

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LOS MOVIMIENTOS CARACTERÍSTICOS DEL FLUJO EN CILINDROS DE MOTORES ALTERNATIVOS DE ALTA PERFORMANCE

[†]Alejandro Albanesi, [‡]Angel Zanotti, [†]Nestor Calvo, [†]Norberto Nigro y [‡]Mario Storti

[†]Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Santa Fe
Lavaisse 610, S3000GLN Santa Fe, Argentina.
e-mail: aalbanes@frsf.utn.edu.ar

[‡]Centro Internacional de Métodos Computacionales en Ingeniería (CIMEC)
INTEC-Universidad Nacional del Litoral-CONICET
Güemes 3450, S3000GLN Santa Fe, Argentina
e-mail: azanotti@intec.unl.edu.ar, web page: <http://venus.ceride.gov.ar/>

Palabras Claves: CFD, LES, Motores Alternativos, Turbulencia, Tumble.

Resumen. *El movimiento del gas en el interior de cilindros de motores alternativos es uno de los principales factores que controlan el proceso de combustión; ya sean encendidos por chispa o por compresión. Por lo tanto, surge la necesidad de estudiar tales movimientos con la finalidad de lograr óptimos estados de combustión que permitan reducir las emisiones y el consumo de combustible.*

En el diseño de motores alternativos de alta performance dos números adimensionales juegan un rol dominante: estos son el coeficiente de descarga y el índice de tumble. El primero es una medida de las pérdidas de presión introducidas por la combinación válvula, conducto de admisión y cilindro; el segundo es un índice del movimiento rotacional de la carga alrededor de un eje normal al eje del cilindro.

El presente trabajo tiene como objetivo la simulación numérica del flujo en el interior del conjunto conducto de admisión, cámara de combustión y cilindro debido a una diferencia de presión constante (flujometría estática virtual); determinando el coeficiente de descarga e índice de tumble.

La resolución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes, para flujos incompresibles viscosos, se realiza mediante el método de elementos finitos (FEM) con un esquema SUPG-PSPG. Un modelo LES-Smagorinsky es utilizado para el cálculo de la turbulencia del flujo.

1 INTRODUCCIÓN

En un motor de combustión interna (**MCI**) la energía térmica requerida para realizar el trabajo mecánico es suministrada por la reacción química entre el combustible y el oxígeno del aire. La duración del proceso de combustión es del orden de los milisegundos, fuertemente dependiente de la preparación de la mezcla aire-combustible¹. Para una buena preparación de la mezcla y una alta tasa de combustión, la carga* fresca debería tener presentes macro y micro-estructuras en su flujo.

El término macro-estructura incluye movimientos de gran escala de la carga en el interior del cilindro, es decir swirl (con un eje de rotación paralelo al eje del cilindro), y tumble (con un eje de rotación perpendicular al eje del cilindro). El término microestructura está relacionado con los movimientos de pequeña escala (turbulencia), caracterizados por la intensidad de la turbulencia, la cual es determinante en la velocidad de propagación del frente de llama.

Para lograr óptimos estados de la combustión que permitan reducir las emisiones y el consumo de combustible, es fundamental conocer la cantidad de carga que ingresa al cilindro y la calidad de la misma (mezclado).

El procedimiento de trabajo sobre el conjunto cámara de combustión, conductos y válvula de admisión para lograr una óptima combustión involucra la interrelación entre las áreas experimentales y las correspondientes al cálculo. Para lograr dicha interrelación, es necesario poder capturar la geometría de los prototipos utilizados en los ensayos.

Por lo tanto este trabajo está dividido en dos grandes bloques. El primero compete al digitalizado del prototipo y reconstrucción de la geometría, para luego obtener una malla de tetraedros que pueda correr en un software de elementos finitos (**FEM**- Finite Element Method), o sea, una malla que cumpla con todas las condiciones de calidad requeridas por un código de elementos finitos.

La segunda parte es la correspondiente a la simulación numérica del flujo para el conjunto cámara, conducto y válvula de admisión, y la identificación de estructuras vorticosas, movimientos característicos, etc, en post de poder interpretar como influyen las mismas en la combustión.

En el proceso de estudio de los movimientos característicos del flujo en motores alternativos, la operación de digitalizado y reconstrucción de la geometría es el cuello de botella. En el digitalizado el inconveniente radica en la existencia de zonas ocultas donde los palpadores u otros equipos no pueden acceder, por lo que nos vemos obligados a hacer un reconocimiento manual (puntos aislados). No obstante en algunos sectores la operación puede realizarse en forma semiautomática (curvas de nivel). En el proceso de reconstrucción, la densidad de puntos para poder capturar con exactitud la superficie debe ser alta y con un h (distancia entre puntos) uniforme; de otra forma, se obtienen defectos en las primeras etapas.

Nota: cuando hacemos referencia a la carga, estamos diciendo que puede ser aire caso de los motores con inyección directa de combustible en la cámara (GDI**- Gasoline Direct Injection), Diesel; o bien mezcla de aire y combustible cuando la mezcla es preparada en el conducto de admisión.*

En la Tabla 1 vemos los datos del motor al que corresponde la tapa de cilindros estudiada.

| | |
|------------------------------|----------------------|
| Diámetro del Cilindro | 88 mm |
| Carrera | 82 mm |
| Número de Cilindros | 4 |
| Cilindrada | 2000 cm ³ |
| Relación de Compresión | 10:1 |
| Número de Válvulas | 4 |
| Diámetro Válvula de Admisión | 36 mm |

Tabla 1: Datos del Motor.

2 GENERACION DE LA GEOMETRIA Y DE LA MALLA

Para reconstruir la geometría y generar la malla se utilizó un software desarrollado por N. Calvo². Este software permite construir mallas de tetraedros mediante una Triangulación de Delaunay.

2.1 Generación de nodos

El método consiste en hacer una triangulación de los nodos provistos por la frontera y luego agregar secuencialmente el centro de toda esfera** interior “grande”, reconstruyendo localmente la triangulación con cada nodo agregado. Con este mecanismo, la malla que se obtiene no requiere ningún tratamiento posterior de suavizado.

