

LA IMPORTANCIA DE LA DINÁMICA DE MALLAS EN LA SIMULACIÓN DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA. ALGUNAS NUEVAS TENDENCIAS

Horacio J. Aguerre^{1,6}, Santiago Marquez Damián^{1,2}, Juan M. Gimenez^{1,3},
Ezequiel J. López⁴, Cesar Pairetti⁵ y Norberto M. Nigro^{1,3}

1-Centro de Investigación en Métodos Computacionales (CIMEC-CONICET-UNL-FICH).

2-Universidad Tecnológica Nacional (UTN-FRSF).

3-Facultad de Ingeniería y Ciencias Hidricas (FICH-UNL).

4-Dpto. de Mecánica Aplicada, Fac. de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue (UNComa).

5-Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Rosario (EIM-FCEIA-UNR).

6-Universidad Tecnológica Nacional (UTN-FRCU).

Palabras clave: Dinámica de Fluidos Computacional, Mallas Dinámicas, Layering, IMAA, OpenFOAM(R).

Resumen

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD por Computational Fluid Dynamics) es una herramienta muy adecuada y poderosa para el estudio de motores de combustión interna. Sin embargo, es necesario emplear herramientas específicas que permitan abordar las características dinámicas de la geometría de los motores. Se identifican principalmente dos rasgos problemáticos. En primera instancia, se requiere afrontar las grandes variaciones de volumen que sufre el cilindro durante las diferentes carreras. Por otra parte, se debe resolver la interacción entre el cilindro y los puertos de admisión y escape, la cual es variable a lo largo del ciclo de funcionamiento.

En este contexto, este trabajo presenta nuevas estrategias en la temática de mallas dinámicas con el objetivo de resolver motores de combustión interna. En particular, se detallan las contribuciones realizadas sobre la conocida técnica de Layering, la cual se utiliza para adaptar la malla acorde al movimiento del pistón dentro del cilindro para evitar relaciones de aspecto de mallas exageradas. Se presentan métodos para poder controlar el tamaño de la malla en las diferentes zonas del cilindro y se propone un nuevo esquema para implementar la técnica mediante cómputo en paralelo. Por otro lado, la interacción entre puertos y cilindros se resuelve mediante una técnica de interfaces llamada IMAA (Interfaz de Malla Acoplada Arbitraria) la cual se adapta para funcionar de forma combinada con Layering.

Las nuevas herramientas son implementadas en la suite OpenFOAM(R), donde se las incorpora dentro del marco de un solver de flujo compresible. Las funcionalidades de malla dinámica se adoptan para simular el ciclo completo en un motor de pistones opuestos de dos tiempos en donde se evalúan las características del flujo resultante.

1. Introducción

El estudio de motores de combustión interna mediante la Mecánica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) es una tarea que implica resolver varios aspectos. Por un lado, debe hallarse la solución a un modelo que permita describir el flujo compresible desarrollado dentro del motor, acoplado con otros fenómenos físicos, como la transferencia de energía y la combustión de la mezcla aire-combustible resultante de un proceso de inyección y evaporación del combustible líquido. Además de la física compleja, se agrega una dificultad adicional que son los componentes móviles del motor que generan que el dominio de estudio sea variable en el tiempo. Principalmente se diferencian dos características: la primera de ellas es la gran deformación del cilindro, dada por la relación de compresión requerida por el ciclo termodinámico (tanto Otto como Diesel); otro aspecto a tener en cuenta es la gestión del ingreso y egreso de gases en el interior del cilindro, la cual depende principalmente si el motor es de dos o cuatro tiempos. En el área de la simulación de fluidos computacional, las características dinámicas de la geometría del motor se abordan mediante herramientas de malla dinámica. En estos problemas, la discretización del dominio debe adecuarse a los cambios de tamaño y forma del mismo a lo largo del tiempo. Las grandes deformaciones del cilindro y el control del ingreso y egreso de gases en el mismo se realizan mediante técnicas diferentes, las cuales se combinan para resolver el ciclo completo de un motor de combustión interna.

