

Diseño e Implementación de Prácticas sobre Flujo Compresible para el Laboratorio de Procesos

I: Módulos de Turbina de Impulso y de Reacción Experimental

Hernán Darío Manrique Mogollón y Raúl David Villarreal Orozco

Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Químico

Modalidad práctica en docencia

Directora

Diana Paola Duarte Duarte

Doctora en Ingeniería Química

Codirectora

Yuly Fernanda López Contreras

Doctora en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Este documento es fruto y testimonio de todo el esfuerzo entregado por cada una de las personas que me han acompañado desde que inicié mi carrera como ingeniero químico.

Le dedico este logro a mis padres, Raúl Villarreal Villarreal y Emilse Orozco Hernández; soy el resultado y fruto directo de sus sueños, sacrificios y esfuerzos realizados día a día para darme un mejor futuro y una vida plena, llena de felicidad y amor. También lo dedico a mis hermanas, Shirley Tatiana Villarreal Orozco y Jhurany's Alejandra Villarreal Orozco. Gracias a su apoyo incondicional, a sus enseñanzas y al amor que me han entregado, junto con el de mis padres, he recibido el combustible que enciende, alimenta y hace crecer la llama dentro de mí, la cual busca la gloria, el éxito, la excelencia, la abundancia y la riqueza.

Extiendo esta dedicatoria a mi profesora Diana Paola Duarte Duarte, sin quien este proyecto no hubiera sido posible; a mi profesor Freddy Avellaneda, por sus enseñanzas y la motivación inculcada en mí; y a cada uno de los profesores que han hecho parte de mi proceso de formación, desde el preescolar hasta mis días de universidad y trabajo.

Se lo dedico, además, a mis familiares, amigos cercanos y a todas las personas que, con cada detalle, enseñanza y motivación han contribuido de manera exponencial a mi crecimiento personal, por último, y no menos importante, me lo dedico a mí, Raúl David Villarreal Orozco, por siempre confiar en mis capacidades, por crecer cada día, por nunca dejar de aprender, por aventurarme en la vida cruzando fronteras, por romper barreras y por asumir riesgos calculados en la búsqueda de una vida llena de abundancia, riqueza, amor, felicidad y cercanía con Dios.

Raúl David Villarreal Orozco

Agradecimientos

Los autores agradecen:

A la profesora Diana Paola Duarte Duarte, 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, por recibirnos, por enseñarnos, por encaminarnos y formarnos con valores éticos y morales. Igualmente queremos dedicar un agradecimiento especial a cada uno de los compañeros que validaron nuestro trabajo, sin su colaboración durante las prácticas este trabajo no hubiera sido posible.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	1
1. Objetivos	4
1.1 Objetivo general	4
1.2 Objetivos específicos	4
2. Marco Teórico	5
2.1 Flujo compresible	5
2.2 Propiedades de estancamiento	5
2.3 Flujo isentrópico unidimensional	6
2.4 Turbina de acción o impulso	8
2.5 Turbina de reacción	9
3. Estado del arte	11
4. Metodología	14
4.1 Reconocimiento de los equipos	15
4.2 Acondicionamiento y puesta en marcha de los equipos	15
4.3 Diseño de las prácticas de laboratorio	17
4.4 Comparación de datos	17
4.5 Validación de los manuales de práctica	19
4.6 Herramienta de apoyo virtual	19
5. Resultados	19

5.1 Reconocimiento de los equipos	19
5.2 Acondicionamiento y puesta en marcha de los equipos	22
5.3 Definición de condiciones y rangos de las variables de operación	23
5.4 Diseño de guías pedagógicas y manuales de operación	37
5.5 Casos base y comparación de los datos de referencia	39
5.6 Validación de las guías prácticas por parte de los estudiantes	41
5.7 Herramienta virtual	43
6. Conclusiones	34
7. Recomendaciones	35
Referencias bibliográficas	36

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 <i>Vista frontal y nomenclatura de las turbinas de impulso y reacción</i>	21
Tabla 2 <i>Rangos de operación definidos para ambos equipos</i>	36
Tabla 3 <i>Combinaciones de variables de entrada para los grupos de trabajo en la turbina de impulso</i>	38
Tabla 4 <i>Combinaciones de variables de entrada para los grupos de trabajo en la turbina de reacción</i>	38
Tabla 5 <i>Guía de conexión para los equipos de flujo compresible a la unidad de conexión principal</i>	49
Tabla 6 <i>Guía pedagógica para el desarrollo de prácticas de laboratorio sobre flujo compresible en la turbina de impulso</i>	44
Tabla 7 <i>Guía de operación para la turbina de impulso</i>	46
Tabla 8 <i>Enumeración de partes unidad de conexión principal</i>	47
Tabla 9 <i>Consideraciones preliminares y pasos por seguir para el proceso de lubricación</i>	48
Tabla 10 <i>Elementos del modulo de turbina de impulso</i>	49
Tabla 11 <i>Etapa 1 laboratorio turbina de impulso</i>	58
Tabla 12 <i>Etapa 2 laboratorio turbina de impulso</i>	60
Tabla 13 <i>Etapa 3 laboratorio turbina de impulso</i>	61
Tabla 14 <i>Etapa 4 laboratorio turbina de impulso</i>	63
Tabla 15 <i>Etapa 5 laboratorio turbina de impulso</i>	64

Tabla 16 <i>Guía pedagógica para el desarrollo de prácticas de laboratorio sobre flujo compresible en la turbina de reacción</i>	57
Tabla 17 <i>Guía de operación turbina de reacción</i>	68
Tabla 18 <i>Enumeración de partes de la unidad de conexión principal</i>	69
Tabla 19 <i>Consideraciones preliminares y pasos por seguir para el proceso de lubricación</i>	71
Tabla 20 <i>Etapa 1 laboratorio turbina de reacción</i>	63
Tabla 21 <i>Etapa 2 laboratorio turbina de reacción</i>	64
Tabla 22 <i>Etapa 3 laboratorio turbina de reacción</i>	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	<i>Vista general del Laboratorio de Procesos de la Escuela de Ingeniería Química</i>	2
Figura 2	<i>Visualización de una tobera convergente-divergentes</i>	7
Figura 3	<i>Ejemplo gráfico turbina de impulso</i>	8
Figura 4	<i>Ejemplo gráfico turbina de reacción</i>	9
Figura 5	<i>Diagrama de flujo general de la metodología</i>	14
Figura 6	<i>Mantenimiento y ensamble de la turbina de impulso</i>	16
Figura 7	<i>Mantenimiento y ensamble de la turbina de reacción</i>	16
Figura 8	<i>Vista frontal del módulo de conexión principal</i>	20
Figura 9	<i>Comparación de los datos de referencia y los obtenidos durante el caso base para la velocidad angular y potencia del eje en la turbina de impulso</i>	41
Figura 10	<i>Validación de los manuales de práctica por parte de los estudiantes</i>	42
Figura 11	<i>Comparación de los datos obtenidos en las pruebas realizadas por los autores y por los estudiantes para la etapa 1 de la práctica de la turbina de impulso</i>	43
Figura B.1.	<i>Enumeración de partes Unidad de conexión principal</i>	55
Figura B.2.	<i>Localización del orificio de lubricación en las turbinas</i>	49
Figura B.3.	<i>Vista frontal turbina de impulso</i>	49
Figura B.4.	<i>Llave de flujo de entrada en su posición bloqueada y libre</i>	58
Figura C.1.	<i>Vista general de partes unidad de conexión principal</i>	69
Figura C.2.	<i>Lubricación turbina de reacción</i>	62
Figura C.3.	<i>Partes funcionales turbina de reacción</i>	62
Figura C.4.	<i>Llave mariposa, posición libre y bloqueada</i>	63

LISTA DE APÉNDICES

Anexo A. Guía de conexión para los equipos de flujo compresible a la unidad de conexión principal	49
Anexo B. Guía de práctica módulo de turbina de impulso	52
Anexo C. Guía de práctica módulo de turbina de reacción	66
Anexo D. Resultados de prácticas base, prácticas de los grupos de estudiantes y tablas de diseño de experimentos	80

Resumen

Título: Diseño e Implementación de Prácticas sobre Flujo Compresible Para el Laboratorio de Procesos I: Módulos de Turbina de Impulso y de Reacción Experimental*

Autores: Hernán Darío Manrique Mogollón, Raúl David Villarreal Orozco**

Palabras Clave: Flujo compresible, turbina de impulso, turbina de reacción, revoluciones por minuto, práctica de laboratorio, compresor.

Descripción: En la Escuela de Ingeniería Química se reconoce la creciente necesidad de trasladar los conceptos teóricos abordados en el aula hacia escenarios experimentales, con el propósito de fortalecer la comprensión del estudiante y estrechar la relación entre la academia y la industria.

Este trabajo de grado tiene como objetivo consolidar y profundizar en los conocimientos previamente adquiridos sobre flujo compresible mediante el diseño e implementación de prácticas experimentales en turbinas de impulso y de reacción orientadas a integrar la teoría con la aplicación práctica. Para ello, se desarrollaron dos prácticas que permiten a los estudiantes comprender y aplicar de manera efectiva los principios fundamentales del flujo compresible, conocimientos relevantes en la ingeniería química, especialmente en el ámbito del manejo y transporte de fluidos. Asimismo, se presenta una guía detallada para la ejecución de las prácticas, las cuales permiten conocer, a pequeña escala, el principio físico y el funcionamiento de las turbinas de impulso y reacción utilizadas en campos de la industria como la generación de energía, transporte de fluidos o propulsión marítima y aeronáutica; y aplicando en ellas los conceptos de flujo compresible. Finalmente, este trabajo expone los resultados obtenidos tanto en las pruebas de implementación de dichas prácticas como en el desarrollo de una herramienta virtual orientada al estudio de los fenómenos de flujo compresible.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.

Directora: Dr. Diana Paola Duarte Duarte. Codirectora: Dr. Yuly Fernanda López Contreras

Abstract

Title: Design and Implementation of Compressible Flow Practices for Process Laboratory I: Impulse Turbine and Experimental Reaction Modules*

Authors: Hernán Darío Manrique Mogollón, Raúl David Villarreal Orozco**

Keywords: Compressible flow, impulse turbine, reaction turbine, rpm, lab practice, compressor.

Description: The School of Chemical Engineering recognizes the growing need to translate theoretical concepts taught in the classroom into experimental settings, with the aim of strengthening student understanding and strengthening the relationship between academia and industry.

This thesis aims to consolidate and deepen previously acquired knowledge of compressible flow with impulse and reaction turbines by designing and implementing experimental practices aimed at translating theory into practical application. To this end, two practices were developed that allow students to effectively understand and apply the fundamental principles of compressible flow, knowledge of great relevance in chemical engineering, especially in the field of fluid handling and transport. It also provides a detailed guide for carrying out the practical exercises, which enable students to learn, on a small scale, about the physical principles and operation of impulse and reaction turbines used in industrial fields such as power generation, fluid transport, and maritime and aeronautical propulsion, applying the concepts of compressible flow. Finally, this work presents the results obtained both in the implementation tests of these practices and in the development of a virtual tool aimed at studying compressible flow phenomena.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.

