

**IMPLEMENTACIÓN DE PRÁCTICAS DE FLUJOS COMPRESIBLES EN
TUBERÍAS Y BOQUILLAS PARA EL LABORATORIO DE PROCESOS I**

**HUMBERTO GARCÍA MORALES
HEINER ANDRÉS MUÑOZ GUERRERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2019

**IMPLEMENTACIÓN DE PRÁCTICAS DE FLUJOS COMPRESIBLES EN
TUBERÍAS Y BOQUILLAS PARA EL LABORATORIO DE PROCESOS I**

**HUMBERTO GARCÍA MORALES
HEINER ANDRÉS MUÑOZ GUERRERO**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico

**DIRECTOR
Diana Paola Duarte Duarte, PhD
Ingeniera Química**

**CO-DIRECTOR
Julio Andrés Pedraza Avella, PhD
Ingeniero Químico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2019

DEDICATORIA

Momentos fáciles y difíciles, llenos de felicidad e incertidumbre, pero siempre guiado por Dios, quien me dio fuerzas para caminar y seguir luchando por cumplir esta meta. Por eso, a él mi primera dedicatoria.

A mi madre querida, Evis Morales Contreras, quien con su amor incondicional y su apoyo constante por ver a su hijo convertirse en Ingeniero Químico, nunca desistió y siempre persistió y tuvo su fe intacta en que al final, todo valdría la pena.

A mi padre Humberto García Gómez, mis hermanos Leydis Mejía Morales, John Carvajal Morales, Karen y Jeiner García Morales, por estar siempre ahí, apoyando y motivándome en cada etapa de mi carrera.

A todos aquellos amigos que hicieron de cada momento algo único y que me enseñaron a compartir y a ser mejor cada día más.

Infinitamente agradecido.

Humberto García Morales

Dios como mi guía, mi mayor fortaleza y refugio, primeramente, agradecido ante él por su bondad, amor y salud, para siempre afrontar cada reto de la mejor manera posible.

A los hermosos padres Uriel de Jesús Muñoz Madariaga y Candelaria del Carmen Guerrero Estrada con los cuales la vida me premió, inculcándome valores éticos y morales, ayudándome a convertir primero que todo en una persona de bien, útil para la sociedad, fueron además de mi gran pilar mi mayor motivación y compañía en la persecución de este sueño, que más que personal era algo colectivo.

Agradecido con el amor y apoyo motivacional e incondicional de mis hermanos Uriel Alberto y Yina Marcela que día a día me hacían sentir orgulloso de ellos y me motivaban a alcanzar la vida profesional a la cual ya ellos pertenecen, también a mi hermosa sobrina Ariel Sofía Muñoz, mi pequeña, que a la distancia con inocencia y angelical sonrisa me llenó siempre de fuerzas y energía para dar lo mejor de mí y así convertirme en Ingeniero Químico.

A mis abuelitas Baudilia Madariaga y a mi hermoso ángel que ya desde el cielo me cuida Erotida Estrada.

A los compañeros con los cuales compartí duros y buenos momentos, vivencias que dejan enseñanza para el mañana.

Heiner Andrés Muñoz Guerrero.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen:

A la profesora Diana Paola Duarte Duarte y al profesor Julio Andrés Pedraza Avella, por su entrega y apoyo constante para poder llevar a cabo este proyecto.

Al personal técnico del laboratorio de procesos, por su acompañamiento y paciencia, además de su amabilidad a la hora de realizar el reconocimiento de las prácticas y las respectivas prácticas experimentales.

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander, a la Escuela de Ingeniería Química, a la sede UIS Barrancabermeja por recibirnos, encaminarnos y formarnos con valores éticos y morales además del conocimiento aportado al principio de este camino.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. MARCO TEÓRICO	18
1.1 CONCEPTOS DE FLUJO COMPRESIBLE	18
1.1.1 Propiedades de estancamiento.....	18
1.1.2 Flujo Isentrópico Unidimensional	19
1.1.3 Toberas convergentes	20
1.1.4 Toberas convergente-divergente	21
1.2 FLUJO EN TUBERÍAS.....	21
1.3 PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN	22
2. METODOLOGÍA	23
2.1 PRELIMINARES	24
2.1.1 Reconocimiento de los equipos	24
2.1.1.1 Calibración de los equipos	24
2.1.1.2 Identificación de las condiciones de operación	24
2.1.1.3 Identificación y selección de las variables respuesta	24
2.1.1.4 Identificación de conceptos.....	24
2.2 DISEÑO DE LAS PRÁCTICAS	25
2.2.1 Planteamiento y desarrollo de las prácticas.....	25
2.2.2 Herramienta Virtual	25
2.3 VALIDACIÓN DE LAS PRÁCTICAS	26
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	27
3.1 RESULTADOS PRELIMINARES	27
3.1.1 Reconocimiento de los equipos	27
3.1.2 Calibración de los equipos	28
3.1.3 Identificación de las condiciones de operación	30

3.1.4 Identificación de conceptos.....	31
3.1.5 Identificación de las variables respuesta	32
3.2 DISEÑO DE LAS PRÁCTICAS	32
3.2.1 Planteamiento y desarrollo de las prácticas.....	32
3.2.2 Herramienta Virtual	33
3.3 VALIDACIÓN DE LAS PRÁCTICAS	36
4. CONCLUSIONES	41
5. RECOMENDACIONES.....	42
BIBLIOGRAFÍA.....	43
ANEXOS.....	45

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Tipos de Toberas. Fuente: Autores	20
Figura 2. Esquema de la metodología. Fuente: Autores	23
Figura 3. Unidad base F300	27
Figura 4. Calibración del micrómetro del equipo F300A.	30
Figura 5. Pantalla de inicio de la herramienta virtual.	34
Figura 6. Vista de los equipos.....	34
Figura 7. VISTA set de videos de la práctica.	34

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Datos para calibración del micrómetro (a) Toma de datos N°1, (b) Toma de datos N°2, (c) Toma de datos N°3.	29
Tabla 2. Promedio de datos para calibración del micrómetro.	29
Tabla 3. Relaciones de diámetros de las boquillas disponibles equipo F300A.	31
Tabla 4. Relaciones de diámetros de las boquillas disponibles equipo F300B.	31
Tabla 5. Datos para cálculos del efecto en las propiedades del fluido al variar la presión de entrada para la Boquilla 1.	38
Tabla 6. Promedio de datos para cálculos del efecto en las propiedades del fluido al variar la presión para la Boquilla 1.	38
Tabla 7. Cálculos de las razones de las propiedades termodinámicas estáticas del fluido para la Boquilla 1.	39
Tabla 8. Datos del manual de fabricante para el flujo másico en contrapresión constante para la Boquilla 1.	40

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS.....	45
ANEXO B PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DEL VOLADIZO Y PUESTA EN CERO DEL MICRÓMETRO F300A	49
ANEXO C FLUJO ISENTRÓPICO EN TOBERAS.....	50
ANEXO D. DEMOSTRACIÓN DEL FENÓMENO DE ESTRANGULAMIENTO Y DEL EFECTO DE LA CONTRAPRESIÓN EN BOQUILLAS CONVERGENTES Y CONVERGENTES-DIVERGENTES.....	66
ANEXO E. PÉRDIDAS DE CARGA EN TUBERÍAS POR FRICCIÓN Y ACCESORIOS	77
ANEXO F VISUALIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA VIRTUAL.....	86
ANEXO G TABLAS PARA TOMA DE DATOS	92

RESUMEN

TITULO: IMPLEMENTACIÓN DE PRÁCTICAS DE FLUJOS COMPRESIBLES EN TUBERÍAS Y BOQUILLAS PARA EL LABORATORIO DE PROCESOS I*.

AUTORES: HUMBERTO GARCÍA MORALES, HEINER ANDRÉS MUÑOZ GUERRERO**.

PALABRAS CLAVES: FLUIDOS COMPRESIBLES, BOQUILLAS, TUBERÍAS, HERRAMIENTA VIRTUAL, CONVERGENTE, DIVERGENTE.

DESCRIPCIÓN:

En la Escuela de Ingeniería Química se hace necesario cada vez más el llevar los conceptos y teoría vista en el aula de clases al área experimental, con el fin de que el estudiante refuerce el conocimiento adquirido y enriquezca la relación academia-industria; es por eso, que la finalidad de este proyecto es asemejar a pequeña escala procesos que se llevan a cabo a nivel industrial, en las prácticas experimentales diseñadas.

Con el desarrollo de este trabajo de grado se pretende promover y afianzar en el estudiante los conocimientos adquiridos previamente sobre flujo compresible en tuberías y boquillas a través de la implementación de prácticas en donde se instauren temas fundamentales que serán llevados de la teoría a la práctica mediante la ejecución experimental. Para esto se diseñaron seis prácticas, con el fin de que los estudiantes puedan entender y aplicar claramente los conceptos sobre flujo compresible que son importantes en la industria. En las prácticas desarrolladas en este proyecto, se puede visualizar de forma global el procedimiento de ejecución de las mismas, además de tener una guía para el reconocimiento de los equipos F300A, F300B y F300G involucrados en cada una de las prácticas diseñadas.

Los resultados de la implementación de las prácticas y del desarrollo de la herramienta virtual de flujos compresibles en tuberías y diversas boquillas convergentes y convergentes-divergentes son presentados en este trabajo.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Diana Paola Duarte Duarte, Ingeniero Químico, PhD. Codirector: Julio Andrés Pedraza Avella. Ingeniero Químico, PhD.

ABSTRACT

TITLE. IMPLEMENTATION OF EXPERIMENTAL PRACTICES ON COMPRESSIBLE FLOWS THROUGH PIPES AND NOZZLES FOR THE SUBJECT LABORATORIO DE PROCESOS I*.

AUTHORS. HUMBERTO GARCÍA MORALES, HEINER ANDRÉS MUÑOZ GUERREO**.

KEYWORDS. COMPRESSIBLE FLOWS, NOZZLES, PIPES, VIRTUAL TOOL, CONVERGENT, DIVERGENT.

DESCRIPTION:

In the Chemical Engineering School, it becomes increasingly necessary the concepts and theory are carried out in the classroom. Classes in the experimental area, in order for the student to reinforce the acquired knowledge and the academic-industry relationship; that is why, the purpose of this project is to resemble on a small scale processes that are carried out at the industrial level, in the experimental practices designed.

With the development of this work of degree is to promote and strengthen in the student of acquired knowledge is learned about the compressible flow in the capacities and the bases of the practices where the subjects are installed the skills that are carried out the theory to practice through experimental execution. For this six practices were designed, so that students can understand and apply the concepts on compressible flow that are important in the industry. In the practices developed in this project, you can view globally the procedure for executing them, as well as having a guide for the recognition of the F300A, F300B and F300G teams involved in each of the appropriate practices.

The results of the implementation of the practices and the development of the virtual tool of compressible flows in pipes and diverse convergent and convergent-divergent nozzles are presented in this work.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Diana Paola Duarte Duarte, Ingeniero Químico, PhD. Codirector: Julio Andrés Pedraza Avella. Ingeniero Químico, PhD.

INTRODUCCIÓN

Estos tiempos que abarcamos de la época del conocimiento, vanguardia de la tecnología, comunicación e información, debemos preguntarnos si estamos aprovechando al máximo la capacidad para gestionar y elegir lo que queremos aprender de manera adecuada. Estamos en una época donde se hace necesario que el estudiante sea capaz de dirigir su propio proceso de aprendizaje, algo así como ser autodidacta sin dejar de lado la labor de un guía con más experiencia.

El ser humano está en la capacidad de elegir y trazar objetivos, que le permitan manipular información, crear métodos de enseñanza, practicar de manera adecuada la toma, elección de pautas y parámetros, ligados directamente al proceso en el que se encuentre. Todo esto, con el fin de encaminarse a alcanzar los objetivos propuestos de manera adecuada con el debido enfoque que garantice una consecución satisfactoria de los puntos plasmados a priori.

El Laboratorio de Procesos de la Escuela de Ingeniería Química es sin lugar a dudas el lugar más cercano y más a la mano que tienen los estudiantes para tener contacto con los diferentes equipos y contrastarlos con la realidad en la industria. Además, de que es el espacio idóneo para poner en práctica todos los conocimientos adquiridos en el aula de manera teórica, donde se pueden aplicar conocimientos de fenómenos de transporte, termodinámica, operaciones unitarias, intercambiadores de calor, comportamiento de fluidos compresibles, control de procesos, entre otros. Por eso, es de mucha importancia mejorar en todos los aspectos, la manera de aprovechar este espacio, que sea lo más satisfactorio posible, para recrear en el estudiante un ambiente de trabajo en equipo donde se asignan y se asumen responsabilidades, pero todo esto con la información clara y

precisa antes de iniciar una práctica, para generar confianza y fluidez en la ejecución de los procesos.

Con el desarrollo de este proyecto denominado Implementación de prácticas de flujos compresibles en tuberías y boquillas para el Laboratorio de Procesos I, se desarrollaron métodos o secuencias que permiten la difusión de información relacionada con el funcionamiento y reconocimiento de los equipos F300A, F300B y F300G, donde la mayoría de las prácticas implementadas se focalizan al entendimiento e identificación de conceptos fundamentales como el flujo de fluidos compresibles. El documento-manual de los equipos se orientó hacia este tema en específico, como también se implementa una herramienta virtual que será de utilidad para consultar todos los conceptos y los contenidos necesarios para llevar a cabo las prácticas.

Las principales finalidades de este proyecto son las siguientes:

- Diseñar unas prácticas que permitan a los estudiantes afianzar los conocimientos de flujo compresible obtenidos de manera teórica en el aula a través de pruebas experimentales en el laboratorio.
- Diseñar una herramienta virtual orientada a estudiantes, docentes y personal auxiliar de laboratorio, donde se ilustre detalladamente el funcionamiento de los equipos de flujo compresible: F300A, F300B y F300G.
- Desarrollar las prácticas de laboratorio para validar el diseño propuesto de las prácticas y realizar la toma de datos que permitan evaluar el funcionamiento del equipo.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 CONCEPTOS DE FLUJO COMPRESIBLE

La compresibilidad es un aspecto muy importante en flujos de alta velocidad, ya que grandes cambios en la velocidad implican grandes variaciones de presión, además en los gases, estos grandes cambios en la presión vienen acompañados por modificaciones significativas en la densidad (ρ) y en la temperatura (T) ¹.

La principal diferencia entre el comportamiento de flujo de los fluidos compresibles e incompresibles, y entre las ecuaciones que los gobiernan, es el efecto de la densidad variable, por ejemplo, la dependencia de la densidad con la presión y la temperatura ².

Flujos compresibles, son fluidos que presentan variaciones importantes en su densidad, los cuales se encuentran con frecuencia en dispositivos que incluyen el flujo de gases a altas velocidades y que combinan la dinámica de fluidos y la termodinámica. Ambas, son absolutamente necesarias para el desarrollo de los fundamentos teóricos ³.

1.1.1 Propiedades de estancamiento Al analizar volúmenes de control es muy conveniente combinar la energía interna y la energía de flujo de un fluido en un solo término: entalpía, definida por unidad de masa como $h = u + P/\rho$. Cada vez que la

¹ UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA. *Cátedra de mecánica de los fluidos. Flujo compresible*. Córdoba, Argentina, 2011

² CENGEL, Y.A., CIMBALA, J.M., & OLGUÍN, V.C. *Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones*, México DF, México: McGraw-Hill, 2006

³ DARBY, R., & CHHABRA, R.P. *Chemical Engineering Fluid Mechanics*. (Second ed). New York, EE. UU: Marcel Decker, Inc, 2001

energía cinética y la energía potencial de un fluido son insignificantes, como sucede con frecuencia, la entalpía representa la energía total de un fluido. Para flujos a altas velocidades, como los que fluyen en motores de propulsión, la energía potencial del fluido es insignificante, pero la energía cinética no lo es, en tal caso, es conveniente combinar la entalpía y la energía cinética del fluido en un solo término llamado entalpía de estancamiento (o entalpía total) h_o , definido por unidad de masa como: $h_o = h + \frac{V^2}{2}$

Cuando la energía potencial de un fluido es insignificante, la entalpía de estancamiento representa la energía total de un flujo de fluido por unidad de masa. De esta manera se simplifica el análisis termodinámico de flujos a altas velocidades ⁴.

