

## FLUCTUACIONES INDUCIDAS DEL FLUJO DE AIRE EN UN DUCTO CON PAREDES DENTADAS

Tolentino Masgo San Luis B.<sup>1</sup> y Toledo Hernández Juan<sup>2</sup>

sanluist@gmail.com<sup>1</sup>, toledo.juan@gmail.com<sup>2</sup>

<http://orcid.org/0000-0001-6320-6864><sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1293-8218><sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” Vice-Rectorado Puerto Ordaz, Centro de Estudios Energéticos.

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Ingeniería, Grupo de Modelamiento Matemático y Simulación Numérica

<sup>2</sup>Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” Vice-Rectorado Puerto Ordaz, Laboratorio de Física Computacional.

<sup>1</sup>Bolívar, Venezuela

<sup>2</sup>Lima, Perú

Recibido (07/09/20), Aceptado (23/09/20)

**Resumen:** Estudios experimentales y numéricos han centrado el interés en el campo de flujo con superficies de paredes dentadas y cavidades, donde la turbulencia del flujo son captadas en imágenes con la técnica Schlieren y recreadas con códigos computacionales. En el presente trabajo, se realiza un estudio numérico para el flujo de aire en un ducto recto con paredes dentadas para seis casos de presión. El flujo se simuló para un dominio computacional 2D con el código ANSYS-Fluent, para lo cual se empleó el modelo RANS en conjunto con el modelo de turbulencia de Menter. Se obtuvieron los campos de número de Mach, velocidad, presión y temperatura con presencia de remolinos y ondas de choque. En ciertas regiones el flujo presentó desviaciones al chocar con las esquinas de los dientes, por lo cual originó fluctuaciones inducidas de los parámetros termodinámicos aguas abajo y hacia la región del centro; en los espacios entre dientes se presentó remolinos; al final del último diente se presentó ondas de choque oblicuas. Se concluye que la sección dentada incrementa la turbulencia e influye a que la velocidad del flujo tenga un incremento escalonado en régimen transónico.

**Palabras Clave:** Ducto, Flujo de aire, Fluctuación, Onda de choque, Pared dentada, Simulación.

## INDUCED FLUCTUATIONS OF AIR FLOW IN A DUCT WITH TOOTHED WALLS

**Abstract:** Experimental and numerical studies have focused interest in the flow field with toothed walls surfaces and cavities, where the flow turbulence is captured in images with the Schlieren technique and recreated with computer codes. In the present work, a numerical study is carried out for the air flow in a straight duct with serrated walls for six pressure cases. The flow was simulated for a 2D computational domain with the ANSYS-Fluent code, for which the RANS model was used in conjunction with the Menter turbulence model. The fields of Mach number, velocity, pressure and temperature with the presence of eddies and shock waves were obtained. In certain regions the flow presented deviations when it collided with the corners of the teeth, for which it originated induced fluctuations of the thermodynamic parameters downstream and towards the central region; swirls were present in the spaces between teeth; oblique shock waves were present at the end of the last tooth. It is concluded that the toothed section increases turbulence and influences the flow velocity to have a stepped increase in the transonic regime.

**Keywords:** Duct, Air flow, Fluctuation, Shock wave, Toothed wall, Simulation

## I. INTRODUCCIÓN

El estudio numérico del régimen del flujo compresible mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) [1], [2], permite cuantificar las magnitudes termodinámicas que no es posible obtener por medios experimentales en un laboratorio. La CFD es una herramienta adecuada para obtener soluciones aproximadas de la realidad del fenómeno físico, si de manera adecuada se toma en cuenta la geometría del dominio computacional, el refinamiento de la malla, el modelo de turbulencia, el establecimiento de los errores durante la etapa de iteración, entre otras variables.

En la literatura para flujo compresible, están reportados trabajos sobre la turbulencia [3], la capa límite [4], [5], ondas de choque [6], modelos de turbulencia [7], así como, la técnica Schlieren [8], [9], el cual permite captar la imagen de las formas de las ondas de choque por medios experimentales.

Cuando el flujo compresible viaja a alta velocidad sobre una pared con superficie irregular, sea una cavidad o un diente, aumenta la turbulencia de la región del flujo adyacente a la pared, y ese incremento de la turbulencia influye en las variaciones de la velocidad, presión, temperatura, entre otros parámetros termodinámicos. Y la intensidad de cambio de la cantidad de movimiento del flujo es diferente para la condición de un flujo interno o para un flujo externo.

Las perturbaciones que sufre el flujo interno en una tubería de gas pueden ser por cavidades producto de la erosión, picadura, entre otros; o superficies con forma de domo producidas por la acumulación de sedimentos, oxidación, entre otros, los cuales influyen en el transporte del flujo y en las mediciones de instrumentos colocados en las tuberías afectadas. Sin embargo, superficies estructuradas con cavidades o dentadas, podrían mejorar el transporte del flujo en secciones en específicos al disminuir el contacto con las paredes, si se controlan las fluctuaciones generadas, o simplemente generar fluctuaciones para la mejora de mezclas de fluidos por turbulencia en procesos requeridos. Es por ello, el continuo interés de estudiar el comportamiento del flujo interno en superficies de las paredes con cavidades o paredes dentadas.