Directora: Dr. Diana Paola Duarte Duarte. Codirectora: Dr. Yuly Fernanda López Contreras

Introducción

En la actualidad, el vertiginoso avance de la tecnología, la comunicación y la información plantea un reto fundamental: aprovechar de manera óptima los recursos disponibles para gestionar el aprendizaje. En este contexto, el estudiante debe asumir un papel activo en la construcción de su conocimiento, desarrollando habilidades de autodirección y autonomía, sin dejar de lado la orientación de un guía con mayor experiencia que facilite el proceso formativo. Esta capacidad no solo se traduce en la definición de metas claras, sino también en la aplicación práctica de los conceptos aprendidos en el aula, a través de experiencias que permitan validar y contrastar la teoría. En este sentido, las prácticas de laboratorio constituyen un escenario clave dentro del proceso académico, ya que favorecen la apropiación del conocimiento, fortalecen la comprensión de fenómenos complejos y estimulan el interés del estudiante al relacionar directamente la teoría con su aplicación real.

El Laboratorio de Procesos de la Escuela de Ingeniería Química representa un espacio fundamental en la formación profesional, al ser el entorno más cercano y accesible para que los estudiantes establezcan contacto directo con equipos experimentales y contrasten sus conocimientos con la realidad industrial. Este ambiente favorece la integración de conceptos vistos en clase como los cambios de energía en sistemas cerrados, estudiados en termodinámica I. Por ello, resulta de gran importancia aprovechar los espacios de formación práctica dados por los laboratorios, garantizando experiencias satisfactorias que fomenten el trabajo en equipo, la asunción de responsabilidades y la ejecución de prácticas con información clara y precisa que asegure confianza y fluidez en los procesos.

En este marco, el presente trabajo propone el diseño y desarrollo de prácticas experimentales orientadas a fortalecer la comprensión de los equipos de turbinas de impulso y

reacción, todos enfocados en el tema de flujo compresible, concepto empleado en el campo de la industria energética en equipos como las turbinas de gas, turbina de vapor, quemadores o compresores industriales (Perry & Green, 2019). Las prácticas implementadas se centran en el análisis e interpretación de conceptos esenciales como el flujo de fluidos compresibles y la relación entre torque y potencia en turbinas. Asimismo, se presenta una herramienta virtual que facilita la consulta de contenidos teóricos, inductivos y bibliográficos, constituyéndose en un recurso complementario para el adecuado desarrollo de las prácticas y la consolidación del aprendizaje. En la Figura 1 se muestra el espacio del laboratorio empleado para el desarrollo de las prácticas experimentales, mismas prácticas que aportan una manera más visual y tangible para que los estudiantes logren integrar los conocimientos adquiridos en las aulas.

Figura 1

Vista general del Laboratorio de Procesos de la Escuela de Ingeniería Química



Las turbinas desempeñan un papel fundamental en la industria, ya que permiten transformar la energía de los fluidos en trabajo útil. Son elementos esenciales en procesos como la compresión de gases y la generación de energía. Para el ingeniero químico, representan un vínculo entre la teoría del flujo compresible y la industria. Su estudio en el laboratorio, a escala reducida, brinda al estudiante una primera aproximación práctica a fenómenos de flujo compresible, justificando su importancia en la formación de un ingeniero químico.

Actualmente, no se han implementado prácticas en esta temática de flujo compresible en el Laboratorio de Procesos I, debido a limitaciones de área disponible en el laboratorio. Este trabajo busca desarrollar prácticas para la implementación de los equipos de turbinas de impulso y reacción que se encuentran disponibles en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería Química.

Como complemento a lo anterior, este trabajo responde a la necesidad de optimizar el uso de los recursos experimentales existentes en el Laboratorio de Procesos, promoviendo su aprovechamiento pedagógico mediante el diseño de prácticas estructuradas, seguras y fundamentadas. La incorporación de las turbinas de impulso y de reacción no solo amplía el alcance de los contenidos abordados en el curso de Laboratorio de Procesos I, sino que también permite al estudiante desarrollar competencias clave asociadas al análisis de datos experimentales, la interpretación de resultados y la toma de decisiones basada en principios termodinámicos y fluidodinámicos. De esta manera, se fortalece la articulación entre la formación teórica y la práctica experimental, fomentando un aprendizaje activo y significativo que prepara al futuro ingeniero químico para enfrentar de forma crítica y responsable los desafíos propios de los procesos industriales donde el flujo compresible juega un papel determinante.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Diseñar e implementar prácticas de laboratorio y un módulo didáctico virtual sobre flujos compresibles en turbinas para el Laboratorio de Procesos I que permitan a los estudiantes de Ingeniería Química comprender y aplicar los conceptos fundamentales en relación con esta temática.

1.2 Objetivos específicos

- Diseñar prácticas de laboratorio sobre flujo compresible usando los módulos de turbinas disponibles para que los estudiantes identifiquen las principales variables operativas del proceso.
- Elaborar un manual guía para las prácticas de laboratorio sobre flujo compresible en turbinas.
- Diseñar un módulo didáctico virtual usando la plataforma Moodle para facilitar el reconocimiento y la operación de los equipos usados en las prácticas de laboratorio de flujo compresible en turbinas.
- Evaluar los modelos de prácticas desarrollados para los equipos de flujo compresible en turbinas por medio de la experiencia con estudiantes de Ingeniería Química.

2. Marco Teórico

2.1 Flujo compresible

La compresibilidad constituye un aspecto esencial en el estudio de flujos a alta velocidad, ya que variaciones significativas en la velocidad del fluido generan cambios notables en la presión. En el caso de los gases, estas variaciones se acompañan de modificaciones en la densidad (ρ) y en la temperatura (T), lo que influye directamente en su comportamiento dinámico (Çengel & Boles, 2019).

La diferencia fundamental entre los flujos compresibles e incompresibles radica en la capacidad del fluido para experimentar variaciones significativas de densidad cuando la presión cambia. En los primeros, la densidad depende de la presión y la temperatura, por lo que las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y energía deben considerar este efecto para describir adecuadamente el fenómeno (Fox, McDonald & Pritchard, 2015).

Se considera flujo compresible aquel en el que los cambios de densidad son significativos, fenómeno común en gases que se desplazan a velocidades elevadas. Su análisis requiere integrar la dinámica de fluidos y la termodinámica, disciplinas que en conjunto permiten establecer las bases teóricas para comprender, modelar y optimizar procesos donde la energía y el movimiento están estrechamente relacionados (White, 2016).

2.2 Propiedades de estancamiento

En el análisis energético de los flujos, resulta conveniente combinar la energía interna y la energía de flujo en un único término: la entalpía, este parámetro representa la energía total de un fluido cuando las energías cinética y potencial son despreciables (Moran, Shapiro, Boettner & Bailey, 2018).

En flujos de alta velocidad, como los presentes en motores de propulsión o turbinas, la energía cinética adquiere relevancia y no puede ser ignorada. En estos casos, se define una entalpía de “estancamiento”. Este concepto permite analizar el intercambio energético sin necesidad de conocer las condiciones locales exactas del flujo, facilitando el estudio termodinámico de sistemas donde la velocidad del gas varía considerablemente (Sonntag, Borgnakke & Van Wylen, 2021).

2.3 Flujo isentrópico unidimensional

En los dispositivos empleados en sistemas de flujo compresible, como toberas, difusores y turbinas, el comportamiento del fluido se ve afectado por variaciones significativas en la presión y la temperatura. En estos casos, el análisis puede simplificarse al asumir un flujo isentrópico y unidimensional, lo cual implica que la entropía permanece constante y que las propiedades del fluido cambian únicamente a lo largo de una dirección principal. Bajo esta condición idealizada, no existen pérdidas por fricción ni efectos disipativos que modifiquen la energía del sistema, permitiendo describir el proceso a partir de relaciones termodinámicas reversibles (Anderson, 2017).

Para ilustrar este comportamiento, puede considerarse el flujo de un gas a través de una tubería o conducto de sección transversal constante bajo condiciones isentrópicas. En este escenario, el caudal másico se mantiene constante y la presión varía debido a los cambios en la velocidad del fluido (asumiendo que la fricción no produce cambios significativos en el proceso). Cuando el gas acelera, parte de su energía interna se transforma en energía cinética; por lo tanto, la temperatura disminuye de manera coherente con la conservación de la energía total del flujo. Esta relación entre aceleración, reducción de temperatura y variación de presión es característica de los procesos isentrópicos en gases ideales (Fox et al., 2015).

Este principio se extiende a geometrías más complejas, como las toberas convergente-divergentes, utilizadas en aplicaciones donde se busca acelerar el gas hasta alcanzar o superar la velocidad del sonido. En la zona de menor área de la tobera, denominada garganta, el número de Mach es igual a uno, siendo el número de Mach la razón entre la velocidad de un objeto o un flujo y la velocidad del sonido en el mismo medio, este número indica si un flujo es de velocidad subsónica, sónica o supersónica (Anderson, 2017).

Figura 2

Visualización de una tobera convergente-divergentes



Nota. Tomado de [Estudio De Una Tobera De Flujo Compresible](#). Raúl Sanabria

Reviriego. (2022)

A partir de este punto, el área vuelve a aumentar, la densidad disminuye rápidamente y la velocidad del fluido alcanza valores supersónicos. Este comportamiento constituye la base del funcionamiento de los componentes de turbinas y sistemas de propulsión, donde la expansión controlada del gas permite transformar su energía térmica en trabajo útil (Yunus & Rogers, 2020), las ecuaciones para el balance de masa y energía para este sistema se muestran a continuación:

Para el balance de masa se tiene que:

$$\dot{m} = \rho AV \quad (\text{Ec. 1})$$

donde:

- ρ = densidad del gas [kg/m^3]

- A = área de la sección transversal [m^2]
- V = velocidad del flujo [m/s]

Esta ecuación se puede modificar para incluir la variación en las propiedades del fluido a lo largo de la tobera, dando como resultado:

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dV}{v} + \frac{dA}{A} = 0 \quad (\text{Ec. 2})$$

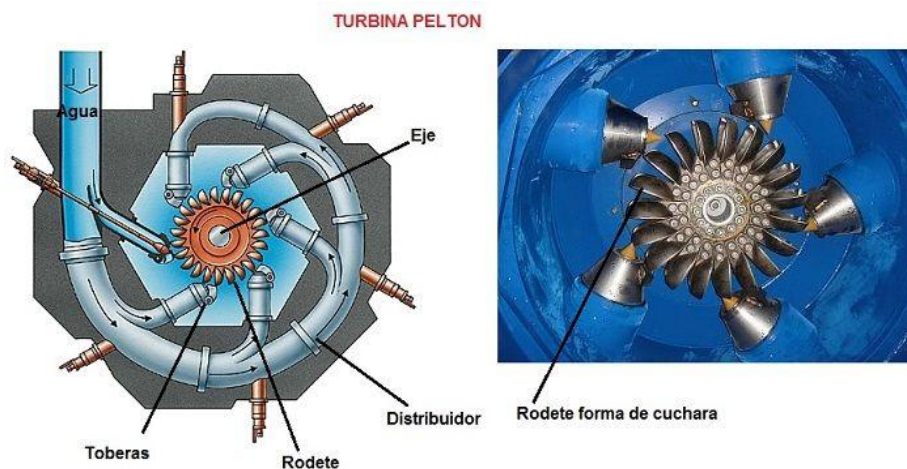
La ecuación 2 emplea las mismas unidades que la ecuación 1.