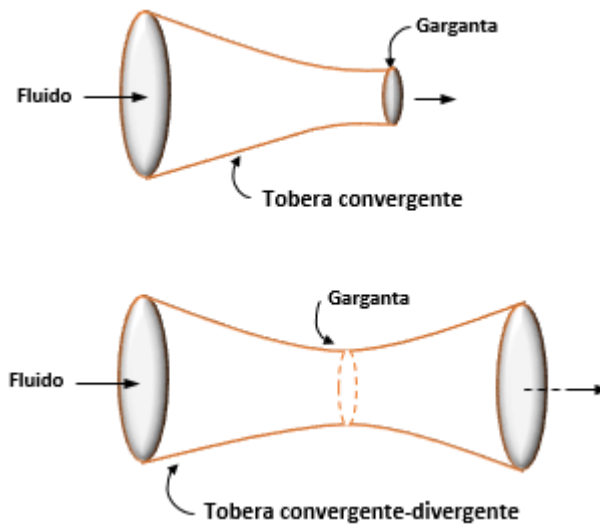
1.1.2 Flujo Isentrópico Unidimensional Durante la circulación de un fluido a través de dispositivos tales como toberas, difusores y los pasajes entre los álabes de las turbinas, las características numéricas de flujo varían principalmente en la dirección del flujo y solamente éste puede aproximarse con buena exactitud como un flujo isentrópico unidimensional. Considere la posibilidad de que un gas fluya en una tubería uniforme (sección transversal constante), el caudal másico y el flujo de masa $G = \dot{m}/A$ son iguales en todas las ubicaciones a lo largo de la tubería, ahora la presión cae a lo largo de la tubería debido a la disipación de energía (por ejemplo, fricción), al igual que para un fluido incompresible. Sin embargo, debido a que la densidad disminuye con la disminución de la presión, y el producto de la densidad y la velocidad debe ser constante, la velocidad debe aumentar a medida que el gas se mueve a través de la tubería, este aumento en la velocidad corresponde a un aumento en la energía cinética por unidad de masa de gas, lo que también resulta en una caída de la temperatura ⁵.

⁴ CENGEL, Y.A., CIMBALA, J.M., & OLGUÍN, V.C. Op. Cit.

⁵ UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA oP. CIT.

El número de Mach es igual a la unidad en la región de menor área de flujo, llamada garganta (Fig.1). Se observa que la velocidad del fluido continúa en aumento después de pasar por la garganta, aunque el área de flujo aumenta rápidamente en esta región. Este incremento en la velocidad a través de la garganta se debe a la rápida disminución en la densidad del fluido, el área de flujo del ducto considerada en este ejemplo, primero disminuye y luego aumenta, estos ductos se llaman toberas convergente-divergentes, se usan para acelerar gases a velocidades supersónicas.

Figura 1. Tipos de Toberas. Fuente: Autores



1.1.3 Toberas convergentes

$$P_e = \begin{cases} P_b & \text{para } P_b \geq P^* \\ P^* & \text{para } P_b < P^* \end{cases} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

En resumen, para todas las presiones del receptor P_b o presión de salida P_s , menores que la presión crítica P^* , la presión en la salida P_e de una tobera convergente es igual a P^* , el número de Mach en la salida es unitario y la razón del flujo de masa es la razón de flujo máxima, debido a que la velocidad del flujo es

sónica en la garganta para la razón de flujo máxima, una presión del receptor menor que la presión crítica no puede detectarse en el flujo corriente arriba de la tobera y no afecta la razón de flujo.

1.1.4 Toberas convergente-divergente Al momento de hacer mención de toberas aceleradoras por lo general se piensa en ductos de flujo cuya área de sección transversal disminuye en la dirección del flujo, sin embargo, la mayor velocidad a la cual un fluido puede acelerarse en una tobera convergente se limita a la velocidad sónica ($Ma=1$), la cual ocurre en la salida (garganta) de la tobera. La aceleración del fluido a velocidades supersónicas ($Ma>1$) puede lograrse solamente al añadir una tobera divergente a la tobera aceleradora subsónica en su garganta. La combinación resultante es una tobera convergente-divergente.

1.2 FLUJO EN TUBERÍAS

El flujo de un líquido o de un gas a través de tuberías o ductos se usa comúnmente en sistemas de calefacción y enfriamiento, y en redes de distribución de fluido. El fluido en estas aplicaciones usualmente se fuerza a fluir mediante un ventilador o bomba a través de una sección del flujo. Se pone particular atención a la fricción, que se relaciona directamente con la caída de presión y las pérdidas de carga durante el flujo a través de tuberías y ductos ⁶.

Los términos tubo, ducto y conducto se usan de manera intercambiable para tramos de flujo. En general, los tramos de flujo de sección transversal circular se conocen como flujo en tubería (en especial cuando el fluido es un líquido), y los tramos de

⁶ CRANE C. *Flow of Fluids Through Valves, Fittings, and Pipe. Tech Manual 410*. New York: Crane Co, 1991

flujo de sección transversal no circular se conocen como ductos (especialmente cuando el fluido es un gas) ⁷.

1.3 PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN

La pérdida de carga representa la altura adicional que el fluido necesita para elevarse por medio de una bomba con la finalidad de superar las pérdidas por fricción en la tubería.

Para la pérdida de energía por fricción de un fluido en un sistema de tuberías normalmente se denota como h_L , para este caso la fricción es proporcional a la carga de velocidad del flujo y la relación de la longitud de la corriente y a la energía cinética por unidad de masa ⁸.

$$h_L = f \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{v^2}{2g} \right) \quad \text{Ecuación 2.2}$$

⁷ HOLLAND FA, R, Bragg. *Fluid Flow for Chemical Engineers, 2nd Ed.*, London, Edward Arnold, 1995

⁸ SHAPIRO AH. *The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow*, Vol. I. New York: Ronald Press, 1953

2. METODOLOGÍA

La metodología empleada para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto se presenta como una serie de pasos organizados, para otorgar tanto claridad como calidad en la información ofrecida. Se establece el paso a paso a seguir para la implementación de las prácticas y se promueve también, el diseño de un sitio web que será usado como herramienta virtual para apoyo en el reconocimiento de las prácticas, con el fin de incentivar el interés de los estudiantes para que se dé una fácil interacción y se lleven a cabo estas prácticas de manera satisfactoria.

En el siguiente diagrama se especifica la serie de etapas y pasos que se siguieron.

Figura 2. Esquema de la metodología. Fuente: Autores



2.1 PRELIMINARES

2.1.1 Reconocimiento de los equipos Se llevó a cabo la identificación y reconocimiento de la información teórica detallada en los manuales genéricos de cada módulo, así como de las partes integrales de cada equipo para entender su funcionamiento. Los manuales fueron adquiridos con la compra de los equipos a la empresa P.A HILTON LIMITED ubicada en Inglaterra, y contienen información relacionada con las partes y calibración de los distintos módulos.

2.1.1.1 Calibración de los equipos Una vez conocidos las partes y funcionamiento de los equipos se realizó su calibración y ajuste para garantizar la fiabilidad de los resultados obtenidos. Esta etapa fue de vital importancia ya que si no se realizaba dicha calibración al momento de realizar la práctica se podrían obtener valores incoherentes.

2.1.1.2 Identificación de las condiciones de operación Se procedió a determinar cuáles son los rangos operables de presión, cuál es el suministro de aire óptimo del compresor, qué pasaba al momento de la manipulación de las válvulas en los módulos, en que influye la cantidad de flujo de aire en donde el equipo no sufre alteraciones y las variables de respuesta del equipo permanecen estables.

2.1.1.3 Identificación y selección de las variables respuesta Se determinaron las variables a seguir las cuales gobiernan y rigen el proceso, a partir de las variables independientes, que hacen mover las variables respuesta, con la finalidad de identificar su comportamiento.

2.1.1.4 Identificación de conceptos Se identifican los conceptos fundamentales, en donde se implementan temas aprendidos anteriormente durante el transcurso de la carrera, en diferentes cursos, para que el estudiante refuerce dichos

conceptos y con base a éstos, seleccionar las variables a desarrollar en la práctica experimental.

2.2 DISEÑO DE LAS PRÁCTICAS

2.2.1 Planteamiento y desarrollo de las prácticas Realizado el reconocimiento, calibración y puesta en funcionamiento de los módulos F300A, F300B y F300G se realizaron los siguientes pasos.

- Conceptos fundamentales. Se seleccionaron y se plantearon las prácticas que reforzarían los conceptos de flujo compresible en el estudiante.
- Toma de datos. Se realizaron pruebas experimentales con el fin de obtener un registro de datos, los cuales presentan tendencias que permiten organizar y diseñar la estructura de las prácticas de laboratorio de acuerdo a la información cualitativa y cuantitativa obtenida.
- Análisis de datos. A partir de la información obtenida se llevó a cabo la interpretación de los datos tabulados, teniendo en cuenta los rangos de condiciones de operación para el correcto desempeño de los distintos módulos y así lograr la mayor eficiencia posible de estos.

2.2.2 Herramienta Virtual Se formuló y trazó el contenido de las prácticas experimentales implementadas, a un medio audiovisual y bibliográfico contenido en una herramienta virtual, el cual es amigable a la vista de los usuarios y que sirve para realizar el reconocimiento de los equipos involucrados, además de aportar mayor claridad en el desarrollo de las prácticas por parte de los estudiantes. La herramienta contiene videos, documentos e imágenes de descripciones, desde partes y manejo de los equipos hasta información y datos conceptuales en un sistema virtual de acceso público.

2.3 VALIDACIÓN DE LAS PRÁCTICAS

Consiste en verificar que las prácticas desarrolladas y los resultados obtenidos son confiables para la medición de la variable respuesta de los equipos F300A, F300B y F300G.

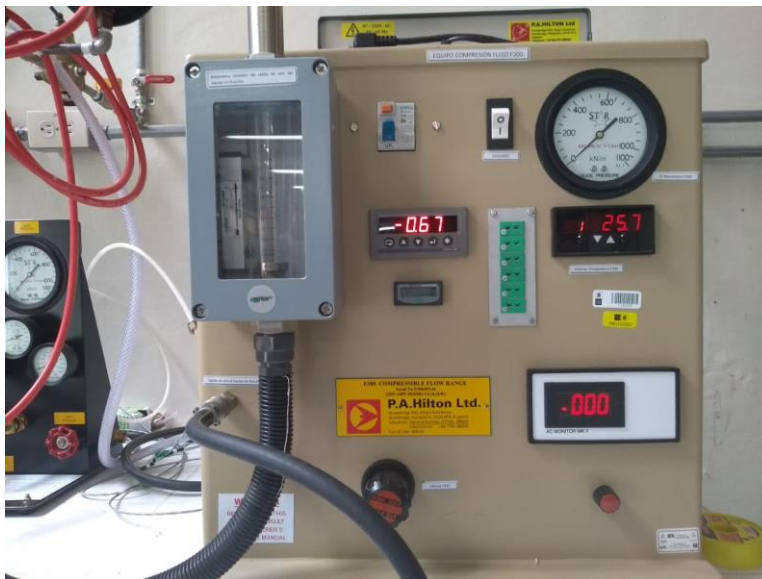
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El proceso se llevó a cabo en varias etapas secuenciales, de la siguiente manera:

3.1 RESULTADOS PRELIMINARES

3.1.1 Reconocimiento de los equipos En esta etapa se hizo uso del manual de funcionamiento de los equipos marca P.A HILTON LIMITED, en el cual se indican las partes y la manera de como operar los distintos módulos (F300, F300A, F300B y F300G). El equipo está constituido por una unidad base o módulo central F300 del cual se conectan los demás módulos F300A, F300B y F300G.

Figura 3. Unidad base F300



La unidad base F300 se encarga de suministrar el aire a los demás equipos, con los cuales se llevan a cabo las diferentes prácticas. El aire que entra a esta unidad

es suministrado por el Compresor SULLAIR que se encuentra en el Laboratorio de Procesos. El equipo puede trabajar a presiones de 1100 kPa pero no es recomendado hacerlo porque se presentarían problemas de estabilidad en el mismo. Se recomienda trabajar a presiones entre 450 y 500 kPa, rango en el que se obtienen resultados coherentes y se presenta estabilidad en los equipos.

A partir de esta información se hizo reconocimiento de todas las partes de los equipos y se realizó una descripción detallada de las partes principales de las unidades. De manera general, el equipo F300A es el que presenta boquillas individuales, el F300B presenta varias boquillas en una misma unidad, y el F300G es el de un sistema de tuberías. Un documento fue generado para ayudar a los estudiantes en el reconocimiento de cada una de las partes de las unidades F300, F300A, F300B y F300G, los cuales se muestran detalladamente en el Anexo A.

3.1.2 Calibración de los equipos Se estableció un procedimiento para realizar la calibración del voladizo y del micrómetro F300A (ver Anexo B). Es necesario realizar la calibración de estos equipos antes de llevar a cabo el desarrollo de la práctica porque dichas unidades o partes (voladizo y micrómetro) son muy sensibles y varían su posición inicial fácilmente. Se tiene especial cuidado en la calibración de estas partes porque son las únicas en donde se pueden ver alteradas las lecturas de los resultados para garantizar la confiabilidad de los resultados. Si no se realiza dicha calibración, en la práctica se podrían obtener valores incoherentes del dial y por ende de los valores de fuerza también.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para la calibración del voladizo y el micrómetro. Todos los datos fueron tomados tres veces durante la ejecución de la práctica. Los resultados obtenidos son representados en la Figura 4 con el fin de conocer la tendencia de los datos, mostrando una linealidad que aproxima la siguiente ecuación $\text{Fuerza de impacto} = 0,0427 \text{ Dial} + 0,0082$. El promedio de los datos y su desviación estándar son mostrados en la Tabla 2.

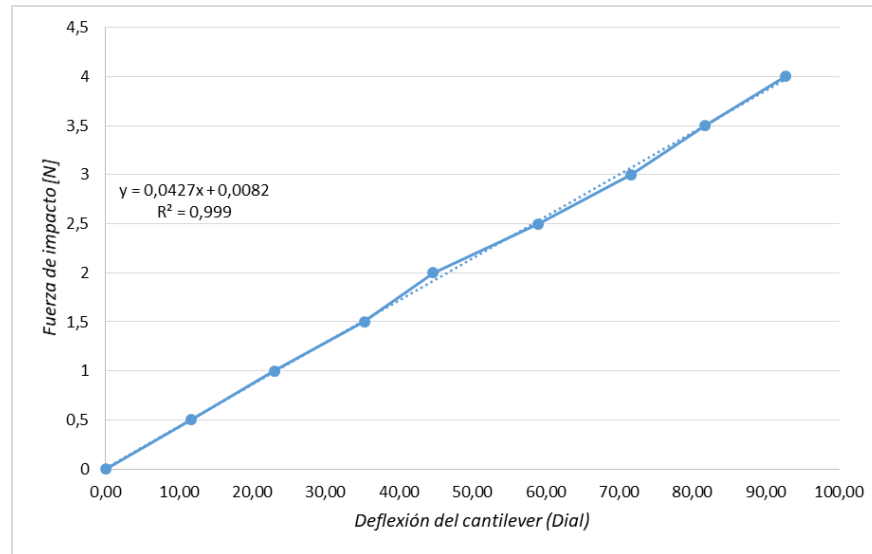
Tabla 1. Datos para calibración del micrómetro (a)Toma de datos N°1, (b) Toma de datos N°2, (c) Toma de datos N°3.

Toma de Datos N° 1		Toma de Datos N° 2		Toma de Datos N° 3		Desviación Dial
Fuerza de impacto [N]	Dial	Fuerza de impacto [N]	Dial	Fuerza de impacto [N]	Dial	
0	0	0	0	0	0	0,000
0,5	12	0,5	11	0,5	12	0,577
1	23	1	22	1	24	1,000
1,5	35	1,5	36	1,5	35	0,577
2	47	2	45	2	42	2,517
2,5	60	2,5	57	2,5	60	1,732
3	71	3	73	3	71	1,155
3,5	82	3,5	81	3,5	82	0,577
4	94	4	91	4	93	1,528

Tabla 2. Promedio de datos para calibración del micrómetro.

Fuerza de impacto [N]	Dial
0	0,0
0,5	11,7
1	23,0
1,5	35,3
2	44,7
2,5	59,0
3	71,7
3,5	81,7
4	92,7
Desviación estándar	0,76

Figura 4. Calibración del micrómetro del equipo F300A.



3.1.3 Identificación de las condiciones de operación Las variables que pueden ser manipulables en los diferentes equipos son:

- F300A: Presión de entrada a la cámara, la presión de salida en la cámara, el flujo de aire y los tipos de boquillas.
- F300B: Presión de entrada al equipo, presión de salida del equipo, set de boquillas y el flujo de aire.
- F300G: Presión de entrada al equipo.