***Nota: La circunfera de un tetraedro es la esfera definida por sus vértices, (Fig. 1). Se usará el término “esfera” en lugar de “circunfera” o “circuncírculo” y “centro” en lugar de “centro de la circunfera”.*

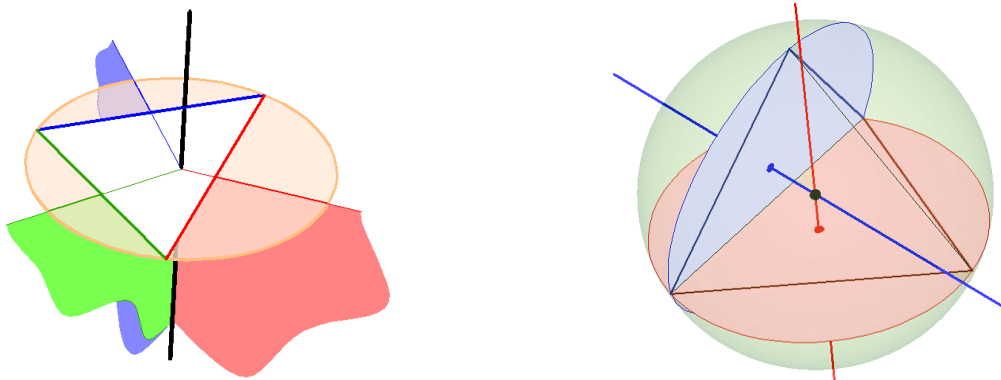


Figura 1: Circunferas y Mediatrices.

2.2 Malla de frontera

El generador desarrollado no respeta las mallas de frontera (*unconstrained* Delaunay) es decir que la frontera de la malla de tetraedros que se obtenga no será la malla original. Los nodos originales sí permanecen y son los únicos que aparecen en la frontera final.

La generalización del criterio de Delaunay a mallas de superficie (no planas) en 3D no es Euclídea y por lo tanto no sirve para garantizar que la frontera de una malla Delaunay de tetraedros sea una malla Delaunay de triángulos. Una “*constrained Delaunay triangulation*”, que respete cualquier frontera original, no es Delaunay.

Para utilizar los nodos como puntos de partida en métodos de partículas (para lo que fue desarrollada inicialmente la aplicación de N. Calvo), la malla de superficie original tiene poco o ningún interés.

2.3 Tetraedro Virtual

Para garantizar que todo nodo se encuentre en alguna esfera hay que proveer una triangulación de partida. Se implementó un gran tetraedro que envuelve al dominio. Los nodos “virtuales” de ese tetraedro se agregan antes de comenzar y son eliminados al final. En la (Fig. 2) se muestra el contenedor esférico de los nodos (la esfera central) centrado en el tetraedro virtual.

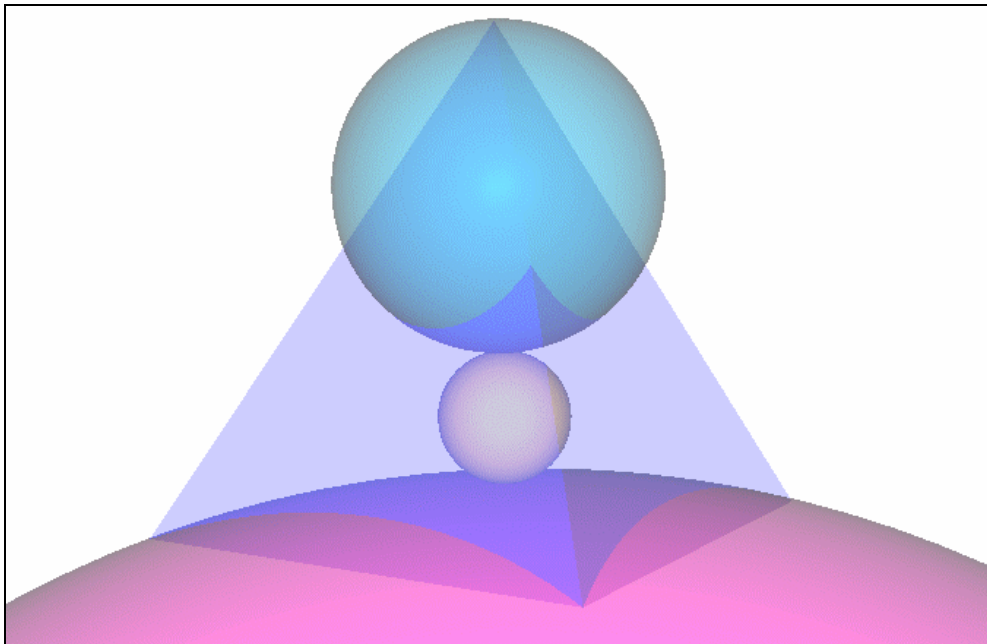


Figura 2: Tetraedro Virtual y contenedor esférico.

El Tamaño del tetraedro virtual está determinado para impedir que genere errores de cálculo, si es muy chico puede que algún nodo resulte muy cerca de una cara del tetraedro.

Por el contrario, si es muy grande, puede que uno de sus alejados vértices defina una esfera muy grande con tres nodos cercanos entre sí.

2.4 Alpha-shapes

La frontera de un conjunto de puntos no es algo matemáticamente bien definido. Un método sencillo consiste en utilizar alpha-shapes. Los elementos exteriores tienen esferas mayores que los interiores; se eliminan todos los elementos cuya esfera tenga un radio mayor que cierto parámetro real α .

El valor de α está íntimamente ligado a la densidad de puntos y para distintos valores de α se generan fronteras distintas, pero aceptables en la medida en que los valores de α sean del orden de h , la distancia típica entre nodos vecinos.

2.5 Función de Distribución (h) de los nodos

La función $h(\mathbf{x})$ define el tamaño deseado de los elementos o la distancia entre nodos vecinos. Se asigna un valor de h en algunos puntos o en algunos nodos e interpolación para los puntos intermedios. Cada vez que se incorpora un nodo, el generador de puntos debe interpolar el valor de h para el nuevo nodo.

Para aumentar el control sobre la distribución, pueden incluirse mallas interiores (cerradas o abiertas) de cuyos elementos se extraerá el valor de h para cada nodo, o bien se incluyen nodos sueltos con un valor de h explícito. Los nodos y mallas de h “rompen” la linealidad de la interpolación del h entre los nodos de la frontera.

2.6 Triangulación Inicial

Se realiza una triangulación Delaunay. La Fig. 3 ilustra, con un sencillo ejemplo bidimensional, la malla inicial de un rectángulo con un hueco circular y algunos nodos de h en las líneas diagonales. Se pueden observar los elementos del triángulo virtual.

Para la triangulación se utilizó un algoritmo que consiste en agregar los nodos de a uno y en orden aleatorio a una triangulación preexistente, haciendo las modificaciones locales que se requieran para mantener la triangulación Delaunay.

Para el conjunto de esferas vacías se calculan el centro, el radio y los cuatro nodos que la definen. Si la triangulación está en proceso, posee una cierta cantidad de esferas ya definidas. Al agregar un nuevo nodo hay que buscar el conjunto de esferas que lo contienen y dejan de ser vacías, esas esferas deberán desaparecer y crearse nuevas esferas vacías definidas por el nuevo nodo y algunos nodos preexistentes.

