

## APLICACIÓN DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL A FLUJOS COMPRESIBLES SIN CAMBIOS DE ÁREA, NO ISENTRÓPICOS COMO COMPLEMENTO DE ENSEÑANZA EN LA UNIVERSIDAD

### APPLICATION OF THE COMPUTATIONAL FLUID MECHANICS TO COMPRESSIBLE FLOWS WITHOUT CHANGES IN THE AREA, NOT ISENTROPICS AS A COMPLEMENT OF TEACHING IN THE UNIVERSITY

Rodrigo Rolny, Germán Henderson y Miguel G. Coussirat

<sup>a</sup>Grupo LAMA, Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza, Rodríguez 273, 5500  
Ciudad Mendoza, Argentina, rodrigo.rolny@alumnos.frm.utn.edu.ar

**Palabras claves:** CFD, Enseñanza, Mecánica de los fluidos, Simulaciones numéricas, Flujo compresible, Flujo de Fanno.

**Resumen.** El desarrollo tecnológico actual ha hecho que la Dinámica de Fluidos Computacional, o CFD por sus siglas en inglés (*Computational Fluid Dynamics*), sea una herramienta cada vez más utilizada en el ámbito de la Mecánica de Fluidos. En la Facultad Regional Mendoza de la Universidad Tecnológica Nacional (FRM/UTN) desde ya hace un tiempo se viene trabajando en la incorporación de la CFD en esta línea de desarrollos asociado a la enseñanza de grado. El presente trabajo tiene como finalidad mostrar y fomentar el uso de esta herramienta como un complemento para mejorar el dictado de la cátedra Mecánica de los Fluidos y Máquinas fluidodinámicas. Se simularon casos de flujos compresibles en tuberías de sección constante, denominados flujo de Fanno. Mediante CFD se obtuvieron resultados de las variaciones características de la fenomenología, las cuales fueron comparadas contra soluciones analíticas. Como conclusión general se muestra que es posible generar una metodología para obtener una mejora en la transmisión de conceptos relacionados con este tipo de flujos.

**Keywords:** CFD, Teaching, Fluid mechanics, Numerical simulations, Compressible flow, Fanno flow.

**Abstract.** The current technological development has made Computational Fluid Dynamics, or CFD for its acronym in English (*Computational Fluid Dynamics*), is a tool increasingly used in the field of Fluid Mechanics. In the Facultad Regional Mendoza de la Universidad Tecnológica Nacional (FRM / UTN) for some time now, work has been done on the incorporation of the CFD in this line of developments associated with undergraduate teaching. The purpose of this paper is to show and encourage the use of this tool as a complement to improve the dictation of the Mecánica de los Fluidos y Máquinas fluidodinámicas Chair. Simulated cases of compressible flows in pipes of constant section, denominated Fanno flow. By means of CFD, results of the characteristic variations of the phenomenology were obtained, which were compared against analytical solutions. As a general conclusion, it is shown that it is possible to generate a methodology to obtain an improvement in the transmission of concepts related to this type of flows.

## 1 INTRODUCCIÓN

La utilización de CFD, como complemento de los estudios de grado en la UTN/FRM, es de gran ayuda para formar recursos humanos altamente especializados que posean la capacidad de utilizar herramientas de última generación para resolver problemas de ingeniería complejos.

Mediante CFD se pretende que el estudiante tenga más herramientas para comprender e interpretar la compleja fenomenología de flujos compresibles confinados, obteniendo un punto de vista algo diferente al método tradicional de enseñanza de la Mecánica de Fluidos, que constaba de clases teóricas del tipo "magistral", ejercicios de gabinete y escasos ensayos experimentales debido al alto costo del equipamiento necesario en estos casos.

Se remarca que para la aplicación de esta metodología no se pretende que el estudiante tenga un conocimiento profundo de métodos numéricos, dejando de lado la necesidad de que deba conocerse el funcionamiento de los códigos, ya que implicaría el estudio de asignaturas complementarias que no se dictan actualmente en la Carrera Ingeniería Electromecánica de la UTN/FRM. Por este motivo realizar simulaciones sencillas, es de gran ayuda para capacitar al estudiante y ayudar en la comprensión de fenomenologías difíciles de visualizar mediante el método tradicional.