Se instauró un rango de presión de operación entre 450 a 500 kPa para todos los equipos, ya que en este rango fue donde se observó que los módulos presentaban mejores respuestas a los cambios operacionales sometidos. El compresor de marca SULLAIR con el que se trabajan los equipos tiene un límite de presión de 160 psi, y la unidad base F300, que suministra el aire hacia los demás módulos (F300A, F300B y F300G) trabaja en un rango de presión óptima entre 140 a 150 psi. Los módulos F300A y F300B trabajan con boquillas o toberas convergentes y convergente-divergentes. La temperatura de operación no se considera una variable, ya que ésta depende de la temperatura ambiente y no puede ser

controlada. La cantidad de flujo de aire es dependiente de la presión del aire de entrada y la presión de operación.

Los equipos F300A y F300B disponen de diferentes tipos boquillas descritas en las Tablas 3 y 4, respectivamente.

Tabla 3. Relaciones de diámetros de las boquillas disponibles equipo F300A.

<i>Equipo F300A</i>					
Boquilla	1	2	3	4	5
Tipo	Conv.	Conv-div.	Conv-div.	Conv-div.	Conv-div.
Diámetro [mm]	2,00	2,40	2,80	3,20	4,00
Diámetro [m]	0,0020	0,0024	0,0028	0,0032	0,0040
Area [mm ²]	3,142	4,524	6,158	8,042	12,566
Area [m ²]	3,14E-06	4,52E-06	6,16E-06	8,04E-06	1,26E-05

Tabla 4. Relaciones de diámetros de las boquillas disponibles equipo F300B.

<i>Equipo F300B</i>			
Set Boquillas	A	B	C
Tipo	Conv-div.	Conv-div.	Conv.
N° Salidas	8	5	6
Diámetro [mm]	2,020	2,010	2,010
Diámetro [m]	0,002	0,002	0,002
Área [mm]	3,205	3,173	3,173
Área [m]	3,20E-06	3,17E-06	3,17E-06

3.1.4 Identificación de conceptos Se evaluaron las variables y las condiciones de operación en cada una de las prácticas a implementar para los equipos F300A y F300B, donde se aplican conocimientos básicos de la mecánica de fluidos, relacionados con flujo compresible, con el fin de demostrar la capacidad de análisis e interpretación de las variables y los fenómenos presentes en una tobera convergente o convergente-divergente, reforzando temas como la determinación del tipo de flujo con el número de Mach, razones de las propiedades termodinámicas estáticas del fluido para las diferentes boquillas, y para la práctica

del equipo F300G, se aplica los conocimientos de mecánica de fluidos sobre el flujo de fluidos compresibles a través de tuberías y accesorios reforzando temas como pérdidas de carga por fricción, pérdidas mayores por fricción en tuberías, pérdidas menores por fricción en accesorios. Lo anterior con el fin de reforzar temas fundamentales vistos en el curso académico de Manejo de Fluidos y Sólidos.

3.1.5 Identificación de las variables respuesta Se identificaron las variables respuesta a seguir para cada módulo:

- F300A: Propiedades termodinámicas estáticas del fluido en el punto de estrangulamiento y en el punto crítico, velocidad de flujo másico, presión, densidad a la salida de la tobera, rendimiento de boquilla, energía cinética y la fuerza (variable tomada solo para la práctica No. 4).
- F300B: Propiedades termodinámicas estáticas del fluido en el punto de estrangulamiento y en el punto crítico, velocidad de flujo másico y la presión en las diferentes salidas de medición de la unidad de boquilla.
- F300G: Velocidad de flujo másico y la presión en cada punto de toma de presión, pérdidas mayores por fricción en la tubería y pérdidas menores por accesorios.

3.2 DISEÑO DE LAS PRÁCTICAS

3.2.1 Planteamiento y desarrollo de las prácticas Una vez identificadas las variables independientes y dependientes en cada una de las unidades se procedió a diseñar las pruebas o prácticas de laboratorio sobre flujo compresible, obteniendo así un total de seis prácticas divididas en 3 sets correspondientes a cada uno de los módulos como se muestra a continuación:

- **F300A. Flujo isentrópico en toberas**
 - A) Fenómeno de estrangulamiento o asfixia en una tobera
 - B) Efecto en las propiedades del fluido al variar la presión de entrada.

- C) Efecto en las propiedades del fluido al varía la presión de la cámara.
- D) Determinación de la velocidad de chorro y eficiencia de una boquilla.
- **F300B. Demostración del fenómeno de estrangulamiento y del efecto de la contrapresión en boquillas convergentes y convergentes-divergentes**
 - A) Fenómeno de asfixia.
 - B) Efecto de la contrapresión
- **F300G. Pérdidas de carga en tuberías por fricción y accesorios**
 - A) Pérdidas de carga en tuberías por fricción y accesorios.
 - B) Se diseñó un procedimiento para realizar cada práctica, estos se muestran detalladamente en los anexos C, D y E.

3.2.2 Herramienta Virtual Se plasmó en la herramienta virtual toda la información necesaria y precisa de los temas fundamentales de flujos compresibles, con la finalidad de realizar un reconocimiento de los equipos y conceptos por parte del estudiante para poder desarrollar la práctica.

El contenido fue dividido principalmente en los ítems generalidades, equipos, implementos, créditos y bibliografía. En las figuras 5, 6 y 7 se puede visualizar parte de la herramienta virtual. Dicha visualización se puede apreciar por completo en el Anexo F.

La herramienta virtual se va dejar a disposición de la comunidad en general, en el siguiente link de fácil acceso: <https://flujoscompresibles-da78c.firebaseio.com/>

Figura 5. Pantalla de inicio de la herramienta virtual.



Figura 6. Vista de los equipos

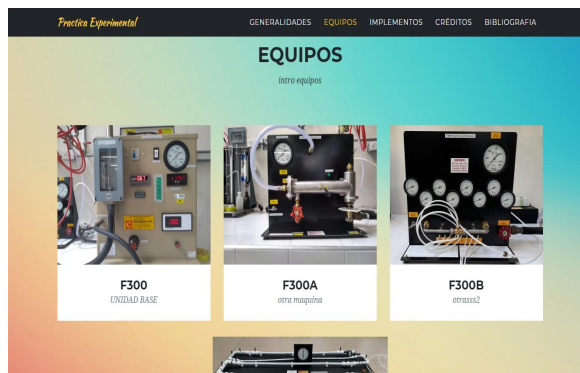


Figura 7. VISTA set de videos de la práctica.



Los programas seleccionados para la elaboración de la herramienta virtual y las características de cada uno son mostrados a continuación:

- **CCS:** Es el formato recomendado para las páginas escritas en formato HTML en base a los estándares de “Cascading Style Sheets” (hojas de estilo en cascada), publicado por el World Wide Web Consortium (W3C). El uso de este estándar nos ahorra tiempo, da consistencia y facilita en gran medida la escritura de páginas Web, haciéndolas más flexibles y ligeras, controlando su aspecto gráfico con mayor precisión y con mayor facilidad para la corrección de errores ⁹.
- **Bootstrap 4:** Es la herramienta de desarrollo de HTML, CCS, y JavaScript más popular en el mundo. Es una herramienta poderosa para cualquier tipo de aplicación Web que esté creando. Con el lanzamiento de la versión 4, Bootstrap es más relevante que nunca y ofrece un conjunto de componentes que son fáciles de usar ¹⁰.
- **Visual Studio Code:** Es un editor de código, cuyas características se asemejan a otros como Geany o el más reciente Brackets de Adobe. Soporta una cantidad considerable de lenguajes, ya sean propios de Microsoft como C#, F# y Visual Basic, o de otros como PHP, Python, Perl, SQL, shell scripting en Bash y Java, siendo este último el gran rival de .NET. También soporta Git y programación web con HTML, CSS y JavaScript, entre otros lenguajes ¹¹.
- **JavaScript:** Es un lenguaje compacto, y basado en objetos, diseñado para el desarrollo de aplicaciones cliente-servidor a través de internet. Fue creado para darle más dinamismo a las páginas Web. Antes con HTML lo único que se podía hacer era poner fotos, texto, sonido y alguna que otra cosa más. Con este lenguaje, le podemos dar más movimiento a una página Web y lograr una verdadera interactividad con los usuarios, algo que todos buscan en internet ¹².

⁹ DURANGO, A. *Diseño Web con CCS*. (2ª Edición).

¹⁰ LAMBERT, M. *Learning Bootstrap 4*. (Second ed). Birmingham, UK. Packt Publishing Ltd. 2016.

¹¹ EVANS, A. *Visual Studio Code 2016 for Students*. CreateSpace Independent Publishing Platform. 2016

¹² JAVASCRIPT. *Innovación y cualificación*, S.L. Málaga. España. 2001

- **GitLab:** Es un servicio web de control de versiones y desarrollo de software colaborativo basado en Git. Además de gestor de repositorios, el servicio ofrece también alojamiento de wikis y un sistema de seguimiento de errores, todo ello publicado bajo una Licencia de código abierto ¹³.

3.3 VALIDACIÓN DE LAS PRÁCTICAS

Las prácticas aquí propuestas serán desarrolladas por los estudiantes de Laboratorio de Procesos I de la Escuela de Ingeniería Química, por lo que los resultados que se obtienen en este trabajo deben ser confidenciales y éstos no serán reportados en este libro para evitar que la información sea utilizada como única herramienta en la discusión de resultados de los estudiantes y limitar su proceso de formación. Se entregará un documento con todos los resultados y sus respectivos análisis en la Secretaría de la Escuela de Ingeniería Química solo para uso de los docentes del Laboratorio de Procesos I.

A título de ejemplo, los resultados obtenidos en la siguiente práctica son mostrados a continuación:

- ✓ Equipo F300A. Prueba de rendimiento de una boquilla.
 - **Práctica 2:** Efecto en las propiedades del fluido al variar la presión de entrada
 - Boquilla No. 1 (Convergente)

En esta práctica se evalúa el efecto de la presión del receptor o contrapresión (es decir, la presión de la región de la descarga de la tobera, *back pressure* en inglés) sobre la velocidad de salida del fluido, la velocidad de flujo másico y la distribución de la presión a lo largo de la tobera.

¹³ AZAUSTRE, C. *Desarrollo web ágil con Angular.js*. (2ª Edición). CarlosAzaustre.es Books. Madrid, España. 2015

Por lo tanto se buscó analizar la variación de las razones de las propiedades termodinámicas estáticas del fluido (presión, temperatura y densidad) en el punto crítico, de estancamiento, y a la salida de la tobera, determinar el tipo de fluido compresible que se presenta en la tobera a las condiciones de operación seleccionadas y evaluar las variaciones que sufre el fluido a través de la tobera convergente seleccionada.

Las condiciones de operación a las cuales fue realizada la prueba fueron teniendo en cuenta como variable independiente la presión de entrada de la cámara. El rango de la presión de entrada estudiado fue de 50 a 500 kPa, evaluando esta variable de forma descendente. La presión de la cámara fue constante, 50 kPa, y el compresor se trabajó a una presión de 150 psi.

Los resultados experimentales obtenidos son mostrados en la Tabla 5. Todos los datos fueron tomados tres veces durante la ejecución de la práctica, y se hizo un promedio de los valores obtenidos en cada una para llevar a cabo los respectivos cálculos. Lo anterior es con el fin de determinar la repetibilidad de los resultados, donde se obtiene un promedio de desviación estándar de 0,03%.

Tabla 5. Datos para cálculos del efecto en las propiedades del fluido al variar la presión de entrada para la Boquilla 1.

TOMA DE DATOS 1 PARA BOQUILLA N° 1										
PRUEBA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión de entrada P_i [KPa]	500	450	400	350	300	250	200	150	100	50
Temperatura de entrada T_i [°C]	23,8	23,7	23,6	23,6	23,6	23,6	23,6	23,6	23,6	23,6
Presión de la cámara P_c [KPa]	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Temperatura de la cámara T_c [°C]	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4
Velocidad de flujo másico $m \times 10^{-3}$ [Kg/s]	4,6	4,2	3,8	3,4	3,1	2,7	2,3	1,8	1,5	0,0
TOMA DE DATOS 2 PARA BOQUILLA N° 1										
PRUEBA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión de entrada P_i [KPa]	500	450	400	350	300	250	200	150	100	50
Temperatura de entrada T_i [°C]	23,6	23,6	23,6	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5
Presión de la cámara P_c [KPa]	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Temperatura de la cámara T_c [°C]	23,4	23,3	23,3	23,3	23,3	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2
Velocidad de flujo másico $m \times 10^{-3}$ [Kg/s]	4,6	4,2	3,8	3,4	3,0	2,7	2,2	1,8	1,4	0,0
TOMA DE DATOS 3 PARA BOQUILLA N° 1										
PRUEBA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión de entrada P_i [KPa]	500	450	400	350	300	250	200	150	100	50
Temperatura de entrada T_i [°C]	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5
Presión de la cámara P_c [KPa]	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Temperatura de la cámara T_c [°C]	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2
Velocidad de flujo másico $m \times 10^{-3}$ [Kg/s]	4,6	4,2	3,8	3,4	3,0	2,7	2,3	1,8	1,4	0,0
Desviación Estándar Velocidad de flujo másico	0	0	5,439E-16	0	0,05773503	5,439E-16	0,05773503	0	0,05773503	0

Tabla 6. Promedio de datos para cálculos del efecto en las propiedades del fluido al variar la presión para la Boquilla 1.

BOQUILLA N° 1										
PRUEBA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión de entrada P_i [KPa]	500	450	400	350	300	250	200	150	100	50
Temperatura de entrada T_i [°C]	23,63	23,60	23,57	23,53	23,53	23,53	23,53	23,53	23,53	23,53
Presión de la cámara P_c [KPa]	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Temperatura de la cámara T_c [°C]	23,33	23,30	23,30	23,30	23,30	23,27	23,27	23,27	23,27	23,27
Velocidad de flujo másico $m \times 10^{-3}$ [Kg/s]	4,6	4,2	3,8	3,4	3,0	2,7	2,3	1,8	1,4	0,0
Desviación Estándar							0,03			

Tabla 7. Cálculos de las razones de las propiedades termodinámicas estáticas del fluido para la Boquilla 1.

Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presion Absoluta cámara P_c [Mpa]	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151
Temperatura Absoluta cámara T_c [K]	296	296	296	296	296	296	296	296	296	296
Densidad ρ [Kg/m ³]	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Velocidad V [m/s]	823,6	751,9	680,3	608,7	543,1	483,3	405,8	322,2	256,6	0,0
Número de Mach Ma	2,4	2,2	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	0,9	0,8	0,0
Presion de estancamiento P_o [Mpa]	2283,6	1642,5	1182,5	854,6	639,2	495,6	363,3	269,5	220,6	151,3
Temperatura de estancamiento T_o [K]	643,8	585,9	533,4	486,1	447,4	416,0	380,7	349,6	330,1	296,4
Densidad de estancamiento ρ_o [Kg/m ³]	12,4	9,8	7,7	6,1	5,0	4,1	3,3	2,7	2,3	1,8
Presion crítica P^* [Mpa]	1206,4	867,7	624,7	451,5	337,7	261,8	191,9	142,4	116,5	79,9
Temperatura crítica T^* [K]	536,5	488,3	444,5	405,1	372,9	346,7	317,2	291,3	275,1	247,0
Densidad crítica ρ^* [Kg/m ³]	7,8	6,2	4,9	3,9	3,2	2,6	2,1	1,7	1,5	1,1
Número de Mach crítico Ma^*	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,0	0,8	0,0
P/P_o	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,6	0,7	1,0
T/T_o	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0
D/D_o	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,7	0,8	1,0
Presion de salida P_s [Mpa]	151,9	151,6	151,4	151,6	151,2	151,7	151,4	151,4	151,3	151,3
Temperatura de salida T_s [K]	296,6	296,5	296,5	296,5	296,4	296,4	296,4	296,4	296,3	296,4
Densidad de salida ρ_s [Kg/m ³]	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
P_s/P_o	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,6	0,7	1,0

En la Tabla 7 se observa que la presión de entrada es igual a la presión de salida esto debido a que el flujo es isentrópico y permanece uniforme a lo largo de la tobera. Las propiedades de estancamiento y las propiedades críticas disminuyen, a medida que también lo hace el número de Mach, esto debido a que está relacionado proporcionalmente con la velocidad de flujo másico. En cuanto a las variables respuesta, se tiene flujos supersónicos en el rango de presión entre 500 a 200 kPa, luego sónico para presiones de 150 kPa, y finalmente, flujos subsónicos a presiones de 100 kPa. Para presiones menores de 100 kPa se tiene un número de Mach igual a 0,0 lo que significa que en ese punto, es nula la relación entre la velocidad local del flujo y la velocidad del sonido dentro del fluido. Esta variación en la velocidad del flujo se debe al rango de diferencia entre la presión de entrada y la presión de la cámara.

