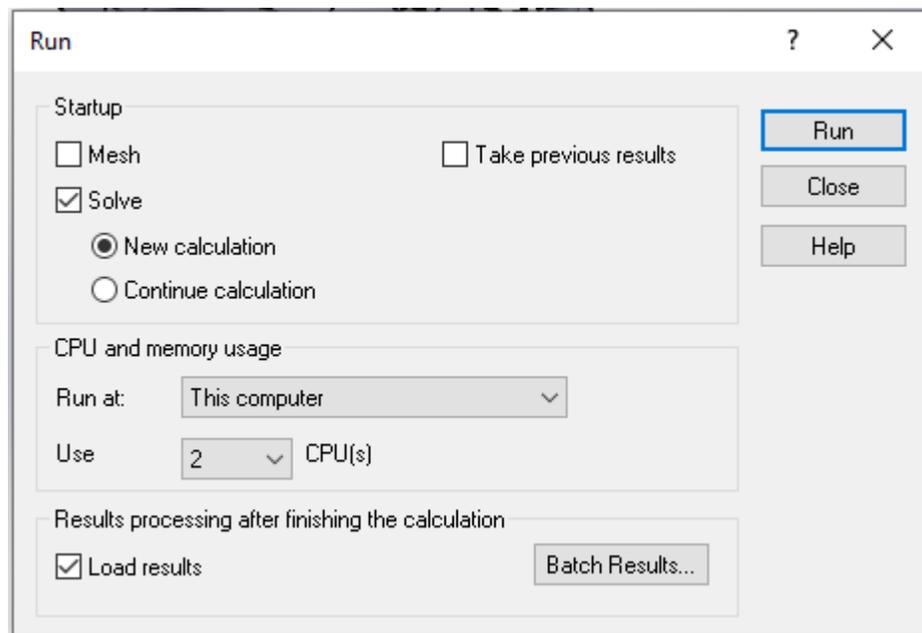


Anexo 2.6. Definición del objetivo de simulación *caudal masico* en la salida del colector de escape. (Simulación del colector de escape).



Anexo 2.7. Configuración de mallado automático: malla nivel 4.

Anexo 3. Correr la simulación.



Anexo 3.1. Cuadro de dialogo para ejecutar la simulación. Equipo: Lenovo Intel Celeron CPU 1005M @1.90 GHz 1.90GHz.

Solver: Project(1) [Predeterminado] (ADM GENERAL.SLDASM) - [Info]

File Calculation View Insert Window Help

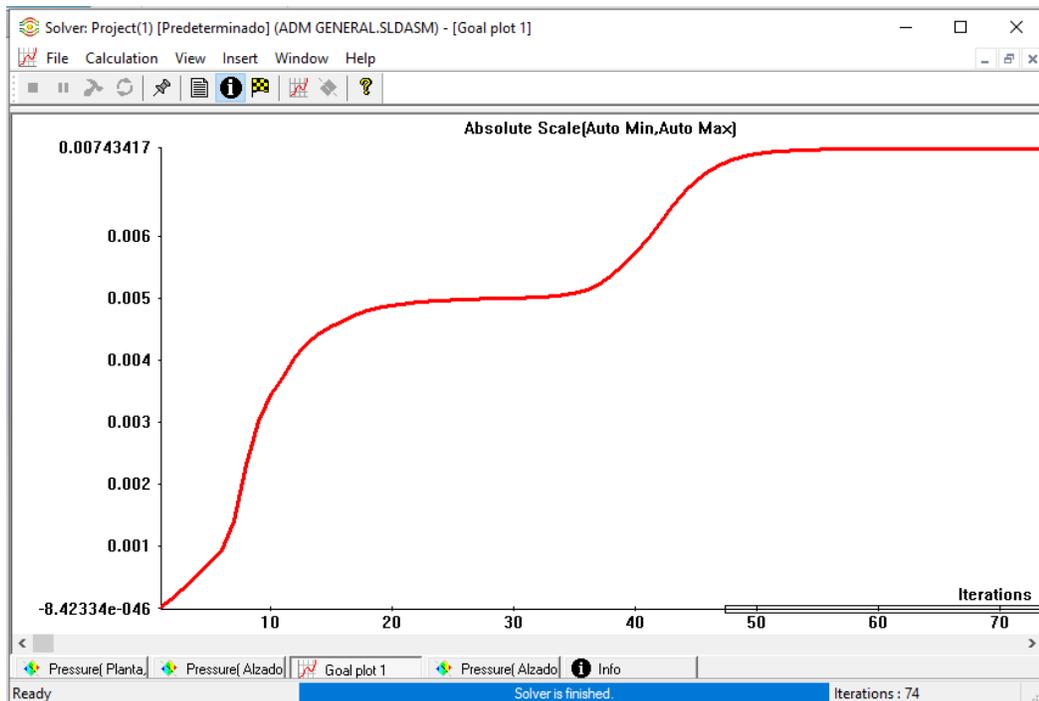
Parameter	Value
Status	Solver is finished.
Cells	27,052
Fluid cells	12,162
Solid cells	14,890
Partial cells	7,861
Iterations	74
Last iteration finished	11:22:46
CPU time per last iteration	00:00:35
Travels	
Iterations per 1 travel	54
Cpu time	0 : 2 : 14
Calculation time left	0 : 0 : 0
Run at	DESKTOP-6809575