Una manera de resolver las grandes deformaciones del dominio es deformando la malla (discretización) inicial del problema. Mediante esta técnica, el movimiento de frontera se traslada hacia el interior del dominio por medio de diferentes estrategias de variable complejidad y robustez. Entre varios métodos se pueden destacar aquellas técnicas basadas en una analogía de las aristas de malla con un sistema resorte-amortiguador [1]. Otra alternativa es trasladar el movimiento de la frontera hacia el interior del dominio de forma suave resolviendo el problema de Laplace para la incógnita desplazamiento de los nodos [2]. Sin embargo, los métodos de deformación de malla tienen desventajas en el caso de extremas deformaciones del dominio. Un ejemplo se observa en los cilindros de motores de combustión interna. En motores de ciclo Diesel, el volumen mínimo y máximo alcanzan relaciones de hasta 25:1 o aún mayores [3]. Este grado de deformación de la malla no puede abordarse mediante técnicas de deformación de malla debido a que la calidad de los elementos de la malla se ve negativamente afectada, lo que genera errores y problemas de convergencia de los métodos numéricos [4]. Para este tipo de casos se utiliza generalmente la técnica de remallado [5]. El remallado es una técnica muy potente para el abordaje de la dinámica de mallas ya que puede adaptarse a cualquier cambio arbitrario del dominio. En contraparte, el proceso de remallado es costoso desde el punto de vista computacional. Además, los diferentes campos del problema en cuestión deben ser trasladados desde una discretización a otra incurriendo en errores numéricos. Una técnica que puede emplearse para reemplazar al remallado es el Layering. La misma se utiliza comúnmente en la simulación de motores de combustión interna para resolver la compresión y expansión del cilindro [6]. En este método se propone remallar el dominio de forma localizada, modificando la malla en una zona reducida del dominio. En este sentido, se disminuye el costo computacional y los errores de mapeo de campos.

El otro problema a resolver en la simulación computacional de motores de combustión interna es el control del ingreso y egreso de flujos en el cilindro. En un motor de dos tiempos el ingreso y egreso de gases ocurre generalmente por el movimiento relativo entre

el pistón y las lumbreras de entrada y salida de gases que están talladas en el cilindro. En un motor de cuatro tiempos, la comunicación entre el aire de los puertos y el cilindro se controla por medio de válvulas. En ambos casos, el modelo computacional debe resolver movimientos tangenciales entre las diferentes regiones que componen el dominio computacional. Esta característica obliga a utilizar mallas inconexas entre sí y por consiguiente se debe adoptar una técnica para acoplar los dominios. Dentro del área de los motores de combustión interna es muy utilizada la técnica de interfaces deslizantes (*sliding interfaces*) [6, 7, 8]. En este método se acoplan los dominios inconexos por medio de la unión de mallas. Al momento de desplazar tangencialmente los dominios, las mallas son desacopladas. Luego, se realiza el movimiento deseado y posteriormente, las mallas vuelven a unirse. Si bien la estrategia de mallas deslizantes es un método de remallado local, los cambios en la malla se realizan solamente a nivel de nodos y caras. El número total de celdas de la malla permanece inalterado por lo que no es necesario trasladar los campos desde la malla desacoplada hacia la acoplada. Además, al momento de resolver el problema numérico la malla está conformada por un solo dominio, y de esta forma se evitan interpolaciones de campos en la interfaz, evitando errores numéricos. La desventaja de esta técnica radica en que el proceso de unión de mallas es costoso computacionalmente limitando el tamaño de los problemas que pueden ser abordados por esta técnica, además de las dificultades propias de su implementación en paralelo.

Una alternativa computacionalmente más eficiente es el uso de interfaces numéricas entre los dominios. En estas técnicas se realiza un acople entre los dominios basado en interpolaciones de campos, en función de un esquema de conectividades. Una forma muy eficiente para determinar las conectividades entre dos interfaces es el método de supermalla local presentado por Farrel y Maddison [9]. En esta estrategia se hace uso de un algoritmo optimizado para la búsqueda de aquellas caras, pertenecientes a interfaces diferentes, que se solapan entre sí. Una vez que se encuentra un par de caras enfrentadas, se calcula el área de intersección entre las mismas. Con el esquema de conectividades y el área de intersección de cada par de caras conectadas se construye un conjunto de pesos de interpolación que se utilizan para acoplar los subdominios.

En este trabajo se presenta el uso de una técnica de interpolación llamada IMAA (Interfaz de Malla Acoplada Arbitraria) basada en la estrategia de supermalla local. La técnica de IMAA presenta la ventaja de permitir acoples parciales entre interfaces. De esta manera, las zonas acopladas de interfaz se resuelven interpolando las variables de estudio y en las zonas no acopladas se impone una condición de borde diferente que generalmente son condiciones de borde de pared. Esta característica del método IMAA lo hace apto para la simulación de motores de combustión interna, en donde la necesidad de definir zonas acopladas y no acopladas es inevitable. Sin embargo, la técnica de IMAA requiere de la duplicación de los bordes geométricos del dominio para alocar las zonas acopladas y desacopladas respectivamente. Esta situación complica su implementación conjunta con la técnica de Layering. En este sentido, este trabajo presenta un ejemplo de implementación de la combinación de la estrategia de IMAA con la técnica de Layering. Además, se presentan estrategias para el manejo del tamaño de malla por medio del Layering y una mejora en el uso paralelizado de la técnica.