En el manual del equipo suministrado por la empresa P.A HILTON LIMITED se reportan los resultados para esta práctica, los cuales son presentados en la Tabla 8. En el manual se menciona esta práctica como “Flujo másico en contrapresión constante” en donde los resultados son reportados para condiciones de presión de entrada de hasta 900 kPa, la cual es mayor a las condiciones usadas en este trabajo

debido a que el compresor utilizado por el fabricante es de mayor capacidad al que se dispone en el Laboratorio de Procesos.

Se observa también que los valores obtenidos en los resultados de las prácticas, son muy parecidos a los del fabricante, por lo que se puede argumentar que los datos presentados en este trabajo son confiables ya que las desviaciones con respecto a los datos reportados en el manual son muy bajos, en este caso con un error relativo menor al 1,1%.

Tabla 8. Datos del manual de fabricante para el flujo másico en contrapresión constante para la Boquilla 1.

BOQUILLA N° 1										
PRUEBA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión de entrada P_i [KPa]	900	800	700	600	500	400	300	200	100	0
Temperatura de entrada T_i [°C]	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	18,50
Presión de la cámara P_c [KPa]	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Temperatura de la cámara T_c [°C]	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50
Velocidad de flujo másico $m \times 10^{-3}$ [Kg/s]	7,60	6,80	6,10	5,35	4,55	3,73	3,00	2,20	1,25	0,00

Se realizaron todas las pruebas experimentales de los sets de prácticas de cada uno de los equipos, teniendo en cuenta, los parámetros fundamentales o variables más importantes, como la presión y velocidad de flujo másico (ver en el Anexo D, E y F los procedimientos de cada práctica). Se hizo la toma de datos y un análisis de los resultados obtenidos en cada procedimiento, los cuales son reportados en el documento anexo entregado a la Secretaria de la Escuela de Ingeniería Química.

Como una ayuda para el desarrollo de las prácticas por parte de los estudiantes, se diseñaron unas tablas para la toma de datos de las prácticas propuestas en este trabajo, las cuales se muestran en el Anexo G.

4. CONCLUSIONES

Para el desarrollo de las prácticas se realizó el reconocimiento de la unidad base F300, así como de los módulos F300A, F300B y F300G. A partir de este reconocimiento se llevó a cabo un conjunto de pruebas experimentales, de las cuales se logró la recopilación de información cualitativa y cuantitativa logrando de esta manera la elaboración y ejecución de varios manuales guía, correspondientes a las prácticas experimentales diseñadas para cada módulo, con las cuales se pretende reforzar las competencias adquiridas por el estudiante en el aula de clases.

Se llevó a cabo el diseño de la herramienta virtual como apoyo a la ejecución de las prácticas, en la cual se añadió información sobre conceptos relevantes a la hora de entender el comportamiento de los flujos compresibles. La herramienta cuenta con información que abarca desde las partes detalladas de los equipos, hasta el funcionamiento de los mismos. Para hacer la herramienta más amigable a la vista del usuario se añadieron diseños atractivos a la parte estructural por medio de HTML.

Se verificó mediante un análisis de repetibilidad que los procedimientos elaborados y los resultados obtenidos fueron veraces de acuerdo a los resultados comparados con el manual, obteniéndose una desviación máxima de 0,6% a las condiciones de operación trabajadas.

5. RECOMENDACIONES

- Verificar y garantizar la visualización de la herramienta virtual por parte de los estudiantes.
- Usar siempre los implementos de seguridad personal ya que se estará trabajando con aire a alta presión.
- Proponer la realización de pruebas experimentales con los equipos F300D y F300E presentes en el Laboratorio de procesos.

BIBLIOGRAFÍA

AZAUSTRE, C. Desarrollo web ágil con Angular.js. (2a Edición). CarlosAzaustre.es Books. Madrid, España. 2015.

CENGEL, Y.A., CIMBALA, J.M., & OLGUÍN, V.C. Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones, México DF, México: McGraw-Hill, 2006.

CRANE C. Flow of Fluids Through Valves, Fittings, and Pipe. Tech Manual 410. New York: Crane Co, 1991.

DARBY, R., & CHHABRA, R.P. Chemical Engineering Fluid Mechanics. (Second ed). New York, EE. UU: Marcel Decker, Inc, 2001.

DURANGO, A. Diseño Web con CCS. (2a Edición).

EVANS, A. Visual Studio Code 2016 for Students. CreateSpace Independent Publishing Platform. 2016.

HOLLAND FA, R, Bragg. Fluid Flow for Chemical Engineers, 2nd Ed., London, Edward Arnold, 1995.

JAVASCRIPT. Innovación y cualificación, S.L. Málaga. España. 2001.

LAMBERT, M. Learning Bootstrap 4. (Second ed). Birmingham, UK. Packt Publishing Ltd. 2016.

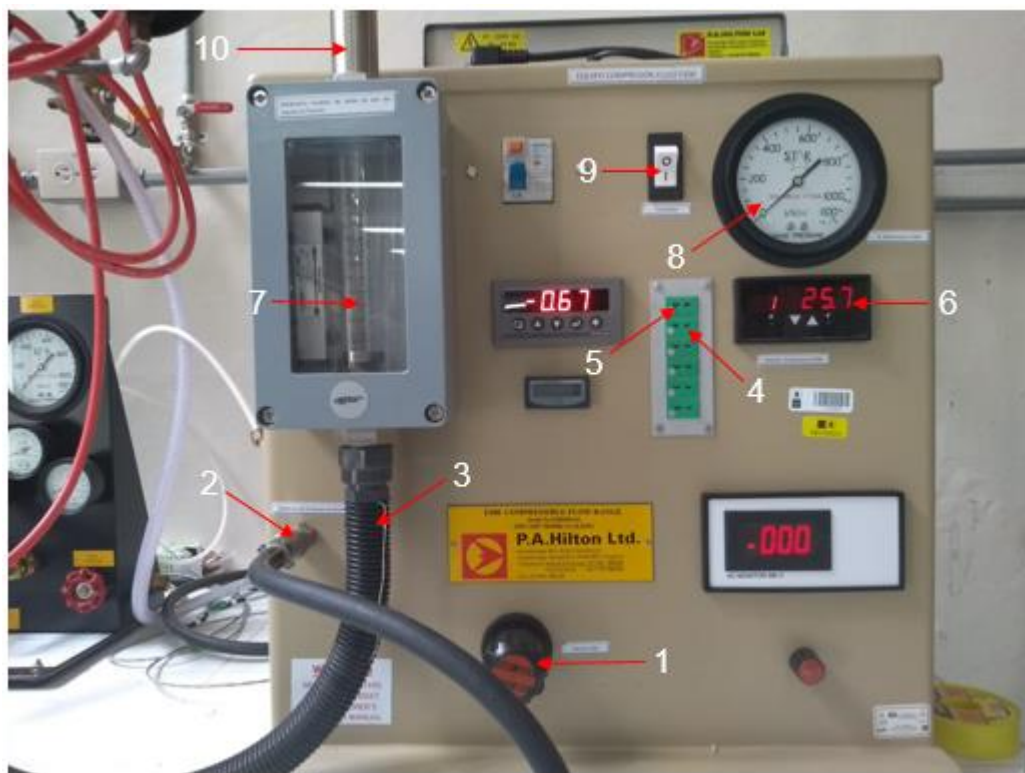
SHAPIRO AH. The Dynamics and Themodynamics of Compressible Fluid Flow, Vol. I. New York: Ronald Press, 1953.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA. Cátedra de mecánica de los fluidos. Flujo compresible. Córdoba, Argentina, 2011.

ANEXOS

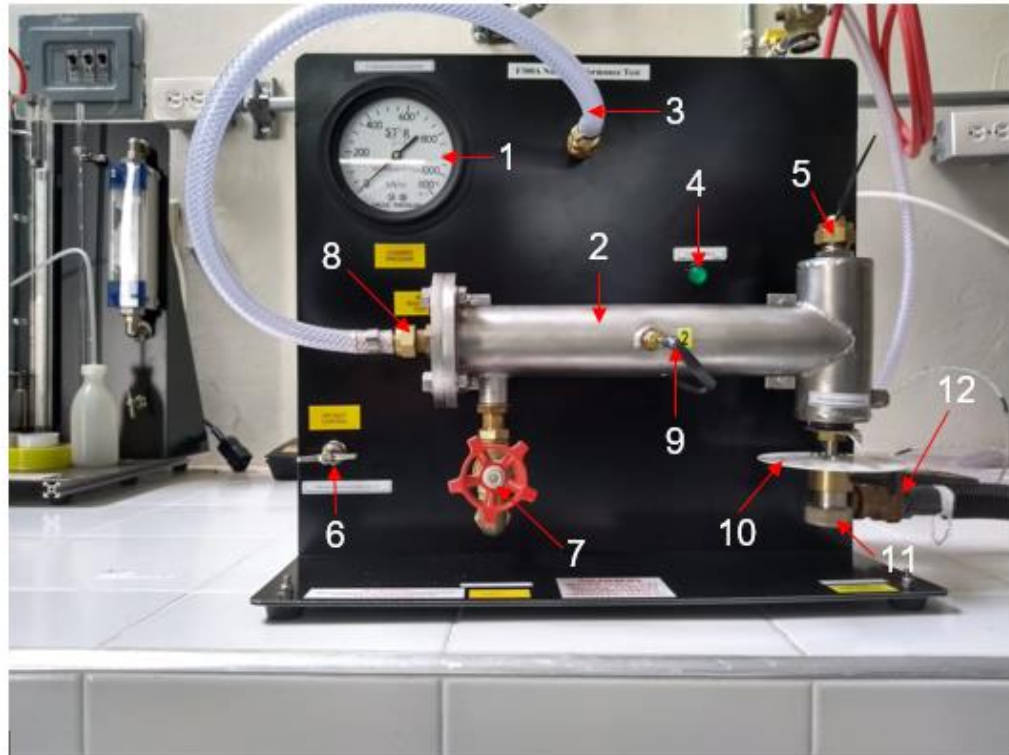
ANEXO A DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS

- **DESCRIPCIÓN EQUIPO F300**



- 1:** Rotámetro
- 2:** Válvula salida de aire a los equipos
- 3:** Manguera de flujo de aire del quipo en función
- 4:** T_2 Temperatura de salida del aire del equipo en función
- 5:** T_1 Temperatura de entrada del aire al equipo en función
- 6:** Tablero de control de Temperatura
- 7:** Medidor de la velocidad de flujo de aire
- 8:** P_i Manómetro presión unidad base F300
- 9:** Encendido
- 10:** Descarga de aire al ambiente

- **DESCRIPCIÓN EQUIPO F300A**



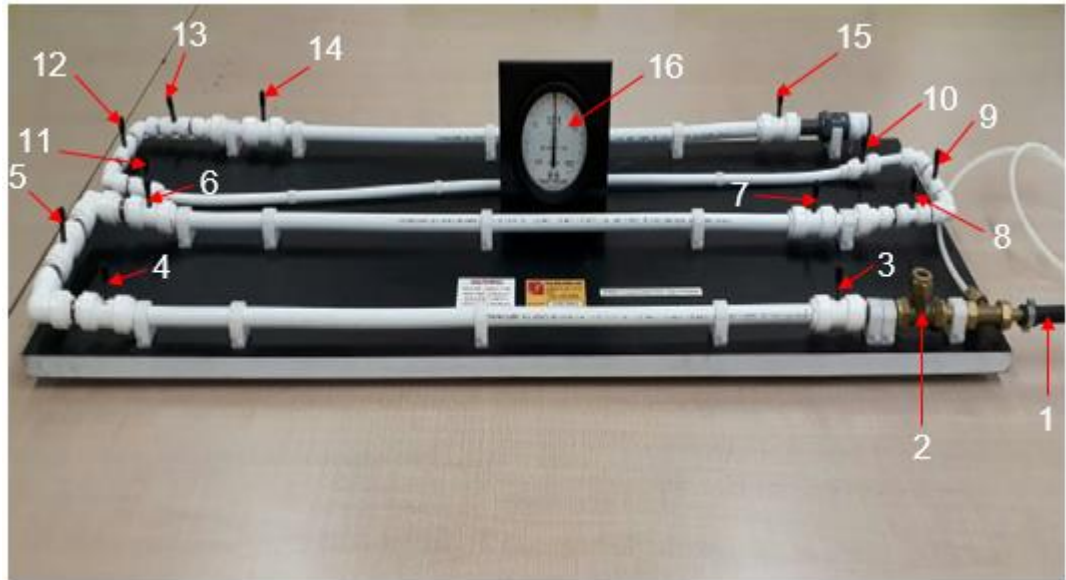
- 1: P_i Presión de la cámara
- 2: Cámara
- 3: Manguera de flujo de aire
- 4: Luz de contacto
- 5: Unidad de configuración de prueba de rendimiento de la tobera.
- 6: Válvula mariposa
- 7: Válvula de contrapresión
- 8: Unidad de configuración de prueba de reacción de chorro
- 9: Termocupla (Temperatura de salida de la cámara)
- 10: Disco micrométrico o Dial
- 11: Tornillo micrométrico
- 12: Descarga de flujo de aire

- **DESCRIPCIÓN EQUIPO F300B**



- 1:** Válvula contrapresión
- 2:** Boquilla en función
- 3:** Válvula mariposa
- 4:** Manguera de flujo de aire del equipo en función
- 5:** Manómetro de presión 1
- 6:** Manómetro de presión 2
- 7:** Manómetro de presión 3
- 8:** Manómetro de presión 4
- 9:** Manómetro de presión 5
- 10:** Manómetro de presión 6
- 11:** Manómetro de presión 7
- 12:** Manómetro de presión 8
- 13:** Manómetro de presión F300B

- **DESCRIPCIÓN EQUIPO F300G**



- 1:** Válvula de suministro de aire
- 2:** Eyector
- 3:** Toma de presión No. 1
- 4:** Toma de presión No. 2
- 5:** Toma de presión No. 3
- 6:** Toma de presión No. 4
- 7:** Toma de presión No. 5
- 8:** Toma de presión No. 6
- 9:** Toma de presión No. 7
- 10:** Toma de presión No. 8
- 11:** Toma de presión No. 9
- 12:** Toma de presión No. 10
- 13:** Toma de presión No. 11
- 14:** Toma de presión No. 12
- 15:** Toma de presión No. 13
- 16:** Manómetro de presión F300G

ANEXO B PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DEL VOLADIZO Y PUESTA EN CERO DEL MICRÓMETRO F300A

- Encender el compresor y esperar aproximadamente 5 minutos a que se estabilice. Tener en cuenta el procedimiento de encendido del compresor.
- Abrir lentamente las válvulas de paso del flujo de aire por la línea de tuberías de laboratorio.
- Encender la unidad base F300.
- Colocar el micrómetro o dial en cero.
- Proceder a calibrar, usando las pesas o vehículos del set de herramientas del equipo.
- Colocar la varilla de soporte de 0,5 Newton y verificar que la luz de contacto encienda.
- Girar el micrómetro hacia la derecha para encontrar el respectivo valor de contacto con el dial. Realizar esta acción hasta que la luz de contacto parpadee.
- Registrar el peso del vehículo (en Newton) y el valor de la lectura del dial en el respectivo formato.
- Colocar la siguiente pesa de 0,5 Newton, para un peso total de 1 Newton, girar hacia la derecha y buscar el respectivo valor de contacto.
- Ir aumentando en incrementos de 0,5 Newton, sucesivamente, hasta que se apliquen 4 Newton de fuerza y hacer la respectiva toma de datos en cada punto.
- Realizar finalmente un gráfico de calibración de la lectura del dial vs la fuerza.

ANEXO C FLUJO ISENTRÓPICO EN TOBERAS

INTRODUCCIÓN

Las toberas y difusores son dispositivos de regulación del flujo que se encuentran en muchas aplicaciones de ingeniería, como en turbinas de gas y de vapor, sistemas de propulsión de aviones, y en sopladores industriales de diferente índole. Las toberas pueden ser clasificadas como convergentes o convergentes-divergentes.

Una tobera incrementa la velocidad de un fluido a expensas de la presión. Por el contrario, un difusor incrementa la presión de un fluido al reducir la velocidad de flujo. En otras palabras, las toberas y los difusores llevan a cabo tareas opuestas.

En esta práctica se evalúa el efecto de la presión del receptor o contrapresión (es decir, la presión de la región de la descarga de la tobera, *back pressure* en inglés) sobre la velocidad de salida del fluido, la velocidad de flujo másico y la distribución de la presión a lo largo de la tobera.