2.4 Turbina de acción o impulso

Las turbinas de acción o de impulso son aquellas en las que el fluido no experimenta un cambio de presión significativo al atravesar el eje central provisto de aspas por donde incide el flujo de aire, generando así el movimiento de la turbina. En este tipo de dispositivos, la expansión del fluido ocurre antes de llegar al eje central, y la presión a la salida se aproxima a la atmosférica. (Dixon & Hall, 2010).

Figura 3

Ejemplo gráfico turbina de impulso



Nota. Tomado de [Turbinas hidráulicas](#).(2019).

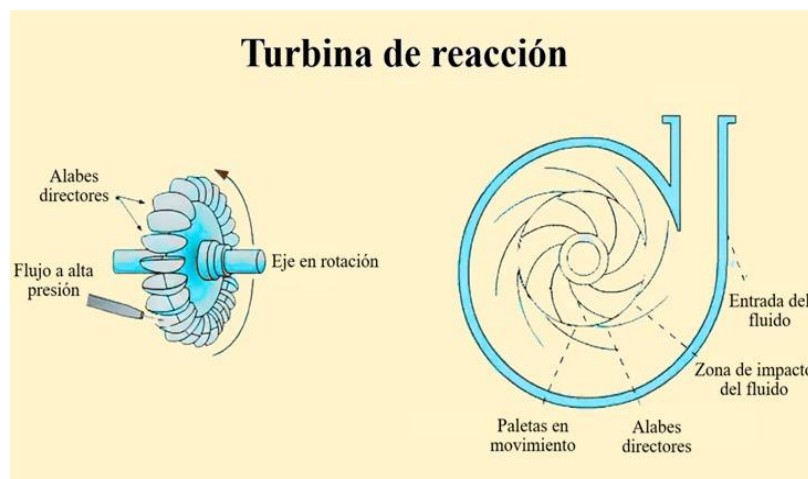
Debido a su diseño sencillo y a su alta eficiencia en la conversión de energía cinética en energía mecánica, las turbinas de impulso se emplean ampliamente en la industria. Entre sus principales aplicaciones se destacan la propulsión de embarcaciones mediante turbinas de vapor, la generación eléctrica en ciclos de gas, el accionamiento de bombas y compresores, así como su uso en sistemas de refrigeración y en ciertos diseños de turbinas eólicas. Estas aplicaciones reflejan la versatilidad de las turbinas de acción para transformar la energía del fluido en trabajo mecánico en diferentes contextos industriales (Connor, 2020; Jansen, 2019; Khalil & Sayed, 2019).

2.5 Turbina de reacción

En las turbinas de reacción el fluido propulsado sufre un cambio de presión considerable en su paso por el rodete con una presión inicial superior a la atmosférica y a la salida de éste se genera una depresión. Se caracterizan por tener una tubería de aspiración, la cual une la salida del rodete con la zona de descarga del fluido. Estas turbinas se pueden dividir con respecto a la configuración de los álabes. Existen tuberías de álabes fijos y turbinas con álabes orientables (Munson, Bruce, Okiishi & Wade, 2009; Wragg, 1974).

Figura 4

Ejemplo gráfico turbina de reacción



Nota. Adaptado de [The engineering choice](#), Shivansh Sabhadiya (2024).

Las turbinas de reacción tienen una amplia gama de aplicaciones en distintos sectores industriales y energéticos. Se emplean principalmente en la generación de energía eléctrica, especialmente en plantas hidroeléctricas, donde el movimiento del agua acciona la turbina para producir electricidad. También son utilizadas en la propulsión marítima de buques y submarinos, aprovechando el agua como fluido de trabajo, y en sistemas de climatización y refrigeración para aumentar la eficiencia energética. En la industria química y petroquímica, impulsan fluidos en procesos como la destilación y la mezcla, mientras que en plantas de energía térmica contribuyen a mejorar la conversión de energía mediante el uso de vapor. Además, participan en sistemas de recuperación de energía, aprovechando el calor o la energía residual de procesos industriales, y en algunos aerogeneradores que aplican principios de reacción para optimizar la producción de energía eólica (EMS Power Machines, 2024; Elsevier, 2021).

Adicionalmente, el desempeño de las turbinas de reacción está estrechamente ligado al control de las condiciones de operación, tales como el caudal, la presión y la geometría de los álabes, ya que estas variables influyen directamente en la eficiencia hidráulica y en la cantidad de energía transformada en trabajo mecánico. A diferencia de las turbinas de impulso, en las que predomina la energía cinética del fluido, en las turbinas de reacción la conversión energética resulta de la combinación entre la variación de presión y la aceleración del fluido. Esta característica hace que su análisis requiera una comprensión integral de los principios de la mecánica de fluidos y la termodinámica, lo cual resalta su valor didáctico en el ámbito académico. En el contexto de laboratorio, el estudio de estas turbinas permite a los estudiantes observar de manera directa la relación entre las variables operativas y la respuesta del sistema, facilitando la interpretación de fenómenos reales que son ampliamente aplicados en procesos industriales y energéticos. (Munson, Bruce, Okiishi & Wade, 2009)

3. Estado del arte

El trabajo en laboratorios representa un pilar fundamental en la formación de los estudiantes de ingeniería, al facilitar la integración entre los conocimientos teóricos y las habilidades prácticas, promoviendo así un aprendizaje más significativo y aplicado. De acuerdo con Brinson (2015), los laboratorios permiten a los estudiantes desarrollar competencias técnicas, cognitivas y actitudinales que fortalecen su comprensión de los fenómenos físicos y su capacidad para resolver problemas reales. En este sentido, la literatura reciente ha demostrado que la eficacia del aprendizaje no depende exclusivamente del formato del laboratorio, presencial, remoto o virtual, sino de la calidad del diseño pedagógico que lo acompaña (Li et al., 2024). Estudios comparativos han revelado que, cuando las actividades experimentales están adecuadamente guiadas, incluyendo retroalimentación continua y fomentando la reflexión, los resultados de aprendizaje pueden ser equivalentes entre los diferentes tipos de laboratorio (Mulwijk et al., 2023).

No obstante, los laboratorios presenciales continúan mostrando ventajas, como el desarrollo de destrezas manuales, la familiaridad con la instrumentación real y la toma de decisiones bajo condiciones experimentales auténticas (Van den Beemt et al., 2023). Por otro lado, los entornos virtuales y remotos han cobrado gran relevancia en los últimos años, especialmente a raíz de la pandemia de Covid-19, ya que permiten ampliar el acceso a experiencias experimentales sin las limitaciones de espacio o recursos físicos (Gericke et al., 2023). Estos entornos, cuando son acompañados por estrategias de aprendizaje activo y un adecuado acompañamiento docente, pueden alcanzar niveles de comprensión conceptual y de desempeño similares a los laboratorios tradicionales (Li et al., 2024).

A pesar de los avances en el diseño y la implementación de laboratorios virtuales y remotos, la literatura identifica vacíos en la medición de la transferencia de las habilidades adquiridas hacia contextos profesionales reales, así como una limitada producción de investigaciones centradas en entornos latinoamericanos, donde factores tecnológicos e institucionales pueden influir en la efectividad del aprendizaje (Brinson, 2015; Van den Beemt et al., 2023). En consecuencia, el trabajo experimental, sea físico o digital, continúa siendo una herramienta esencial para el desarrollo de competencias en ingeniería, siempre que se enmarque en un enfoque instruccional estructurado que promueva la autonomía, la reflexión crítica y la aplicación práctica de los conocimientos adquiridos.

En 2018, en la Escuela de Ingeniería Química se desarrolló un trabajo de grado sobre flujo compresible, en el cual se implementaron prácticas y un módulo didáctico virtual para el estudio del flujo de aire a través de un sistema de tuberías y boquillas (García & Muñoz, 2018). En el proyecto en mención se diseñó una página web como material de apoyo virtual para la realización de las prácticas de flujo compresible en tuberías y boquillas, así como las respectivas guías para la operación de los equipos abordados por ese trabajo. Actualmente, se pretende implementar prácticas adicionales en turbinas de impulso y de reacción para la asignatura de Laboratorio de Procesos I, que permitan fortalecer la comprensión de los principios termodinámicos y fluidodinámicos involucrados, así como fomentar el desarrollo de habilidades experimentales en los estudiantes de Ingeniería Química.

Además del contexto particular del Laboratorio de Procesos de la UIS, el estado del arte a nivel nacional muestra que otras universidades en Colombia también han incorporado equipos de turbinas y máquinas hidráulicas en sus espacios educativos y de investigación. Por ejemplo, la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito cuenta con un laboratorio de turbo maquinaria e

hidráulica de potencia donde se instalan y operan diversos modelos de turbinas hidráulicas para el análisis experimental de curvas características y medición de parámetros como caudal, presión y potencia, lo que permite a los estudiantes familiarizarse con la operación real de estos equipos y sus comportamientos dinámicos en condiciones controladas (Escuela Ingeniería Julio Garavito, 2022). Asimismo, en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas de la Universidad Tecnológica de Pereira se enseña la operación y confrontación experimental de turbinas y otras máquinas de fluidos, confrontando resultados prácticos con conceptos teóricos fundamentales en mecánica de fluidos e hidráulica (Universidad tecnológica de Pereira, 2020). A nivel investigativo, trabajos recientes desarrollados en la Universidad de Antioquia han abordado la caracterización y optimización de turbinas aplicadas a energía hidrocínética, integrando métodos experimentales y numéricos, lo que evidencia el interés creciente por este tipo de sistemas en la academia colombiana (Universidad de Antioquia, 2021). Este panorama evidencia que la implementación y uso de equipos de turbinas como recurso didáctico y científico está en expansión en el país, contribuyendo a reforzar la formación de ingenieros con competencias prácticas para enfrentar retos en campos energéticos e industriales.