Se mencionan algunos trabajos más relevantes de simulaciones numéricas reportados en la literatura con diferentes propósitos de investigación y aplicación para el flujo interno, para paredes con cavidades [10], [11], [12]; y para el flujo interno para paredes dentadas [13]. En [11] explican que las profundidades de las cavidades rectangulares tienen influencia en el desarrollo del régimen del flujo, produciendo oscilaciones en la velocidad del flujo en la vecindad de las paredes. En [13] exponen

sus resultados de oscilaciones del flujo, e inicio de formación de ondas de choque oblicuas al final del último diente. Los resultados de ambos trabajos [11], [13], aun no concluyentes, permiten dar una noción de cómo se comporta el régimen del flujo para las condiciones geométricas establecidas; siendo de interés en continuar con el estudio.

En el presente trabajo, se realiza un estudio numérico del flujo de aire para un dominio computacional 2D para la geometría de un ducto con pared dentada, con ocho dientes en la pared inferior y ocho dientes en la pared superior, con el fin de determinar de qué manera influye en el desarrollo del flujo las paredes dentadas con espesor de diente de 1 mm y longitud de 5 mm, cuando se aplica a la entrada de la tobera cargas de presión en el rango de 200-700 kPa. El campo de flujo de aire se simuló aplicando el modelo de las ecuaciones de Navier-Stokes de número de Reynolds promedio (RANS, por sus siglas en inglés) en el código ANSYS-Fluent versión 12.1, el cual aplica el método de volumen finito (MVF). En la sección II se presenta el fundamento matemático de las ecuaciones empleadas, el dominio computacional y el método de solución computacional. En la sección III se exponen los resultados. Seguidamente, se exponen las conclusiones del análisis realizado.

## II. METODOLOGÍA

### Fundamento matemático

Para la simulación 2D del campo de flujo compresible se empleó el modelo RANS. Donde, las ecuaciones gobernantes empleadas son: conservación de la masa (1), cantidad de movimiento (2), conservación de la energía (3) y de estado (4); en condiciones estacionarias se expresan como:

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

Donde, la densidad es  $\rho$  y el campo de velocidades  $u$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\tau}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_i' u_j'}) \quad (2)$$

Donde, el tensor de tensiones  $\bar{\tau}$ , se expresa como:

$$\bar{\tau} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right)$$

El esfuerzo de Reynolds  $-\rho \overline{u_i' u_j'}$ , de acuerdo a la hipótesis de Boussinesq se expresa como:

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij}$$

Además, el campo de presión es  $p$ , la viscosidad  $\mu$ , la energía cinética turbulenta es  $k$ , la viscosidad turbulenta  $\mu_t$ . El delta de Kronecker es  $\delta_{ij}$ , si  $i$  y  $j$  son iguales su valor es uno, si son diferentes su valor es cero. Además, la ecuación (2) está cerrada, ya que incluye el término de esfuerzos de Reynolds.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right) \quad (3)$$

Donde, la energía total es  $E$ , la temperatura  $T$ , y la conductividad térmica efectiva  $k^{eff}$ . Además, el tensor de tensiones efectivo  $(\tau_{ij})_{eff}$  se expresa como:

$$(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}$$

$$p = \rho RT \quad (4)$$

Donde, la constante del gas es  $R$ . De la ecuación (4), la densidad se expresa como  $\rho = p/RT$ .

Para flujo compresible, las relaciones de presiones (5) y de temperaturas (6) en función del número de Mach,  $M$ , el cual es el parámetro dominante, se expresan como:

$$\frac{p_0}{p} = \left( 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (5)$$

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{(\gamma - 1)}{2} M^2 \quad (6)$$

Donde, la presión de estancamiento es  $p_0$  y la temperatura de estancamiento  $T_0$ , y la relación de calores específicos  $\gamma$ .

El rango de número de Mach se establece como: flujo incompresible  $M \leq 0.3$ , flujo subsónico  $0.3 \leq M \leq 0.8$ , flujo transónico  $0.8 \leq M \leq 1.2$ , flujo supersónico  $1.2 \leq M \leq 5$ , Para el flujo sónico  $M=1$  [6]. Cabe señalar, White [14] considera el flujo hipersónico para  $M > 3$  y, Anderson [6] para  $M > 5$ .

Para la variación de la viscosidad en función de la temperatura se tomó en cuenta la ley de Sutherland [4], y para la turbulencia del flujo se consideró el modelo SST  $k-\omega$  de Menter [15]. Donde, el modelo de turbulencia de Menter es adecuado para la simulación del flujo del presente trabajo, ya que la misma ha sido evaluado con otros modelos de turbulencia y cotejados con da-

tos experimentales para flujo compresible en diferentes geometrías de equipos experimentales [16], [17].