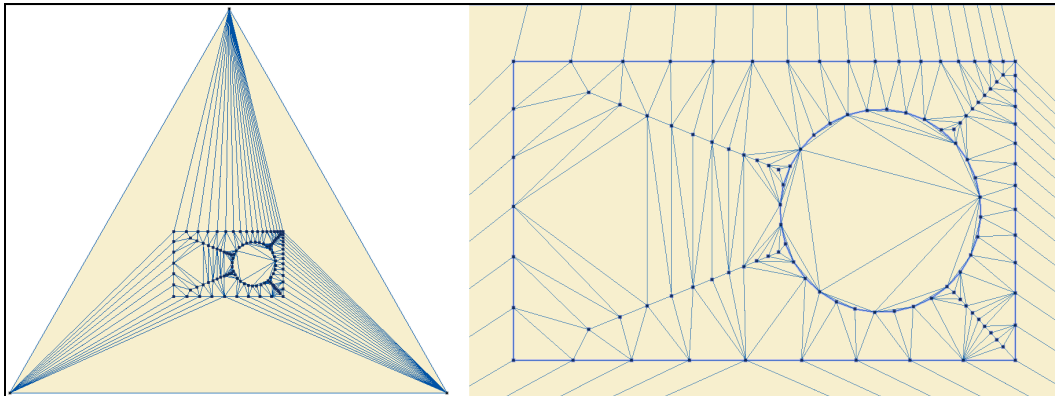


Figura 3: Malla inicial de los nodos de frontera y de h .

2.7 Identificación del Interior del Dominio

Para averiguar si un tetraedro está en el interior o en el exterior del dominio, primero se descartan los tetraedros obvios: Serán exteriores los que tienen nodos virtuales e interiores los que tienen nodos de h o nodos en diferentes piezas conexas de la frontera. Cuando la malla de frontera original no se respeta, la discriminación del resto de los tetraedros presenta una notable dificultad y existen varias posibilidades de solución pero todas con alguna limitación. Ésta es la operación más complicada e insegura de todo el proceso de generación de puntos.

La implementación contiene una mezcla de métodos, cada test se realiza sobre el conjunto de elementos sin clasificar, que vaya quedando:

- 1) Se discriminan los tetraedros con nodos virtuales, nodos de h o nodos en diferentes piezas conexas de la frontera.
- 2) Para cada nodo de frontera se analizan cada una de sus aristas contra “todas” las normales a las caras del nodo. Dependiendo de los signos y valores de los ángulos, la arista y todos sus tetraedros se consideran exteriores o interiores. Quedan indeterminados los vértices de un solo elemento, que tiene todas sus aristas sobre la frontera.
- 3) Cada elemento indefinido, se discrimina con los siguientes dos métodos en serie:
 - a) Se define un vector desde cada nodo al centroide, si todas las caras de frontera del nodo “ven” igual al vector se identifica el elemento. Con esto se discriminan todos los vértices de un solo tetraedro y se convalida el test que sigue.
 - b) Tres vecinos definidos exteriores/interiores implican que el elemento es exterior/interior.
- 4) En otro barrido sobre los elementos indefinidos restantes, pero recurrente mientras cambie la cantidad, se discrimina por mayoría de vecinos definidos. La recurrencia se debe a que existen grupos de elementos indefinidos vecinos entre sí.
- 5) Para el resto de las malformaciones que invariablemente aparecen en mallas complejas (en problemas reales), se utilizó la herramienta de alfa-shapes, con α suficientemente grande ($\alpha \geq 10h$) para el acabado de la superficie.

2.8 Reconstrucción de la geometría

Utilizando una máquina de medición por coordenadas (MMC) (Fig.4), se relevó la geometría 3D del conducto de admisión y cámara de combustión de un motor de 4 válvulas por cilindro de 2000cc, siendo el resultado de dicho proceso la nube de puntos que se puede observar en la Fig. 5.

La técnica utilizada en la digitalización, consistió en tomar puntos sobre curvas de nivel, donde la cantidad de muestras quedan determinadas por el gradiente que presentaba la curva a medir, pudiendo ser la operación automática (función para medición de perfiles) o en algunos casos (debido al espacio) manual.

Siendo que la tapa de cilindros presenta simetría con respecto a un plano medio que contiene al eje del cilindro y que es perpendicular al plano de la tapa del cilindro, se aprovechó esta ventaja para relevar solo la mitad de la geometría, pudiendo incrementar la densidad de la nube de puntos.

Dado que la zona de desprendimiento del flujo³ está en el radio interno del conducto en la zona adyacente al casquillo (como podemos observar en la Fig. 6), cualquier modificación en la geometría del mismo puede repercutir considerablemente en el resultado de la simulación. Por lo que se optó por incrementar la densidad de la nube en dicha zona (Fig. 7).

Para la reconstrucción de la superficie del tubo de admisión y la cámara de combustión, se utilizó el software desarrollado por N. Calvo. Con la finalidad de capturar la superficie, fue construida una malla de h cercana a la nube de puntos, generando una malla de volumen con elementos tetraédricos. La superficie externa de la cáscara generada es la malla de superficie resultante constituida por elementos triangulares (Fig. 8 y 9).

Las superficies generadas mediante estos procesos semiautomáticos contenían errores en aquellas zonas donde la densidad de puntos era baja, presentando deformaciones cóncavas como podemos observar tanto para los tubos (en azul), (Fig. 10), como así también para la cámara de combustión (en rojo), (Fig. 11).

Debido a estas imperfecciones, se interpoló la superficie en forma manual con un CAD utilizando curvas *splines* y la superficie generada anteriormente. Se dividió estratégicamente la superficie en *patches* cuadrangulares utilizando superficies de *Coons* (Fig. 12 y 13).

Dado que las mediciones son tomadas con un palpador de punta esférica es necesario hacer un offset de la superficie con una distancia igual al radio del palpador. Siendo la superficie resultante para el conducto de admisión y la cámara de combustión las observadas en la Fig.14 y 15 respectivamente.

En la Fig. 16 vemos un detalle de la válvula y su unión al tubo, mientras que en la Fig. 17 tenemos el modelo completo, con el agregado de los dispositivos complementarios, estos son la tobera y el cilindro (en cian). La superficie es por último cerrada por completo (Fig. 18), siendo esta condición necesaria para generar la malla de volumen.



Figura 4: Máquina de medición.

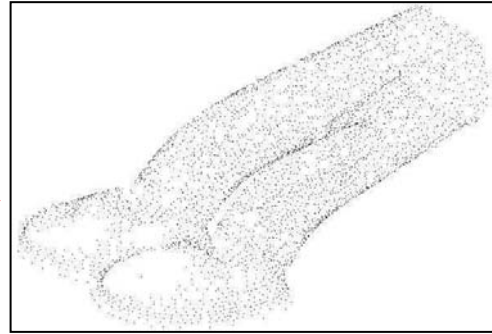


Figura 5: Nube de puntos inicial.