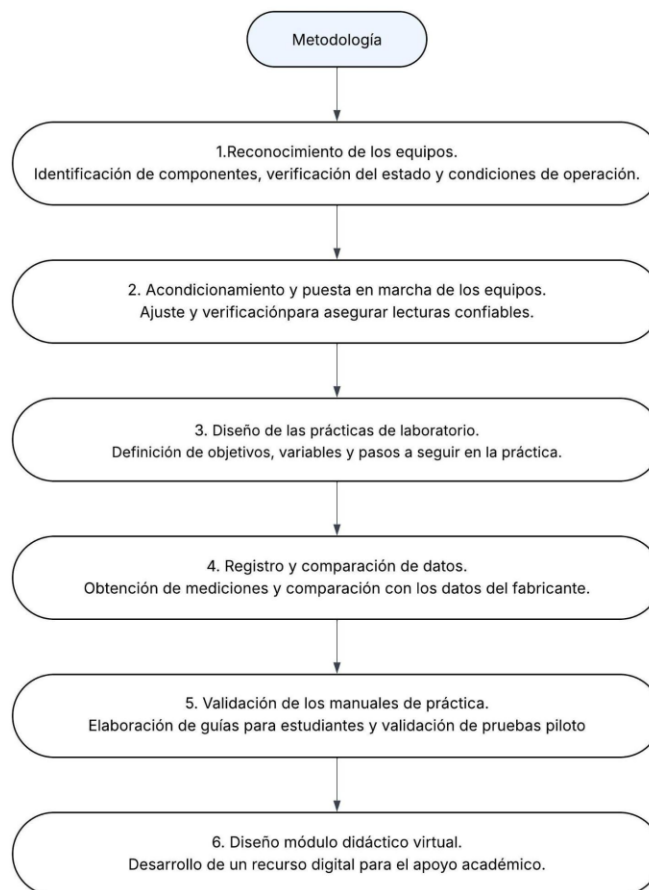
En síntesis, el estado del arte evidencia que el uso de laboratorios experimentales apoyados en herramientas virtuales constituye una tendencia consolidada en la formación en ingeniería, tanto a nivel internacional como nacional. Las universidades han avanzado en la implementación de equipos de turbinas y máquinas de fluidos como recursos didácticos clave para la comprensión de fenómenos complejos, destacándose la importancia de integrar prácticas presenciales con entornos digitales que faciliten el acceso a la información y el aprendizaje autónomo.

4. Metodología

La metodología empleada para llevar a cabo el diseño de las prácticas de flujo compresible en turbinas de impulso y de reacción se estructuró en una secuencia ordenada de etapas que abarca tanto la verificación operativa de los equipos como la elaboración de instructivos claros y funcionales (Figura 5). El proceso incluyó la puesta en marcha de los módulos, el diseño experimental de las prácticas y el desarrollo de los manuales, además de una etapa de prueba de los procedimientos operativos realizada con la participación de varios grupos de estudiantes con acompañamiento docente y técnico de la Escuela de Ingeniería Química.

Figura 5

Diagrama de flujo general de la metodología



Adicionalmente, se desarrolló una herramienta virtual de información con respecto a la práctica para fortalecer la preparación y comprensión de los estudiantes. Esta metodología constituye el primer paso hacia la formalización de un procedimiento sistemático para el desarrollo de estas prácticas experimentales en el trabajo de grado, asegurando la confiabilidad de los resultados y fomentando la participación de los estudiantes con el fin de lograr una retroalimentación objetiva. A continuación, se describe cada una de las etapas de desarrollo de este trabajo.

4.1 Reconocimiento de los equipos

Se llevó a cabo la identificación y reconocimiento de la información teórica detallada en los manuales suministrados por el proveedor, la compañía P.A HILTON LIMITED, así como de las partes integrales de cada equipo para entender su funcionamiento y operación. Se revisaron los manuales de los equipos para identificar información relacionada con las partes y operación de los distintos módulos; y con esto revisar también los requerimientos de aire de entrada necesarios para la operación de las turbinas.

4.2 Acondicionamiento y puesta en marcha de los equipos

Se llevó a cabo una revisión general de los equipos con el propósito de verificar su estado mecánico y funcional antes de su operación. Como parte de este procedimiento, se inspeccionaron los componentes estructurales y de unión, se desarmaron los equipos en busca de posibles fallas asociadas al desgaste, desajustes o acumulación de suciedad. Posteriormente, se efectuaron labores de limpieza, ajuste y reensamble de las piezas, siguiendo de manera ordenada los procedimientos establecidos en los manuales técnicos del fabricante. Estas actividades se desarrollaron como parte de un mantenimiento preventivo, orientado a restablecer las condiciones óptimas de operación y asegurar la confiabilidad y seguridad de los equipos durante las prácticas experimentales.

Figura 6

Mantenimiento y ensamble de la turbina de impulso



Se realizaron pruebas piloto por parte de los autores del trabajo de grado con el fin de evaluar el estado funcional de los dispositivos y sus variables operativas. Dentro de estas pruebas piloto se llevó a cabo el proceso de lubricación necesario para el correcto funcionamiento de los dispositivos.

Figura 7

Mantenimiento y ensamble de la turbina de reacción



Para determinar los rangos operativos y la reproducibilidad de los resultados experimentales, se pusieron en marcha las turbinas a presiones de entrada de 20, 30, 40 y 50 [kN/m²]. Se tomaron los datos resultantes de revoluciones por minuto de la turbina y torque, para luego repetir estas pruebas en un total de tres veces.

4.3 Diseño de las prácticas de laboratorio

Para el diseño de las prácticas de laboratorio, se tomaron como referencia las pruebas mostradas en los manuales de operación de los equipos, a partir de los cuales se definió el paso a paso de los experimentos a seguir en el laboratorio.

Se realizaron las guías de práctica, una para la turbina de impulso y una para la turbina de reacción, se definió el número de estudiantes (3 por grupo de trabajo), se eligieron los rangos de variables de entrada que se utilizaran para trabajar en cada grupo.

4.4 Comparación de datos

Se compararon los valores experimentales obtenidos durante el desarrollo de las prácticas realizadas por los autores y los datos de referencia suministrados por el fabricante de los equipos, con estos datos se calcularon las variables de respuesta para evaluar el comportamiento de las turbinas bajo diferentes condiciones operativas.

Cada una de las siguientes fórmulas corresponde a una variable de respuesta en las distintas etapas de las prácticas, los datos necesarios para realizar los cálculos se obtienen mediante mediciones directas con los equipos, todas las fórmulas necesarias para realizar los cálculos y transformaciones de unidades están incluidas en los anexos B y C.

$$T = Fr_{eje} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

- T = Torque [Nm]
- F = Fuerza de frenado [N]
- r_{eje} = Radio del eje, valor constante de 0.0145 [m]

Para obtener la variable de respuesta de potencia del eje y mantener la consistencia dimensional es necesario incluir un factor de conversión para transformar la velocidad angular en unidades de rev/min a rad/s, por lo tanto, se obtiene:

$$P_s = T \frac{2\pi}{60} \omega \quad (\text{Ec.4})$$

Donde :

- P_s = Potencia del eje [W]
- T = Torque [Nm]
- ω = Velocidad angular [rev/min]

$$Q = \dot{m}\Delta h + P_s \quad (\text{Ec.5})$$

$$\Delta h = C_p(t_2 - t_1) \quad (\text{Ec.6})$$

Donde:

- Q = Calor generado por el sistema [W]
- \dot{m} = Flujo de aire en el equipo [kg/s]
- Δh = Cambio de la entalpia [kJ/kg]
- P_s = Potencia del eje [W]
- C_p = Capacidad calorífica del aire, con un valor fijo de $1.004 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$

4.5 Validación de los manuales de práctica

Para validar el diseño de las prácticas se realizaron pruebas del procedimiento operativo de las turbinas con estudiantes de la Escuela de Ingeniería Química, con el propósito de verificar la coherencia y efectividad de las guías. En esta etapa, se evaluó la claridad de las instrucciones, la operatividad de los equipos y la pertinencia de los tiempos establecidos para cada actividad mediante la interacción directa, así como la retroalimentación de los estudiantes que realizaron estas pruebas; a su vez se compararon los datos con los obtenidos en las pruebas piloto para determinar la precisión de estos resultados.

4.6 Herramienta de apoyo virtual

Se planteó el desarrollo de guías de información virtual con el propósito de garantizar que los estudiantes tengan los conocimientos básicos necesarios para la ejecución de las prácticas. Se planteó presentar los materiales de manera clara y accesible, facilitando el reconocimiento de los equipos involucrados y proporcionando mayor precisión en el desarrollo de las actividades por parte de los estudiantes.

5. Resultados

5.1 Reconocimiento de los equipos

Para esta etapa preliminar al diseño de los manuales de práctica, se utilizó el manual de funcionamiento general de los equipos provisto por el fabricante. Se elaboraron guías de autoría propia, las cuales describen los elementos que componen los equipos y el funcionamiento paso a paso de los distintos equipos: módulo de conexión principal, turbina de impulso y turbina de reacción.

Figura 8

Vista frontal del módulo principal de conexión



La unidad de conexión principal se encarga de suministrar el aire a los módulos de forma individual, es decir, cada módulo de turbina se conecta de forma independiente y se utiliza para el desarrollo de sus respectivas prácticas experimentales. Para facilitar la comprensión por parte de los estudiantes, se incluyó en los manuales de práctica la identificación numérica de cada uno de los componentes del sistema. En el anexo A se puede encontrar la guía de conexión de flujo compresible para la unidad principal, en el anexo B se encuentra la guía para la práctica de la turbina de impulso y en el anexo C se ubica la guía para la práctica de la turbina de reacción. El aire que alimenta estas unidades proviene del compresor SULLAIR, con una capacidad máxima de 120 psi, ubicado en el Laboratorio de Procesos.

De manera general, ambos módulos presentan estructuras similares; sin embargo, la turbina de impulso cuenta con cuatro válvulas de cierre parcial de flujo que permiten un mayor control del

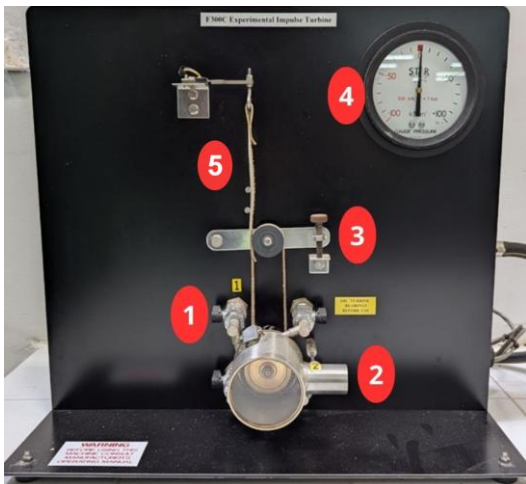
flujo de aire de entrada. En contraste, la turbina de reacción opera con una única entrada de aire, lo que provoca un choque directo y una reacción de movimiento al interior de la turbina.

El rango de presión de operación recomendado por el fabricante para los módulos de turbinas de impulso y de reacción se encuentra entre 10 kPa y 50 kPa, lo cual permite obtener condiciones estables y resultados confiables durante los ensayos. Cabe destacar que los indicadores de todos los equipos muestran unidades de presión en unidades de kN/m^2 ; por esta razón, en las guías de los Anexos B y C se consideró pertinente mantener dicha nomenclatura, con el fin de evitar confusiones en los estudiantes durante la operación de los equipos.