Warning	Comment
No warnings	

Pressure(Planta) Pressure(Alzado) Goal plot 1 Pressure(Alzado) Info

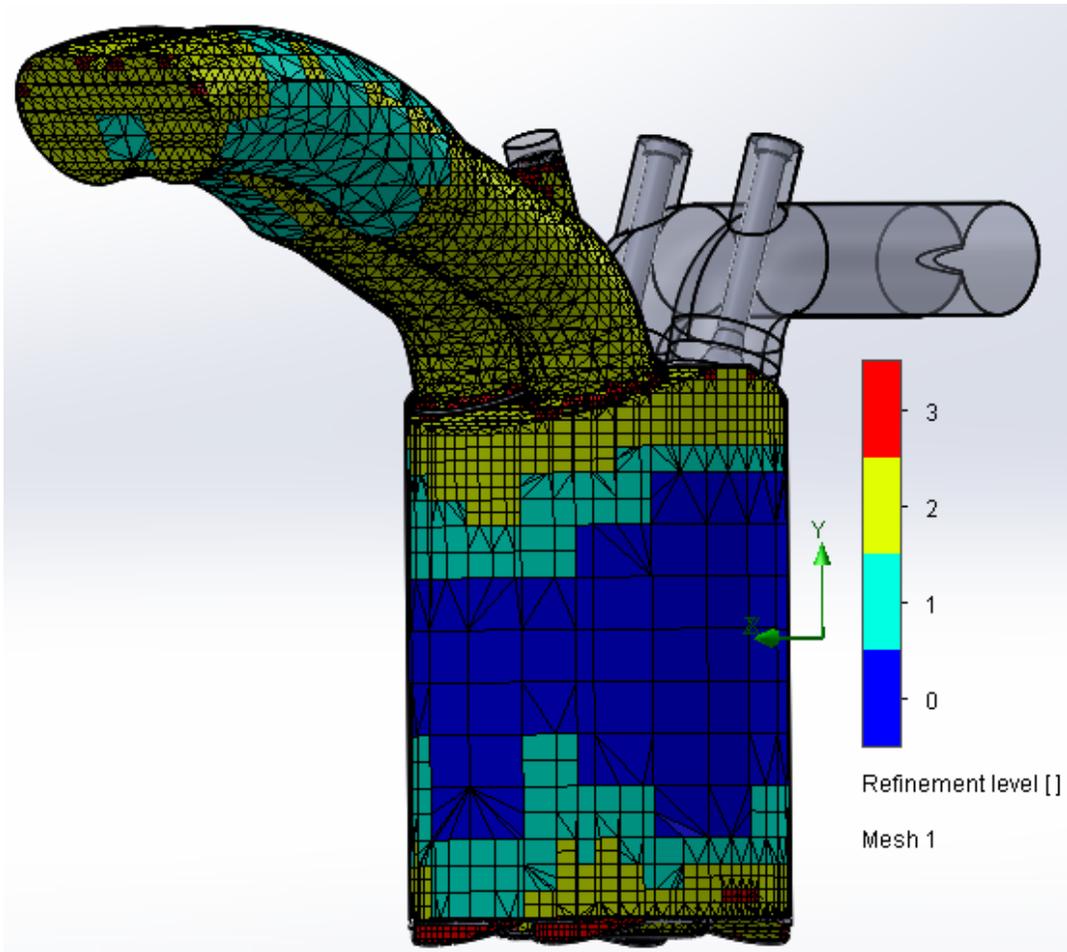
Ready Solver is finished. Iterations : 74

Anexo 3.2. Parámetros del proceso de simulación.