### Dominio computacional

La Figura 1 muestra el dominio computacional en 2D en el plano cartesiano. Se tomó en cuenta la mitad de la geometría por la simetría que tiene, en este caso, la pared superior dentada. El dominio computacional se dividió en tres secciones: la sección de la tobera, la longitud de la garganta, el cual es el ducto recto con pared dentada, y la atmósfera. Las dimensiones de la tobera son: longitud recta 20 mm, la sección convergente 20 mm, para una longitud total de 40 mm; la altura mayor 20 mm y la altura menor en la sección divergente 10 mm. Las dimensiones del ducto recto con la pared superior dentada: longitud total 210 mm; longitud total donde se encuentran los ocho dientes 110 mm; separación entre dientes 10 mm; longitud del diente  $L_d=5$  mm y espesor  $h_d=1$  mm; y altura del ducto 10 mm a partir de la simetría en el eje  $x$ . Las dimensiones de la atmósfera: longitud 150 mm y altura 25 mm. Además, la longitud total del dominio es 400 mm. Cabe destacar, la relación de la longitud del diente y el espesor es  $L_d/h_d=5$

Se consideró flujo de aire, siendo los parámetros: relación de calor específico  $\gamma=1.4$ , la constante del gas  $R=287$  J/(kg.K), el calor específico a presión constante  $C_p=1006.43$  J/(kg.K) y la conductividad térmica  $k=0.0242$  W/(m.K).

Las condiciones iniciales y de borde aplicadas al dominio 2D, se estableció como:

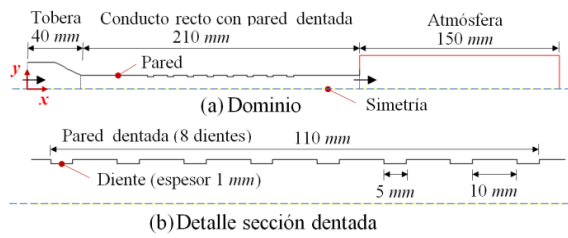
La entrada de flujo a la tobera se establecieron para seis condiciones de presión:  $P_{ent}=200; 300; 400; 500; 600$  y  $700$  kPa, y temperatura  $T_{ent}=300$  K como valor constante.

El ambiente de la atmósfera a la presión  $P_{amb}=101.325$  kPa y temperatura  $T_{amb}=300$  K como valores constantes.

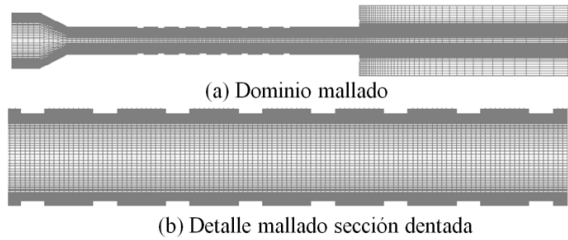
En las paredes adiabáticas las velocidades del fluido son nulas en el dominio por la condición de no deslizamiento.

En la simetría del dominio a lo largo del eje  $x$ , la velocidad del fluido en la dirección del eje  $y$  es nula.

El dominio 2D se malló con celdas cuadriláteras estructuradas en la plataforma ANSYS-Meshing en Workbench. Luego de tres refinamientos de la malla en las adyacencias de las paredes basadas en un estudio de convergencia numérica, la malla final de buena calidad reportó 20510 celdas cuadriláteras, la cual se muestra en la Figura 2.



**Figura 1. (a) Dominio computacional tobera, pared dentada, y atmósfera. (b) Sección ampliada: detalle de la sección dentada.**



**Figura 2. (a) Dominio computacional mallado con 20510 celdas cuadriláteras. (b) Sección ampliada: detalle malla de la sección dentada.**

**Método de solución computacional**

En el código ANSYS-Fluent, se seleccionó la opción de análisis basado en densidad para un fluido compresible y simetría en 2D. Para el flujo, la turbulencia de la energía cinética y para la disipación específica, se seleccionó la opción: Second Order Upwin. Para el monitor residual se determinó un valor fijo de 0.00001, tanto para continuidad, velocidad, y energía. Se realizaron 9000-80000 iteraciones, para obtener los resultados finales de convergencia numérica del campo de flujo para seis valores de cargas de presión aplicada en el rango de 200-700 kPa. Para el procesamiento de datos se utilizó un equipo con las siguientes características: Laptop marca Síragon, modelo M54R, Intel Core 2 Duo, dos procesadores de 1.8 GHz y memoria RAM de 3 GB.

**III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En esta sección, se presentan las simulaciones numéricas del campo de flujo de número de Mach, velocidad, presión estática y temperatura estática, así como, los perfiles evaluados en la simetría del dominio en x, para cada caso de carga de presión a la entrada de la tobera.

El campo de flujo para el número de Mach se muestra en la Figura 3 y de los perfiles en evaluados en la simetría en la Figura 4, para la carga de presión aplicada en el rango de 200-700 kPa.