Si bien esta metodología sólo se ha abordado de una manera incipiente hasta el momento en varias Cátedras de la Carrera, en los últimos años se han venido realizando una serie de trabajos (e.g. [Stramaná et al., 2014](#), [López et al., 2016](#) y en [Rolny et al., 2017](#)) para tratar de generar una mayor interacción entre las herramientas CFD y las distintas temáticas desarrolladas dentro de los programas de las Cátedras de la Carrera. El presente trabajo da continuidad a esta línea de desarrollo, donde también se mencionan algunas características básicas de los potenciales códigos CFD a utilizar para resolver los problemas planteados.

En los citados trabajos se viene comprobando que una buena metodología para la introducción de CFD en la enseñanza dentro de los cursos de grado, es relacionarla con los temas estudiados en el curso, resolviendo algunos problemas concretos (y que presentan cierta dificultad en su resolución analítica) planteados en las prácticas de gabinete de la asignatura.

Dentro de las estrategias definidas en esta nueva metodología para la UTN/FRM, se cree que una buena opción para introducir al estudiante en el ámbito de CFD, es resolver ejercicios de gabinete que ofrezcan dificultades en su "visualización" complementando así la formación teórica de grado con aplicaciones sencillas CFD que permitan profundizar aspectos teóricos. Se aclara que por temas de tiempo no se realizaron simulaciones de conceptos como onda de choque normal, y bloque de flujo másico.

## 2 OBJETIVOS

A partir del marco anteriormente reseñado, se pretende mediante este trabajo contribuir a que la resolución de estos problemas motive al estudiante de la UTN/FRM a introducirse en el uso de CFD ya que el "visualizar", mediante imágenes, comportamientos de flujo por medio de esta herramienta ayudará en su proceso cognitivo, motivándolo a realizar futuras aplicaciones de CFD en problemas de ingeniería complejos. Se consigue, de esta forma, que los desarrollos teóricos relacionados con el temario de la Asignatura tengan una contraparte relacionada con las simulaciones computacionales que fomente en los estudiantes el interés por este método alternativo de cálculo, además de la posibilidad de incrementar sus conocimientos teóricos, con la finalidad de formar profesionales más capacitados también en el uso de CFD. De esto último, surge el interés

de no tratar el código como una “caja negra”, es decir, no realizando el estudio de las formas en la que el código realiza las simulaciones, sino mostrar al estudiante que las teorías estudiadas en el curso son las que se aplican en el código CFD para realizarlas, siendo las ecuaciones tratadas mediante técnicas numéricas para su resolución, ya que se cree que con los conocimientos que se imparten en la asignatura, permiten una comprensión básica de que es lo que se está resolviendo.

Es por eso que, continuando la serie de desarrollos de aplicaciones CFD para flujos compresibles, se sigue aquí con esta línea de desarrollo de módulos complementarios para la Cátedra Mecánica de los Fluidos y Maquinas Fluidodinámicas (MFMF), estando éstos relacionados con el temario de contenidos mínimos que posee la Asignatura.

Específicamente, en este trabajo se pretende complementar mediante CFD el tema Flujos Compresibles sin cambio de áreas y no isentrópicos, tomando como referencia alguna de la bibliografía recomendada por la Cátedra, (White 2004, FOX 2011). Algunos detalles más específicos respecto a flujos compresibles se han tomado de bibliografía complementaria (Thompson 1972, NASA et al., 2007).

El estudio de Flujos Compresibles sin cambio de áreas y no isentrópicos, implica un cierto grado de dificultad en su comprensión, ya que los fluidos bajo estas condiciones no se comportan intuitivamente. Además de lo ya reseñado, la solución teórica “clásica”, es decir mediante cálculos analíticos, que se obtiene (del tipo soluciones de manual) es más compleja de abordar, puesto que los efectos de compresibilidad del gas añaden dificultad en el desarrollo del marco teórico, y no permite una visualización clara del patrón del flujo. Se añade también la complejidad de esta fenomenología, el que presenta curvas características difíciles de interpretar en su forma teórica general. Esta dificultad es en gran parte solucionada por las curvas y visualizaciones obtenidas en la resolución por CFD.