Finalmente, se simula un motor de pistones opuestos de dos tiempos en donde se aplican las herramientas de malla dinámica descritas. La implementación computacional se realiza mediante la suite de código abierto OpenFOAM(R) [11].

2. Teoría

2.1. Layering

La técnica de Layering es una metodología empleada para abordar las grandes deformaciones que se experimentan en el cilindro de motores de combustión interna. En esta técnica, la malla del cilindro consiste en la extrusión de una malla bidimensional a lo largo de un eje. La malla resultante se divide en varias partes o capas las cuales son los elementos de trabajo que se utilizan en el presente método. La técnica funciona de la siguiente manera: cuando el cilindro se comprime, la capa adyacente a la frontera móvil reduce su tamaño. Cuando este disminuye por debajo de un cierto valor, la capa en cuestión se remueve del dominio. En este sentido, las capas se van eliminando de forma secuencial a medida que el cilindro se comprime. De manera contraria, cuando el cilindro se expande, la capa adyacente a la frontera móvil aumenta su tamaño. Cuando este aumenta por encima de un cierto valor, la capa en cuestión se subdivide en dos nuevas capas, es decir se agrega una nueva capa. De esta forma, se van agregando nuevas capas a medida que el cilindro se expande. Para mayor información del procedimiento de la técnica, se puede consultar un trabajo previo de los autores [12]. Uno de los inconvenientes de esta técnica en su versión original, es que el tamaño característico de la malla es constante a lo largo de toda la transformación del dominio. Esta característica no es deseable en la simulación de motores de combustión interna, ya que si el paso de malla es adecuado para el volumen mínimo del cilindro, será excesivo para la posición de máxima expansión. Si se ajusta la resolución de malla para que sea acorde al estado de máximo volumen del cilindro, la resolución en el estado comprimido será insuficiente. La Figura 1 muestra gráficamente esta problemática:

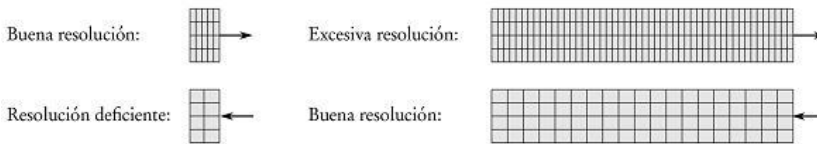


Figura 1. Problemática de la técnica de Layering cuando se usan tolerancias de capa constantes.

Para resolver este inconveniente se proponen dos estrategias diferentes. La primer opción consiste en el uso de tolerancias de Layering que son variables en el espacio. En este esquema se define el tamaño de la capa y en definitiva, el tamaño característico de la malla en función de la posición del pistón. De esta forma se puede definir un tamaño pequeño de capa para la cámara de combustión y un tamaño mas holgado para las zonas alejadas de la cámara, cuando el cilindro se encuentra expandido. En la Figura 2 se observa un ejemplo de uso de tolerancias variables con el espacio mediante la definición de una zona fina, una zona gruesa y una zona de transición lineal entre las dos primeras,

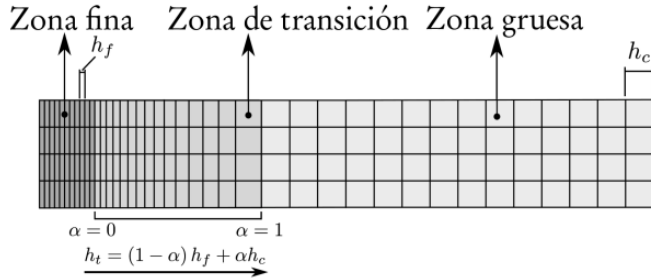


Figura 2. Uso de tolerancias variables con el espacio mediante tres zonas de refinamiento.

La segunda alternativa es el uso de deformación de malla en combinación con el movimiento rígido de frontera. En la técnica de Layering original, el dominio interno del cilindro permanece estático, siendo solamente la frontera la que se mueve de forma rígida. El uso de deformación de malla permite que el movimiento de la frontera se traslade hacia el interior del dominio de una forma gradual. Esta estrategia tiene la ventaja adicional de que permite reducir la frecuencia de adición o remoción de capas de acuerdo al grado de deformación de malla impuesto sobre el dominio interno. El grado de deformación impuesto sobre la malla permite controlar el tamaño de la misma, obteniéndose mallas comprimidas con un refinamiento aceptable y mallas expandidas con una cantidad de elementos no excesiva. Otra ventaja que presenta el uso de deformación de malla es el hecho que la deformación global del cilindro se distribuye a lo largo de todo el dominio. Esto evita que la totalidad de la deformación sea absorbida por la capa adyacente, lo que reduce la tasa de compresión o expansión de la misma y consecuentemente ayuda a evitar problemas numéricos. En la Figura 3 se muestra un ejemplo de combinación de Layering con deformación de malla.