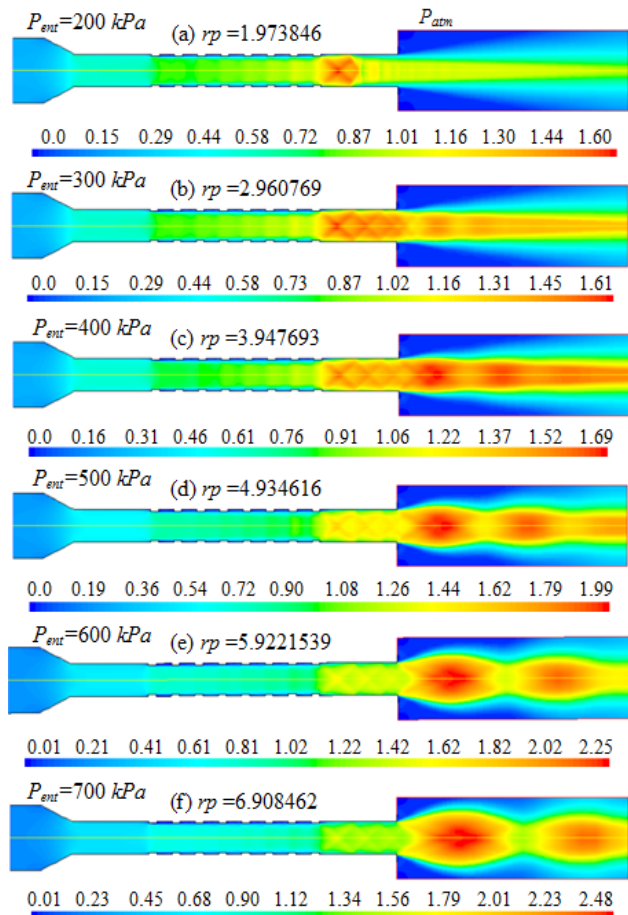
El flujo incrementa su velocidad en la sección de la tobera, la cual termina en la longitud de 40 mm, y alcanzó un valor estimado de Mach 0.6; de esta longitud hasta 90 mm el flujo sufre una desaceleración, por lo cual se observa como un escalón en la velocidad del flujo, siendo el valor estimado de Mach 0.8. En el tramo de 90-200 mm, se tiene las paredes dentadas, con ocho dientes en la pared superior y ocho

dientes en la pared inferior, región donde se muestra como el flujo sufre perturbaciones inducidas por la superficie dentada, el cual logra superar la velocidad sónica en el último diente a un valor estimado de Mach 1.2, por lo cual, el flujo tiene una velocidad transónica en la sección dentada en el rango de Mach 0.8-1.2.

Desde la posición de la longitud de 200-250 mm corresponde para una sección recta de la pared que no tiene dientes, en dicha sección, se presentan choques oblicuos, por lo cual, el flujo se acelera y desacelera. Donde, la velocidad del flujo en la salida ducto alcanzó un valor estimado de Mach 1.4.

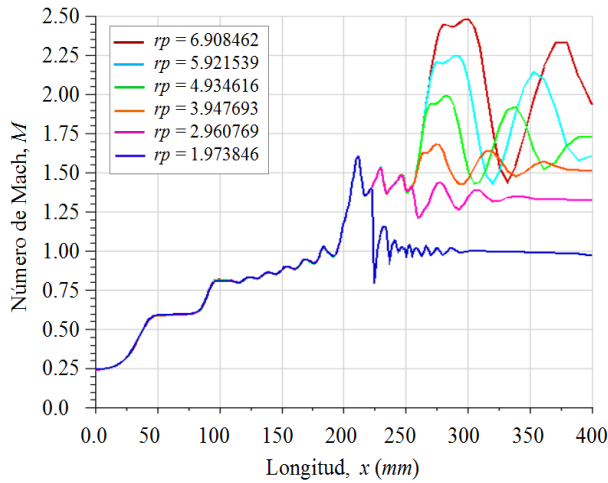
Desde el inicio de la tobera hasta la sección final, en la posición 250 mm, el comportamiento de la trayectoria del flujo para el número de Mach tienen el mismo patrón, excepto para la presión de entrada de 200 kPa, ya que el flujo aun no alcanzó un estrangulamiento total.

A la salida del ducto, en el ambiente de la atmósfera se presentan las ondas de choque y cuyas regiones del chorro supersónico en la literatura es conocido como pluma y penacho. Las ondas de choque incrementan su intensidad a medida que se incrementa la presión de entrada, para el rango de 300-700 kPa. Donde, para estas condiciones de cargas aplicadas, el flujo alcanzó en el ambiente una velocidad supersónica en el rango estimado de número de Mach de 1.25-2.5.



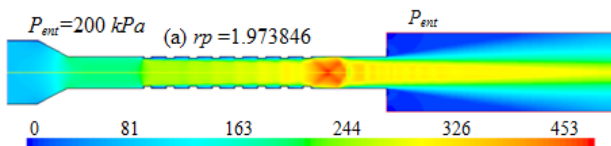
**Figura 3. Campo de número de Mach para diferentes presiones de entrada.**