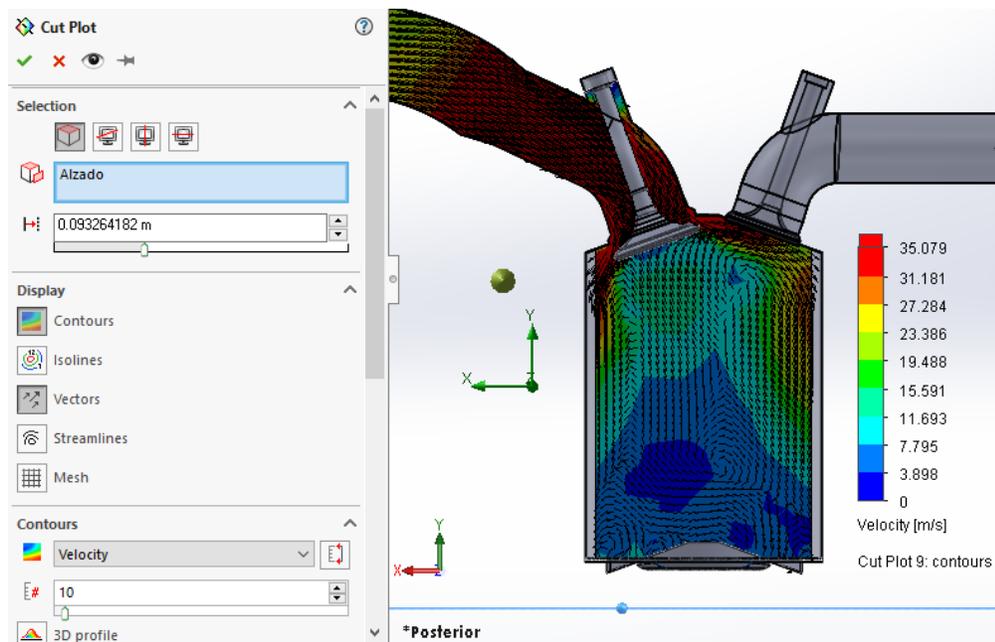


Anexo 3.3. Gráfico de convergencia para la variable objetivo de simulación.

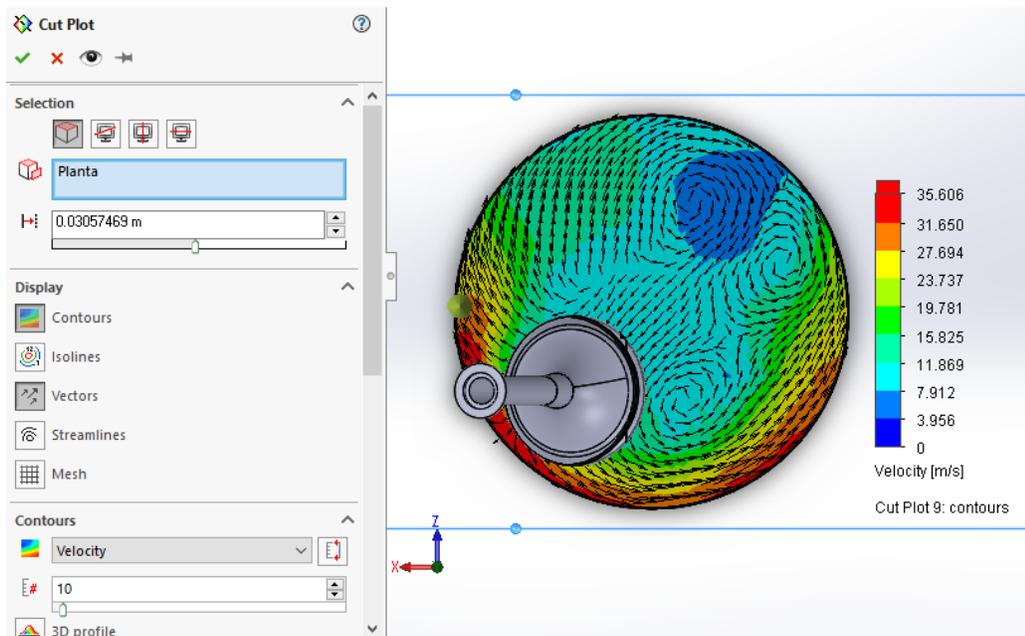
Anexo 4. Visualización de resultados.



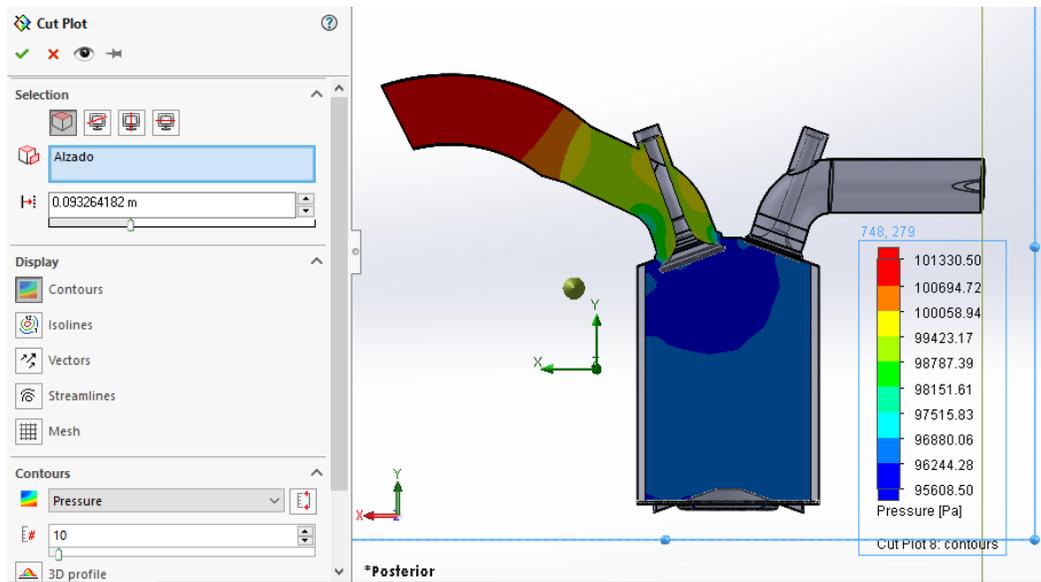
Anexo 3.3. Visualización de mallado automático escala 4 en postproceso.