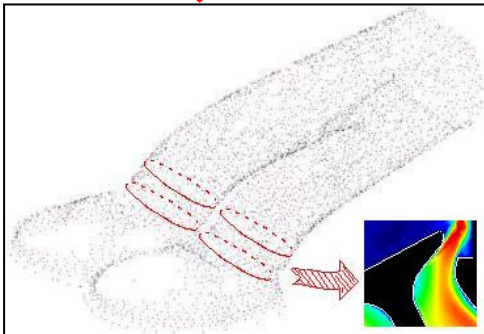


Figura 6: Zona crítica.

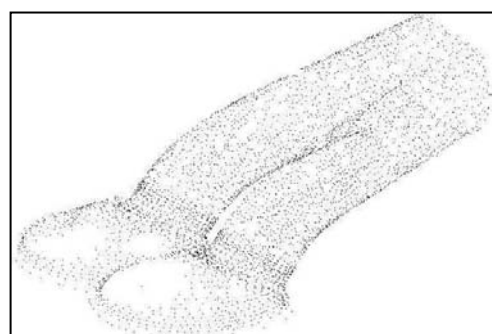


Figura 7: Nube de puntos final.

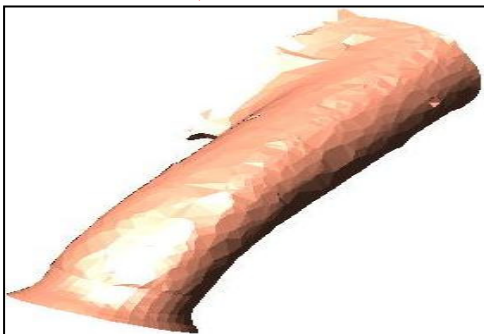


Figura 8: Superficie del tubo de admisión.



Figura 9: Sup. de la cámara de combustión.

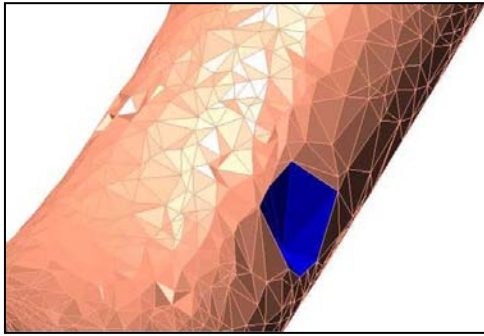


Figura 10: Defectos en tubos de admisión.

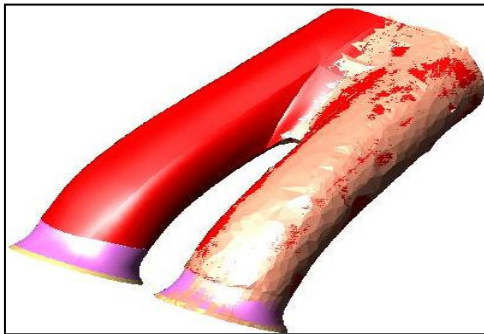


Figura 12: Interpolación tubos de admisión.

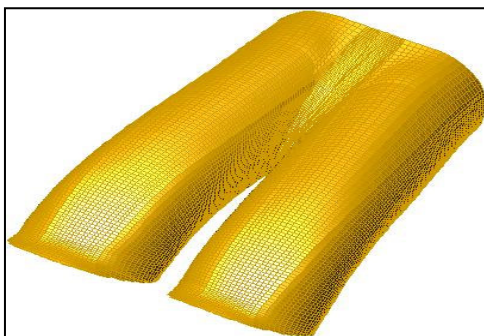


Figura 14: Sup. final tubos de admisión.

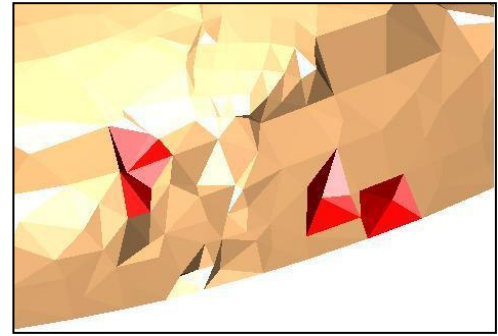


Figura 11: Defectos en la cámara.



Figura 13: Interpolación de la cámara.

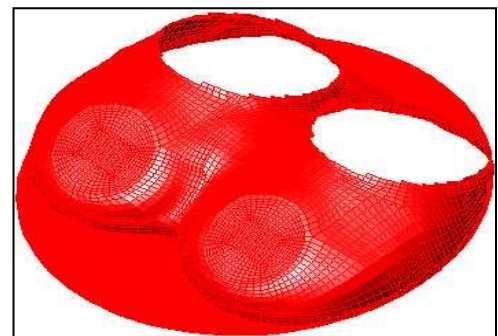


Figura 15: Sup. final de la cámara.



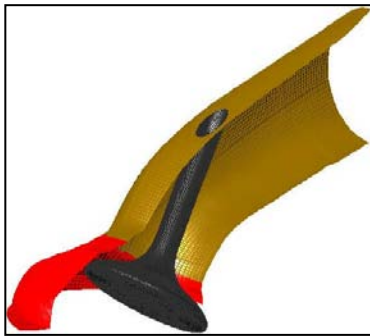


Figura 16: Válvula de admisión

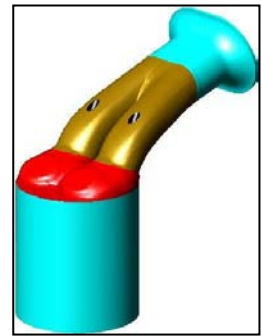


Figura 17: Complementos

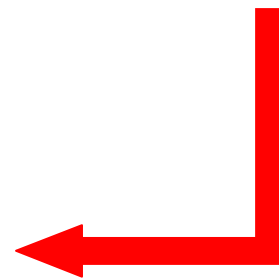


Figura 18: Malla de superficie final

2.9 Malla generada

Para generar la malla de volumen, se partió de la malla de superficie obtenida en la reconstrucción geométrica. En la Fig. 19 se observan dos cortes de la malla de superficie a distinta profundidad.