COMPETENCIAS GENERALES.

Aplicar estrategias de aprendizaje autónomo en el área de conocimiento de fluidos compresibles que le permitan al estudiante tomar decisiones oportunas y pertinentes en el ámbito académico y profesional

COMPETENCIAS ESPECÍFICAS.

- Aplicar los conocimientos básicos de la mecánica de fluidos relacionados con flujo compresible.

- Demostrar la capacidad de análisis e interpretación de las variables y los fenómenos presentes en una tobera convergente o convergente-divergente.
- Adquirir la capacidad para la resolución de problemas de forma efectiva en el área de fluidos compresibles.

OBJETIVOS

- Analizar la variación de las razones de las propiedades termodinámicas estáticas del fluido (presión, temperatura y densidad) en el punto crítico, de estancamiento, y a la salida de la tobera.
- Determinar el tipo de fluido compresible que se presenta en la tobera a las condiciones de operación seleccionadas.
- Evaluar las variaciones que sufre el fluido a través de la tobera convergente o convergente-divergente seleccionada.

MARCO TEÓRICO

Toberas convergentes y convergentes-divergentes

Durante la circulación de un fluido a través de dispositivos tales como toberas, difusores y los pasajes entre los álabes de las turbinas, las características numéricas de flujo varían principalmente en la dirección del flujo y éste puede aproximarse con buena exactitud a un flujo isentrópico unidimensional [1].

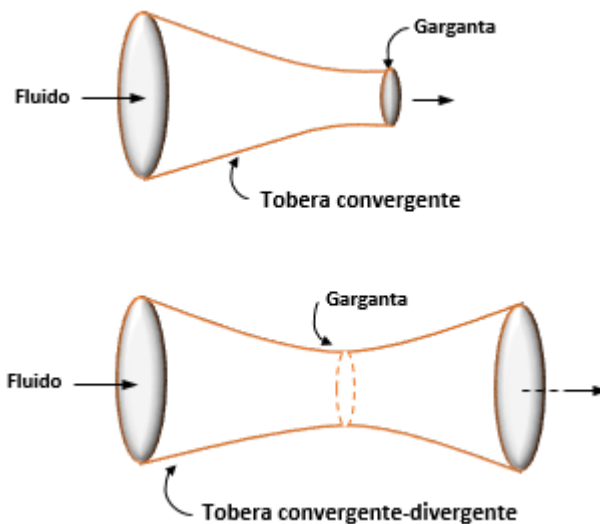


Figura C1. Tobera convergente y convergente-divergente. Fuente: Autores

Cuando se piensa en toberas aceleradoras, por lo general se piensa en ductos de flujo cuya área de sección transversal disminuye en la dirección del flujo. Sin embargo, la mayor velocidad a la cual un fluido puede acelerarse en una tobera convergente se limita a la velocidad sónica ($Ma = 1$), la cual ocurre en la salida (garganta) de la tobera. La aceleración del fluido a velocidades supersónicas ($Ma > 1$) puede lograrse solamente al añadir una tobera divergente a la tobera aceleradora subsónica en su garganta. La combinación resultante es una tobera convergente-divergente, la cual es un dispositivo común en aviones supersónicos y cohetes de propulsión [1].

Fenómeno de asfixia o estrangulamiento

El fenómeno de estrangulamiento se presenta cuando un flujo en un conducto convergente alcanza la velocidad sónica ($Ma = 1$) en la sección de área transversal mínima, comúnmente llamada garganta. Sin embargo, éste fenómeno también puede explicarse por medio del perfil de presiones generado a lo largo del proceso, tal como se observa en el siguiente esquema:

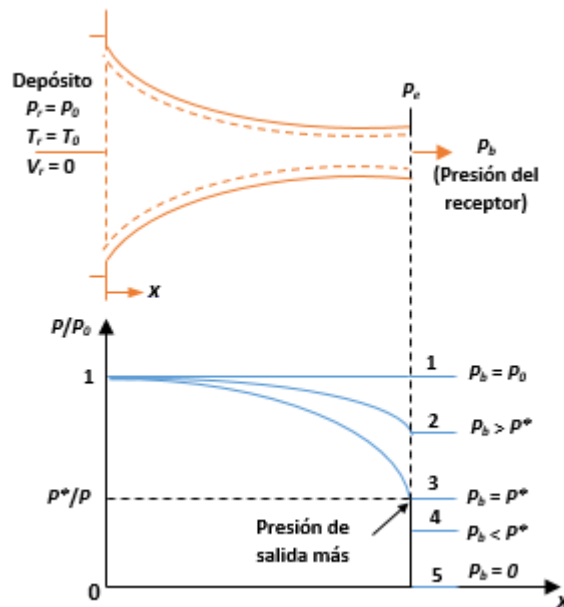


Figura C2. Toberas convergentes. Fuente: Autores

Cuando la presión del receptor P_b , o presión de salida de la tobera P_s , se reduce a P_3 (es decir P^* , la cual es la presión necesaria para aumentar la velocidad del fluido hasta alcanzar la velocidad del sonido en la salida de la garganta de la tobera), el flujo de masa alcanza un máximo valor y se dice que el flujo está bloqueado o estrangulado.

Relaciones de propiedades de flujo isentrópico de gas ideal

Las propiedades estáticas y las de estancamiento de un gas ideal pueden ser relacionadas en función de la razón de los calores específicos k y del número de Mach (Ma). Estas relaciones son desarrolladas considerando que el flujo es isentrópico y que el gas tiene calores específicos constantes. Las propiedades del fluido a lo largo de un proceso de expansión isentrópica (propiedades estáticas). Pueden relacionarse con sus propiedades de estancamiento o reposo, denotadas por un subíndice 0, por medio de las siguientes expresiones:

Presión:

$$\frac{P_0}{P} = \left(1 + \frac{k-1}{2} Ma^2\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad \text{Ecuación C1}$$

Temperatura:

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{k-1}{2} Ma^2 \quad \text{Ecuación C2}$$

Densidad:

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left(1 + \frac{k-1}{2} Ma^2\right)^{\frac{1}{k-1}} \quad \text{Ecuación C3}$$

Propiedades críticas del fluido

Las propiedades del fluido en una región donde el número de Mach es unitario son llamadas propiedades críticas, y las razones expresadas por las ecuaciones D4 a la D6 se llaman razones críticas. En la literatura, los valores críticos cuando se habla de flujo compresible son comúnmente representados por un asterisco (*) como superíndice. Si se considera un valor de Ma igual a uno, entonces las ecuaciones D1 a D3 pueden ser transformadas a las ecuaciones mostradas a continuación:

$$\frac{T^*}{T_0} = \frac{2}{k+1} \quad \text{Ecuación C4}$$

$$\frac{P^*}{P_0} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad \text{Ecuación C5}$$

$$\frac{\rho^*}{\rho_0} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \quad \text{Ecuación C6}$$

Estas ecuaciones se evalúan para varios valores de k y se indican en la **Tabla D1**. Las propiedades críticas de flujo compresible no deben confundirse con las propiedades termodinámicas de las sustancias en el *punto crítico* (tales como la temperatura crítica T_c y la presión crítica P_c).

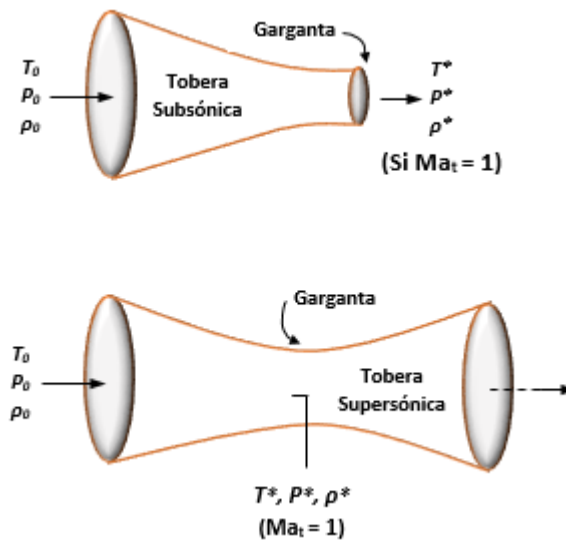


Figura C3. Tobera Subsónica y Supersónica. Fuente: Autores

	Vapor sobrecalentado $k = 1.3$	Productos de combustión $k = 1.33$	Aire $k = 1.4$	Gases monoatómicos $k = 1.667$
$\frac{P^*}{P_o}$	0,5457	0,5404	0,5283	0,4871
$\frac{T^*}{T_o}$	0,8696	0,8584	0,8333	0,7499
$\frac{\rho^*}{\rho_o}$	0,6276	0,6295	0,634	0,6495

Tabla C1. Razones de presión, temperatura y densidad crítica para el flujo isentrópico de algunos gases ideales. (Cengel & Cimbala, 2012).

Mach crítico

Otro parámetro que se utiliza a veces en el análisis de flujo isentrópico unidimensional de gas ideal es Ma^* , el cual es la razón de la velocidad local a la velocidad del sonido en la garganta:

$$Ma^* = \frac{V}{c^*}$$

Ecuación C7

El Mach crítico también puede expresarse como:

$$Ma^* = \frac{V}{c} \frac{c}{c^*} = \frac{Ma}{c^*} = \frac{Ma \sqrt{kRT}}{\sqrt{kRT^*}} = Ma \sqrt{\frac{T}{T^*}} \quad \text{Ecuación C8}$$

donde Ma es el número de Mach local, T es la temperatura local y T^* es la temperatura crítica. Al expresar T de la ecuación (D8) y al sustituir se obtiene:

$$Ma^* = Ma \sqrt{\frac{k+1}{2+(k-1)Ma^*}} \quad \text{Ecuación C9}$$

Velocidad de chorro

El chorro de aire que sale de la tobera es recibido por la cabeza de impacto montada en el extremo del voladizo. Al salir de la cabeza de impacto el aire fluye en una dirección perpendicular a la velocidad del chorro como se muestra en la siguiente figura:

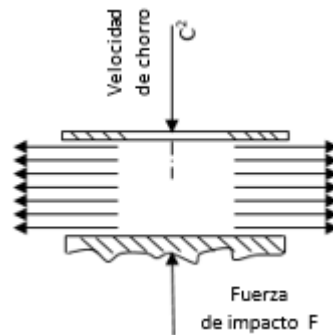


Figura C4. Velocidad de chorro del aire en una boquilla. Fuente: Manual de procedimiento equipo F300A. Fuente: Autores

A partir de la siguiente ecuación se calcula la velocidad de chorro C_o en función de la fuerza de impacto y el flujo másico:

$$C_o = \frac{\text{fuerza de impacto } (F)}{\text{flujo másico de aire } (\dot{m})} \left[\frac{m}{s} \right] \quad \text{Ecuación C10}$$

La fuerza de impacto se calcula con la gráfica de calibración del equipo F300A, haciendo uso de la regresión lineal.

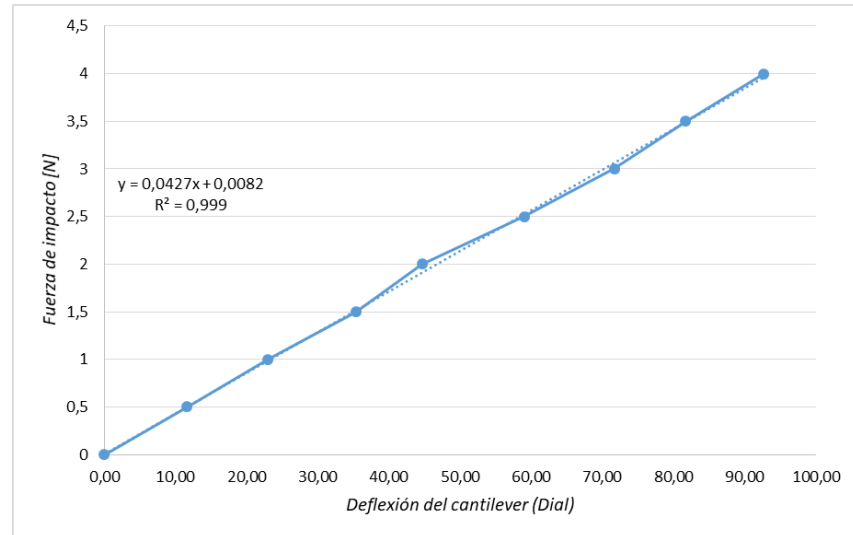


Figura C5. Calibración del micrómetro del equipo F300A.

Energía cinética específica

Capacidad de un cuerpo dado para producir efectos físicos externos a ese cuerpo a partir de su movimiento [2].

$$k_e = \frac{c_o^2}{2}$$

Ecuación C11

Cambio de entalpía isentrópico

El estado del flujo de fluido que entra a la tobera, así como su presión a la salida, están prefijados. Se ignora la transferencia de calor entre la tobera y el medio, así como las variaciones de energía cinética y potencial. Bajo estas hipótesis, los balances de masa y energía para el funcionamiento en situación estacionaria pueden combinarse para dar el trabajo realizado ($\dot{w}$) por cada una de las unidades de masa ($\dot{m}$) que fluyen a través de la tobera [3].

$$\frac{\dot{W}}{m} = h_1 - h_2 \quad \text{Ecuación C12}$$

Que puede ser expresada también como:

$$h_i - h_o = \frac{\gamma}{\gamma-1} RT_i \left[1 - \left(\frac{P_o}{P_i} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \quad \text{Ecuación C13}$$

donde $h_i - h_o$ equivale Δh , el cual es el cambio de entalpía isentrópico.

Eficiencia de una tobera

Relación que existe entre la energía cinética específica y el cambio de entalpía isentrópica.

$$n = \frac{k_e}{\Delta h} \quad \text{Ecuación C14}$$

Datos de las toberas disponibles

Boquilla	1	2	3	4	5
Diámetro [mm]	2	2,4	2,8	3,2	4
Diámetro [m]	0,002	0,0024	0,0028	0,0032	0,004
Área [mm ²]	3,1416	4,5239	6,1575	8,0425	12,5664
Área [m ²]	3,14E-06	4,52E-06	6,16E-06	8,04E-06	1,26E-05

Tabla C2. Datos de las boquillas. Fuente: Manual operativo F300A.

TEMAS DE CONSULTA

- Conceptos básicos de flujo compresible, flujo en toberas convergentes y convergentes-divergentes

- Clasificación de los fluidos compresibles mediante el número de Mach, propiedades de estrangulamiento y propiedades críticas del fluido.
- Velocidad de chorro de un fluido.

PROCEDIMIENTO

Calibración del voladizo y puesta en cero del micrómetro F300A

- Encender el compresor y esperar aproximadamente 5 minutos a que se estabilice. Tener en cuenta el procedimiento de encendido del compresor.
- Abrir lentamente las válvulas de paso del flujo de aire por la línea de tuberías de laboratorio.
- Encender la unidad base F300.
- Colocar el micrómetro o dial en cero.
- Proceder a calibrar, usando las pesas o vehículos del set de herramientas del equipo.
- Colocar la varilla de soporte de 0,5 Newton y verificar que la luz de contacto encienda.
- Girar el micrómetro hacia la derecha para encontrar el respectivo valor de contacto con el dial. Realizar esta acción hasta que la luz de contacto parpadee.
- Registrar el peso del vehículo (en Newton) y el valor de la lectura del dial en el respectivo formato.
- Colocar la siguiente pesa de 0,5 Newton, para un peso total de 1 Newton, girar hacia la derecha y buscar el respectivo valor de contacto.
- Ir aumentando en incrementos de 0,5 Newton, sucesivamente, hasta que se apliquen 4 Newton de fuerza y hacer la respectiva toma de datos en cada punto.
- Realizar finalmente un gráfico de calibración de la lectura del dial vs la fuerza.

Práctica 1. Fenómeno de estrangulamiento o asfixia en una tobera

- Encender el compresor y esperar aproximadamente 5 minutos a que se estabilice. Tener en cuenta el procedimiento de encendido del compresor.