Anexo 3.3. Configuración de los gráficos de contorno para visualizar las características de los vórtices en el plano Tumble. Con $h = 4 \text{ mm}$.



Anexo 3.3. Configuración de los gráficos de contorno para visualizar las características de los vórtices en el plano Swirl. Con $h = 4 \text{ mm}$.



Anexo 3.4. Configuración de los gráficos de contorno para visualizar los campos de presión. Con $h = 4 \text{ mm}$.

Anexo 5. Reporte que arroja SWFS sobre la simulación. Para la apertura de válvula $h = 4 \text{ mm}$.

General Information

Analysis Environment:

Software Product:	Flow Simulation 2016 SP0.0. Build: 3259
CPU Type:	Intel(R) Celeron(R) CPU 1005M @ 1.90GHz
CPU Speed:	1900 (1200) MHz
RAM:	3996 MB / 134217727 MB
Operating System:	(Build 19044)

Model Information:

Model Name:	ADM GENERAL.SLDASM
Project Name:	Project(1)

Project Comments:

Unit System:	SI (m-kg-s)
Analysis Type:	Internal

Size of Computational Domain:

Size

X min	-0.088 m
X max	0.106 m
Y min	-0.057 m
Y max	0.121 m
Z min	0.071 m
Z max	0.143 m

Simulation Parameters

Mesh Setting

Basic Mesh

Basic Mesh Dimensions

Number of cells in X	18
Number of cells in Y	18
Number of cells in Z	6

Analysis Mesh

Total Cell count:	27159
Fluid Cells:	12354
Solid Cells:	14805
Partial Cells:	7861
Trimmed Cells:	0

Additional Physical Calculation Options

Heat Transfer Analysis:

Heat conduction in solids: Off

Flow Type: Laminar and turbulent

Time-Dependent Analysis: Off

Gravity: Off

Radiation:

Humidity: Off

Default Wall Roughness: 0 micrometer

Material Settings

Fluids

Air.

Initial Conditions

Initial Conditions

Thermodynamic parameters	Static Pressure: 101325.00 Pa Temperature: 313.00 K
Velocity parameters	Velocity vector Velocity in X direction: 0 m/s Velocity in Y direction: 0 m/s Velocity in Z direction: 0 m/s
Turbulence parameters	

Boundary Conditions

Total Pressure 1

Type	Total pressure
Faces	Face<1>@inlet port surface-1
Coordinate system	Global coordinate system
Reference axis	X
Thermodynamic parameters	Total Pressure: 101325.00 Pa Temperature: 313.00 K
Turbulence parameters	
Boundary layer parameters	Boundary layer type: Turbulent

Total Pressure 2

Type	Total pressure
Faces	Face<2>@piston surface-1 Face<4>@piston surface-1 Face<3>@piston surface-1 Face<6>@piston surface-1 Face<5>@piston surface-1 Face<7>@piston surface-1 Face<10>@piston surface-1 Face<9>@piston surface-1 Face<8>@piston surface-1 Face<11>@piston surface-1 Face<14>@piston surface-1 Face<13>@piston surface-1 Face<12>@piston surface-1 Face<19>@piston surface-1 Face<18>@piston surface-1 Face<17>@piston surface-1 Face<16>@piston surface-1 Face<15>@piston surface-1 Face<20>@piston surface-1

	Face<21>@piston surface-1
Coordinate system	Global coordinate system
Reference axis	X
Thermodynamic parameters	Total Pressure: 96325.00 Pa Temperature: 313.00 K
Turbulence parameters	
Boundary layer parameters	Boundary layer type: Turbulent

Volumetric Heat Sources

Engineering Goals

Goals

Surface Goals

SG Mass Flow Rate 1

Type	Surface Goal
Goal type	Mass Flow Rate
Faces	Cara<1>@inlet port surface-1
Coordinate system	Global coordinate system
Use in convergence	On

Analysis Time

Calculation Time: 111 s

Number of Iterations: 60

Warnings: A vortex crosses the pressure opening Boundary Condition :
Total Pressure 2 ; Inlet flow/outlet flow=12.1828
Boundary Condition : Total Pressure 2 ; Inlet flow/outlet flow=24.3121
Boundary Condition : Total Pressure 2 ; Inlet flow/outlet flow=1.22428
Boundary Condition : Total Pressure 2 ; Inlet flow/outlet flow=4.90571
Boundary Condition : Total Pressure 2 ; Inlet flow/outlet flow=2.60956
Boundary Condition : Total Pressure 2 ; Inlet flow/outlet flow=24.8664
Boundary Condition : Total Pressure 2 ; Inlet flow/outlet flow=3.11664
Boundary Condition : Total Pressure 2 ; Inlet flow/outlet flow=0.163982
Boundary Condition : Total Pressure 2 ; Inlet flow/outlet flow=0.599125