### 3 METODOLOGÍA DESARROLLADA

La metodología por seguir será la de complementar los ejemplos de aplicación de las formulaciones obtenidas para el análisis de flujo en tuberías de sección constante, con algunas simulaciones numéricas de esos mismos casos desarrollados como ejemplos de cálculo, que se realizan con el programa ANSYS/Fluent v19.1.

La base teórica necesaria para comprender los resultados obtenidos mediante CFD, son adquiridos por el estudiante en el dictado de la Cátedra. No sólo debe conocer sobre Mecánica de los Fluidos, sino manejar correctamente conceptos termodinámicos para poder comprender las distintas fenomenologías. Al momento de dictar los temas de “Flujos Compresibles” el estudiante está capacitado para aplicar los principios generales de forma integral (Teorema de Transporte de Reynolds + Principios de Conservación) a este tipo de problemas.

Se comienza con una introducción general, y se desarrollarán las ecuaciones y principios necesarios para poder realizar el ejercicio propuesto de la forma teórica clásica, aplicándolo luego a conductos sin variación de área con fricción, sin adición de calor. Debemos conocer las hipótesis necesarias para realizar el estudio, a saber: 1) flujo adiabático estacionario unidimensional, 2) gas perfecto con calores específicos constantes, 3) conducto recto de área constante, 4) el trabajo mecánico (de posibles partes móviles) y las variaciones de energía potencial despreciables, y 5) el esfuerzo en la pared responde a correlaciones de coeficientes de fricción de Darcy.

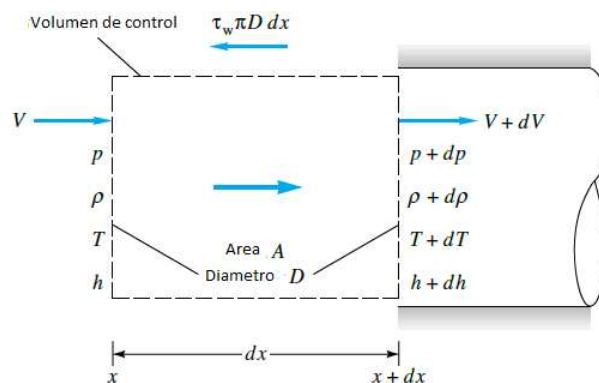


Figura 1: Volumen de control para el flujo en conductos de sección constante con fricción.

Las ecuaciones aplicadas al volumen de control de la Fig. 1 son las siguientes:

Ecuación de continuidad

$$\rho_1 c_1 A_1 = \rho_2 c_2 A_2 = cte \quad (1)$$

Cantidad de movimiento

$$p_1 - p_2 = \rho_2 c_2^2 - \rho_1 c_1^2 \quad (2)$$

Energía

$$h_1 + \frac{c_1^2}{2} = h_2 + \frac{c_2^2}{2} = cte = h_0; \quad (3)$$

Gas perfecto

$$\frac{p_1}{\rho_1 T_1} = \frac{p_2}{\rho_2 T_2} = R = cte \quad (4)$$

$C_p$  constante

$$h = C_p T = \left( \frac{kR}{k-1} \right) T; \quad k = cte = 1,4 \text{ (aire)} \quad (5)$$

En donde:  $\rho_i$ , densidad;  $c_i$ , velocidad;  $A_i$ , área;  $p_i$ , presión estática;  $h_i$ , entalpía;  $T_i$ , temperatura;  $R$ , constante particular del gas;  $C_p$ , calor específico a presión constante;  $k$ , relación de calores específicos; subíndices 1,2, estados cualesquiera del gas; 0, estado de remanso (i.e.,  $c_0 = 0$ ). Se supone el flujo como no isentrópico, esto es, entropía no es constante.