- Abrir lentamente las válvulas de paso del flujo de aire por la línea de tuberías de laboratorio.
- Encender la unidad base F300.
- Asegurar que el seguro del mando de presión en la unidad base F300 se encuentre inhabilitado, accionando la perilla hacia afuera.
- Cerrar la válvula de entrada de aire (Válvula mariposa).
- Verificar y/o instalar la boquilla convergente y posteriormente la boquilla convergente-divergente, seleccionada previamente por el docente, en la unidad de configuración de prueba de rendimiento de la tobera. Las opciones de toberas que pueden ser usados son:
 - Tobera 1: convergente
 - Tobera 2, 3, 4, 5: convergente-divergente.
- Seleccionar una presión de entrada, entre 400 y 500 KPa, ajustando el regulador de presión P_i en el F300 y la válvula de mariposa P_0 de entrada del F300A y mantenerla constante durante toda la práctica.
- Cerrar la válvula de contrapresión y abrir la válvula de mariposa observando el aumento en los indicadores de presión del sistema para que $P_0 = P_i$. Verificar que la velocidad de flujo másico sea cero.
- Abrir gradualmente la válvula de contrapresión y disminuir 50 KPa a la presión en la cámara (presión de salida).
- Reducir la presión de salida en rangos de 50 KPa, mientras la presión de entrada se mantiene en el valor seleccionado (presión constante).
- Registrar el valor de cada variable ya mencionada. La presión de entrada se reducirá hasta que sea igual a la presión de salida ($P_0 = 0$).
- Activar el seguro en el mando de presión y cerrar las válvulas de paso de flujo de aire en la línea de tuberías de laboratorio.
- Apagar el compresor.

Práctica 2: Efecto en las propiedades del fluido al variar la presión de entrada

- Encender el compresor y esperar aproximadamente 5 minutos a que se estabilice. Tener en cuenta el procedimiento de encendido del compresor.
- Abrir lentamente las válvulas de paso del flujo de aire por la línea de tuberías de laboratorio.
- Encender la unidad base F300.
- Asegurar que el seguro del mando de presión en la unidad base F300 se encuentre inhabilitado, accionando la perilla hacia afuera.
- Cerrar la válvula de entrada de aire (Válvula mariposa).
- Verificar y/o instalar la tobera convergente y posteriormente la tobera convergente-divergente, de acuerdo a las indicaciones del docente, en la unidad de configuración de prueba de rendimiento de la tobera.
- Seleccionar una presión de entrada, entre 400 y 500 KPa, ajustando el regulador de presión P_i en el F300 y la válvula de mariposa P_0 de entrada del F300A. Cerrar la válvula de contrapresión, y llevar la presión de la cámara (equipo F300A), a aproximadamente 50 KPa.
- Registrar el valor de la presión de salida, la velocidad de flujo másico de aire y las temperaturas de entrada.
- Reducir la presión de entrada en rangos de 50 KPa, mientras la presión de la cámara se mantiene en el valor seleccionado (presión constante). Registre el valor de cada variable ya mencionada. La presión de entrada se reducirá hasta que sea igual a la presión de salida ($P_i = P_0$).
- Activar el seguro en el mando de presión y cerrar las válvulas de paso de flujo de aire en la línea de tuberías de laboratorio.
- Apagar el compresor.

Práctica 3: Efecto en las propiedades del fluido al variar la presión de la cámara

- Encender el compresor y esperar aproximadamente 5 minutos a que se estabilice. Tener en cuenta el procedimiento de encendido del compresor.

- Abrir lentamente las válvulas de paso del flujo de aire por la línea de tuberías de laboratorio.
- Encender la unidad base F300.
- Asegurar que el seguro del mando de presión en la unidad base F300 se encuentre inhabilitado, accionando la perilla hacia afuera.
- Cerrar la válvula de entrada de aire (Válvula mariposa).
- Verificar y/o instalar la tobera convergente y posteriormente la tobera convergente-divergente, la cuál será indicada previamente por el docente, en la unidad de configuración de prueba de rendimiento de la tobera.
- Seleccionar una presión de entrada, entre 400 y 500 KPa, ajustando el regulador de presión P_i en el F300 y la válvula de mariposa P_0 de entrada del F300A y mantenerla constante durante toda la práctica.
- Abrir totalmente la válvula de contrapresión y abrir la válvula de mariposa, observando el aumento y disminución en los indicadores de presión del sistema P_0 y P_i , respectivamente. Verificar que la velocidad de flujo másico de aire sea diferente de cero.
- Cerrar gradualmente la válvula de contrapresión y aumentar 50 KPa a la presión en la cámara (presión de salida).
- Registrar el valor de la presión de salida, la velocidad de flujo másico de aire y las temperaturas de entrada.
- Aumentar la presión de salida en rangos de 50 KPa, mientras la presión de entrada se mantiene en el valor seleccionado (presión constante) y registrar el valor de cada variable ya mencionada. La presión de entrada se reducirá hasta que sea igual a la presión de salida ($P_0 = P_i$).
- Activar el seguro en el mando de presión y cerrar las válvulas de paso de flujo de aire en la línea de tuberías de laboratorio.
- Apagar el compresor.

Práctica 4: Determinación de la velocidad de chorro y eficiencia de boquilla

- Encender el compresor y esperar aproximadamente 5 minutos a que se estabilice. Tener en cuenta el procedimiento de encendido del compresor.
- Abrir lentamente las válvulas de paso del flujo de aire por la línea de tuberías de laboratorio.
- Encender la unidad base F300.
- Asegurar que el seguro del mando de presión en la unidad base F300 se encuentre inhabilitado, accionando la perilla hacia afuera.
- Cerrar la válvula de entrada de aire (Válvula mariposa).
- Verificar y/o instalar la tobera convergente y posteriormente la tobera convergente-divergente, seleccionada previamente por el docente, en la unidad de configuración de prueba de reacción de chorro (F330A) y asegurar que la cabeza de impacto esté instalada correctamente (remitirse al video en la plataforma).
- Asegurar que el disco del micrómetro se encuentre limpio y puesto en cero.
- Seleccionar una presión de entrada, entre 400 y 500 KPa, ajustando el regulador de presión P_i en el F300 y la válvula de mariposa P_0 de entrada del F300 A y mantenerla constante durante toda la práctica.
- Abrir completamente la válvula de contrapresión.
- Ajustar, con mucho cuidado, el tornillo micrométrico hasta que el indicador se ilumine, indicando contacto con la viga.
- Registrar el valor de la presión de entrada, contrapresión (en este caso 0 KPa), la lectura del micrómetro y la velocidad de flujo másico de aire observado.
- Cerrar la válvula de contrapresión rápidamente, y cambiar la presión, del equipo F300A, a aproximadamente 50 KPa.
- Ajustar el tornillo micrométrico y registrar su lectura, los valores de presión de entrada, y de contrapresión.
- Aumentar la presión progresivamente en 50 KPa hasta que $P_0 = P_i$; y registrar las diferentes lecturas del equipo para cada punto.

- Activar el seguro en el mando de presión y cerrar las válvulas de paso de flujo de aire en la línea de tuberías de laboratorio.
- Apagar el compresor.

RESULTADOS

En las prácticas 1, 2 y 3

- Calcular, analizar y comparar los valores de la presión, temperatura y densidad del aire tanto en el punto de estrangulamiento como en el punto crítico.
- Determinar el número de Mach y clasificar el tipo de flujo compresible para cada valor de presión.
- Calcular la presión, temperatura y densidad del aire a la salida de la tobera.

En la práctica 5

- Calcular, analizar y comparar los valores de la presión, temperatura y densidad del aire tanto en el punto de estrangulamiento como en el punto crítico.
- Determinar el número de Mach y clasificar el tipo de flujo compresible para cada valor de presión.
- Calcular la presión, temperatura y densidad del aire a la salida de la tobera.
- Calcular la fuerza de impacto y velocidad de chorro del fluido.
- Determinar la energía cinética específica y el cambio de entalpía isentrópica.
- Calcular la eficiencia de la tobera.

TABLA PARA TOMA DE DATOS

La siguiente tabla puede ser usada para las anotaciones de las prácticas 1, 2 y 3.

BOQUILLA N°										
PRUEBA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión de entrada P_i [KPa]										
Temperatura de entrada T_i [°C]										
Presión de la cámara P_c [KPa]										
Temperatura de la cámara T_c [°C]										
Velocidad de flujo másico $\dot{m} \times 10^{-3}$ [Kg/s]										

La siguiente tabla puede ser usada para las anotaciones de la práctica 4.

BOQUILLA N°										
PRUEBA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión de entrada P_i [KPa]										
Temperatura de entrada T_i [°C]										
Presión de la cámara P_c [KPa]										
Temperatura de la cámara T_c [°C]										
Deflexión del cantilever										
Velocidad de flujo másico $m \times 10^{-3}$ [Kg/s]										

REFERENCIAS

- [1] Cengel, Y.A., Cimbala, J.M., & Olguín, V.C. (2006). *Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones*, México DF, México: McGraw-Hill.
- [2] Kurt, C & Rolle. (2006). *Termodinámica*. Sexta ed. México DF, México: Pearson Education.
- [3] Moran, M., & Shapiro, H. *Fundamentos de termodinámica técnica*. 2ª ed. (2005). Barcelona, España: Reverté, S.A.

ANEXO D. DEMOSTRACIÓN DEL FENÓMENO DE ESTRANGULAMIENTO Y DEL EFECTO DE LA CONTRAPRESIÓN EN BOQUILLAS CONVERGENTES Y CONVERGENTES-DIVERGENTES.

INTRODUCCION

El flujo isentrópico a través de boquillas convergentes o convergentes-divergentes tiene un amplio rango de aplicaciones en la industria, principalmente en la propulsión de fluidos compresibles como en turbinas de gas y vapor, en la propulsión de aviones y naves espaciales, y en sopladores industriales de aire. Además, tiene una aplicación importante en la medición de flujo de fluidos.

Una boquilla (o tobera) convergente-divergente es un ducto que posee una sección transversal convergente seguida de una divergente, unidas por una garganta. En algunas aplicaciones la boquilla puede estar formada solo por la sección convergente. Las boquillas se diseñan de forma que la fricción de pared sea mínima y que no tenga lugar la separación de capa límite [1].

Durante el movimiento del fluido a través de la boquilla, las propiedades y variables de flujo varían principalmente en la dirección de flujo, por lo tanto, se considerará un flujo isentrópico unidimensional. Las relaciones entre las propiedades estáticas y de estancamiento se determinan en esta práctica, aplicando los conceptos de flujo isentrópico y número de Mach para evaluar el efecto de estas variables sobre la velocidad de salida, el flujo másico y la distribución de la presión a lo largo de una tobera convergente y una convergente-divergente.

COMPETENCIAS GENERALES

Aplicar estrategias de aprendizaje autónomo en el área de conocimiento de fluidos compresibles que le permitan al estudiante tomar decisiones oportunas y pertinentes en el ámbito académico y profesional.

COMPETENCIAS ESPECÍFICAS

- Aplicar los conocimientos básicos de la mecánica de fluidos relacionados con flujo compresible.
- Demostrar la capacidad de análisis e interpretación de las variables y los fenómenos presentes en una boquilla.
- Adquirir la capacidad para la resolución de problemas de forma efectiva en el área de fluidos compresibles.

OBJETIVOS

- Determinar el tipo de fluido compresible que se presenta en la boquilla a las condiciones de operación seleccionadas.
- Identificar y demostrar matemáticamente el punto exacto en el que se presenta el fenómeno de estrangulamiento mediante el flujo másico de aire.
- Evaluar el efecto de la contrapresión en la distribución de la presión a lo largo de una boquilla.

MARCO TEÓRICO

Toberas convergentes y convergentes-divergentes

Cuando se piensa en toberas aceleradoras, por lo general se piensa en ductos de flujo cuya área de sección transversal disminuye en la dirección del flujo. Sin embargo, la mayor velocidad a la cual un fluido puede acelerarse en una tobera convergente se limita a la velocidad sónica (cuando el número de Mach, Ma , es

igual a 1), la cual ocurre en la salida (garganta) de la tobera (Figura E1). La aceleración del fluido a velocidades supersónicas ($Ma > 1$) puede lograrse solamente al añadir una tobera divergente a la tobera aceleradora subsónica en su garganta. La combinación resultante es una tobera convergente-divergente, la cual es un dispositivo común en aviones supersónicos y cohetes de propulsión [2].

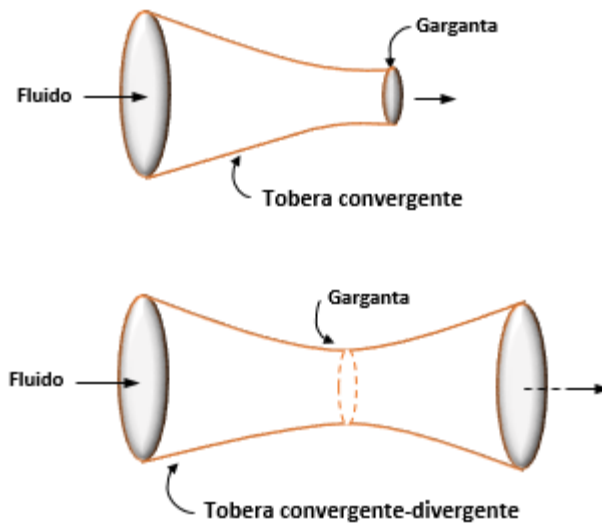


Figura D1. Toberas convergentes y convergentes-divergentes. Fuente: Autores

Número de Mach

El número de Mach (Ma) relaciona la velocidad del fluido con la velocidad del sonido en dicho fluido en idénticas condiciones termodinámicas, de tal forma que cuando $Ma > 1$ el flujo se denomina supersónico, cuando $Ma < 1$ el flujo se denomina subsónico y cuando $Ma = 1$ el flujo se denomina sónico.

Para los líquidos el número de Mach es muy pequeño, ya que la velocidad del sonido es muy grande, de forma que este número adimensional no se considera para el análisis de fluidos incompresibles en este sentido [3]. El número de Mach se calcula como se muestra a continuación:

$$Ma = \frac{v}{c} \quad \text{Ecuación D1}$$

siendo v la velocidad del fluido y c la velocidad del sonido. Esta ecuación representa la relevancia que tiene la compresibilidad en un flujo determinado, además de la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas originadas por la compresibilidad del fluido.

Propiedades críticas y de estancamiento

Las propiedades del fluido en una región donde el número de Mach es unitario son conocidas como propiedades críticas. Estas propiedades se representan con un asterisco como superíndice (*). No deben confundirse con las propiedades termodinámicas de las sustancias en el punto crítico (tales como la presión crítica y la temperatura crítica).

Las propiedades de un fluido en estado de estancamiento se conocen como propiedades de estancamiento (temperatura de estancamiento, presión de estancamiento, densidad de estancamiento, etc.). Estas propiedades se denotan con el subíndice 0. El estado de estancamiento isentrópico se refiere al proceso de llevar al reposo un flujo de fluido (estancamiento) de forma reversible y adiabática (es decir, isentrópico) [2].

Las propiedades del fluido a lo largo de un proceso de expansión isentrópica pueden relacionarse con sus propiedades de estancamiento o reposo, denotadas por un subíndice 0, por medio de las siguientes expresiones:

Presión:

$$\frac{P_0}{P} = \left(1 + \frac{k-1}{2} Ma^2\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad \text{Ecuación D2.}$$

Temperatura:

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{k-1}{2} Ma^2 \quad \text{Ecuación D3.}$$

Densidad:

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left(1 + \frac{k-1}{2} Ma^2\right)^{\frac{1}{k-1}} \quad \text{Ecuación D4.}$$

Es práctica común en el análisis de flujo compresible representar los valores críticos con un asterisco (*) como superíndice. Se toma $Ma = 1$ en las ecuaciones E4 a la E6 y resulta:

Temperatura:

$$\frac{T^*}{T_0} = \frac{2}{k+1} \quad \text{Ecuación D5.}$$

Presión:

$$\frac{P^*}{P_0} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad \text{Ecuación D6.}$$

Densidad:

$$\frac{\rho^*}{\rho_0} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \quad \text{Ecuación D7.}$$

Fenómeno de estrangulamiento o asfixia.

La entrada de una boquilla convergente generalmente está conectada a un ducto o depósito. Este ducto es lo suficientemente grande como para que la velocidad a la entrada de la boquilla se considere despreciable. Por lo tanto, el flujo a través de la boquilla se aproxima a un flujo isentrópico, y la presión y temperatura de estancamiento del fluido en cualquier sección transversal a la entrada de la boquilla son iguales a la presión y temperatura del ducto, respectivamente [2].

Si la presión de la región de descarga de la boquilla (contrapresión o presión del receptor, P_b) se reduce, entonces es posible observar los efectos que tiene esta variable en la distribución de la presión a lo largo de la tobera (Figura E2). Cuando la contrapresión disminuye hasta tomar el valor de la presión crítica (P^* , presión necesaria para aumentar la velocidad del fluido hasta alcanzar la velocidad del sonido en la salida de la garganta de la tobera), el flujo másico alcanza un máximo valor y se dice que el flujo está estrangulado, bloqueado o asfixiado. Si la contrapresión se reduce más allá de la presión crítica, no habrá cambios adicionales en la distribución de presión a lo largo de la tobera [1].