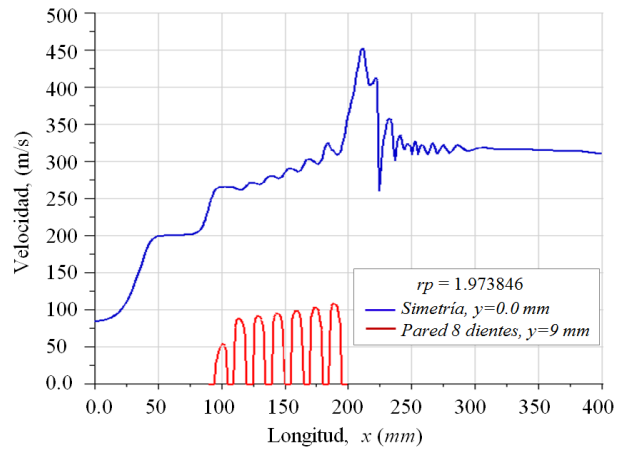


**Figura 4.** Perfiles de número de Mach, evaluados en la simetría en el eje x.

El campo de velocidad se muestra en la Figura 5, para la carga aplicada de presión de 200 kPa. En la Figura 6, se muestra el perfil de velocidad evaluado en la simetría y el comportamiento de la trayectoria en la sección dentada, el cual se muestra un incremento de la velocidad escalonado producto de las oscilaciones inducidas del flujo, consecuencia del cambio fluctuante de la cantidad de movimiento en diferentes regiones del campo flujo. Además, se muestra el comportamiento de la trayectoria del perfil de velocidad del flujo evaluado en la pared y espacios entre los dientes, a la altura  $y=9$  mm; donde, en los espacios entre diente y diente se tiene picos de velocidad que se han incrementado hasta un valor estimado de 100 m/s, y cuyo valor es considerado alto, por lo cual logra incrementar la turbulencia del flujo y causar fluctuaciones al disminuir su velocidad de manera brusca.

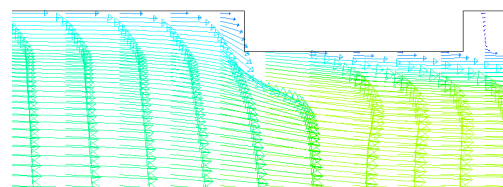


**Figura 5.** Campo de velocidad para la presión de entrada de 200 kPa.

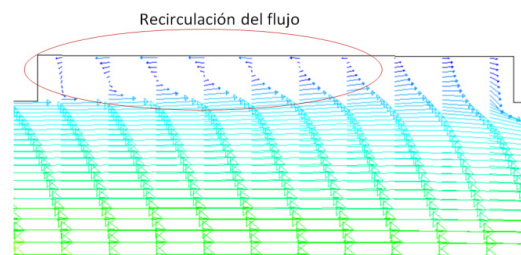


**Figura 6.** Perfiles de velocidad en la simetría en x y en la pared de la sección dentada.

Durante el tránsito del flujo en la sección dentada, el flujo se encuentra con una obstrucción, el cual es el diente, tal como se muestra en la Figura 7, por tanto, cierta cantidad de masa de aire tiende a desviarse, ocasionando un cambio de su cantidad de movimiento a la vez que se comprime y descomprime, generando perturbaciones en ciertas regiones del flujo que se encuentran en su vecindad. En la Figura 8 se muestra la separación entre dientes, la cual se puede considerar como cavidad rectangular, región del flujo que presenta una recirculación en el extremo izquierdo, en forma de remolino, el cual es conocido como vórtice de von Karman [3], que también contribuye en el incremento de las fluctuaciones del régimen del flujo por las variaciones del gradiente de velocidad.



**Figura 7.** Vector de velocidad que muestra la desviación del flujo al inicio de la pared del diente.



**Figura 8.** Vector de velocidad que muestra el remolino en la región del flujo en el extremo izquierdo, en la separación entre dientes.

En la Figura 9 se muestra el campo de presión estática, se observa como varían las magnitudes de las presiones en diferentes regiones del campo de flujo. En la sección dentada se muestran las fluctuaciones de presiones, así como donde se presentan las ondas de choque oblicuas al final del último diente y en la atmósfera. Las fluctuaciones de las presiones evaluados en la simetría en x se muestran en la Figura 10, donde se observa que a medida que aumenta la presión de entrada las oscilaciones de las fluctuaciones del flujo tienden a tener un patrón definido, y se observa las regiones donde el flujo tiene una presión menor al ambiente de la atmósfera.

Mientras que, para el campo de temperatura estática, la cual se muestra en la Figura 11 y de los perfiles en la Figura 12, se observa las variaciones de sus magnitudes en la región del ducto y en la atmósfera. En los espacios entre los dientes tienen una temperatura mayor a la región del flujo que está en el centro, y las magnitudes menores de temperatura se presentan en las regiones donde se produce el choque, iniciando desde el último diente hacia la atmósfera.

Los perfiles de temperatura muestran que el comportamiento de las trayectorias siguen el mismo patrón desde el inicio hasta el final de la tobera convergente, excepto para la presión de entrada de 200 kPa. Además, muestran que en la sección dentada la temperatura está en el rango de 235-265 K, y disminuye aun más cuando el flujo sale a la atmósfera, el cual está en el rango de 135-260 K, lo que indica que su energía interna termodinámica a disminuido a un nivel inferior con respecto a otras regiones del campo de flujo.

Por lo cual, a mayor presión de entrada, el flujo se descarga a la atmósfera a velocidad supersónica a menor temperatura. Para la presión de entrada de 700 kPa, en el ambiente producto de la onda de choque, una región del flujo descende su temperatura alrededor de 140 K (-133°C).