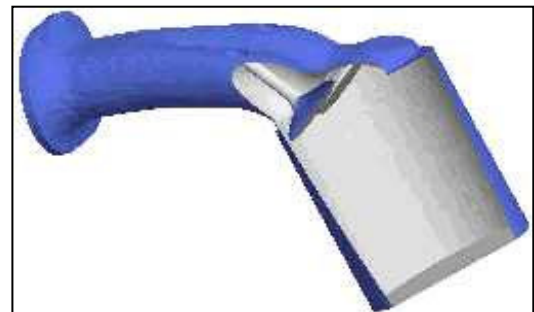


Figura 19: Cortes de la malla de superficie

La Fig. 20 ilustra el tamaño de los elementos de la malla de superficie. Se utilizaron elementos con h reducidos representados en color azul (0.2 mm) en la región circundante a la válvula con la finalidad de poder capturar las estructuras dominantes de la turbulencia, mientras que en las demás zonas se emplearon elementos con h mayor representados en verde claro y amarillo (<34 mm).

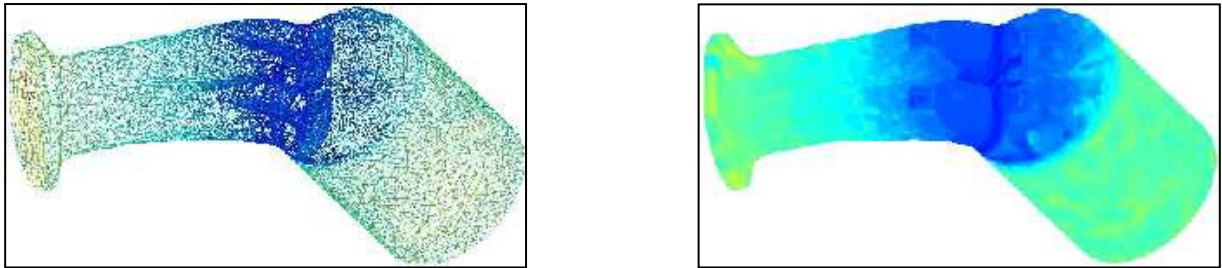


Figura 20: Tamaño de los elementos de la malla de superficie.

Se colocaron mallas de h en el interior del modelo, con el propósito de evitar la linealidad de la interpolación entre los nodos de la frontera, e impedir que la cantidad de nodos se eleve por encima de la capacidad de cálculo, (Fig. 21).

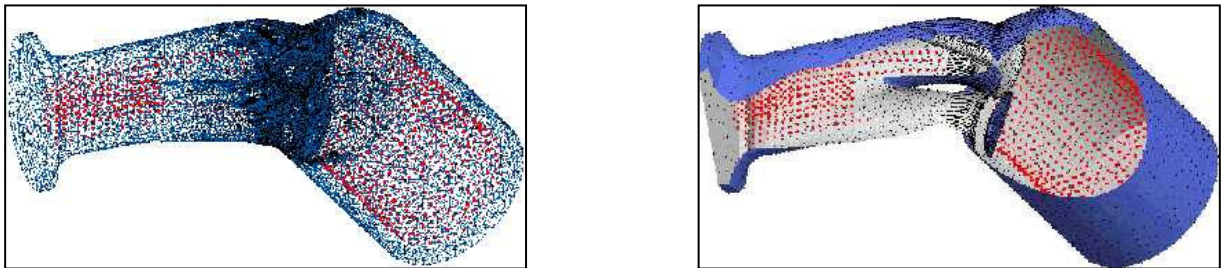


Figura 21: Mallas y nodos de h .

Finalmente, se generó una malla de volumen de elementos tetraédricos, la misma está compuesta por 134526 nodos y 802814 elementos, (Fig. 22). Se pueden observar los distintos tamaños de elementos.

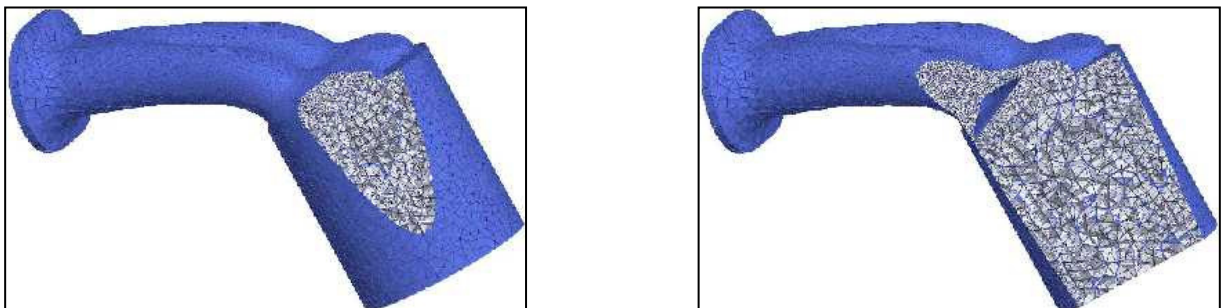


Figura 22: Malla de Volumen.

3 SIMULACIÓN DE FLUJO EN MOTORES DE 4 VALVULAS POR CILINDRO

Dos factores dominantes sobre las emisiones y rendimiento pueden ser distinguidos, uno es el coeficiente de descarga y el otro son los movimientos de la carga en el interior del cilindro. A continuación se desarrolla en forma introductoria cada uno de ellos.

3.1 Definición del coeficiente de descarga

Una de las formas más sencillas de caracterizar la influencia del conjunto conducto de admisión / válvula en flujo estacionario es medir el coeficiente de descarga para un alzada de válvula especificada (fija) con una pérdida de carga constante a través de la misma.

Se define al coeficiente de descarga C_D como la razón entre el área efectiva y el área geométrica de flujo a través de la sección de paso de la válvula.

Estos resultados se grafican como una relación entre el coeficiente de descarga y la alzada de válvula adimensional***, para una determinada pérdida de carga.

Para determinar el coeficiente de descarga, se considera el flujo a través de una tobera ideal. El flujo másico isentrópico a través de un orificio es obtenido a partir de la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_i = A \cdot \sqrt{2 p_0 \rho_0 \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{2}{\gamma}} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right]}, \quad (1)$$

donde p_0 y ρ_0 son la presión y la densidad de estancamiento respectivamente, γ es el exponente adiabático ($\gamma = c_p/c_v$, para el aire $\gamma = 1,4$) y A es el área de referencia.

Se puede expresar al flujo másico real al introducir el coeficiente de descarga C_D , por medio de la siguiente expresión:

$$\dot{m}_{real} = C_D \dot{m}_i. \quad (2)$$

Si el fluido es incompresible la ecuación (1) queda de la siguiente manera:

$$\dot{m}_i = A \cdot \sqrt{2 \rho (p_0 - p)}, \quad (3)$$

la presión p relativa a la presión atmosférica ($p_0 = \text{atm}$) se mide sobre un plano localizado aguas debajo de la tapa de cilindros a una distancia aproximadamente igual a dos diámetros del cilindro.