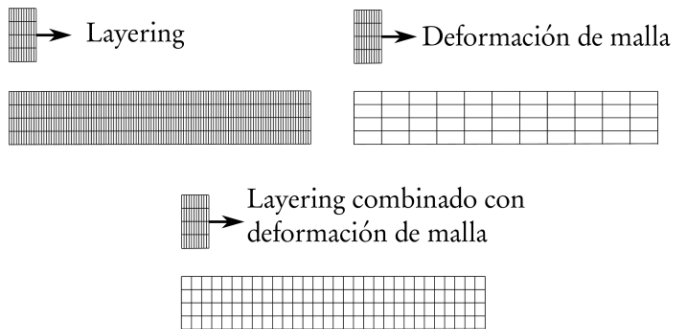


Figura 3. Transformaciones de la malla para las técnicas de Layering, deformación de malla y combinación de ambas.

2.2. Interfaz de Malla Arbitraria Acoplada

El método de interfaz de malla arbitraria acoplada posibilita que los subdominios puedan estar mallados con un diferente patrón de discretización y que puedan desplazarse de forma relativa de forma independiente. El punto de contacto entre los subdominios esta conformado por las interfaces las cuales son mallas de superficie (bidimensionales). Debido a que los subdominios están mallados de forma diferente, las interfaces tienen mallas no conformes. La técnica de IMAA consiste en generar un esquema de conectividades entre las mallas no conformes para luego realizar interpolaciones numéricas entre los valores adyacentes a ambas interfaces. Con el objeto de realizar las interpolaciones, se deben definir los pesos que se le va a asignar a cada valor interpolado. Esto se determina según la porción de área solapada que tienen los elementos conectados en la interfaz.

En el método de los volúmenes finitos, con las incógnitas definidas en centros geométricos de celda (método colocado), se necesitan interpolar los valores a las caras para poder calcular los flujos entrantes o salientes de la celda (volúmenes de control). Cualquier cara interna de la malla pertenece sólo a dos celdas, las cuales se denominan celda *owner* y celda *neighbour* [4]. Por lo tanto el valor en una cara interna se calcula por medio de interpolación de estos dos valores,

$$\phi_f = \alpha_{own} \phi_{own} + \beta_{nbr} \phi_{nbr} \quad (1)$$

donde ϕ_f es el valor interpolado en la cara, ϕ_{own} es el valor de la celda *owner*, ϕ_{nbr} es el valor de la celda *neighbour*. Los coeficientes α y β dependen del esquema de interpolación empleado (discretización espacial). Sin embargo, una cara de interfaz puede pertenecer a más de una celda en la región opuesta a a la interfaz considerada. Para resolver este inconveniente, la técnica de IMAA define un valor de celda *neighbour* equivalente, que resulta de la interpolación de los valores de todas las celdas que están solapando la cara de interfaz,

$$\phi_{nbr}^- = \sum_{i=1}^n w^i \phi_{nbr}^i \quad (2)$$

donde ϕ_{nbr}^- es el valor interpolado (valor de celda *neighbour* equivalente), w^i son los pesos de interpolación y ϕ_{nbr}^i son los valores de las celdas *neighbour* que se encuentran del lado opuesto de la interfaz. De esta forma, la determinación del valor de interfaz resulta como,

$$\phi_f^I = \alpha \phi_{own} + \beta \phi_{nbr}^- \quad (3)$$

donde ϕ_f^I es el valor de una cara de interfaz.

Una característica importante que tiene la estrategia IMAA es que permite resolver casos donde el acople entre dominios es parcial, es decir, la interfaz de un dominio puede estar parcialmente solapada con la interfaz del dominio opuesto. En el sector acoplado se aplican las interpolaciones descritas previamente, mientras que en el sector no acoplado se define una nueva condición de borde. Esta nueva condición de borde es generalmente

una condición de pared, aunque es posible determinar cualquier tipo de condición, como puede ser una entrada o salida de flujo. La implementación computacional del manejo de interfaces parcialmente solapadas es resuelta mediante el uso de una frontera de dominio de carácter dual. En otras palabras, la interfaz de IMAA está conformada por una malla de superficie que está duplicada, es decir, las caras de borde de los subdominios enfrentados están duplicadas. Los dos bordes de cada interfaz se denominan borde *couple* y *blockage* respectivamente. La interfaz duplicada se utiliza para alojar en cada uno de los bordes el tratamiento de las regiones acopladas y desacopladas de forma separada. En este sentido, el sector acoplado (regiones solapadas) es tratado por el borde *couple*. De forma contraria, la región inconexa se resuelve mediante el borde *blockage*. Si el sector de la interfaz es acoplado, el borde *couple* actúa de forma completa y la influencia del borde *blockage* se anula. En el caso contrario, en el sector desacoplado el borde *blockage* actúa de forma completa y la influencia del borde *couple* desaparece. El procedimiento para decidir el grado de actuación de cada borde es a partir de la manipulación de las áreas de las caras de ambas interfaces. En este sentido, si se configura un valor nulo de área a una cara de interfaz, la influencia de esta en el sistema numérico es anulada. Por lo tanto, de forma de anular la influencia de una interfaz en un determinado sector se define un valor nulo de área a todas las caras que se encuentran en esa zona. Es importante remarcar que los bordes *couple* y *blockage* pueden contribuir de forma parcial para aquellas zonas en que las caras de interfaz están parcialmente solapadas. La manipulación de las áreas se realiza escalando las áreas geométricas de acuerdo al porcentaje de área solapada.