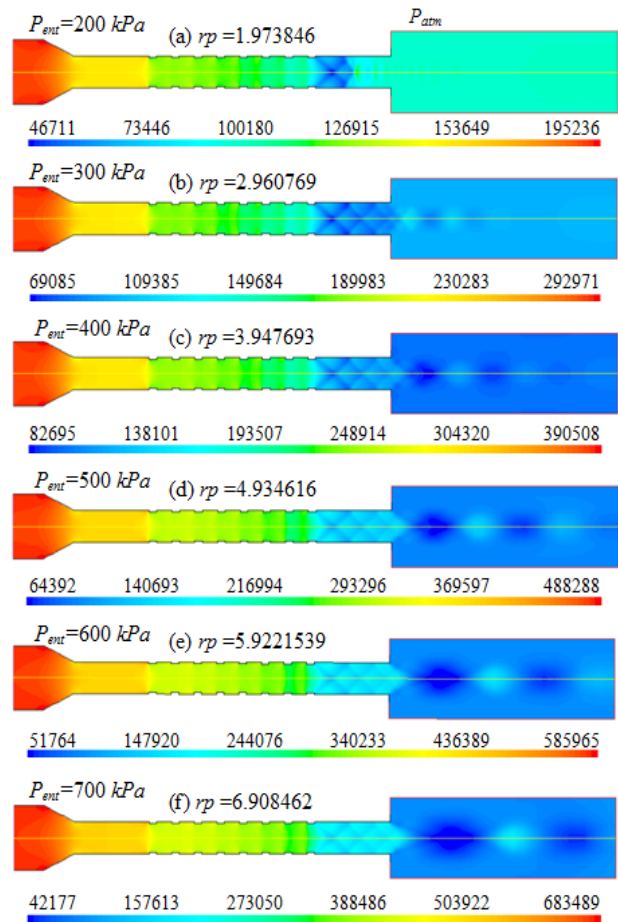


Figura 9. Campo de presión estática (Pa) para diferentes presiones de entrada.

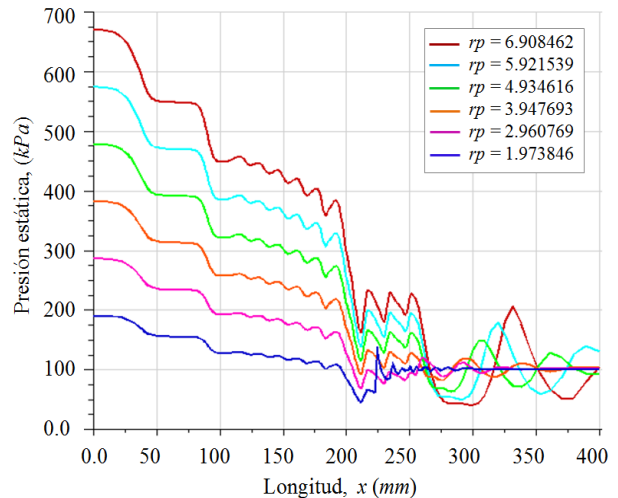


Figura 10. Perfiles de presión estática, evaluados en la simetría en x.

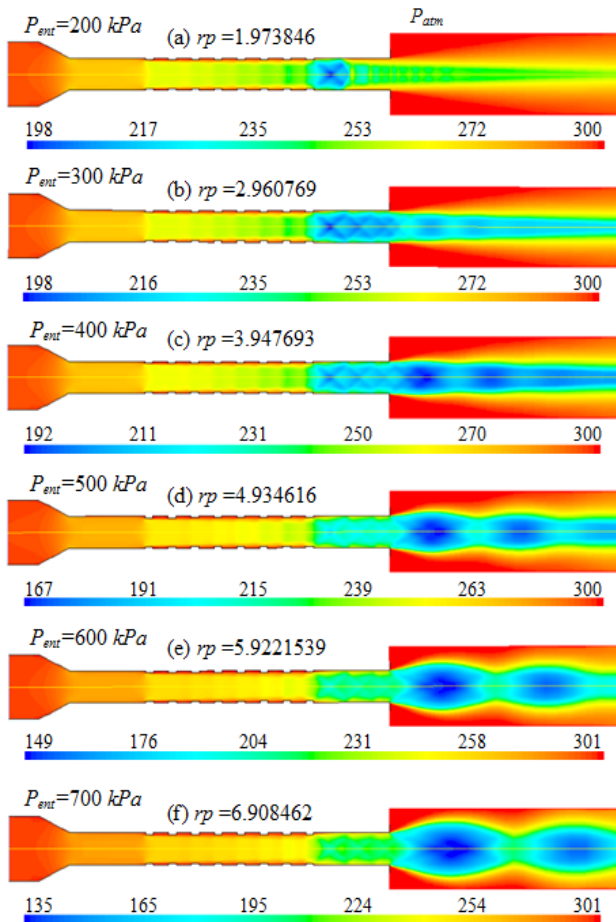


Figura 11. Campo de temperatura estática (K) para diferentes presiones de entrada.

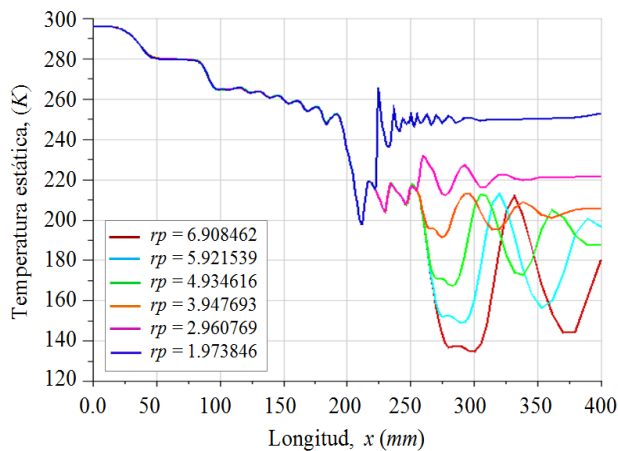


Figura 12. Perfiles de temperatura estática, evaluados en la simetría en x.