***Nota: la alzada de válvula adimensional es la relación entre la alzada y el diámetro exterior de la válvula.

El coeficiente de descarga se puede expresar como:

$$C_D = \frac{\dot{m}_{real}}{\dot{m}_i}, \quad (4)$$

donde para flujo incompresible:

$$C_D = \frac{\dot{m}_{real}}{A \cdot \sqrt{2\rho(p_0 - p)}}. \quad (5)$$

Un punto importante para destacar es que la hipótesis de flujo incompresible permite calcular el coeficiente de descarga con un error muy pequeño. Por ejemplo, si la pérdida de carga es $\Delta p = p_0 - p = 2KPa$ el error cometido es del 1,2% aproximadamente.

El área de referencia se puede considerar de dos formas distintas: a) el área geométrica mínima en base a la geometría asiento de válvula y alzada. El área geométrica mínima del flujo puede dividirse en tres rangos, según las dimensiones indicadas en la Fig. 23.

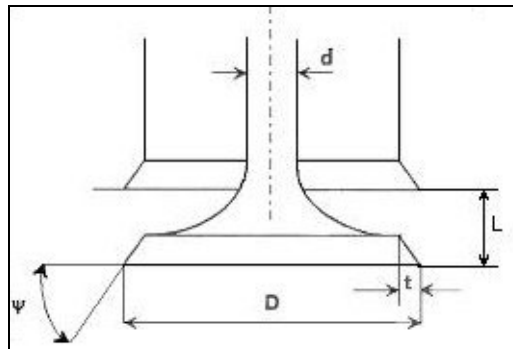


Figura 23: Geometría de la válvula.

Rango 1: para

$$0 < L \leq \frac{2t}{\sin 2\psi}, \quad (6)$$

el área geométrica mínima corresponde a la superficie lateral de un tronco de cono con altura perpendicular al asiento de la válvula, y se expresa como:

$$A = \pi \cdot L \cdot \cos \psi \left[D - 2t + \left(\frac{L}{2} \right) \cdot \sin \psi \right]. \quad (7)$$

Rango 2: para

$$\frac{2t}{\sin 2\psi} < L \leq t \cdot \tan \psi + \sqrt{\left[\frac{(D-2t)^2 - d^2}{4 \cdot (D-t)} \right]^2 - t^2}, \quad (8)$$

el área geométrica mínima corresponde a la superficie lateral de un tronco de cono, donde la superficie lateral ya no es más perpendicular al asiento de válvulas. De esta manera se expresa el área geométrica mínima como:

$$A = \pi \cdot (D-t) \cdot \sqrt{(L-t \cdot \tan \psi)^2 + t^2}. \quad (9)$$

Rango 3: para

$$t \cdot \tan \psi + \sqrt{\left[\frac{(D-2t)^2 - d^2}{4 \cdot (D-t)} \right]^2 - t^2} < L, \quad (10)$$

el área geométrica mínima corresponde a la sección de paso**** del conducto de admisión:

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot [(D-2t)^2 - d^2]. \quad (11)$$

La necesidad de utilizar tres ecuaciones para determinar el área geométrica en función de un rango de alzada presenta inconvenientes en la utilización práctica.

b) El área de referencia más conveniente utilizada en la práctica y la que se emplea en el presente trabajo, es la llamada área de la cortina de la válvula:

$$A = \pi \cdot D \cdot L, \quad (12)$$

el coeficiente de descarga se puede calcular por medio de la siguiente expresión:

$$C_D = \frac{m^*}{\pi \cdot D \cdot L \cdot \sqrt{2\rho\Delta p}} \quad (13)$$

****Nota: no necesariamente la sección mínima se encuentra en la garganta del casquillo, puede encontrarse motores con conductos de admisión que presentan la sección mínima aguas arriba de la garganta.

3.2 Movimientos característicos

Como fue mencionado, dentro de los movimientos macroscópicos de la carga encontramos al tumble y swirl. Dichos movimientos son inducidos durante el proceso de admisión debido principalmente a la forma de los conductos, válvula y cámara de combustión. A continuación se describen dichos movimientos:

Tumble: es un movimiento de rotación macroscópico de la carga alrededor de un eje contenido en un plano normal al eje del cilindro (Fig. 24a). Este movimiento es característico en motores con cuatro válvulas por cilindro. El mismo persiste durante casi toda la etapa de compresión, distorsionando su forma debido al movimiento ascendente del pistón. Aproximadamente 30° antes del *PMS* el vórtice es desplazado hacia el centro de la cámara, donde debido a la geometría de esta última se produce una rápida degradación del tumble en micro-vórtices (*Breakdown*), incrementando la energía cinética turbulenta.

El incremento de la energía cinética turbulenta genera un aumento en la velocidad del frente de llama durante el 10 al 90% de la fracción de masa quemada, denominada *duración de la llama*, (Fig.25).

Swirl: es un movimiento macroscópico de la carga típico en motores con dos válvulas por cilindro, donde la carga rota alrededor de un eje paralelo al eje del cilindro, (Fig. 24b). Este movimiento ayuda al desarrollo del núcleo de la llama (*kernel*), reduciendo la etapa comprendida entre el 0 –10% de la fracción de masa quemada, conocida como *retardo de ignición*, (Fig.25).