$$\tilde{A}_f^c = \sum_{i=1}^n w^i A_f^c \quad (4)$$

$$\tilde{A}_f^b = (1 - \sum_{i=1}^n w^i) A_f^b \quad (5)$$

donde \tilde{A}_f^c y \tilde{A}_f^b son las áreas manipuladas de los bordes *couple* y *blockage* siendo A_f^c y A_f^b las áreas geométricas originales de ambos bordes respectivamente. Las áreas de las caras de interfaz cumplen la restricción de la conservación del área geométrica. La suma de las áreas manipuladas es igual al área geométrica de cada cara (los bordes *couple* y *blockage* son idénticos, por lo tanto el área de sus caras también),

$$\tilde{A}_f^c + \tilde{A}_f^b = A_f^c = A_f^b \quad (6)$$

2.3. Combinación de Layering con la técnica de interfaces IMAA

La estrategia de acople dinámico de IMAA en combinación con la técnica de Layering permite resolver las dificultades de malla dinámica presentes en motores de combustión interna. En la Figura 4 se muestran ejemplos de aplicación de la metodología para motores de dos y cuatro tiempos,

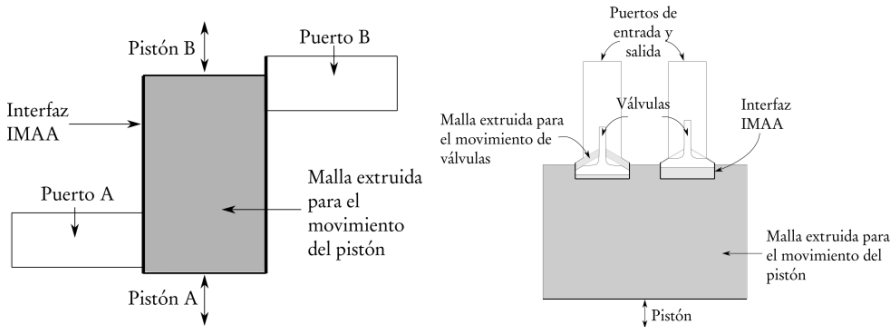


Figura 4. Ejemplos de aplicación de la combinación de Layering e IMAA en motores de dos y cuatro tiempos (izquierda y derecha respectivamente).

En un motor de dos tiempos, el movimiento del pistón o los pistones, para el caso de un motor de pistones opuestos, determina la comunicación del cilindro con los puertos. En este contexto, la interfaces de IMAA están conformadas por el borde exterior del cilindro y los bordes límites de los puertos. En la Figura 4 se aprecia que el puerto B está parcialmente conectado con el cilindro. En esta situación es indispensable el uso de una interfaz que permita acoples parcialmente solapados, como lo permite la técnica de IMAA.

En el ejemplo del motor de cuatro tiempos, las interfaces de IMAA se utilizan para comunicar la zona del cilindro con la región de malla extruida que se dispone especialmente para el movimiento de las válvulas. Para ambos casos (dos y cuatro tiempos) la técnica de Layering se utiliza para resolver el movimiento del pistón, en particular, en el motor de cuatro tiempos, la metodología también se adopta para posibilitar el movimiento de las válvulas.

2.4. Paralelismo

El cómputo en paralelo es una estrategia conveniente para acelerar los tiempos de las simulaciones. Sin embargo, los métodos numéricos deben adaptarse computacionalmente al cómputo paralelizado lo que puede ser una tarea de gran dificultad. En este sentido, se implementa computacionalmente el método combinado de Layering y la técnica de IMAA de forma totalmente paralelizada en una arquitectura de memoria distribuida. En esta arquitectura el paralelismo se realiza dividiendo el dominio de estudio en subdominios que van a ser distribuidos a los diferentes procesadores encargados del cómputo en paralelo. Debe prestarse especial atención al aplicar Layering para resolver simulaciones de forma paralelizada. Al momento de remover o agregar una nueva capa en el dominio, todos los procesadores que contienen el frente de avance móvil del dominio deben sincronizarse. Es decir, todos los procesadores deben remover o agregar una capa de forma simultánea. En caso de la remoción o adición se realice por un grupo parcial de procesadores, la malla resultante no será válida. En problemas de múltiples zonas de movimiento, como puede ser un motor multicilíndrico, cada grupo de procesadores que contiene el frente móvil de cada cilindro debe sincronizarse para remover y agregar las capas de forma simultánea. En consecuencia, se deben gestionar diferentes grupos de procesadores que se comunican

entre sí. Esta tarea se realiza mediante la estrategia de comunicadores del protocolo de comunicación Interfaz de Paso de Mensajes (MPI, por sus siglas en inglés).