Boundary Condition : Total Pressure 2 ; Inlet flow/outlet flow=1.86641

Boundary Condition : Total Pressure 2 ; Inlet flow/outlet flow=7.51117

Boundary Condition : Total Pressure 2 ; Inlet flow/outlet flow=2.2667

Boundary Condition : Total Pressure 2 ; Inlet flow/outlet flow=0.544177

Boundary Condition : Total Pressure 2 ; Inlet flow/outlet flow=6.05295

Boundary Condition : Total Pressure 2 ; Inlet flow/outlet flow=0.218293

Boundary Condition : Total Pressure 2 ; Inlet flow/outlet flow=1.09697

Results

Analysis Goals

Goals

Name	Unit	Value	Progress	Use in convergence	Delta	Criteria
SG Mass Flow Rate 1	kg/s	0.0254	100	0.000742301055	0.000718011546	On

Global Min-Max-Table

Name	Minimum	Maximum
Density (Fluid) [kg/m ³]	1.03	1.17
Pressure [Pa]	92756.06	104526.30
Temperature [K]	307.70	313.38
Temperature (Fluid) [K]	307.70	313.38
Velocity [m/s]	0	96.224
Velocity (X) [m/s]	-86.545	47.115
Velocity (Y) [m/s]	-80.570	22.119
Velocity (Z) [m/s]	-76.797	78.724
Mach Number []	0	0.27
Velocity RRF [m/s]	0	96.224
Velocity RRF (X) [m/s]	-86.545	47.115
Velocity RRF (Y) [m/s]	-80.570	22.119
Velocity RRF (Z) [m/s]	-76.797	78.724
Vorticity [1/s]	1.04	51047.70
Relative Pressure [Pa]	-8568.94	3201.30
Shear Stress [Pa]	0	97.16
Bottleneck Number []	1.1476770e-016	1.0000000

Heat Transfer Coefficient [W/m ² /K]	0	0
ShortCut Number []	3.4006047e-018	1.0000000
Surface Heat Flux [W/m ²]	0	0