La fricción en las paredes de la tubería recta es quien nos provoca el aumento del número de Ma en el caso de flujo compresible sin cambio de área, adiabático y con pérdidas por fricción,

denominado Flujo de Fanno. La forma de relacionar la rugosidad de una tubería con la velocidad es mediante la ecuación de Bernoulli donde, simplificando y trabajando la misma podemos obtener el siguiente resultado.

$$h_f = \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \tag{6}$$

En donde:  $h_f$ , pérdida de carga;  $L$ , longitud de la tubería;  $D$ , diámetro de la tubería;  $v$ , velocidad del fluido;  $f$ , factor de fricción.

La **Tabla 1**, muestra como varían las propiedades del flujo dependiendo de su velocidad (subsónico o supersónico)

| <i>Propiedad</i> | <i>Subsónico</i> | <i>Supersónico</i> |
|------------------|------------------|--------------------|
| $p$              | Disminuye        | Aumenta            |
| $\rho$           | Disminuye        | Aumenta            |
| $v$              | Aumenta          | Disminuye          |
| $p_0, \rho_0$    | Disminuye        | Disminuye          |
| $T$              | Disminuye        | Aumenta            |
| $Ma$             | Aumenta          | Disminuye          |
| <i>Entropía</i>  | Aumenta          | Aumenta            |

Tabla 1: Variación de propiedades en función de flujo subsónico y supersónico.

El motivo por el cual la entropía aumenta a lo largo del conducto tanto en flujo subsónico como supersónico es debido a la segunda ley de la termodinámica para flujo adiabático. Por esta misma razón, la presión ( $p_0$ ) y densidad de remanso ( $\rho_0$ ) disminuyen.

Utilizando las variables de la **Tabla 1**, siendo útiles y necesarias para realizar el cálculo clásico, las relacionaremos en función del  $Ma$ , para poder escribir las siguientes ecuaciones.

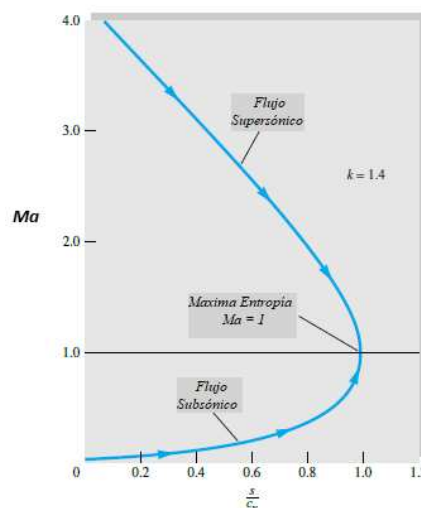


Figura 2: Relación entre  $Ma$  y Entropía que cumple el segundo principio de la termodinámica.

El parámetro clave para comprender lo que sucede en cada caso, es el número de Ma. Éste tenderá a valores Ma=1 aguas abajo, sin importar la condición sónica (subsónico o supersónico) del flujo de entrada, por este motivo es que la entropía aumenta. Mediante la [Ec. 7](#), se grafica la curva de la [Fig. 2](#), que permite visualizar el comportamiento de la entropía en función del Ma.

$$\Delta S = \frac{\Delta S}{C_p} = \ln \left[ M_a^{\frac{k-1}{k}} \left( \left[ \frac{2}{k+1} \right] \left[ 1 + \frac{k-1}{2} M_a^2 \right] \right)^{\frac{-(k+1)}{2k}} \right] \quad (7)$$

Se denomina longitud crítica ( $L^*$ ), a la distancia de la tubería tomando como referencia el comienzo de esta, para la cual el número de Ma = 1, teniendo como referencia el valor del número de Ma de entrada. Mediante la [Ec. 8](#), se calcula este valor.

$$\frac{fL^*}{D} = \frac{1-Ma^2}{kMa^2} + \frac{k+1}{2k} \ln \frac{(k+1)Ma^2}{2+(k-1)Ma^2} \quad (8)$$