Otra cuestión a tener en cuenta al momento de simular Layering en paralelo es la descomposición del dominio en subregiones. El esquema de división adoptado en el frente móvil debe mantenerse a lo largo de toda la extrusión del cilindro. Para resolver este problema se desarrolla un particionador automático especialmente diseñado para descomponer dominios destinados a Layering. El mismo utiliza un esquema de partición polar que se centra en el eje de cada cilindro o sector de malla extruida. El particionador utiliza un algoritmo de balanceo automático que tiene como objetivo distribuir uniformemente la cantidad de celdas en todos los subdominios generados. Adicionalmente, el particionador se encarga de asegurar que cada procesador tiene una malla extruida sin interrupciones. Esta tarea se realiza mediante una "caminata" o walking partiendo de las caras de cada frente móvil siguiendo la dirección de extrusión. En caso de encontrar alguna celda que no pertenece al procesador deseado, se la realoca en el procesador en cuestión.

3. Ejemplo de aplicación en un motor de pistones opuestos

El presente ejemplo de aplicación es un motor de pistones opuestos el cual se denomina JLA en referencia a su inventor Jose Luis Alonso. El motor en cuestión consta de cuatro cilindros en línea, cada uno con dos pistones enfrentados. A su vez, dos cigüeñales se disponen uno en cada extremo de los cilindros, comandando los pistones de dicho extremo. Se utiliza el ciclo Otto de dos tiempos en donde el ingreso del combustible al cilindro se realiza mediante inyección directa.

Este motor presenta las dos problemáticas descritas en este trabajo, en referencia al manejo de mallas dinámicas. El cilindro sufre de grandes deformaciones debido al movimiento de los pistones y además, el movimiento de los pistones abre y cierra los puertos de admisión y escape habilitando de esta forma el ingreso y egreso de gases. La deformación del cilindro se resuelve mediante la técnica de Layering. En este ejemplo se aplican los desarrollos descritos en este trabajo: múltiples zonas de movimiento, tolerancias variables con el espacio y manejo paralelizado de la técnica. Por otra parte, la interacción entre el cilindro y los puertos de admisión se resuelve mediante la estrategia de IMAA la cual se concibe para trabajar en combinación con Layering. El modelo computacional del problema comprende el análisis fluidodinámico de un cilindro del motor el cual se lo considera de forma aislada.

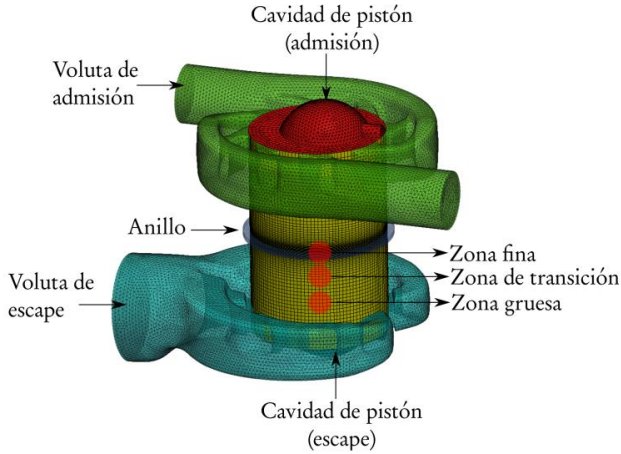


Figura 5. Diferentes partes en la que se divide el dominio computacional indicando las zonas de refinamiento en el cilindro.

La cámara de combustión tiene un refinamiento mayor que las restantes partes del cilindro. Esta característica se logra gracias al uso de tolerancias variables con el espacio la cual comprende tres zonas de refinamiento para este ejemplo, una zona gruesa, una zona de transición y una zona fina. La geometría utilizada para el modelo computacional se muestra en la Figura 5, indicando las diferentes partes del mismo y detalles de la discretización utilizada para el cilindro. Se detalla la presencia de un anillo en la zona central del cilindro. Este anillo es producto de una separación de las camisas del cilindro, la cual genera una porción circular dentro del mismo de mayor diámetro.