Results

Conclusion

Appendix

Material Data

Engineering Database

Gases

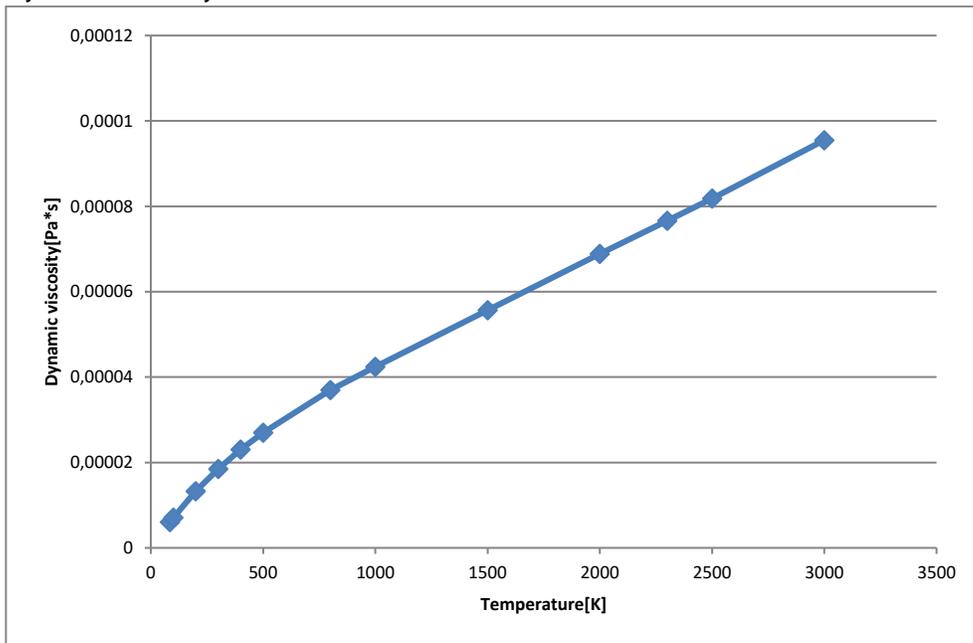
Air

Path: Gases Pre-Defined

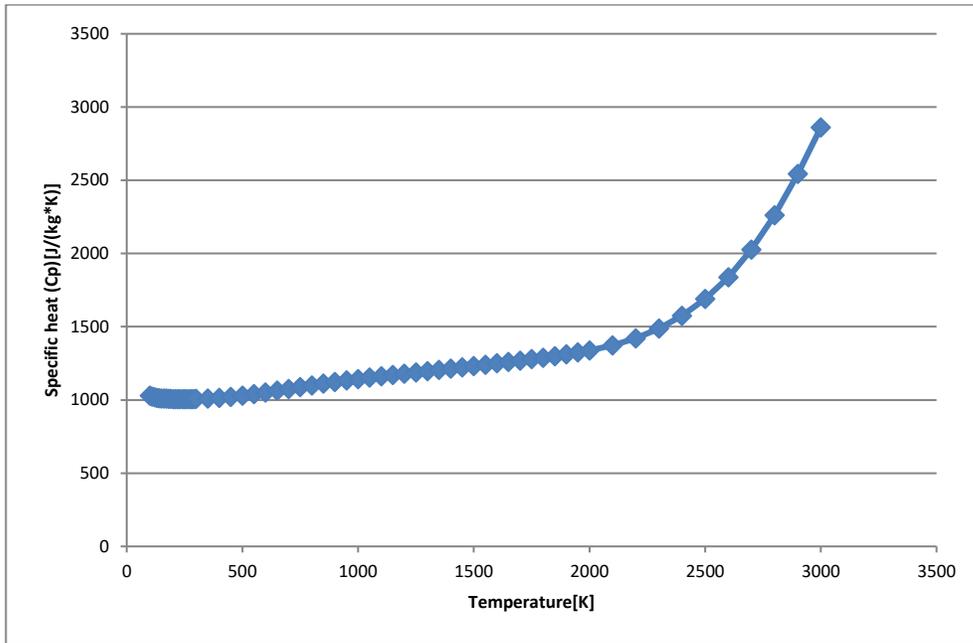
Specific heat ratio (Cp/Cv): 1.399

Molecular mass: 0.0290 kg/mol

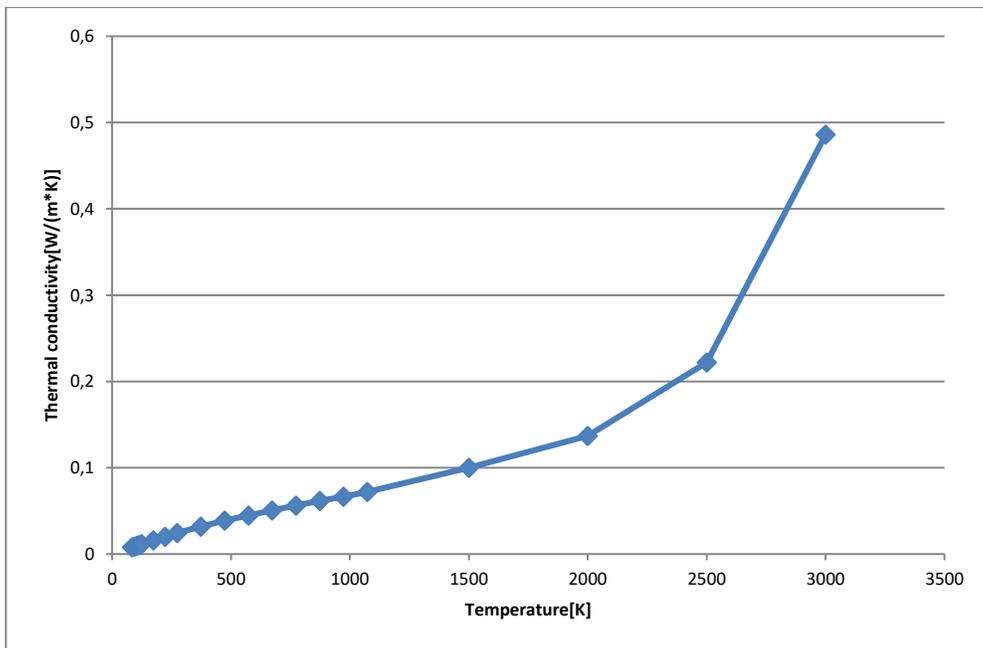
Dynamic viscosity



Specific heat (Cp)