En la Tabla 1 se muestran los resultados de la identificación inicial de ambas turbinas, donde se describen las principales partes que componen cada módulo. La correcta identificación de cada uno de los elementos que componen los equipos es fundamental para el adecuado desarrollo de las prácticas experimentales.

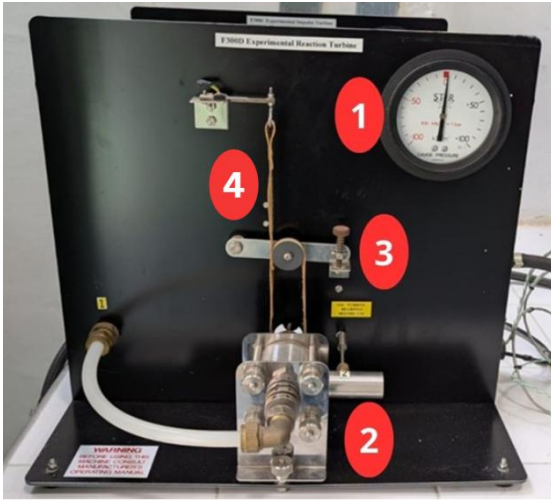
Tabla 1

Vista frontal y nomenclatura de las turbinas de impulso y reacción



Elementos de la turbina de impulso:

1. Válvulas de cierre parcial de la boquilla de entrada
 2. Salida de aire a la unidad de conexión principal
 3. Tornillo de ajuste para la polea de frenado
 4. Medidor de presión de entrada
 5. Polea de frenado
-

**Elementos de la turbina de reacción:**

1. Medidor de presión de entrada
2. Salida de aire a la unidad de conexión principal
3. Tornillo de ajuste para la polea de frenado
4. Polea de frenado

5.2 Acondicionamiento y puesta en marcha de los equipos

En esta etapa se llevaron a cabo actividades para recuperar la funcionalidad de los equipos y garantizar su correcta puesta en marcha. Para ello, se realizó inicialmente una revisión y ajuste de sus elementos estructurales. En el caso de la turbina de reacción, fue necesario desmontar la parte frontal para ajustar adecuadamente la tuerca y contratuerca principales, posteriormente el equipo fue ensamblado nuevamente. Por su parte, la turbina de impulso se desarmó completamente con el fin de reajustar los empaques de sellado, los cuales se encontraban mal posicionados. Las fallas identificadas en ambos equipos se deben principalmente al largo periodo de inactividad en el laboratorio lo que ocasionó acumulación de suciedad, pérdidas de presión en las uniones y desajustes en el ensamblaje. La corrección de estas condiciones se logró mediante una limpieza adecuada y el reensamblaje de los equipos siguiendo estrictamente los procedimientos establecidos en los manuales operativos del fabricante, lo que permitió restablecer su correcto funcionamiento.

Una vez que los equipos alcanzaron condiciones operativas, se realizaron pruebas piloto con el fin de verificar su estado funcional y determinar la viabilidad de realizar una práctica piloto en cada módulo. Al realizar estas pruebas se evidenció la necesidad de un ajuste completo para las

dos turbinas, ya que el estado en el que estas se encontraban no permitió un acercamiento a los resultados referenciados en el manual de operación.

Con esta información se realizó un ajuste de la polea de frenado en ambos módulos. Este proceso consistió en ajustar la posición de la polea y verificar la lectura en el indicador digital, el cual se encuentra en el módulo de conexión principal, este procedimiento se encuentra descrito en detalle en el Anexo A, última sección de la Figura A.1. Esta calibración es indispensable antes de cada práctica, ya que se determinó que la polea es altamente sensible a cambios de presión y puede modificar su posición inicial, generando lecturas erróneas del sensor de tensión si no se corrige adecuadamente.

De igual manera, se definió el procedimiento de lubricación de los módulos, el cual debe realizarse al inicio de cada práctica y tras cada hora de operación. Esta actividad puede ser llevada a cabo por los estudiantes, y asegura que los componentes móviles operen sin fricciones excesivas que alteren los resultados. El procedimiento de lubricación se encuentra detallado en cada una de las guías (Anexos B y C).

5.3 Definición de las condiciones y rangos de las variables de operación

Una vez que los equipos se encontraron en condiciones operativas, se identificaron y definieron de manera explícita los rangos de las variables de entrada dentro de los cuales los equipos pueden operar de manera estable. Esto permitirá que las prácticas experimentales diseñadas no presenten inconvenientes técnicos, evitando la operación en rangos donde los equipos no garantizan estabilidad en la lectura de los datos.

En la Tabla 2 se muestran las variables de entrada definidas para ambos módulos, junto con los rangos de operación adecuados para cada una de ellas. De estos intervalos se seleccionan los valores fijos de las variables de entrada que pueden asignarse a los distintos grupos de trabajo

de estudiantes y garantizan condiciones de operación estables, en las cuales las lecturas de los datos se realizan de manera confiable.

Tabla 2

Rangos de operación definidos para ambos equipos

Variable de entrada	Rango de operación
Presión de entrada	10 - 50 kPa
Velocidad angular de entrada	5000 - 30000 rev/min

Los límites de las condiciones de operación se determinaron experimentalmente, al observar que, dentro de cada rango definido, la respuesta del sistema presentaba una mayor estabilidad frente a variaciones operativas. Este comportamiento coincide con las recomendaciones generales de operación del fabricante y con los rangos de operación de los módulos de boquillas y tuberías obtenidos por estudios previos (García & Muñoz, 2018).

En las prácticas desarrolladas, los equipos muestran en sus indicadores información relevante necesaria para calcular las variables de salida, estos datos son: temperatura del aire de salida, el caudal de aire de salida, la tensión aplicada en la polea de freno y la velocidad angular de la turbina. A partir de estos datos experimentales medidos en cada etapa de la práctica, se pueden calcular de las variables de salida del sistema las cuales son: el torque desarrollado por la turbina, la potencia mecánica del eje, el consumo específico de aire, la potencia útil y la eficiencia isentrópica, usando estos datos calculados es posible analizar el comportamiento típico de una turbina bajo diferentes condiciones operativas.

Estas variables se seleccionaron por su relevancia en la caracterización del comportamiento dinámico de las turbinas y por su relación directa con las condiciones de entrada, lo que permite evaluar la eficiencia y el desempeño de los equipos bajo diferentes escenarios experimentales.

5.4 Diseño de guías pedagógicas y manuales de operación

Como preámbulo a los instructivos secuenciales para la operación de los equipos se diseñaron criterios pedagógicos que servirán como punto de partida para el proceso de aprendizaje del estudiante durante las prácticas de laboratorio. En este sentido, se propuso un conjunto de microcompetencias, estrategias de enseñanza y aprendizaje, así como criterios de evaluación para estos laboratorios. Estos elementos se incluyeron en la parte inicial de cada una de las guías, presentadas en forma de tabla como introducción a los instructivos secuenciales de operación de los equipos.

Una vez definidos los parámetros y rangos de operación, así como las herramientas pedagógicas previamente mencionadas, se elaboraron los manuales de operación, uno para cada turbina. Estos manuales se estructuraron en distintas etapas operativas que permiten modificar las variables de entrada y observar su efecto sobre las variables de respuesta.

En el caso de la turbina de impulso, se diseñaron cuatro etapas para el desarrollo de cada práctica, cada una propuesta de la siguiente forma (el instructivo detallado para cada etapa según el tipo de turbina se encuentra en las guías en los Anexos B y C):

- Etapa 1: para esta etapa se selecciona una presión de entrada para trabajar, esto produce una velocidad angular en el eje que será modificada usando un tornillo que tensiona una polea de freno, este proceso se repite en diferentes momentos para reducir progresivamente la velocidad angular hasta detener la turbina y se realiza una toma de datos para cada momento, esto permite calcular las siguientes variables de respuesta: torque y potencia del eje, para finalmente graficar y analizar el comportamiento de estas variables.
- Etapa 2: en esta etapa se define previamente una velocidad angular fija de operación como condición de trabajo. Manteniendo constante esta velocidad, se selecciona una presión de

entrada y se ajusta progresivamente la apertura de las boquillas de la turbina, lo que modifica el caudal de aire que atraviesa el equipo. Para cada configuración se realiza la toma de datos correspondiente, aplicando el control mediante la polea de freno para conservar la velocidad angular estable. Con los valores registrados se calculan las siguientes variables de respuesta: consumo específico de aire y potencia del eje. Finalmente se grafican estas dos variables de respuesta y se analiza su interacción.

- Etapa 3: en esta etapa se fija nuevamente una presión de entrada fija, con esto la velocidad angular resultante se reduce a la mitad mediante el ajuste de la polea de freno y se registran los datos indicados por los instrumentos del equipo. Con la información de los indicadores se calculan las siguientes variables de respuesta asociadas al desempeño de la turbina: potencia del eje, cambio de entalpia y el calor generado por el sistema.
- Etapa 4: similar a la etapa anterior, se selecciona una presión de entrada fija a trabajar y se opera el equipo de tal forma que se obtenga nuevamente la mitad de la velocidad angular inicial, posteriormente se calcula una serie diferente de variables de respuesta: temperatura absoluta de entrada, presión absoluta de entrada, relación de presión en la turbina, temperatura de salida después de la expansión isoentrópica, índice del cambio de entalpia y eficacia isoentrópicas externa.

Estas etapas son diferentes para la turbina de reacción, dichas etapas y las ya mencionadas para la turbina de impulso se describen con mayor detalle y en forma procedimental en las guías ubicadas en los Anexos B y C, estas guías incluyen todas las fórmulas necesarias para calcular las variables de respuesta, así como la información adicional necesaria para algunos cálculos, como el radio del eje o la capacidad calorífica del aire.

Para aplicar estas guías de laboratorio, se diseñaron seis prácticas experimentales distintas para cada turbina con el fin de ser asignadas a diferentes grupos de trabajo. En la Tabla 3 se muestra la primera de estas prácticas experimentales (por cuestiones de espacio las demás tablas se añaden en el Anexo D), donde se observan los valores asignados de entrada para cada etapa, las variables a medir, ajustar y calcular.