Se resuelve un ciclo del motor sin considerar la combustión de la mezcla aire-combustible. El objetivo principal del estudio es evaluar las características dinámicas del flujo de entrada y los patrones de flujo que se presentan en el interior del cilindro.

3.1.1. Configuración del problema

Las propiedades del fluido adoptado para el modelo computacional son equivalentes a la del aire atmosférico.

La variación de la viscosidad y conductividad térmica del fluido con la temperatura se calculan mediante el modelo de Sutherland [13]. Con respecto a las condiciones de borde del problema, se considera a la entrada una presión de 190000 Pa y una temperatura de 371 K. Estos valores se corresponden con las características de salida del turbo compresor diseñado para el motor.

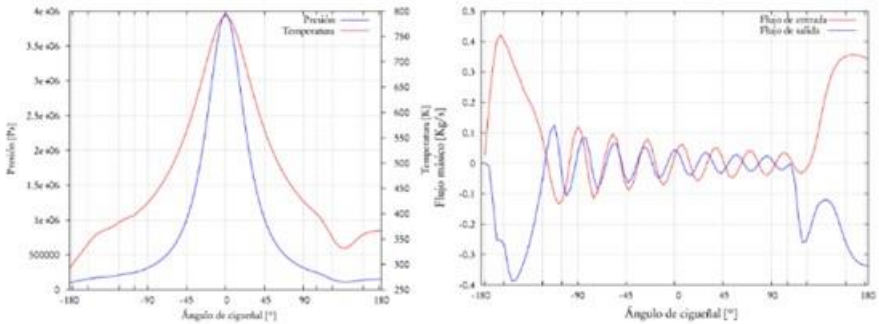


Figura 6. Evolución de la temperatura, presión, flujos de salida y entrada a lo largo del ciclo simulado.

Se asume presión atmosférica para los puertos de salida y condiciones de temperatura adiabáticas en las paredes del motor. El problema es resuelto mediante el solver compresible de la suite OpenFOAM(R), denominado *rhoPimpleDyMfoam*.

3.1.2. Resultados

En la Figura 6 se muestra la evolución de la temperatura y la presión dentro del cilindro dentro del ciclo de motor simulado. El flujo observado en el cilindro presenta una velocidad angular considerable. Este patrón de flujo se denomina usualmente como *swirl* [3]. Debido a que este motor tiene un sistema de alimentación por inyección directa, es recomendable tener un flujo con alto *swirl* para de esta forma poder evaporar y mezclar el combustible inyectado.

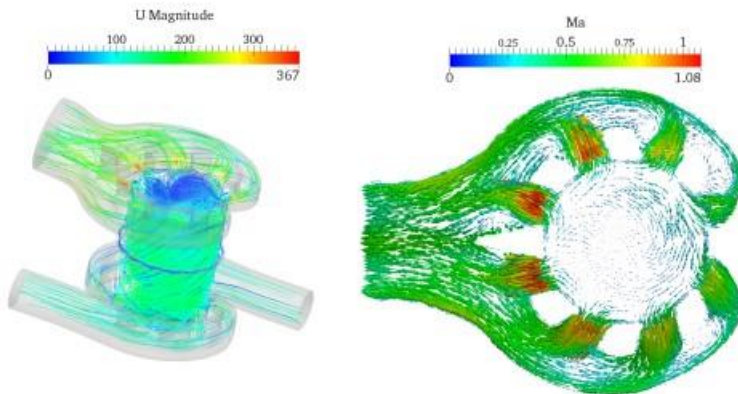


Figura 7. Líneas de corriente sobre todo el dominio y vectores de velocidad graficados sobre un plano transversal al conducto de escape.

En la Figura 7 se muestra a la izquierda, líneas de corriente coloreadas con la velocidad en donde se puede observar el flujo con *swirl*. El mismo está inducido por el ángulo de entrada del flujo al cilindro que es condicionado por la forma geométrica de las lumbreras. En el

lado izquierdo de la Figura 7 se grafican vectores coloreados con el número de Mach sobre un corte transversal al eje axial del cilindro, el cual se localiza en un plano medio de las lumbreras de salida. Se observa una distribución asimétrica del flujo en las lumbreras. La mayor parte del flujo egresa por las lumbreras que comunican al puerto de salida de forma directa. Por otro lado, en las lumbreras que están dispuestas de forma opuesta al conducto de escape, el flujo es relativamente menor.

4. Notas finales

En este trabajo se presentó un conjunto de herramientas para el estudio de motores de combustión interna mediante simulación computacional. En particular, se hizo énfasis en herramientas de malla dinámica que resuelvan dos aspectos importantes de la dinámica de motores, la deformación del cilindro y la interacción entre el cilindro y los puertos de entrada y salida de gases. Este sentido, se describió la técnica de Layering para el tratamiento de las grandes deformaciones de malla y la técnica de IMAA para la resolución del acople entre las diferentes zonas del motor.