Thermal conductivity



BIBLIOGRAFÍA

- 3Dvision. (2009, July 31). *The Capabilities and Limitations of Flow Simulation*. Computer Aided Technology. <https://www.cati.com/blog/the-capabilities-and-limitations-of-flow-simulation/>
- ANDEMOS. (2021). *Matriculas Nuevas Vehiculos Y Motos | ANDEMOS*. <https://datastudio.google.com/reporting/832d7738-08f7-4e3a-8843-65d4a746cfcc/page/yakzB>
- Arango, J., Sierra, F., & Silva, V. (2014). *An exploratory analysis of existing research on internal combustion engines operating with biogas* (Vol. 18, Issue 39).
- Cabascango, C. (2019). Simulación y evaluación de cámara de combustión usando etanol con gasolina en motores de inyección directa. In *UISEK*. Universidad Internacional SEK, Ecuador.
- Callejón, A., Gomez, G., Martínez, J., Sanchez, S., & Díaz, M. (2020). *Teoría de motores alternativos de combustión interna*. Universidad de Almería, España.
- Carreras, R., Florez, J., Callejon, I., Carrera, X., Balsells, D., Bonet, O., Espada, I., Forns, S., Isidro, L., Miret, T., Sanchez, D., Serrano, A., Soldevilla, X., Villa, J., Costa, R., Forcadell, C., & Casanovas, J. (2005). *Motores alternativos de combustion interna* (Vol. 1). Universidad Politécnica de Cataluña.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2005). Termodinámica. In *Monografía De Enseñanza De La Ingeniería Térmica Y De Fluídos*. McGraw-Hill.
- Colangelo, A. (2016). *Flow Simulation Basic Concepts*. Simulation. <https://www.engineersrule.com/flow-simulation-basic-concepts/>
- Davis, S. J., & Caldeira, K. (2010). Consumption-based accounting of CO2 emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(12), 5687–5692. <https://doi.org/10.1073/pnas.0906974107>
- 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>
- Fernández, F., & Duarte, J. (2013). Módulo para la medición de variables en motores de combustión interna. *Entramado*, 9(2), 250–256.
- FIA. (2015). “*Global reduction in CO2 emissions from cars: a consumer’s perspective.*”
- Fujii, H., & Managi, S. (2015). Optimal production resource reallocation for CO2 emissions reduction in manufacturing sectors. *Global Environmental Change*, 35, 505–513. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.06.005>
- García Mariaca, A., Cendales Ladino, E. D., & Eslava Sarmiento, A. F. (2016). Motores de combustión interna (MCI) operando con mezclas de etanol gasolina: revisión. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 26(1), 75. <https://doi.org/10.18359/rcin.1626>
- Giglio, V., & di Gaeta, A. (2020). “Novel regression models for wiebe parameters aimed at 0D combustion simulation in spark ignition engines.” *Energy*, 210, 118442. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118442>
- Giménez, B., Melgar, A., Horrillo, A., & Tinaut, F. V. (2021). A correlation for turbulent combustion speed accounting for instabilities and expansion speed in a hydrogen-natural gas spark ignition engine. *Combustion and Flame*, 223, 15–27. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.09.026>
- Gomez, S. (2014). *El Gran Libro De SolidWorks - 2ª Ed*. ISBN: 978-607-622-233-1.
- GrabCAD. (2021). GrabCAD: Design Community, CAD Library, 3D Printing Software. In

- GrabCAD (p. grabcad.com). <https://grabcad.com/>
- Henao, E., Romero, C., & Arango, J. (2018). Revisión de la investigación en motores de combustión interna en Colombia. *Ingenio Magno*, 9(2), 74–93.
- Henao, É., Romero, C., & Monroy, M. (2018). Ciclo Atkinson: una alternativa para mejorar la eficiencia en motores de combustión interna. *Revista UIS Ingenierías*, 18(2), 167–176. <https://doi.org/10.18273/revuin.v18n2-2019016>
- Heredia Quintana, S. (2020). *Desarrollo e implementación de una metodología secuencial CFD-cinética química detallada para el análisis de la combustión HCII y sus principales emisiones en motores estacionarios*. Universidad de Antioquia, Medellín.
- Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. ISBN: 007028637X.
- 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>
- Liu, Y., Kuznetsov, A., & Sa, B. (2021). Simulation and Analysis of the Impact of Cylinder Deactivation on Fuel Saving and Emissions of a Medium-Speed High-Power Diesel Engine. *Applied Sciences*, 11(16), 7603. <https://doi.org/10.3390/app11167603>
- Llanes, E., & Leguísamo, J. (2018). Identificación Del Modo De Trabajo De Un Motor GDI Al Variar La Altura Mediante Una Prueba Estática a Ralentí y 2500 RPM. *INNOVA Research Journal*, 3(7), 61–70. <https://doi.org/10.33890/innova.v3.n7.2018.750>
- Marín A., D., & Toro L., M. (2018). “Caracterización de las curvas de presión, par y potencia de un motor de combustión interna monocilíndrico bajo diferentes regímenes de operación” [Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia]. <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/9463/T621.43M337.pdf;jsessionid=7B2FA87FB7FA0B4A54DBEABA46E2F03C?sequence=1>
- Martinas, G., Cupsa, O. S., Stan, L. C., & Arsenie, A. (2015). Cold flow simulation of an internal combustion engine with vertical valves using layering approach. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 95(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/95/1/012043>
- Mora, D. O., & Mantilla, J. M. (2017). Study of the process of combustion in a high swirl engine using computational fluid dynamics. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 33(4), 212–224. <https://doi.org/10.1016/J.RIMNI.2016.04.010>
- 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(February), 297–310. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.02.018>
- Noguera, R. C. (2012). *Motor rotativo Wankel*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Olarte S., E. F., & Rios Q., F. A. (2011). “Aplicación del metodo numerico de Runge Kutta para la determinacion del diagrama indicador de un motor de combustion interna alternativo” [Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia]. https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/1594/digital_21631.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Payri, F., & Desantes, J. M. (2015). *Motores De Combustión Interna Alternativos*. ISBN: 978-84-291-4802-2.