Tabla 3

Etapa 1 de la práctica 1 propuesta para la turbina de impulso

Etapa 1: Relación entre torque y potencia con la velocidad angular					
Presión de trabajo 10 [kPa]					
Ajustar: Tornillo de freno según procedimiento (Anexo B y C)		Medir		Calcular	
Práctica	Momento	Fuerza de freno [N]	Velocidad angular, ω [rev/min]	Potencia del eje [Watts]	Torque [Nm]
1	0	F0	$\omega_{m\acute{a}x}$	Ps0	T0
	1	F1	85% $\omega_{m\acute{a}x}$	Ps1	T1
	2	F2	70% $\omega_{m\acute{a}x}$	Ps2	T2
	3	F3	55% $\omega_{m\acute{a}x}$	Ps3	T3
	4	F4	40% $\omega_{m\acute{a}x}$	Ps4	T4
	5	F5	25% $\omega_{m\acute{a}x}$	Ps5	T5
	6	F6	10% $\omega_{m\acute{a}x}$	Ps6	T6
	7	F7	0% $\omega_{m\acute{a}x}$	Ps7	T7

Tabla 4*Etapa 2 de la práctica 1 propuesta para la turbina de impulso*

Etapa 2: Consumo de aire específico según el impulso inicial y el número de válvulas.					
Velocidad angular $\omega = 22000$ [rev/min]					
Ajustar		Medir		Calcular	
Número de válvulas de cierre parcial abiertas	Presión de entrada [kPa]	Caudal de salida aire, \dot{m} [kg/s]	Fuerza del freno, F [N]	Potencia del eje, Ps [Watts]	Consumo específico del aire, CEA [kg/kJ]
4	50	$\dot{m}1$	F1	Ps 1	CEA 1
4	35	$\dot{m}2$	F2	Ps 2	CEA 2
3	50	$\dot{m}3$	F3	Ps 3	CEA 3
3	35	$\dot{m}4$	F4	Ps 4	CEA 4
2	50	$\dot{m}5$	F5	Ps 5	CEA 5
2	35	$\dot{m}6$	F6	Ps 6	CEA 6
1	50	$\dot{m}7$	F7	Ps 7	CEA 7
1	35	$\dot{m}8$	F8	Ps 8	CEA 8

Tabla 5*Etapa 3 de la práctica 1 propuesta para la turbina de impulso*

Etapa 3: Aplicación de la primera ley de la termodinámica a un sistema abierto sencillo sometido a un caudal constante.		
Presión de trabajo 50 [kPa]		
Ajustar	Medir	Calcular
Velocidad angular, ω [rev/min]	Fuerza del freno [N]	Potencia del eje [Watts]
Hasta alcanzar un 50% de $\omega_{m\acute{a}x}$	Temperatura entrada y Salida [°C]	Cambo de entalpía, ΔH [kJ/kg]
		Calor generado por el sistema, Q [W]

Tabla 6*Etapa 4 de la práctica 1 propuesta para la turbina de impulso*

Etapa 4: Determinación de la eficacia isentrópica de una turbina.				
Presión de trabajo 40 [kPa]				
Ajustar	Medir			Calcular
Velocidad angular ω [rev/min]	Fuerza del freno [N]	Potencia del eje, Ps [W]	Relación de presión de la turbina, Rp	
Hasta alcanzar un 50% de $\omega_{m\acute{a}x}$	Temperatura entrada [°C]	Temperatura absoluta de entrada, t_{e1} [°K]	Temperatura de salida después de la Expansión isoentrópica, T_y [°K]	Eficacia isentrópica externa, η
		Presión absoluta de entrada, Pa [kPa]	Índice del cambio de entalpía isentrópico, H [W]	

5.5 Casos base y comparación con los datos de referencia

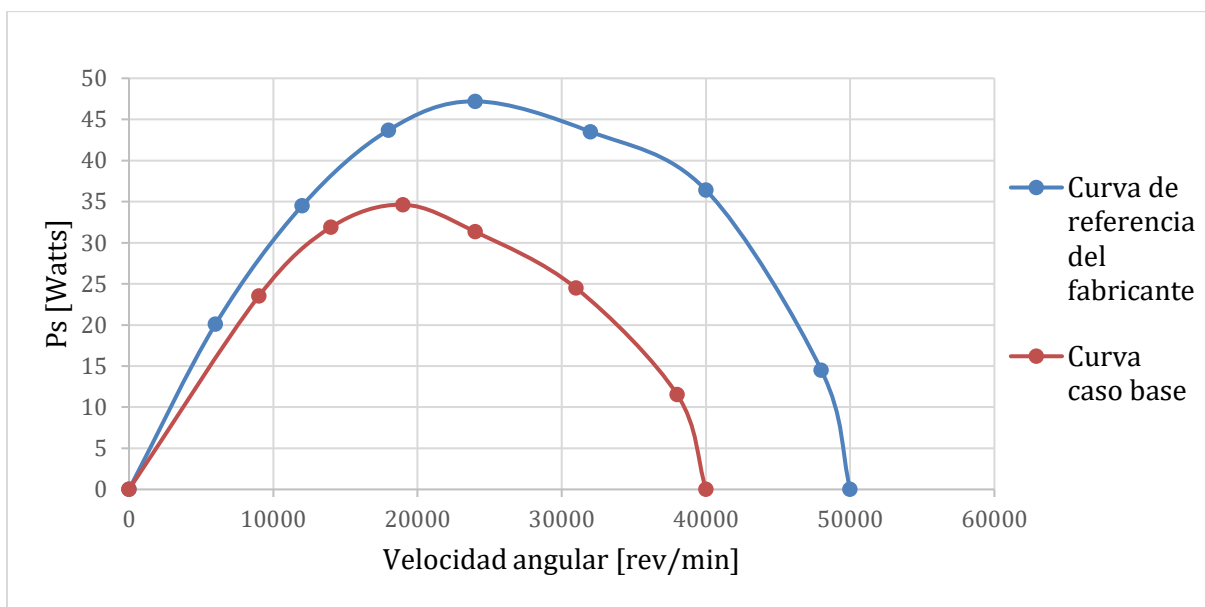
Tras la construcción de las guías de operación, se realizó una prueba para cada turbina por parte de los autores, donde se comprobó si los datos obtenidos eran acordes a los resultados propuestos por el fabricante. Estas pruebas iniciales, denominadas casos base, sirvieron como punto de partida para validar la coherencia de los resultados de operación de cada turbina, así como la legibilidad y la coherencia estructural de las instrucciones anteriormente escritas en las guías de operación.

Al realizar estas pruebas se evidenció que las turbinas tenían un correcto estado funcional y las prácticas se pudieron llevar a cabo sin ningún inconveniente técnico, en esta sección se

presentan los resultados únicamente para la etapa inicial de la práctica en la turbina de impulso (etapa 1, relación entre torque y potencia con la velocidad angular), los demás resultados obtenidos se incluyen en el anexo D. En la Figura 9 se presenta la comparación de estos resultados obtenidos en el caso base con los propuestos en el manual del fabricante.

Figura 9

Comparación de los datos de referencia y los obtenidos durante el caso base para la velocidad angular y potencia del eje en la turbina de impulso



Del análisis comparativo entre la curva de referencia del fabricante y la curva base obtenida experimentalmente se observa una dispersión apreciable en los valores de potencia del eje para velocidades angulares similares. En la zona de operación media, donde ambas curvas alcanzan su máximo, la desviación se encuentra aproximadamente entre el 25% y el 35%, mientras que a velocidades angulares más elevadas esta desviación aumenta, superando en algunos puntos el 45% debido a una caída más temprana de la potencia en la curva experimental. Considerando todo el rango común de operación, la desviación promedio puede estimarse del orden del 30% al 40%. No obstante, ambas curvas mantienen la misma tendencia general, caracterizada por un incremento

inicial de la potencia con la velocidad angular hasta alcanzar un valor máximo, seguido de un descenso progresivo, lo que confirma que el fenómeno físico se reproduce adecuadamente en el laboratorio y que las diferencias cuantitativas observadas no comprometen la posibilidad de estudiar el fenómeno físico involucrado.

Esta práctica en particular tiene más desviación de lo que se podría esperar para las prácticas diseñadas anteriormente, ya que el procedimiento se lleva a cabo sobre el límite máximo del rango de operación de presión inicial (60 kPa), fue necesario operar a esta presión ya que los manuales del fabricante no incluían datos explícitos para otras condiciones de operación.

La desviación entre los datos ideales propuestos por el fabricante y los valores obtenidos durante las prácticas experimentales se atribuye a diversos factores propios al estado actual de los equipos y a las condiciones reales de operación, las causas más relevantes son: el desgaste natural de los componentes, siendo especialmente significativo el deterioro de la polea de freno; la diferencia entre la presión de entrada máxima suministrada por el compresor del laboratorio y la presión de referencia establecida por el fabricante, lo cual incrementa la desviación a mayores presiones de trabajo; así como la pérdida de precisión de los instrumentos de medición dada por el desuso prolongado. Adicionalmente, pequeñas variaciones en la ejecución de las prácticas respecto a los procedimientos originales del fabricante contribuyen a estas diferencias.

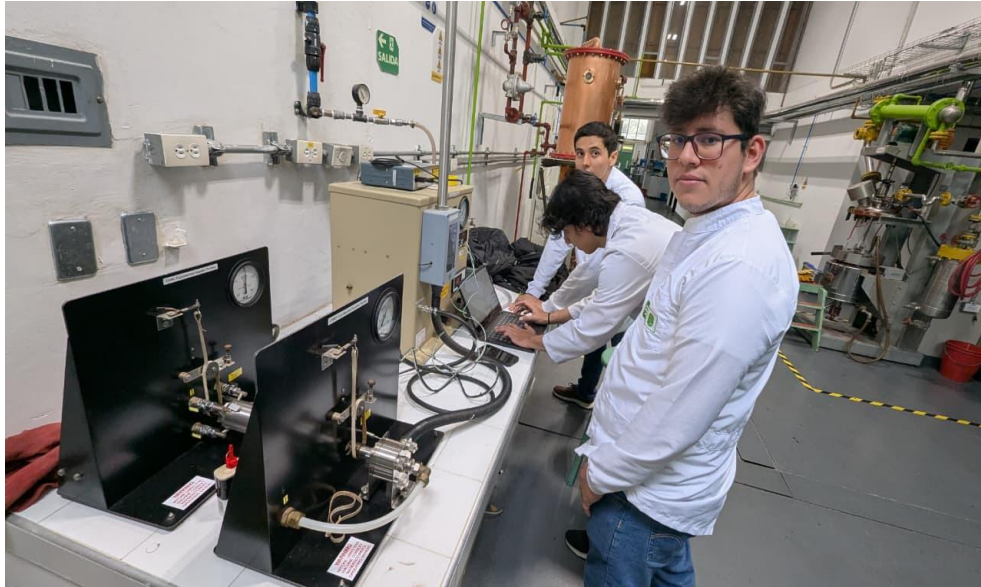
5.6 Validación de las guías prácticas por parte de los estudiantes

La validación de las prácticas se llevó a cabo con la participación de estudiantes de la Escuela de Ingeniería Química, quienes realizaron los experimentos siguiendo el instructivo previamente elaborado y posteriormente ofrecieron retroalimentación sobre aspectos como

claridad de las instrucciones, secuencia lógica de los pasos, legibilidad de los esquemas y extensión de los manuales.