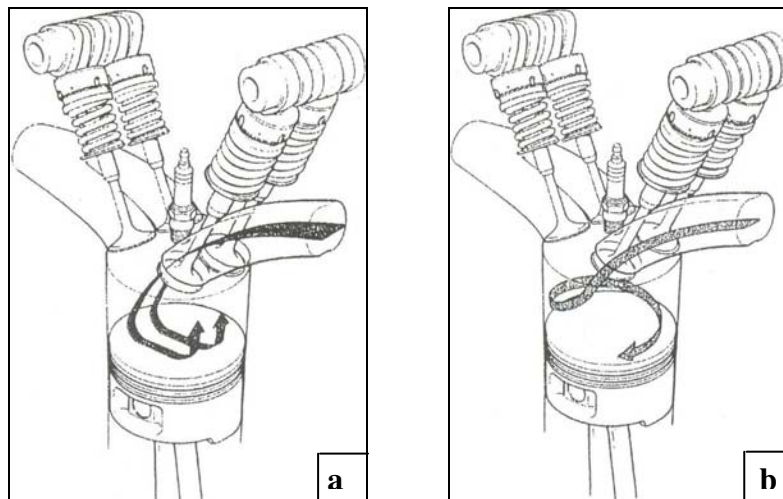


Figura 24: Movimientos característicos, a. Tumble y b. Swirl

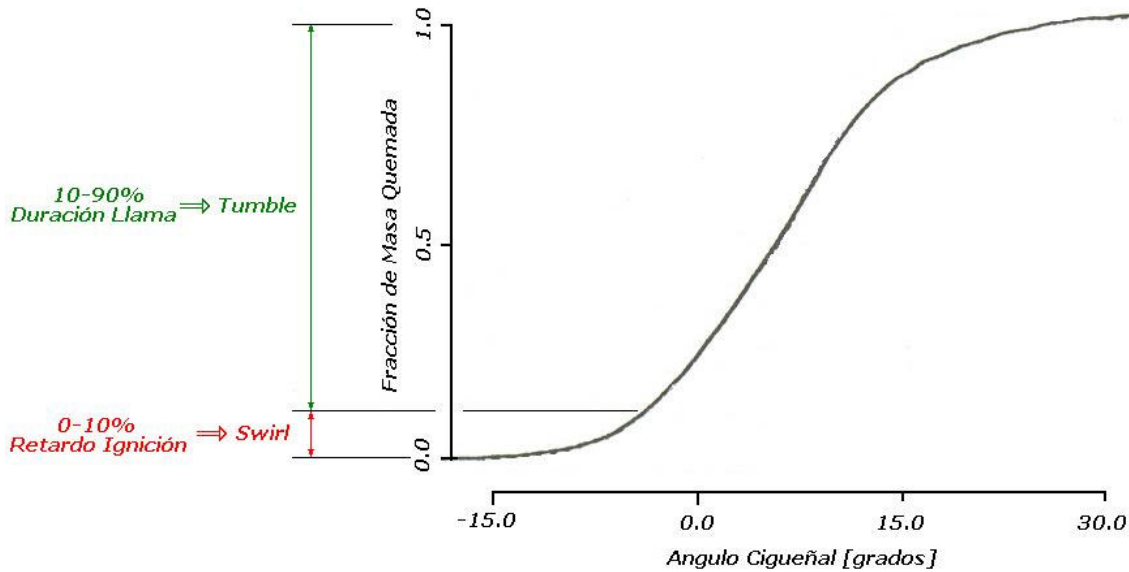


Figura 25: Fracción de masa quemada.

3.3 Modelo Matemático

Las ecuaciones de Navier-Stokes restringidas a un fluido viscoso e incompresible, representan el modelo matemático más apropiado del flujo de un fluido viscoso con efectos compresibles despreciables.

3.4 Modelo Numérico

La resolución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes incompresibles se hacen mediante elementos finitos [Finite Element Method (FEM)], con un esquema tipo SUPG+PSPG [Streamline Upwind Petrov Galerkin (SUPG) + Pressure Stabilized Petrov Galerkin (PSPG)] propuesto por Tezduyar et al.⁴.

Todo este esquema es implementado en el programa de elementos finitos PETSc-FEM⁵, orientado principalmente a la resolución numérica de problemas en mecánica de fluidos con varios campos acoplados (o multi- física).

3.5 Modelo de turbulencia

Los modelos LES (Large Eddy Simulation)⁶ forman una familia de modelos de turbulencia, donde el modelo de Smagorinsky es uno de los más utilizados.

En este modelo definimos la viscosidad cinemática turbulenta como:

$$\nu_T = C_s \Delta h^2 \sqrt{\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) : \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u})}, \quad (11)$$

con la constante de Smagorinsky igual a $C_s = 0.18$, siendo Δ una función de amortiguamiento para reducir la cantidad de viscosidad turbulenta en la vecindad de objetos sólidos inmersos

en el flujo del fluido, y h es el tamaño de la grilla, el cuál actúa como parámetro de corte que determina las escalas de la turbulencia a ser resueltas. Las escalas que están por debajo del h de la malla son modeladas. Una de las principales ventajas de los modelos **LES** es que la viscosidad adicionada tiende a reducirse cuando la malla es refinada, y en el límite de **DNS** (Direct Numerical Simulation) la viscosidad tiende a cero.

Finalmente $\epsilon(\mathbf{u}) : \epsilon(\mathbf{u})$ representa la traza del tensor velocidad de deformación haciendo a la viscosidad turbulenta un parámetro local.

3.6 Resultados

A continuación se exponen los resultados obtenidos para el modelo generado en el apartado “2”, el cual posee como condiciones de contorno una diferencia de presión entre el plano de entrada de la tobera y el plano de salida del cilindro de $\Delta p = 6.2 KPa$. A su vez, en el plano de entrada se impone como restricción que la velocidad sea normal a dicho plano.

Los resultados expuestos son preliminares dado que no se ha llegado hasta el momento al número de Reynolds correspondiente a la medición realizada en el flujómetro. En la Fig. 26 podemos ver el campo de velocidades para los planos medios de la válvula y el plano de la tapa de cilindros, como podemos observar, las zonas de mayor velocidad son las correspondientes al radio interno, con una alimentación acentuada hacia el centro de la cámara de combustión (Fig.27). Por otro lado gran parte del caudal que ingresa al cilindro es a través de la zona de la válvula opuesta al conducto.

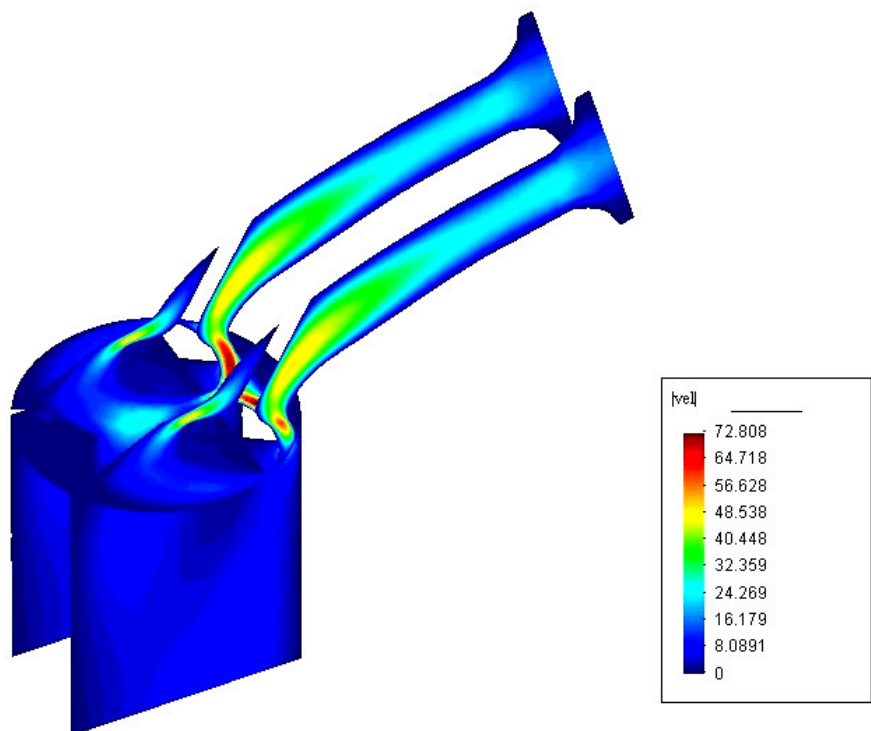


Figura 26: Campo de velocidades para los planos medios de las válvulas y el plano de la tapa de cilindros