Asimismo, las ecuaciones de las distintas propiedades para el punto crítico, en función del número de Ma, son las siguientes:

$$\frac{p}{p^*} = \frac{1}{Ma} \left[ \frac{k+1}{2+(k-1)Ma^2} \right]^{1/2} \quad (9)$$

$$\frac{\rho}{\rho^*} = \frac{V^*}{V} = \left[ \frac{2+(k-1)Ma^2}{k+1} \right]^{1/2} \quad (10)$$

$$\frac{T}{T^*} = \frac{a^2}{a^{*2}} = \frac{k+1}{2+(k-1)Ma^2} \quad (11)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho_0^*} = \frac{p_0}{p_0^*} = \frac{1}{Ma} \left[ \frac{2+(k-1)Ma^2}{k+1} \right]^{(1/2)(k+1)/(k-1)} \quad (12)$$

Además, para poder conocer los valores de cada propiedad, en distintos puntos, y poder confeccionar las curvas características necesarias para comprender el ejercicio propuesto, se pueden utilizar productos de cocientes, [Ec. 13](#).

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_2 p^*}{p^* p_1} \quad (13)$$

## 4 RESULTADOS

Se simulará el siguiente caso: una tubería recta sin cambio de sección con fricción, sin adición de calor. Como primer paso se comparará para el caso propuesto, los resultados obtenidos mediante

CFD contra los resultados analíticos obtenidos del caso 1 (Fig. 3) en NASA et al., 2007. Como trabajo adicional, y con el objeto de aumentar la motivación del estudiante, luego se visualizarán los efectos no intuitivos (Fig. 2) de la fenomenología en estudio, difíciles de comprender, obtenidos mediante CFD.

Se considera al fluido (Nitrógeno) como gas ideal, no viscoso. Las geometrías se definen como 2D axi-simétricas de paredes con un factor de fricción  $f = 0,002$ . Para definir las condiciones de borde se calcularán los valores de remanso para la entrada a la tubería, de los cuales algunos permanecen constantes. En la salida de la tubería se define una presión estática constante, siendo ambos valores idénticos a los de los enunciados del ejercicio de la Fig. 3.

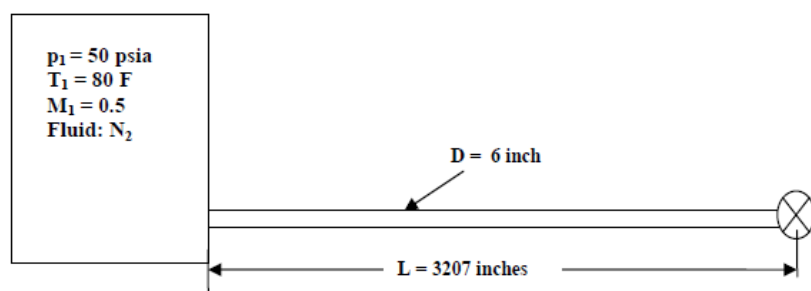


Figura 3: Geometría de tubería sin cambio de sección; condiciones de remanso.

Los resultados obtenidos se post-procesarán mediante las herramientas de visualización de flujos que los códigos de CFD comerciales poseen para así ofrecer al estudiante una completa representación de curvas de las distintas variables como presión, velocidad, número de Ma, entalpía y entropía, como así también los campos de propiedades que presentan variaciones no intuitivas como la temperatura, los que no pueden visualizarse a partir de los resultados obtenidos de forma analítica.

#### 4.1 Resultados obtenidos para tubería sin cambio de sección

En el enunciado del ejercicio propuesto, caso 1 (Fig. 3) en NASA et al., 2007 (no mostrado) se dan detalles de una tubería de sección determinada y constante, por donde circula un fluido (Nitrógeno), con las siguientes propiedades de remanso, ver Tabla 2, a las que se le definirá un valor de presión estática en la salida, compatible con el enunciado del ejercicio.