Figura 10

Validación de los manuales de práctica por parte de los estudiantes



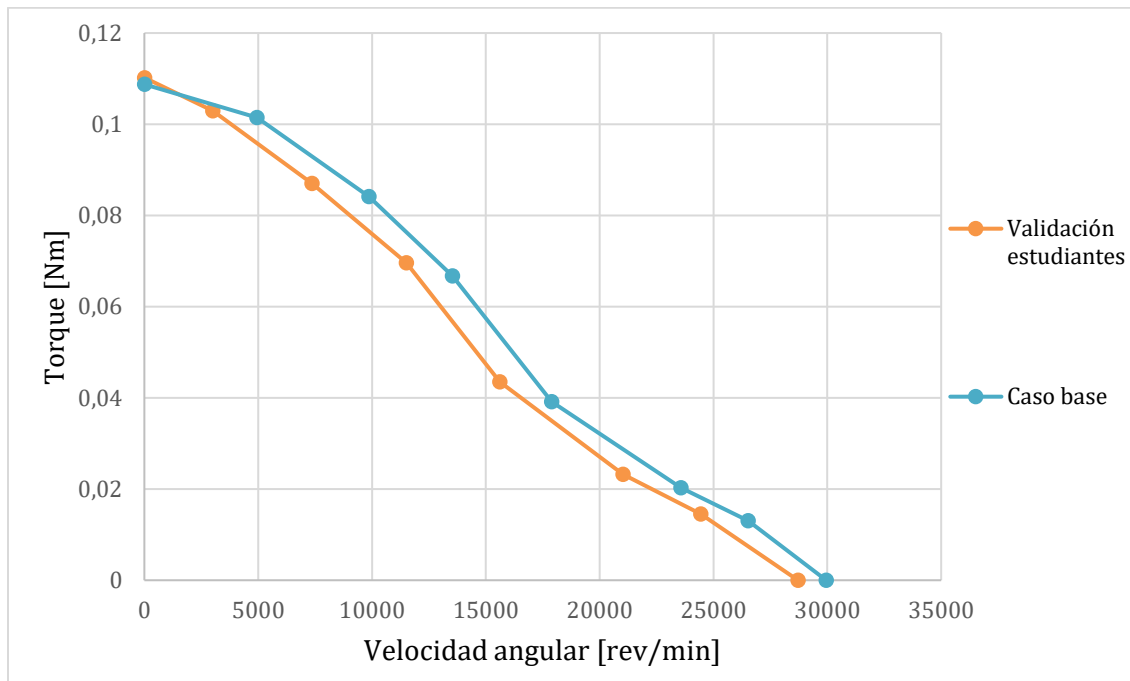
Entre las observaciones más frecuentes, se destacó la necesidad de enfatizar en las etapas de preparación previa del equipo y de simplificar algunos apartados técnicos. Esta retroalimentación permitió hacer ajustes puntuales en la redacción y estructura de las guías antes de su versión definitiva.

En esta sección se presentarán únicamente los datos correspondientes a la etapa 1 de la práctica 1 de la turbina de impulso, con el fin de centrar el análisis en los aspectos fundamentales de dicha etapa. El resto de la información complementaria, así como los datos y resultados asociados a las etapas posteriores de la práctica, se incluyen en los anexos para su consulta.

En este contexto, los resultados de torque en función de la velocidad angular, obtenidos por los autores como caso base y a partir de las prácticas desarrolladas por los estudiantes para la turbina de impulso, se presentan en la Figura 11.

Figura 11

Comparación de los datos obtenidos para torque en las pruebas realizadas por los autores y por los estudiantes a 30 kPa para la práctica con la turbina de impulso



Para una presión de entrada de 30 kPa, se observa una baja desviación de los resultados experimentales de los estudiantes respecto al caso base, inferior al 7 %, lo que evidencia una adecuada reproducibilidad de la práctica y una correcta aplicación del procedimiento experimental. Asimismo, esta concordancia valida el uso de la metodología empleada y del montaje experimental para la obtención de resultados consistentes en el laboratorio.

5.7 Herramienta virtual

Una página web está disponible como herramienta virtual para que los estudiantes accedan de manera sencilla a las guías descargables en formato PDF de cada uno de los equipos. Además, en esta plataforma se especifican los EPP (Elementos de Protección Personal) requeridos, con el

fin de garantizar la seguridad integral del estudiante durante la operación de los equipos. El enlace a la página web es el siguiente: <https://practicaflujoscompresibles.netlify.app/>

Este enfoque se adoptó debido a que el primer recurso que se proporciona a los estudiantes al iniciar una práctica en el laboratorio de procesos suele ser la guía de operación de los equipos. La familiarización previa con estas guías facilita la correcta ejecución de la práctica, disminuyendo la probabilidad de errores de operación y reduciendo el tiempo requerido para la comprensión del procedimiento experimental. En conjunto, esta plataforma no solo mejora el proceso de ejecución de las prácticas experimentales, sino que también fortalece la autonomía del estudiante y favorece la estandarización de los procedimientos, contribuyendo a la calidad y la reproducibilidad de los resultados obtenidos.

6. Conclusiones

Se comprobó el correcto funcionamiento de las turbinas de impulso y de reacción mediante revisiones técnicas y mantenimiento preventivo, garantizando condiciones operativas adecuadas y un desempeño confiable. Adicionalmente, se elaboraron guías prácticas de laboratorio para ambos equipos, las cuales fueron validadas a través de pruebas experimentales realizadas por estudiantes de la Escuela de Ingeniería Química, confirmando su claridad, aplicabilidad y utilidad como apoyo al aprendizaje.

Los resultados experimentales mostraron que el diseño de los experimentos es consistente en aproximadamente un 70% con los datos de referencia del fabricante, reduciéndose significativamente las desviaciones al operar dentro de los rangos establecidos. El análisis comparativo evidenció diferencias mínimas entre los valores medidos y teóricos, respaldando la confiabilidad de los procedimientos y la validez de los datos obtenidos. Asimismo, se desarrolló

una herramienta virtual de apoyo que integra recursos digitales y se articula con trabajos previos sobre flujo compresible.

Finalmente, se consolidó un diseño experimental funcional a partir de los equipos disponibles en el laboratorio, recuperando herramientas que se encontraban en desuso y aportando recursos adicionales al Laboratorio de Procesos y a la Escuela de Ingeniería Química para fortalecer la formación práctica de los estudiantes.

7. Recomendaciones

Para retomar las prácticas de laboratorio sobre flujo compresible se recomienda implementar también los trabajos realizados por estudiantes en años anteriores respecto a los demás módulos en esta temática.

Asignar un espacio adecuado dentro del laboratorio que permita el correcto montaje de las unidades experimentales, garantizando el desarrollo de las prácticas de flujo compresible tanto en turbinas —objeto del presente documento— como en los módulos de tuberías y boquillas de (García & Muñoz, 2018), dado que todos estos equipos forman parte del mismo conjunto experimental.

Fortalecer las prácticas acerca del flujo compresibles aplicadas en universidades aliadas a la UIS al determinar prácticas de referencia que se podrían incluir laboratorios futuros una vez se puedan implementar en las nuevas instalaciones del laboratorio de procesos.

Se recomienda que la escuela realice revisiones periódicas de los distintos módulos de flujo compresible con el fin de evitar pérdidas de precisión en los instrumentos de medición de los equipos debido al desuso prolongado mientras se establece un nuevo espacio de trabajo para estos.

Referencias bibliográficas

- Anderson, J. D. (2017). *Fundamentals of Aerodynamics*. McGraw-Hill Education.
- Bejan, A., & Lorente, S. (2013). *Design with Constructal Theory*. Wiley.
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2019). *Thermodynamics: An Engineering Approach* (9th ed.). McGraw-Hill Education.
- Connor, N. (2020b, enero 8). *¿Qué es la turbina de impulso y la turbina de reacción? Definición*. Thermal Engineering. <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-turbina-de-impulso-y-la-turbina-de-reaccion-definicion/>
- Cuadrado, Ilba, Cadavid, Francisco, Agudelo, John, Sánchez, Carlos. (2008). Modelado de flujo compresible unidimensional e isentrópico por el método de volúmenes finitos. *Dyna*, 75(155), 199-210..
- Dixon, S. L., & Hall, C. A. (2010). *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery* (6^a ed.).
- Dufour, D. J., & Cormier, S. (2015). Energy Recovery in Industrial Processes: A Review of Technologies and Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 97-107. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.169>
- Durrani, M. A., & Tharwat, M. (2018). *Hydraulic Turbines: Theory and Applications*. Springer.
- Elsevier. (2021). *Sustainable Fuel Technologies Handbook*. Hydraulic reaction turbines and their use in power generation.

EMS Power Machines. (2024). How do steam turbines work. Recuperado de <https://powermachines.com/how-do-steam-turbines-work/>

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. (s. f.). Laboratorio de turbomáquinas e hidráulica de potencia. Recuperado el 2 de febrero de 2026, de <https://www.escuelaing.edu.co/es/campus/laboratorio-de-turbomaquinas-e-hidraulica-de-potencia/>

Fox, R. W., McDonald, A. T., & Pritchard, P. J. (2015). Introduction to Fluid Mechanics (9th ed.). John Wiley & Sons.

García Morales H., Muñoz Guerrero H. (2018). Implementación de prácticas y módulo didáctico de flujos compresibles en tuberías y boquillas para el laboratorio de procesos 1 (Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico, Universidad Industrial de Santander) Bucaramanga, Colombia. <https://noesis.uis.edu.co/items/b2011c65-9d28-4f11-9844-215649e97e33/full>

Jansen, J. (2019). Fluid Mechanics for Engineers. Oxford University Press.

Khalil, A., & Sayed, H. (2019). Gas Turbines: A Handbook of Air, Steam, and Gas Turbines. Academic Press.

Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2018). Fundamentals of Engineering Thermodynamics (9th ed.). John Wiley & Sons.

Munson, Bruce Roy, T. H. Okiishi, and Wade W. Huebsch. (2009) "Turbomachines." Fundamentals of Fluid Mechanics. 6th ed. Hoboken, NJ: J. Wiley & Sons. Print.

P.A HILTON LTD, (2009). Manual de mantenimiento y funcionamiento experimental: Módulo de turbinas F300C y F300D.

Perry, R. H., & Green, D. W. (2019). Perry's Chemical Engineers' Handbook. 9th Edition. McGraw-Hill.

Sen, M., & Bhowmik, S. (2020). Principles of Turbomachinery in Air-Breathing Engines. Springer.

Sonntag, R. E., Borgnakke, C., & Van Wylen, G. J. (2021). Fundamentals of Thermodynamics (9th ed.). John Wiley & Sons.

Universidad de Antioquia. (2021). Caracterización y optimización de turbinas aplicadas a energía hidrocínética [Artículo en revista académica]. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. Recuperado el 2 de febrero de 2026, de <https://revistas.udea.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/348001>

Universidad Tecnológica de Pereira. (s. f.). Laboratorio de mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. Recuperado el 2 de febrero de 2026, de <https://media2.utp.edu.co/programas/68/laboratorio-de-fluidos-y-maquina-hidraulicas7-1.pdf>

White, F. M. (2016). Fluid Mechanics (8th ed.). McGraw-Hill Education.

Wragg, D. W. (1974). Dictionary of Aviation (D. Wragg, Ed.). Osprey Publishing. (S/f). Google.com. Recuperado el 14 de octubre de 2024, de <https://docs.google.com/document/d/1xZNqWQHWQ823ukcT52quyXIXnUutiMY/edit>

Yunus, C., & Rogers, R. (2020). Compressible Fluid Flow and Gas Dynamics. Pearson Education.