- Prince, J., Ovando, G., & Rodriguez, A. (2018). Análisis y modelado de motores tipo HCCI usando biocombustibles Analysis and modeling of HCCI type engines using biofuels. In *Artículo Revista de Sistemas Experimentales Diciembre* (Vol. 5). www.ecorfan.org/bolivia
- Quintero, P., Gil Del Val, A., & Urroz, J. (2015). *Simulación y estudio en SolidWorks de la cadena cinemática de un motor diésel mono-cilíndrico y de ese mismo motor modificado*. Universidad Publica de Navarra (UPNA).
- Quora. (2015). *What is tumble flow and what are its effects in combustion in IC engine?* <https://www.quora.com/What-is-tumble-flow-and-what-are-its-effects-in-combustion-in-IC-engine>
- Ramirez, J., & Arcilla, A. (2017). Validación experimental de la relación de compresión para varios combustibles a utilizar en un motor de combustión interna. In *Universidad Tecnologica de Pereira*.
- Rea, A. (2011). *Análisis Del Flujo De Aire En El Múltiple De Admisión De Un Motor* [Escuela Superior Politécnica De Chimborazo]. <http://dspace.esepoch.edu.ec/bitstream/123456789/1484/1/85T00206.pdf>
- Reitz, R. D. (2013). Directions in internal combustion engine research. *Combustion and Flame*, 160(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2012.11.002>
- Roberts, A., Brooks, R., & Shipway, P. (2014). Internal combustion engine cold-start efficiency: A review of the problem, causes and potential solutions. *Energy Conversion and Management*, 82, 327–350. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.002>
- Rojas, S. B., & Huaraz, M. A. (2018). *caracterización del atomizado de etanol y propano en inyectores tipo y mediante SolidWorks Flow Simulation*. <http://repositorio.uns.edu.pe/handle/UNS/3045>
- Rovira, A., & Muñoz, M. (2015). *MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA*. ISBN: 978-84-362-7086-0.
- Scaggion, L. (2018). *Analisi fluidodinamica tramite cfd e ottimizzazione del processo di riempimento nei motori di formula sae*. UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA.
- Schiffmann, P., Gupta, S., Reuss, D., Sick, V., Yang, X., & Kuo, T. W. (2016). “TCC-III Engine Benchmark for Large-Eddy Simulation of IC Engine Flows.” *Oil and Gas Science and Technology*, 71(1). <https://doi.org/10.2516/ogst/2015028>
- 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.
- Serrano, D. A., Cerpa, F. Y., & Gutiérrez, G. A. (2021). Análisis de las pérdidas de carga en flujo turbulento en un laboratorio universitario de mecánica de fluidos. *Información Tecnológica*, 32(4), 3–12. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642021000400003>
- Shafie, N. A. M., & Said, M. F. M. (2017). Cold flow analysis on internal combustion engine with different piston bowl configurations. *Journal of Engineering Science and Technology*, 12(4), 1048–1066.
- Sobachkin, D. A., & Dumnov, D. G. (2014). *Base numérica de CFD integrada en CAD*.
- SolidWorks. (2011). *An Introduction to Flow Analysis Applications with SolidWorks Flow Simulation, Student Guide*. PMS0419-ENG
- Tian, Z. F., & Abraham, J. (2014). “Application of computational fluid dynamics (CFD) in teaching internal combustion engines.” *International Journal of Mechanical Engineering Education*, 42(1), 73–83. <https://doi.org/10.7227/IJMEE.42.1.7>
- Tordini, D. (2019, May 2). *Diagnosing an Engine With SOLIDWORKS Flow Simulation*. Mechanical Design, Simulation & Analysis. <https://hawkridgesys.com/blog/diagnosing-an-engine-with-solidworks-flow-simulation>

- Torres M, D., Quintero R, H. F., López L, J. F., & Orozco G, Á. A. (2018). "Monitoreo de condición en motores de combustión Interna monocilíndricos con base en adquisición y procesamiento de señales experimentales" in 6th Engineering, Science and Technology Conference (2017). *KnE Engineering*, 3(1), 736–746. <https://doi.org/10.18502/keg.v3i1.1477>
- 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]. In *Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents* (Vol. 7, Issue 2). https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/98604/44877508_TFG_15184617546657028284912265978353.pdf?sequence=2
- Verdú, D. (2017). *Mejora de una herramienta de diagnóstico de la combustión a partir de la presión instantánea en cámara mediante la incorporación de un modelo de Tumble* [Escuela Técnica Superior Ingenieros Industriales Valencia]. <https://docplayer.es/62764908-Trabajo-fin-de-master-en-ingenieria-industrial.html>
- Xamán, J., & Gijón, M. (2015). *Dinámica De Fluidos Computacional Para Ingenieros* . https://books.google.com.co/books?id=dwIDDAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_atb#v=onepage&q&f=false