El campo de flujo de número de Mach, velocidad, presión estática y temperatura estática, arrojaron resultados de sus variaciones termodinámicas en diferentes regiones, tales como, en la sección de la tobera, del ducto dentado y en la atmósfera. Donde, en la sección den-

tada presentó fluctuaciones inducidas de los parámetros termodinámicos con un incremento escalonado de la velocidad para un régimen transónico. Después del último diente hasta la salida del ducto, presencia de ondas de choque oblicuo. En la atmósfera, ondas de choque.

Regiones del flujo adyacente a las paredes dentadas, presentaron fluctuaciones con presencia de remolinos en las esquinas del extremo izquierdo entre los espacios entre dientes, los cuales tiene la forma de cavidad rectangular. Esta generación de remolinos en dicha cavidad rectangular presentó diferencias de presiones consecuencia de la variación de la cantidad de movimiento, ya que es entendido que cuando el flujo se comprime su densidad se incrementa y cuando se descomprime su densidad disminuye, por lo cual, se presenta un gradiente de velocidad y de presión, y en ciertas regiones el flujo se acelera y en otras se desacelera. Además, se acentúa más la perturbación en la zona de contacto con los dientes, lo cual propaga la turbulencia e incrementa su intensidad, por tanto, los torbellinos tendrán diferentes escalas. Los torbellinos de mayor escala se fraccionan a torbellinos de menor escala, que transfieren energía de las fluctuaciones en un proceso continuo de cascada energética que se disipan durante el proceso de los choques moleculares. Por lo cual, a la misma altura del diente, al no existir una superficie continua en la cavidad, en esa región el flujo se hace más turbulento e incrementa su velocidad, e incrementó a un valor estimado de 100 m/s, formando picos de velocidad en cada sección de la cavidad, mientras que, en la pared del diente la velocidad fue nula.

En flujo interno, al tener una superficie dentada, las cavidades contribuyen a que el flujo no tenga contacto con la pared, por lo cual se reduce la fricción, generando los remolinos como impulsores de velocidad en ciertas regiones del flujo en su vecindad; algo similar cuando un cuerpo reposa en contacto sobre una rueda, que requiere de menor energía para ser impulsado. Además, las esquinas de los dientes contribuyen en la generación de fluctuaciones, esto es, para las dimensiones de los dientes considerados para el estudio.

Para un caso en específico, en la simetría del dominio en la sección dentada (90-200 mm), la velocidad del flujo con incremento escalonado se ubicó para una magnitud estimada de número de Mach en el rango de 0.8-1.2, velocidad en el rango de 250-350 m/s, presión estática en el rango de 90-500 kPa y de la temperatura estática en el rango de 235-265 K. Resultados similares para un flujo interno en la sección dentada, fueron reportados en [13], donde se ubicó el rango de Mach 0.8-1.2, lo cual es coincidente con el resultado del presente trabajo. Donde, el campo de flujo fue simulado

en un dominio 2D discretizado mediante el método de elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés). Así mismo, para un flujo interno, las fluctuaciones inducidas por las cavidades rectangulares en una superficie plana fueron reportadas en [11], donde la intensidad de la fluctuación, en la simetría presentó oscilaciones con incremento escalonado de la velocidad, y fueron menores con respecto al resultado del presente trabajo. Sin embargo, la velocidad en las cavidades al nivel de la superficie, presentó picos de valores por arriba de 100 m/s, siendo valores mayores de velocidad a lo obtenido al nivel de la altura de los dientes.

## V. CONCLUSIONES

Según del análisis realizado para el flujo de aire en un ducto dentado, se concluye que:

Para la carga aplicada de presiones en el rango de 200-700 kPa, las ondas de choque oblicuo se presentan a partir del último diente hasta la salida del ducto. Para el rango de presión de entrada de 300-700 kPa, en la atmósfera, las ondas de choque incrementan su intensidad, y se encuentra en el rango de Mach 1.25-2.5; y la temperatura del flujo en el rango 130-260 K.

En la sección dentada, el cual tiene una separación entre dientes, con geometría de una cavidad rectangular, se incrementa la turbulencia del flujo, e induce a una fluctuación de los parámetros termodinámicos, donde la velocidad del flujo tiene un comportamiento escalonado. En la simetría, el flujo tiene valores estimados de velocidad transónica en el rango de Mach 0.8-1.2, velocidad en el rango de 250-350 m/s, presión estática 90-500 kPa y temperatura estática 235-265 K, siendo valores por debajo de cero grados centígrados, respectivamente.

Para estudios posteriores, la longitud de los dientes se debe reducir progresivamente hasta una longitud mínima, así como el espacio entre las separaciones entre dientes. Bajo estas condiciones se considera determinar el nuevo comportamiento del régimen de flujo para un dominio computacional 2D y 3D, con el propósito de cuantificar la velocidad en diferentes regiones del campo de flujo.

## AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento a Jehová, mi Dios todopoderoso, mi fuente de sabiduría e inspiración. Al Centro de Estudios Energéticos (CEE) de la Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” Vice-Rectorado Puerto Ordaz, Bolívar, Venezuela. Al Grupo de Modelamiento Matemático y Simulación Numérica (GMMNS, Group of Mathematical Modeling and Numerical Simulation) de la Universidad Nacional

de Ingeniería (UNI), Lima, Perú.

## REFERENCIAS

- [1] J. Blazek, Computational fluid dynamics: principles and applications. Butterworth-Heinemann, 2015.
- [2] B. Andersson, R. Andersson, L. Håkansson, M. Mortensen, R. Sudiyo, B. van Wachem, and L. Hellström, Computational Fluid Dynamics Engineers. Cambridge University Press, 2012.
- [3] T. v. Karman, “The fundamentals of the statistical theory of turbulence,” *Journal of the Aeronautical Sciences*, vol. 4, no. 4, pp. 131–138, 1937. doi: 10.2514/8.350
- [4] F. White, Viscous fluid flow. McGraw-Hill Education, 2005.
- [5] H. Schlichting, Boundary-layer theory. McGraw-Hill classic textbook reissue series, 2016.
- [6] J. D. Anderson, Fundamentals of aerodynamics. McGraw-Hill series in aeronautical and aerospace engineering, 2017.
- [7] D. C. Wilcox, Turbulence modeling for CFD. DCW Industries, 2006.
- [8] P. Krehl and S. Engemann, “August Toepler — the first who visualized shock waves,” *Shock Waves*, vol. 5, no. 1, pp. 1–18, Jun 1995. doi: 10.1007/BF02425031
- [9] G. S. Settles, “Toma ultrarrápida de imágenes de ondas de choque, explosiones y disparos,” *Revista Investigación y Ciencia*, pp. 74–83, May. 2006. <https://www.investigacionyciencia.es>
- [10] H. Hirahara, M. Kawahashi, M. U. Khan, K. Hourigan, “Experimental investigation of fluid dynamic instability in a transonic cavity flow,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, 31, pp. 333–347, 2007. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2006.05.007.
- [11] S. L. Tolentino, S. Caraballo, J. Toledo, J. Mírez y C. Torres, “Oscilaciones de la velocidad del flujo en un ducto recto con cavidades rectangulares,” *XVI Jornadas de Investigación 2018, UNEXPO Puerto Ordaz, Venezuela*, pp. 34–39, 2018.
- [12] S. Jeyakumar, K. A. Yuvaraj, K. Jayaraman, F. Cardona, M. T. Sultan, “Effect of cavity fore wall modifications in supersonic flow,” *Conference, Materials Science and Engineering*, 152, pp. 1–7, 2016. doi: 10.1088/1757-899X/152/1/012002.
- [13] S. L. Tolentino y S. Caraballo, “Estudio del flujo de aire en un conducto recto con pared dentada,” *XIV Jornadas de Investigación 2016, UNEXPO Puerto Ordaz, Venezuela*, pp. 203–210, 2016.
- [14] F. White, Fluids Mechanics. McGraw-Hill Education, 2016.
- [15] F. R. Menter, “Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications,” *AIAA*



Journal, vol. 32, no. 8, pp. 1598-1605, 1994. doi: 10.2514/3.12149

[16]S. L. B. Tolentino Masgo, "Evaluación de modelos de turbulencia para el flujo de aire en una tobera plana," Revista Ingenius, no. 22, pp. 25-37, Julio-Diciembre

2019. doi: 10.17163/ings.n22.2019.03

[17]S. L. B. Tolentino Masgo, "Evaluación de modelos de turbulencia para el flujo de aire en un difusor transónico," Revista Politécnica, vol. 45, no. 1, pp. 25-38, 2020. doi: 10.3333/rp.vol45n1.03

## RESUMEN CURRICULAR



**San Luis B. Tolentino Masgo.** Ingeniero Mecánico y Magister Scientiarum en Ingeniería Mecánica. Egresado de la Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre" Vice-Rectorado Puerto Ordaz, Bolívar, Venezuela. Sus trabajos están orientados en la línea de investigación de Modelación y Simulación Computacional. Es investigador colaborador del Centro de Estudios Energéticos (CEE) de la Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre" Vice-Rectorado Puerto Ordaz, Bolívar, Venezuela; y del Group of Mathematical Modeling and Numerical Simulation (GMMNS) de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Lima, Perú.



**Juan Toledo Hernández.** Nació el 18/03/1961 en Caracas, Venezuela. Obtuvo su título de Ingeniero Electricista en la Universidad Simón Bolívar en 1992, y el de Magister Scientiarum en Ingeniería Eléctrica opción Sistemas de Potencia en la Universidad Central de Venezuela en el 2000. Está jubilado de EDELCA-CORPOELEC con más de 28 años de experiencia en la industria eléctrica nacional, incursionando en el área de Ingeniería de Centrales Hidroeléctricas para las Centrales del Bajo Caroni en Venezuela, como son Macagua, Caruachi, Tocoma y Guri. Ha sido tutor académico e industrial de más de 30 tesis de pregrado y 7 tesis de Maestría en diferentes áreas de investigación. Está adscrito al Laboratorio de Física Computacional, Sección de Física de la UNEXPO-Puerto Ordaz, desde el año 2005 al presente. Además, fue Miembro del Comité Científico del X Congreso Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, CIMENICS'2010.