|                        | <i>Variable</i>         | <i>Valor</i>   | <i>Unidad</i> |
|------------------------|-------------------------|----------------|---------------|
| Diámetro               | <b>D</b>                | <b>0,1524</b>  | <b>m</b>      |
| Longitud               | <b>L</b>                | <b>81,4578</b> | <b>M</b>      |
| Presión de remanso     | <b><math>p_0</math></b> | <b>307619</b>  | <b>Pa</b>     |
| Presión de salida      | <b><math>p_s</math></b> | <b>0</b>       | <b>Pa</b>     |
| Temperatura de remanso | <b>T</b>                | <b>314</b>     | <b>K</b>      |
| Ma entrada             | <b>Ma</b>               | <b>0,5</b>     | <b>Adim.</b>  |

Tabla 2: Dimensiones de la tubería y valores de remanso. Ver Fig. 3.

Los resultados analíticos obtenidos tras la resolución del ejercicio mediante las ecuaciones presentadas anteriormente se muestran en la Tabla 3.

|                     | Variable | Valor  | Unidad            |
|---------------------|----------|--------|-------------------|
| Presión Crítica     | $p^*$    | 0      | Pa                |
| Temperatura Crítica | $T^*$    | 262,34 | K                 |
| Densidad Crítica    | $\rho^*$ | 1,04   | Kg/m <sup>3</sup> |

Tabla 3: Resultados obtenidos mediante solución analítica para los valores críticos (sónicos, Ma = 1).

Pese a que no es un objetivo principal en este trabajo, como se sabe que es típico de la metodología CFD el analizar la calidad de los resultados obtenidos en función del tamaño de las celdas de la malla definida, y que se requieren de al menos tres mallas con diferente tamaño de celda para el análisis de resultados. Se comienza realizando las simulaciones con dos mallas del tipo estructuradas, con celdas de tamaño no homogéneo en cada una de ellas. La segunda malla tiene el doble de elementos que la primera.

Las simulaciones fueron realizadas con modelos turbulentos distintos a modo de poder comparar sus resultados. El primero fue Standard K-Épsilon, densidad base, el segundo utilizado fue SST K-Omega, presión base.

Se compararon las curvas obtenidas de forma analítica y las obtenidas mediante la simulación a fin de poder visualizar la no intuitiva en las variaciones de las propiedades (Tabla 1) del flujo para el caso en estudio. Además, se compararon estos resultados con los que se obtienen al simular el mismo caso, pero para flujo incompresible.

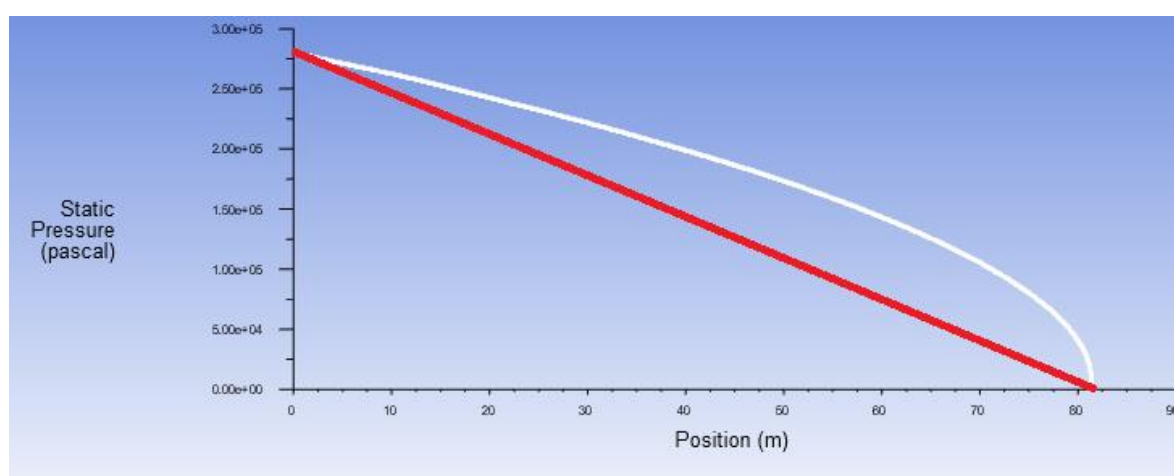


Figura 4: Curva blanca, flujo de Fanno compresible. Curva roja, flujo incompresible.