Con respecto a la técnica de Layering se muestran un par de mejoras destinadas al manejo del tamaño de malla para los diferentes estados del cilindro. En primer lugar se propone el uso de tolerancias variables con el espacio. Esta funcionalidad permite definir el tamaño de la capa en función de la posición del pistón mediante cualquier función arbitraria. La otra alternativa desarrollada es el uso combinado de deformación de malla con Layering que permite generar un cambio automático del tamaño de malla a medida que el cilindro se comprime o expande. Esta técnica tiene ventajas adicionales, como la reducción de la frecuencia de remoción o adición de capas y el suavizado de la deformación por medio de la distribución de la misma en todo el dominio. Por otro lado, se describió la técnica de manejo de interfaces denominada IMAA. Se explicó brevemente el método de interpolación utilizado y el manejo de las zonas acopladas y desacopladas de la interfaz.

Ambas técnicas computacionales se implementaron de forma conjunta para generar una herramienta apta para la simulación de motores de combustión interna. Se explicó de forma conceptual como se utiliza la combinación de los métodos en la simulación de motores de cuatro y dos tiempos. También se incluyeron detalles sobre el abordaje en paralelo de ambas técnicas. Las herramientas propuestas se evaluaron en la simulación de un motor de pistones opuestos de desarrollo regional. El motor utiliza un ciclo de dos tiempos, en donde la tecnología de interfaces con acople parcial es indispensable para la gestión de la apertura y cierre de lumbreras. En la simulación se aplica el uso de tolerancias variables con el espacio de la técnica de Layering para determinar un refinamiento adecuado en la cámara de combustión. El problema se resolvió mediante un solver compresible. De los resultados obtenidos, se realizó una breve discusión de las características de flujo más relevantes.

Las herramientas descritas en este trabajo permiten resolver de forma combinada la gestión de malla dinámica de los motores de combustión interna. Las técnicas están diseñadas para funcionar mediante cómputo paralelizado lo que permite acelerar los tiempos de cómputo y posibilita el estudio de problemas con mayor grado de detalle. Se destaca que las herramientas se implementaron en una plataforma de código abierta, permitiendo de esta forma tener un mayor control de la herramienta y además, permite

tener un instrumento de aplicación industrial sin necesidad de destinar recursos económicos en licencias de *software*.

Los trabajos a futuro están orientados a expandir el alcance de las técnicas de Layering e IMAA en problemas de motores de cuatro tiempos con válvulas inclinadas, lo cual permitirá resolver el ciclo completo de motores de combustión interna de forma automática.

5. Referencias

- [1] Blom F, "Considerations on the spring analogy", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 32(6):647-688, 2000
- [2] Löhner R, Yang C, "Improved ALE mesh velocities for moving bodies", *Communications in Numerical Methods in Engineering*", 12(10):599-608, 1998
- [3] Heywood J, "Internal combustion engine fundamentals", Mc-Graw-Hill, 1988
- [4] Jasak H, "Error analysis and estimation for the finite volume method with applications to fluid flows", Imperial College London, 1996
- [5] Menon S, Mooney K G, Stapf K, Schmidt D P, "Parallel adaptive simplicial re-meshing for deforming domain cfd computations ", *Journal of Computational Physics*, 298:62-78, 2015
- [6] Lucchini T, D'Errico G, Jasak H, Tukovic Z, "Automatic mesh motion with topological changes for engine simulation", Technical Report, SAE Technical Paper, 2007
- [7] Piscaglia F, Montorfano A, Onorati A, "Development of fully-automatic parallel algorithms for mesh handling in the OpenFOAM-2.2.x technology", Technical Report, SAE Technical Paper, 2013
- [8] Piscaglia F, Montorfano A, Onorati A, "A moving mesh strategy to perform adaptive Large Eddy Simulation of IC engines in OpenFOAM", International Multidimensional Engine Modeling User's Group Meeting, 2014
- [9] Farrell P, Maddison J, "Conservative interpolation between volume meshes by local galerkin projection" *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 200:89–100, 2011
- [10] Weller H, Tabor G, Jasak H, Fureby C, "A tensorial approach to computational continuum mechanics using object oriented techniques", *Computers in Physics*, 12(6):620 – 631, 1998
- [11] Márquez Damián S, Gimenez J, Nigro, N, "gdbOF: A debugging tool for OpenFOAM", *Advances in Engineering Software*", 47:12-23, 2012
- [12] Aguerre H, Márquez Damián S, Gimenez J, Nigro N, "Modeling of compressible fluid problems with OpenFOAM using dynamic mesh technology", *Mecánica Computacional Vol. XXXII*, 2013
- [13] Sutherland W, "The viscosity of gases and molecular force", *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 36(223):507–531, 1893