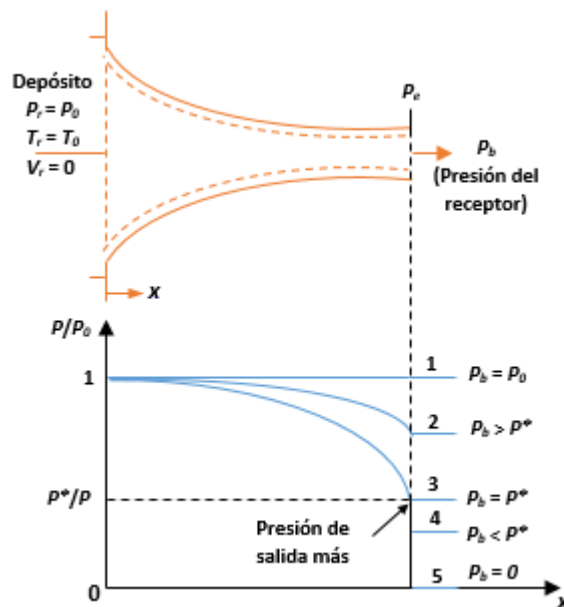


Figura D2. Efecto de la presión del receptor en la distribución de presión en una tobera convergente. Fuente: Autores

Teóricamente para un flujo isentrópico a través de una boquilla, si el flujo es aire que alcanza las condiciones críticas o sónicas en la garganta entonces se tiene la siguiente relación de presiones que expresa las condiciones a las cuales se alcanza el estrangulamiento o asfixia [3].

$$\frac{P^*}{P_0} = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \text{ Ecuación D8.}$$

donde γ es la razón de calores específicos, que para el caso particular del aire es 1,4. Por lo anterior, el valor de la relación de presión crítica a presión de estancamiento que se obtiene es de 0,528 [1].

Contrapresión.

Es decir, la presión de la región de la descarga de la tobera, *back pressure* en inglés) sobre la velocidad de salida, la razón del flujo de masa y la distribución de la presión a lo largo de la tobera [2].

Relación global de presión.

Es la relación existente entre la presión absoluta P_0 justo en la cual el flujo de masa se empieza a comportar de manera constante con la presión absoluta de suministro P_i se define como.

$$\frac{P_0}{P_i} \quad \text{Ecuación D9.}$$

Relaciones locales de presión.

Se puede definir a la relación local de presión como la razón existente entre la presión P_n que indica cualquier presión existente a lo largo de la tobera con respecto a la presión absoluta de suministro P_i se define como:

$$\frac{P_n}{P_i} \quad \text{Ecuación D10.}$$

TEMAS DE CONSULTA

- Flujo en toberas convergentes y convergentes-divergentes.
- Clasificación de los fluidos compresibles mediante el número de Mach.
- Relaciones de propiedades de flujo isentrópico de gas ideal.
- Flujo isentrópico en toberas convergentes y convergentes-divergentes.

PROCEDIMIENTO

Práctica 1. Fenómeno de asfixia

- Encender el compresor y esperar aproximadamente 5 minutos a que se estabilice. Tener en cuenta el procedimiento de encendido del compresor.
- Encender la unidad base F300.
- Asegurar que este instalada la boquilla C en la unidad F300B.
- Abrir lentamente las válvulas de paso del flujo de aire por la línea de tuberías de laboratorio.
- Asegurar que el seguro del mando de presión en la unidad base F300 se encuentre inhabilitado, accionando la perilla hacia afuera.
- Cerrar la válvula de entrada de aire (Válvula mariposa).
- Seleccionar una presión P_i en la unidad base F300 de 450 kPa y mantener este valor constante a lo largo de la demostración ajustando el regulador de presión y la válvula mariposa.
- Abrir la válvula mariposa y cerrar la válvula de contrapresión.
- Abrir gradualmente la válvula de contrapresión en valores de 50 kPa.
- Registrar la presión en cada uno de los medidores, el flujo másico de aire y la temperatura.
- Abrir gradualmente la válvula de contrapresión en valores de 50 kPa.
- Registrar nuevamente la presión en cada uno de los medidores, el flujo másico de aire y la temperatura.

- Confirmar que la velocidad de flujo másico de aire llega a su punto máximo cuando $P_0 = 0,5$ a $0,6 P_i$ aproximadamente.
- Repetir sucesivamente los anteriores pasos hasta que P_0 haya alcanzado el mínimo valor.
- La demostración se puede repetir con la boquilla A, pero para este caso el flujo másico de aire llega a su punto máximo cuando $P_0 = 0,8 P_i$ aproximadamente.

Práctica 2. Efecto de la contrapresión

- Encender el compresor y esperar aproximadamente 5 minutos a que se estabilice. Tener en cuenta el procedimiento de encendido del compresor.
- Encender la unidad base F300.
- Asegurar que este instalada la boquilla C en la unidad F300B.
- Abrir lentamente las válvulas de paso del flujo de aire por la línea de tuberías de laboratorio.
- Asegurar que el seguro del mando de presión en la unidad base F300 se encuentre inhabilitado, accionando la perilla hacia afuera.
- Cerrar la válvula de entrada de aire (Válvula mariposa).
- Seleccionar una presión P_i en la unidad base F300 de 450 kPa y mantener este valor constante a lo largo de la demostración ajustando el regulador de presión y la válvula mariposa.
- Abrir completamente la válvula mariposa y la válvula de contrapresión.
- Cerrar gradualmente la válvula de contrapresión en valores de 50 kPa.
- Registrar los valores de presión en cada medidor para cada presión en el manómetro de la válvula de contrapresión.
- Abrir gradualmente la válvula de contrapresión en valores de 50 kPa
- Registrar nuevamente los valores de presión en cada medidor para cada presión en el manómetro de la válvula de contrapresión.
- Repetir los anteriores pasos hasta que P_0 alcance valor de 400 kPa.

TABLA PARA TOMA DE DATOS

✓ ASFIXIA

La práctica se lleva a cabo con la Boquilla C y opcionalmente con la boquilla A.

Boquilla C									
Entrada Ti [°C]									
Salida Ts [°C]									
Entrada Presión [Pi]									
Salida Presión [Ps]									
Velocidad de flujo de masa de aire * 10 ⁻³ [Kg/s]									
P1									
P2									
P3									
P4									
P5									
P6									

Boquilla A									
Entrada Ti [°C]									
Salida To [°C]									
Entrada Presión [Pi]									
Salida Presión [Po]									
Velocidad de flujo de masa de aire [Kg/s]									
P1									
P2									
P3									
P4									
P5									
P6									
P7									
P8									

✓ CONTRAPRESIÓN

La práctica se lleva a cabo con la Boquilla C y opcionalmente con la boquilla A.

Boquilla A									
Entrada Ti [°C]									
Salida To [°C]									
Entrada Presión [Pi]									
Salida Presión [Po]									
Velocidad de flujo de masa de aire [Kg/s]									
P1									
P2									
P3									
P4									
P5									
P6									
P7									
P8									

Boquilla C									
Entrada T_i [°C]									
Salida T_s [°C]									
Entrada Presión [Pi]									
Salida Presión [Ps]									
Velocidad de flujo de masa de aire $\cdot 10^{-3}$ [kg/s]									
P1									
P2									
P3									
P4									
P5									
P6									

RESULTADOS

- Calcular la densidad y la velocidad del fluido en todas las salidas de la boquilla para los diferentes valores de presión P_0 .
- Calcular el número de Mach y clasificar el tipo de flujo compresible para cada valor de presión.
- Identificar el punto donde ocurre el fenómeno de asfixia experimental y teóricamente considerando una tobera.
- Evaluar y explicar el efecto de la contrapresión en la tobera.
- Calcular, analizar y comparar los valores de la presión, temperatura y densidad del aire tanto en el punto de estrangulamiento como en el punto crítico y adicional, el número de Mach crítico.

REFERENCIAS

- [1] W. L. McCabe, J. C. Smith, and P. (2002). Harriott, *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*, Sixth ed.: McGraw-Hill.
- [2] Muñoz, M & Rovira de Antonio, A. *Motores de combustión interna*. (2014). UNED.
- [3] Cengel, Y.A., Cimbala, J.M., & Olguín, V.C. (2006). *Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones*, México DF, México: McGraw-Hill.

ANEXO E. PÉRDIDAS DE CARGA EN TUBERÍAS POR FRICCIÓN Y ACCESORIOS

INTRODUCCIÓN

A medida que un fluido avanza por un conducto u otro dispositivo es normal que se presenten pérdidas de energía durante la trayectoria, debido a la fricción existente entre el fluido y las paredes de la tubería, a estas pérdidas se les conoce como pérdidas mayores. Además, se pueden presentar pérdidas debido a la presencia de accesorios como codos, válvulas o variación del área transversal que atraviesa el fluido, a estas pérdidas se les conoce como pérdidas menores.

Estas pérdidas se presentan ya que al estar el fluido en movimiento surge una fuerza que se opone al flujo de este, transformando parte de la energía que lleva el fluido en calor, la cual se disipa a través de las paredes de la tubería o ducto, estas pérdidas se expresan en función de la energía por unidad de peso del fluido normalmente conocido como carga (h).

En esta práctica se llevará a cabo la medición de la presión manométrica en los diferentes tramos de la tubería con la finalidad de estimar las pérdidas mayores y menores teniendo en cuenta la variación de la presión y la velocidad a la cual viaja el fluido.

COMPETENCIAS GENERALES

Aplicar los conocimientos de mecánica de fluidos sobre la pérdida de carga por fricción durante el flujo de fluidos compresibles a través de tuberías y accesorios

COMPETENCIAS ESPECÍFICAS

- Aplicar los conocimientos básicos de la mecánica de fluidos relacionados con flujo compresible.
- Adquirir la capacidad para la resolución de problemas de forma efectiva en el área de fluidos compresibles.
- Analizar la influencia de las variables presentes en el recorrido de un fluido a través de una sección de tuberías.

OBJETIVOS

- Determinar las pérdidas mayores y menores de carga, relacionadas con la fricción del fluido en la tubería y con los accesorios presentes en esta.
- Estimar la velocidad del fluido en cada tramo de la tubería.
- Calcular la velocidad del fluido en cada tramo de la tubería.
- Determinar el comportamiento y la distribución de la presión de entrada P_i en función del recorrido por la tubería.

MARCO TEÓRICO

El flujo de un líquido o de un gas a través de tuberías o ductos se usa comúnmente en sistemas de calefacción y enfriamiento, y en redes de distribución de fluido. El fluido en estas aplicaciones usualmente se fuerza a fluir mediante un ventilador o bomba a través de una sección del flujo. Se pone particular atención a la fricción, que se relaciona directamente con la caída de presión y las pérdidas de carga durante el flujo a través de tuberías y ductos [1].

Los términos tubo, ducto y conducto se usan de manera intercambiable para tramos de flujo. En general, los tramos de flujo de sección transversal circular se conocen como flujo en tubería (en especial cuando el fluido es un líquido), y los tramos de flujo de sección transversal no circular se conocen como ductos (especialmente cuando el fluido es un gas) [2].

Velocidad del fluido

La velocidad del aire para flujo en tubería depende directamente del flujo másico, además esta será inversamente proporcional a la presión debido al eyector ubicado en la entrada del fluido a la red de tubería, la velocidad se puede calcular mediante.

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho A} \quad \text{Ecuación E1.}$$

Número de Reynolds

La transición de flujo laminar a turbulento depende de la geometría, la rugosidad de la superficie, la velocidad del flujo, la temperatura de la superficie y el tipo de fluido, entre otros factores.

$$Re = \frac{\rho D v}{\mu} \quad \text{Ecuación E2}$$

donde V velocidad de flujo(m/s), D longitud característica de la geometría (diámetro en este caso, en m), μ viscosidad cinemática del fluido (m^2/s). Note que el número de Reynolds es una cantidad adimensional, Además, la viscosidad cinemática tiene la unidad m^2/s y se puede ver como difusividad viscosa o difusividad de cantidad de movimiento [3]

Pérdidas de carga por fricción

La pérdida de carga representa la altura adicional que el fluido necesita para elevarse por medio de una bomba con la finalidad de superar las pérdidas por fricción en la tubería.

Para la pérdida de energía por fricción de un fluido en un sistema de tuberías normalmente se denota como h_L , para este caso la fricción es proporcional a la carga de velocidad del flujo y la relación de la longitud de la corriente y a la energía cinética por unidad de masa [4].

$$h_L = f \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{v^2}{2g} \right) \quad \text{Ecuación E3.}$$

El cálculo del factor de fricción se puede realizar mediante distintas ecuaciones dependiendo de algunas condiciones como la relación entre la rugosidad de la tubería y su diámetro además del número de Reynolds.

➤ Colebrook-White.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\frac{\varepsilon}{D}}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad \text{Ecuación E4}$$

➤ Haaland.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log \left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\frac{\varepsilon}{D}}{3.7} \right)^{1.11} \right] \quad \text{Ecuación E5.}$$

➤ Swamee-Jain.

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad \begin{matrix} 10^{-6} < \varepsilon/D < 10^{-2} \\ 500 < Re < 1 \times 10^8 \end{matrix} \quad \text{Ecuación E6}$$

Pérdidas menores

El fluido en un sistema de tubería típico pasa a través de varias uniones, válvulas, flexiones, codos, ramificaciones en forma de T (conexiones en T), entradas, salidas,

ensanchamientos y contracciones. Dichos componentes (accesorios) interrumpen el suave flujo del fluido y provocan pérdidas adicionales debido al fenómeno de separación y mezcla del flujo que producen. Este tipo de pérdidas se conoce como pérdidas menores [5].

$$h_L = k_L \left(\frac{v^2}{2g} \right) \text{ Ecuación E7.}$$

Las pérdidas se expresan en términos de K_L , el cual es el coeficiente de pérdida que varía dependiendo del tipo de accesorio. Para el caso de una expansión, el coeficiente se indica en la siguiente tabla de acuerdo a la relación D_2/D_1 (relación del diámetro más grande con respecto al diámetro más pequeño).

D2/D1	Angulo del cono en grados.											
	2	6	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60
1,1	0,01	0,01	0,03	0,05	0,1	0,13	0,16	0,18	0,19	0,2	0,21	0,23
1,2	0,02	0,02	0,04	0,09	0,16	0,21	0,25	0,29	0,31	0,33	0,35	0,37
1,4	0,02	0,03	0,06	0,12	0,23	0,3	0,36	0,41	0,44	0,47	0,5	0,53
1,6	0,03	0,04	0,07	0,14	0,26	0,35	0,42	0,47	0,51	0,54	0,57	0,61
1,8	0,03	0,04	0,07	0,15	0,28	0,37	0,44	0,5	0,54	0,58	0,61	0,65
2	0,03	0,04	0,07	0,16	0,29	0,38	0,46	0,52	0,56	0,6	0,63	0,68
2,5	0,03	0,04	0,08	0,16	0,3	0,39	0,48	0,54	0,58	0,62	0,65	0,7
3	0,03	0,04	0,08	0,16	0,31	0,4	0,48	0,55	0,59	0,63	0,66	0,71
∞	0,03	0,05	0,08	0,16	0,31	0,4	0,49	0,56	0,6	0,64	0,67	0,72

Tabla E1. Coeficiente de resistencia dilatación gradual. (Mott, 2006, pág. 286)

Para el caso cuando existen accesorios en este caso codos el coeficiente de pérdidas se puede estimar de manera bibliográfica.

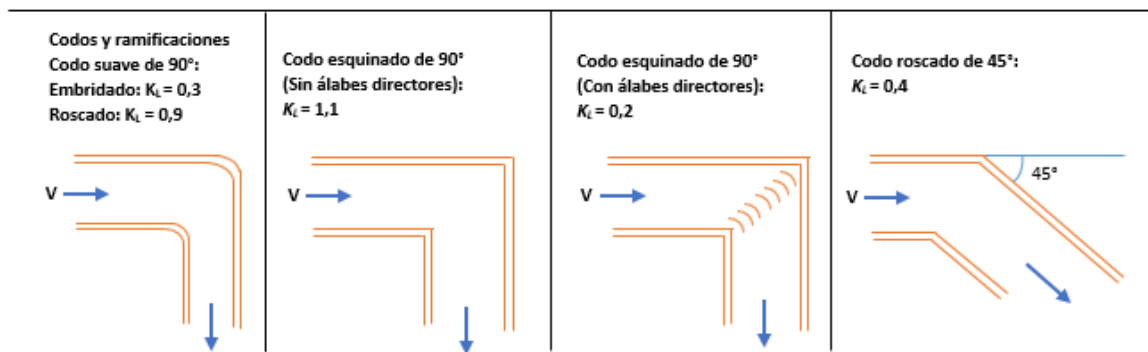


Figura E1. Coeficiente de pérdidas para codos. Fuente: Autores

TEMAS DE CONSULTA

- Flujo laminar y turbulento en tuberías.
- Diagrama de Moody
- Pérdidas de carga por fricción mayores y menores.
- Pérdidas de presión por fricción.