Se observa la variación de la presión (Fig. 4) para un flujo incompresible, comparado con la variación en un flujo de Fanno compresible, donde se observa la diferencia en la pendiente por el comportamiento de las variables como presión, densidad y temperatura.

La temperatura en flujo de Fanno compresible, tiene un comportamiento muy distinto al que imaginaríamos, ya que, al ir aumentando el número de Ma, la temperatura disminuye como se ve en la Fig. 5. La forma de explicar este comportamiento es que al no haber transferencia de calor la temperatura de estancamiento ( $T_0$ ) es constante, si se trabajan las ecuaciones Ec. 3 y Ec. 5, se podría demostrar lo mencionado mediante una ecuación.



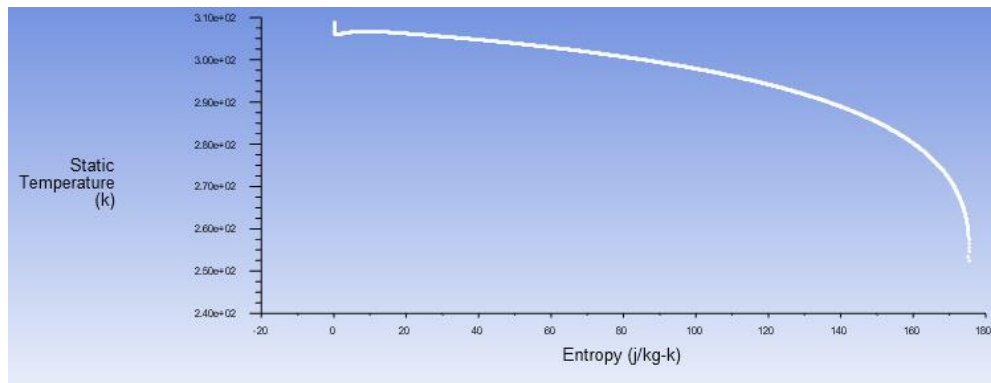


Figura 5: Relación entre temperatura y entropía.

Al mantenerse constante la temperatura de remanso, y al aumentar la energía cinética del fluido (aumento de velocidad), disminuye la temperatura local. Esta disminución junto con la disminución de la densidad se traduce en un aumento de la entropía, (Fig. 5).

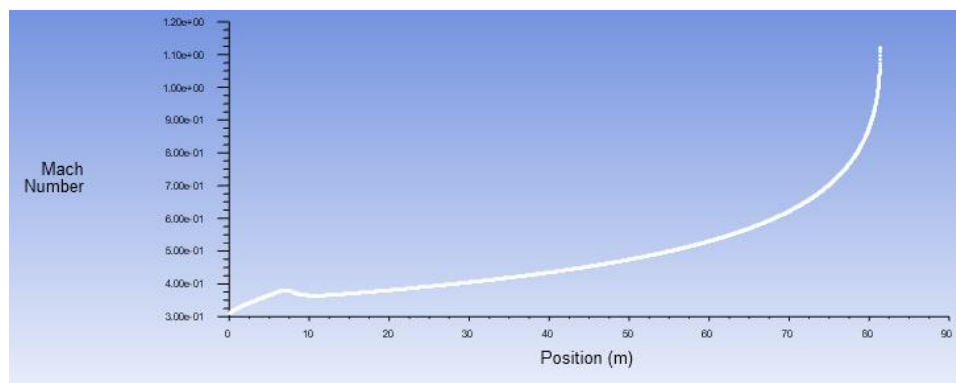


Figura 6: Relación entre el número de Ma y la posición.

Por último, se analiza el aumento del número de Ma hasta la zona crítica (Fig. 6). Se observa un error que comete el software de simulación, la entropía sigue aumentando, llegando a un valor físicamente imposible ( $Ma > 1$ ), donde debería aparecer el fenómeno de onda de choque, la cual compensaría ese aumento de entropía, en variación de las propiedades de remanso manteniendo en la unidad el número de Ma.