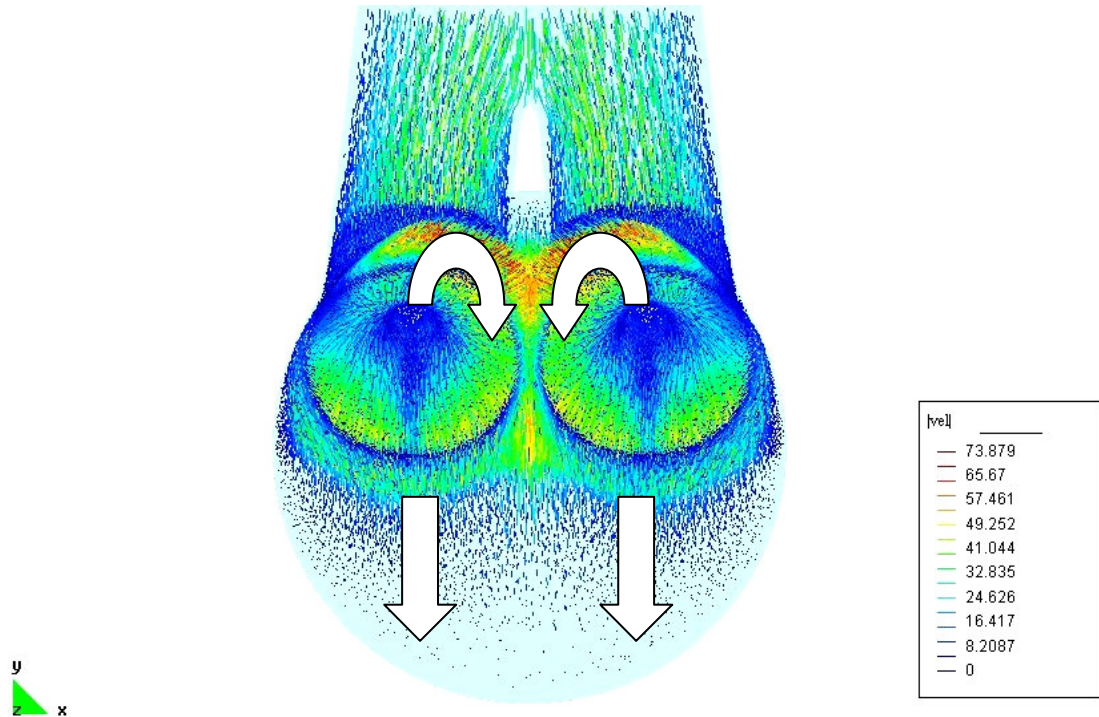


Figura 27: Velocidad de la carga vista desde el interior del cilindro.

En la Fig. 28 se grafica el campo de velocidades para un plano medio de la válvula de admisión, en la misma podemos definir dos regiones principales de alimentación del cilindro Q1 y Q2, las cantidades de movimiento angular respectivas compiten entre sí dando origen al tumble.

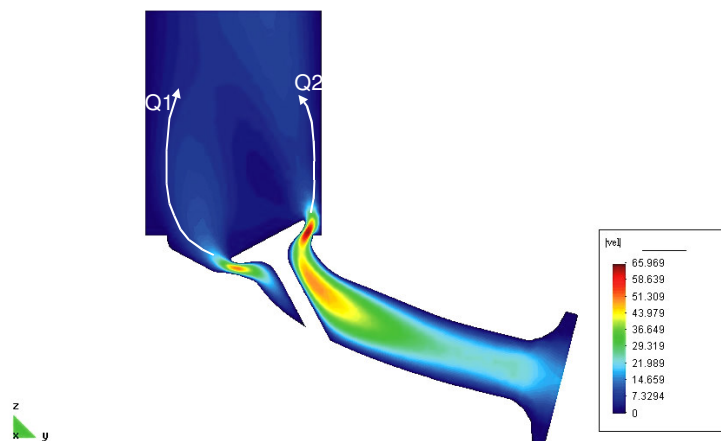


Figura 28: Campo de velocidades para el plano medio de la válvula de admisión.

4 CONCLUSIONES

Se desarrollo la reconstrucción de la geometría de una tapa de cilindro de un motor alternativo de alta performance, a partir de una nube de puntos obtenida por medio del digitalizado de la pieza. Con dicha geometría se generó una malla de elementos tetraédricos compuesta por 134526 nodos y 802814 elementos. El modelo se corrió en el software de elementos finitos Petsc-fem⁵. Se destacan en el proceso completo anteriormente mencionado los siguientes puntos:

- La reconstrucción de la geometría es el cuello de botella del proceso, dado que es necesario un número muy alto de horas de trabajo manual.
- Los resultados preliminares muestran un potencial importante de las herramientas de CFD para el desarrollo de problemas de este tipo.

Como trabajo futuro, podemos destacar el perfeccionamiento de la técnica para la reconstrucción de la geometría de manera tal de poder reducir el trabajo manual. En cuanto a los resultados numéricos es necesario determinar los coeficientes de descarga para poder validar el código para este tipo de aplicaciones, para luego realizar modificaciones en la geometría con la finalidad de lograr mejoras en las prestaciones del motor original.

5 REFERENCIAS

- [1] J.B. Heywood, “Fluid motion within the cylinder of internal combustion engines”, *The 1986 Freeman Scholar Lecture, J. Fluids Engrg.*, **109**, 3-35, (1987).
- [2] N.A. Calvo, *Generación de mallas tridimensionales por métodos duales*, Tesis remitida al Comité Académico del Doctorado en Ingeniería de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, 2005.
- [3] M. Teclas, A. Melling and F. Durst, “Flow separation in the inlet valve gap of piston engines”, *TeProg. Energy Combustión Sci.*, **24**, 165-195, (1998).
- [4] T. Tezduyar, S. Mittal, S. Ray, and R. Shih, “Incompressible flow computations with stabilized bilinear and linear equal order interpolation velocity-pressure elements”, *Comp. Meth. Applied Mechanics and Engineering*, **95**, 221–242, (1992).
- [5] PETSc-FEM: A general purpose, parallel, multi-physics FEM program. GNU General Public License (GPL), <http://minerva.arcrude.edu.ar/petscfem>.
- [6] D.Wilcox, “*Turbulence Modeling for CFD*”, DCW Industries, La Cañada, California, (1998).