Descripción Equipo

F300G



Conformado por un eyector, un manómetro y una red de tubería lisa de diferentes áreas con diámetros de 0,0068 m y 0,011m con 13 puntos de tomas de presión a lo largo de esta con distancias entre ellos de 0,0089-0,0018-0,0018-0,0091-0,0014-0,0012-0,0015-0,0011-0,0013-0,00135-0,0014-0,008 m y con un ángulo de expansión súbita entre 30° y 35°.

PROCEDIMIENTO

- Encender el compresor, esperar aproximadamente 5 minutos a que se estabilice. Tener en cuenta el procedimiento de encendido del compresor.
 - Encender la unidad base F300.
 - Abrir lentamente las válvulas de paso del flujo de aire por la línea de tuberías de laboratorio.
 - Asegurar que el seguro del mando de presión en la unidad base F300 se encuentre inhabilitado, accionando la perilla hacia afuera.
 - Aumentar lentamente la presión P_i en la unidad base F300 hasta ajustarla en un valor de 200 kPa.
 - Conectar el medidor de la presión a la toma número 1, removiendo cuidadosamente la cobertura o tapón de este punto, por medio de una manguera.
 - Registrar la presión de la toma número 1, la presión P_i y el flujo másico del aire ($\dot{m}$).
 - Aumentar la presión progresiva y lentamente en valores de 50 kPa.
 - Registrar nuevamente los valores de toma de presión, presión P_i y flujo másico de aire ($\dot{m}$).
 - Repetir el procedimiento hasta que se alcance un valor de 500 kPa.
 - Disminuir la presión de la unidad base F300 hasta un valor de 0 kPa.
 - Apagar el equipo.
 - Asegurar que se encuentre habilitado el mando de presión, ajustando la perilla hacia adentro.
 - Cerrar las válvulas de paso de flujo de aire en la línea de tuberías de laboratorio.

TOMA DE DATOS

Presión de suministro	Número de las tomas													Caudal de masa
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	g/s
200														
250														
300														
350														
400														
450														
500														

RESULTADOS

- Graficar el comportamiento y distribución de la presión de entrada P_i con respecto a su recorrido por la tubería (puntos de tomas de presión vs P_i)
- Calcular la velocidad del fluido en todos los tramos de la tubería.
- Graficar la distribución de la velocidad para cada uno de los valores de presión, analizar y justificar su comportamiento.
- Calcular el número de Mach e identificar el tipo de fluido compresible.
- Calcular las pérdidas mayores por fricción en la tubería.
- Calcular las pérdidas menores por accesorios (codos y expansiones).

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Crane C. *Flow of Fluids Through Valves, Fittings, and Pipe. Tech Manual 410*. New York: Crane Co, 1991.
- [2] Holland FA, R, Bragg. *Fluid Flow for Chemical Engineers, 2nd Ed.*, London, Edward Arnold, 1995.
- [3] Cengel, Y.A., Cimbala, J.M., & Olguín, V.C. (2006). *Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones*, México DF, México: McGraw-Hill.

- [4] Shapiro AH. *The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow*, Vol. I. New York: Ronald Press, 1953.
- [5] Khouri, E. *Apuntes de hidráulica para explotaciones forestales*. (2004). Oviedo, España: Ediuno.

ANEXO F VISUALIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA VIRTUAL

En la Figura F1 podemos observar la primera vista del sitio web, en la cual se da una bienvenida y se muestra el menú general del proyecto.



Figura F1. Pantalla de inicio de la herramienta virtual.

En la Figura F2 podemos observar la segunda vista del sitio web, la cual muestra las generalidades del proyecto que incluye teoría de flujos compresibles, conceptos y la historia de los mismos.

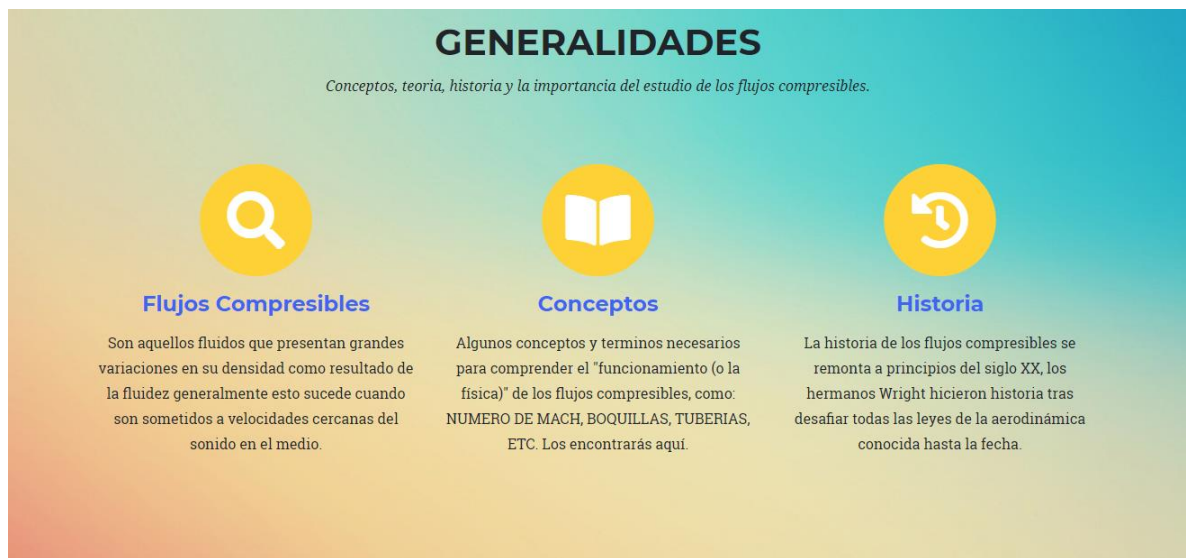


Figura F2. Vista de generalidades de la página web

En la Figura F3 podemos observar la tercera vista del sitio web, la cual muestra el contenido de la teoría de flujos compresibles.



Figura F3. Vista de flujos compresibles en las generalidades

En la Figura F4 podemos observar la cuarta vista del sitio web, la cual muestra el contenido de los conceptos fundamentales de flujo compresible.



CONCEPTOS

TEORIA

Numero de Mach

Boquillas

Tuberías

Eyector

Es el parámetro más importante para el estudio de flujos compresibles, el cual permite evidenciar la relación entre la velocidad a la que viaja el fluido y la velocidad que presenta el sonido dentro del fluido ósea.

$$Ma = \frac{v}{c}$$

v, es velocidad del fluido y c es la velocidad del sonido, representa la relevancia que tiene la compresibilidad en un flujo determinado, además es la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas originadas por la compresibilidad del fluido recibe este nombre gracias a Ernst Mach.

Clasificación de los fluidos según el número de Mach:

Figura F4. Vista de los conceptos en las generalidades

En la Figura F5 podemos observar la quinta vista del sitio web, la cual muestra la historia sobre flujos compresibles.



HISTORIA

TEORIA

Historia



A principios del siglo XX, los hermanos Wright hicieron historia tras desafiar todas las leyes de la aerodinámica conocida hasta la fecha. Desde entonces, la obsesión del ser humano por controlar y superar los límites de la velocidad ha adquirido un matiz casi obsesivo. Gracias a esta estímulos pronto fue descubierta un nuevo término que definió esa continúa busca

Figura F5. Vista de la historia en las generalidades

En la Figura F6 podemos observar la sexta vista del sitio web, la cual muestra los diferentes equipos utilizados durante las prácticas.

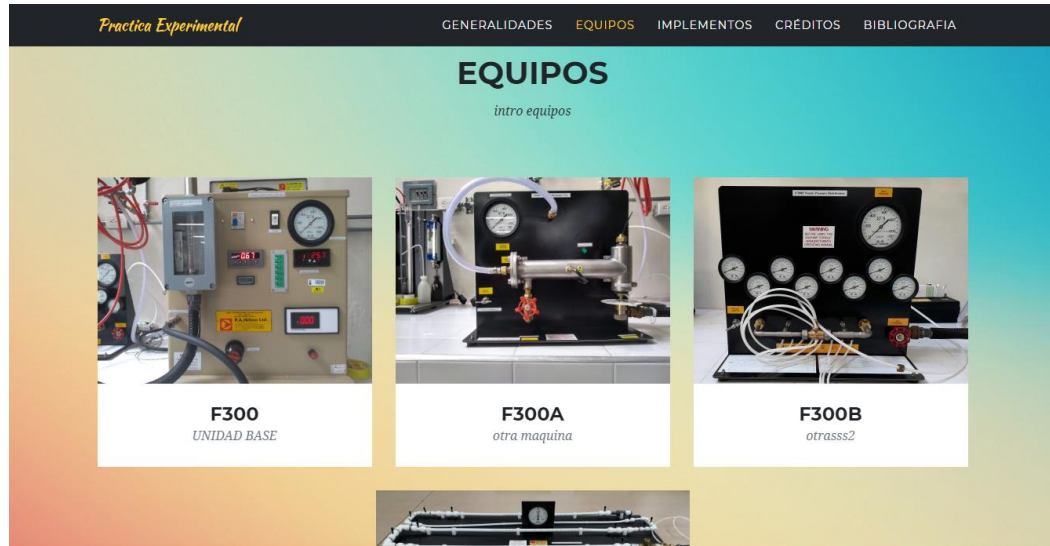


Figura F6. Vista de los equipos.

En la Figura F7 podemos observar la séptima vista del sitio web, en la cual ingresamos por medio de un clic a la información del equipo a trabajar, en este caso el F300G.



Figura F7. Vista del equipo F300G

En la Figura F8 podemos observar la octava vista del sitio web, en la cual ingresamos al set de prácticas en donde está contenido un PDF con la guía de la práctica a realizar.

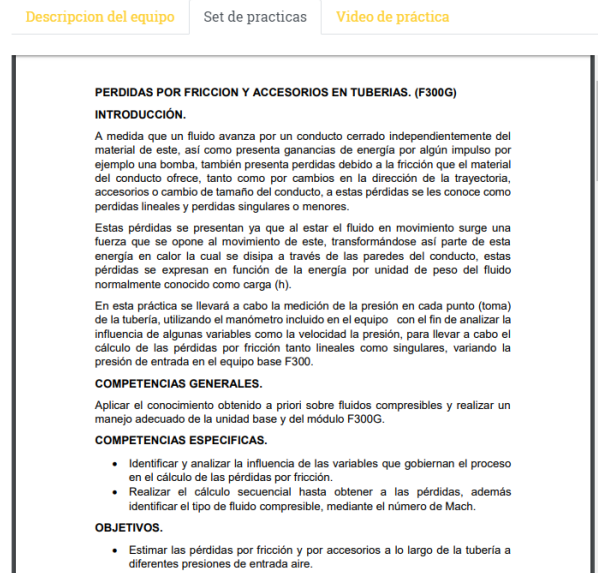


Figura F8. Vista del set de prácticas del equipo F300G

En la Figura F9 podemos observar la novena vista del sitio web, en la cual ingresamos a los diferentes videos en donde se hace el respectivo reconocimiento de la práctica a realizar.



Figura F9. Vista set de videos de la práctica

En la Figura F10 podemos observar la décima vista del sitio web, en la cual podemos observar los diferentes implementos de seguridad utilizados a lo largo de la práctica.

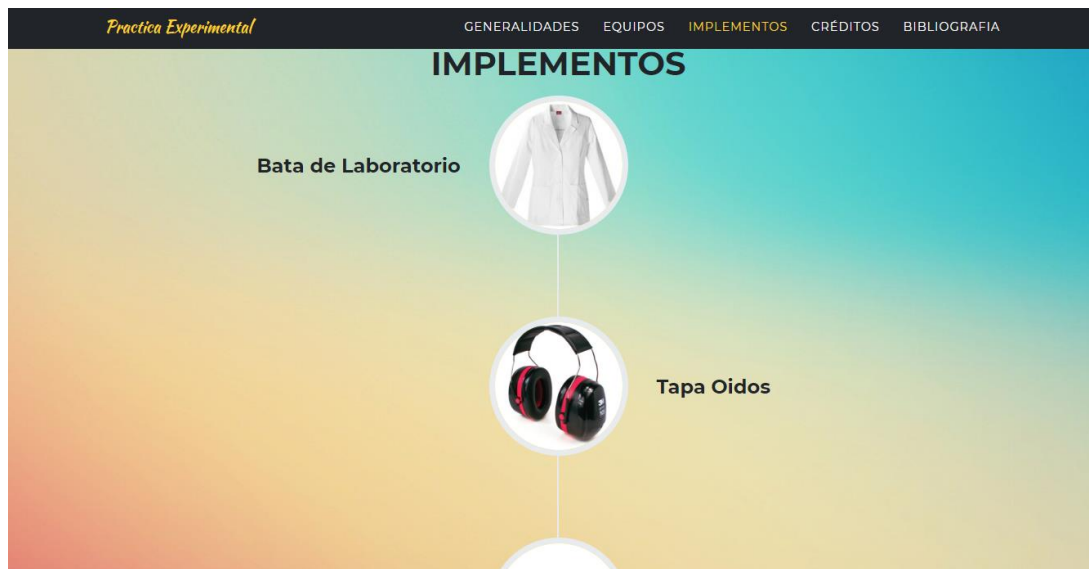


Figura F10. Vista de implementos de seguridad.

ANEXO G TABLAS PARA TOMA DE DATOS

Las siguientes tablas se anexan como una ayuda para que el estudiante pueda construir sus propias plantillas. Éstas no son forzadas, sino que son simplemente una guía.

- Equipo F300A. Flujo isentrópico en toberas**

La siguiente tabla puede ser usada para las anotaciones de las prácticas 1, 2 y 3.

BOQUILLA N°										
PRUEBA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión de entrada P_i [KPa]										
Temperatura de entrada T_i [°C]										
Presión de la cámara P_c [KPa]										
Temperatura de la cámara T_c [°C]										
Velocidad de flujo másico mx10-3 [Kg/s]										

La siguiente tabla puede ser usada para las anotaciones de la práctica 4.

BOQUILLA N°										
PRUEBA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión de entrada P_i [KPa]										
Temperatura de entrada T_i [°C]										
Presión de la cámara P_c [KPa]										
Temperatura de la cámara T_c [°C]										
Deflexión del cantilever										
Velocidad de flujo másico mx10-3 [Kg/s]										

- F300B. Demostración del fenómeno de estrangulamiento y del efecto de la contrapresión en boquillas convergentes y convergentes-divergentes**

La práctica 1 se lleva a cabo con la Boquilla C y opcionalmente con la boquilla A.

Boquilla C									
Entrada Ti [°C]									
Salida Ts [°C]									
Entrada Presión [Pi]									
Salida Presión [Ps]									
Velocidad de flujo de masa de aire * 10 ⁻³ [Kg/s]									
P1									
P2									
P3									
P4									
P5									
P6									

Boquilla A									
Entrada Ti [°C]									
Salida To [°C]									
Entrada Presión [Pi]									
Salida Presión [Po]									
Velocidad de flujo de masa de aire [Kg/s]									
P1									
P2									
P3									
P4									
P5									
P6									
P7									
P8									

La práctica 2 se lleva a cabo con la Boquilla C y opcionalmente con la boquilla A.

Boquilla A									
Entrada Ti [°C]									
Salida To [°C]									
Entrada Presión [Pi]									
Salida Presión [Po]									
Velocidad de flujo de masa de aire [Kg/s]									
P1									
P2									
P3									
P4									
P5									
P6									
P7									
P8									

Boquilla C									
Entrada Ti [°C]									
Salida Ts [°C]									
Entrada Presión [Pi]									
Salida Presión [Ps]									
Velocidad de flujo de masa de aire * 10 ⁻³ [Kg/s]									
P1									
P2									
P3									
P4									
P5									
P6									

- **F300G. Pérdidas de carga en tuberías por fricción y accesorios**

La siguiente tabla puede ser usada para las anotaciones de la práctica 1.

Número de las tomas														
Presión de suministro	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Caudal de masa
kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	g/s
200														
250														
300														
350														
400														
450														
500														