## 5 CONCLUSIONES

Mediante el uso de la CFD se han podido obtener soluciones para las curvas del flujo compresible (Fanno), comparando las soluciones obtenidas contra sus contrapartes analíticas y viendo una buena concordancia entre ambas soluciones como era de esperarse.

La posibilidad de visualizar las curvas de las variables en forma detallada mediante las herramientas de post-proceso permite visualizar el comportamiento del flujo dentro de la tubería y analizar la evolución de las propiedades, así como observar y poder entender fenómenos como la onda de choque, y el bloqueo (no mostrados), traducido en gasto másico máximo, datos que se

podrían obtener únicamente de forma empírica, con equipamiento costoso y difícil de obtener para una universidad. Por este motivo, nos obliga a recurrir a las herramientas utilizadas para comprender fenómenos, con una avanzada complejidad en su resolución.

Se cree que mediante estos ejemplos se puede hacer una introducción más “amistosa” de la CFD a los estudiantes que cursan la asignatura Mecánica de los Fluidos y Máquinas Fluidodinámicas, motivando así su uso en el ámbito de la ingeniería.

Los resultados obtenidos nos permiten realizar simplificaciones al estudio de estos casos particulares, los cuales disminuyen la dificultad de estudio.

La implementación de la herramienta de CFD se viene dando en la cátedra Mecánica de los Fluidos y Máquinas Fluidodinámicas en los últimos años, mediante la presentación y ejecución de ejercicios de gabinete proporcionados por la misma, con gran aceptación por los alumnos. Además de ello, los becarios brindan apoyo e información a los alumnos interesados en el método. Por temas relacionado con licencias para la obtención de softwares, en el corriente año, no se ha podido presentar la metodología en el curso de grado.

Desde este año, con los becarios del grupo LAMA, se ha implementado la utilización de softwares libres, incrementando la complejidad gradualmente en los casos estudiados, obteniendo grandes resultados en la comprensión de los contenidos. Se espera con optimismo para el próximo año, poder seguir con la línea continua de trabajo, aplicando el nuevo código en estudio.

## 6 AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido parcialmente financiado por la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) dentro de su propio programa de I+D+i (UTN/SCTyP). Los autores desean agradecer a la UTN por proveer soporte financiero para este trabajo enmarcado en los proyectos de investigación y mejora de la enseñanza en ingeniería, proyectos UTI3504TC y UTI3543TC.

## REFERENCIAS

- ANSYS Inc., ‘ANSYS/FLUENT Soft.’, <https://www.ansys.com/academic/free-student-products>, 2018.
- Stramaná A, Panella L, Coussirat M, Gandolfo E, *Uso de herramientas CFD como apoyo al aprendizaje de la mecánica de los fluidos en la universidad*, Mecánica Computacional Vol. XXXIII, págs. 2127-2141, 2014.
- López M, Mancuso F, Aguirre R, Henderson G y Coussirat M, *Uso de la Mecánica de Fluidos computacionales como apoyo a la enseñanza de la mecánica de los fluidos en la universidad*, Mecánica Computacional Vol. XXXIV, págs. 1597-1616, 2016.
- Rolny R, Mancuso F, Coussirat M, *Aplicación de la mecánica de fluidos computacional como complemento de enseñanza en la universidad: Estudio de flujos compresibles*, Mecánica Computacional Vol. XXXV, págs. 755-770, 2017.
- Alak Bandyopadhyay, Alok Majumdar, *Modeling of Compressible Flow with Friction and Heat Transfer using the Generalized Fluid System Simulation Program (GFSSP)*, hosted by NASA Glenn Research Center and Corporate College, Cleveland, September 10-14, 2007.
- Fox and McDonald’s, *Introduction to fluid mechanics*, John Wiley & Sons, INC., 8va edición, 2011.
- Thompson P., *Compressible-Fluid Dynamics*, Mc Graw Hill, 1era edición, 1972.
- White F, “*Mecánica de Fluidos*”, Mc Graw Hill, 5ta edición, 2004.