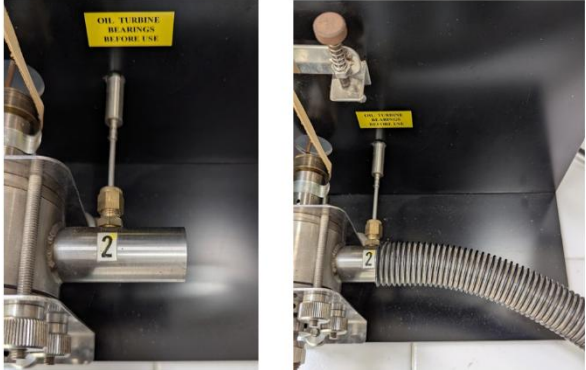
Apéndices

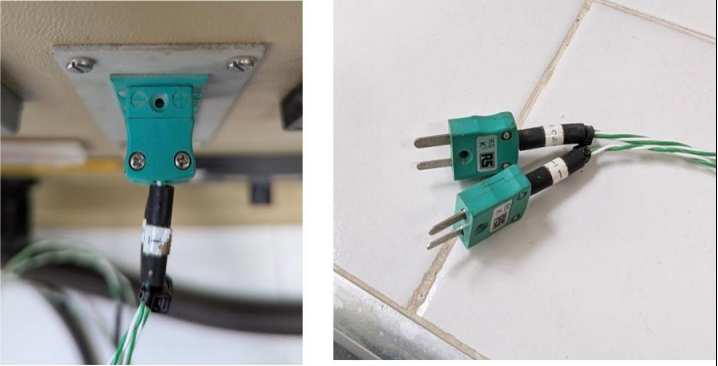
Anexo A. Guía de conexión para los equipos de flujo compresible a la unidad de conexión principal

Tabla 5

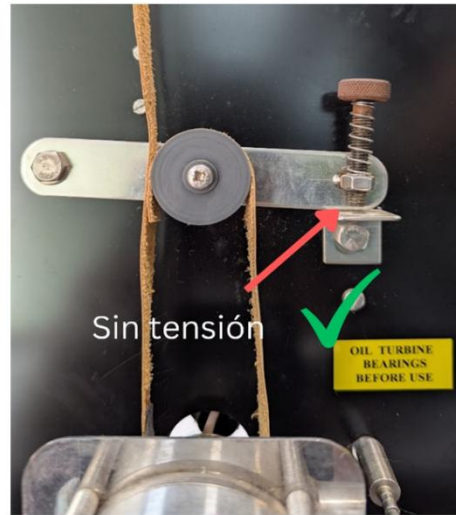
Guía de conexión para los equipos de flujo compresible a la unidad de conexión principal

Sí=✓	Pasos del procedimiento	Ubicación (Fotos)
	<p>Ubicación conexiones individuales de la unidad Principal:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Válvula invertida flujo de entrada 2. Salida de aire hacia la turbina 3. Interruptor de encendido 4. Medidor de caudal de salida 5. Dinamómetro 6. Medidor de rpm 7. Conexión sensor de temperatura (termopares) e indicador de temperatura 8. Conexión sensores RPM, revoluciones por minuto (cable gris, lateral izquierdo de la unidad) 9. Conexiones sensores dinamómetro (cable negro, lateral izquierdo de la unidad). 	

<p>Conexión preliminar de las turbinas de impulso y reacción a la unidad principal. * Cerciorarse que el suministro de aire del compresor esté habilitado para la conexión del equipo y la llave de paso se encuentre cerrada. *Asegurar la conexión al tomacorriente del transformador adicional conectado al equipo principal</p>	
<p>Conectar la manguera de la turbina a la salida de aire (2) de la unidad de conexión principal</p>	
<p>Conectar los respectivos sensores a las entradas ubicadas en el lateral izquierdo de la maquina (8y 9)</p>	
<p>Conectar la manguera plástica del medidor del caudal de salida (4) al escape de la turbina señalada con el número 2 en amarillo, como se muestra en la imagen de la derecha.</p>	



<p>Conectar los sensores de temperatura a la entrada 7 (cables verdes, los símbolos positivo y negativo del cable deben estar apuntando hacia arriba), Estos tienen una numeración individual, el número 1 se ubica en la entrada superior y el número 2 en la siguiente.</p>	
---	--

Finalmente, asegurarse que el tornillo de la polea de freno ubicado en el frente de los equipos de turbina esté completamente suelto (sin tensión). Colocar el tablero del sensor del dinamómetro (5) en cero, esto se hace oprimiendo una vez el botón del signo asterisco “ * ” en el tablero, la imagen mostrará la palabra “ZERO”, luego se debe presionar de nuevo el mismo botón dentro de los próximos 5 segundos.



Anexo B. Guía de práctica módulo de turbina de impulso**Tabla 6**

Guía pedagógica para el desarrollo de prácticas de laboratorio sobre flujo compresible en la turbina de impulso

		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ASIGNATURA: LABORATORIO DE PROCESOS I		
GUÍA PEDAGÓGICA PARA EL DESARROLLO DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO SOBRE FLUJO COMPRESIBLE		
<p>PROPÓSITO DE LAS PRÁCTICAS: Esta guía tiene como propósito fortalecer el proceso de enseñanza-aprendizaje de los conceptos fundamentales del flujo compresible mediante la experimentación directa con módulos de turbinas de una etapa. Se busca que el estudiante interactúe con un sistema real, aplicando herramientas de medición y control que le permitan comprender la relación entre variables termodinámicas y mecánicas, como el torque, la potencia, el consumo específico de aire y la eficiencia isoentrópica. De este modo, se promueve la integración coherente entre los conocimientos teóricos adquiridos en clase y la experiencia práctica en el laboratorio, resaltando la importancia de observar y analizar el comportamiento del sistema en condiciones reales de operación para consolidar una formación técnica más sólida, aplicada y significativa.</p>		
<p>MICROCOMPETENCIAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desarrolla habilidades para evaluar el comportamiento de sistemas reales relacionados con el flujo compresible, fortaleciendo su criterio ingenieril y su capacidad para resolver problemas de manera rigurosa, integrando de manera efectiva los principios de la termodinámica aplicada y la mecánica de fluidos en contextos prácticos de análisis y toma de decisiones. • Analiza e interpreta datos experimentales obtenidos en el laboratorio a través del uso de equipos de flujo compresible, como turbinas de impulso y de reacción, identificando y comprendiendo las relaciones entre variables clave del sistema, y representando gráficamente estas relaciones para explicar las tendencias y variaciones en el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de operación. • Formula informes técnicos claros, concisos y bien estructurados a partir de la práctica experimental con equipos de turbina, empleando terminología técnica apropiada, organizando la información de manera lógica y coherente, utilizando correctamente las fuentes bibliográficas consultadas, y atendiendo a los estándares formales de presentación, redacción y ortografía, demostrando competencia en la comunicación escrita en contextos de ingeniería. • Aporta constructivamente al trabajo colaborativo durante las prácticas de laboratorio, mediante el ejercicio de una comunicación asertiva, la cooperación activa y el liderazgo orientado al logro de metas comunes, comunicando de forma clara y efectiva, tanto oralmente como por escrito, las ideas y explicaciones necesarias para el desarrollo exitoso de la práctica. • Participa activamente en la ejecución de la práctica experimental, colaborando en la recolección y validación de datos, y promoviendo el trabajo en equipo y el intercambio de ideas como estrategias clave para la resolución de problemas técnicos derivados de la actividad. 		

ESTRATEGIAS DE ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE:

- **Preparación previa:** Busca crear en el estudiante un contacto previo con el equipo que contribuya significativamente al aprendizaje mediante el uso de un documento previo que ilustre los diferentes elementos del equipo junto a una explicación breve de su operación, posteriormente se evaluarán los conocimientos previos necesarios para la ejecución de la práctica. Para ello, los estudiantes contestarán un cuestionario antes de participar en la actividad. Esto contribuirá a reducir los accidentes, lograr una buena gestión del tiempo y asegurar el cumplimiento de los implementos de seguridad necesarios.
- **Desarrollo de la experimentación:** Corresponde al desarrollo y aplicación de aspectos prácticos de la temática mediante el desarrollo de experimentos empleando los equipos de turbinas para el estudio del flujo compresible y sus temas relacionados al emplear un modelo de experimentación para mejorar las habilidades en toma de datos, trabajo en equipo y la capacidad de integrar correctamente los conceptos adquiridos en clase y afianzar los temas practicados.
- **Presentación del informe:** El desarrollo y presentación de un informe posterior a la práctica ayuda a integrar el aprendizaje de los estudiantes, ya que les permite analizar de forma crítica los resultados obtenidos, reforzar la comprensión de los principios teóricos aplicados y demostrar su capacidad para resolver los problemas planteados al inicio de la práctica. Mediante la construcción de un informe que presente gráficos que expliquen las relaciones entre los distintos fenómenos físicos presentes en la temática y conclusiones en base a los objetivos de la práctica, con este ejercicio se fortalecen habilidades esenciales como la redacción técnica, la organización de conceptos, la interpretación de datos y la comunicación efectiva de ideas.

CRITERIOS DE EVALUACIÓN (100%):

- **Ejecución efectiva de las actividades propuestas:** El estudiante coopera activamente, escucha a sus compañeros, comparte responsabilidades y apoya al grupo en la resolución de tareas con el fin de llegar a un buen término en el desarrollo de la práctica y la correcta ejecución de todas las fases presentes para cada equipo. **(10%)**
- **Formulación del informe de la práctica:** El estudiante expresa las ideas con claridad y transmite resultados de forma precisa mediante el uso de gráficos y análisis claros y concisos que sean acordes a la capacidad de respuesta ingenieril. Expresa la capacidad de abordar las distintas situaciones que se presenten durante la práctica, propone soluciones viables, justifica decisiones y corrige los errores cometidos para llegar a conclusiones pertinentes acordes a los objetivos de la práctica. **(50%)**
- **Organización y gestión del tiempo:** El estudiante planifica bien sus tareas al cumplir con los plazos establecidos de realización y entrega del informe, y organiza adecuadamente los recursos durante la práctica con el fin de optimizar el tiempo empleado para obtener todos los resultados necesarios para su informe en el tiempo asignado para la realización de la sesión. **(20%)**
- **Análisis de resultados:** El estudiante aplica correctamente las fórmulas e interpreta críticamente las gráficas, explica coherentemente el comportamiento físico observado, da solución a los objetivos planteados en la práctica y es capaz de llegar a conclusiones constructivas con relación al aprendizaje de la temática. **(20%)**

Bibliografía:

P.A HILTON LTD, (2009). *Manual de mantenimiento y funcionamiento experimental: Módulo de turbina F300C*.

Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). *Essentials of Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill Education.

Tabla 7*Guía de operación para la turbina de impulso*

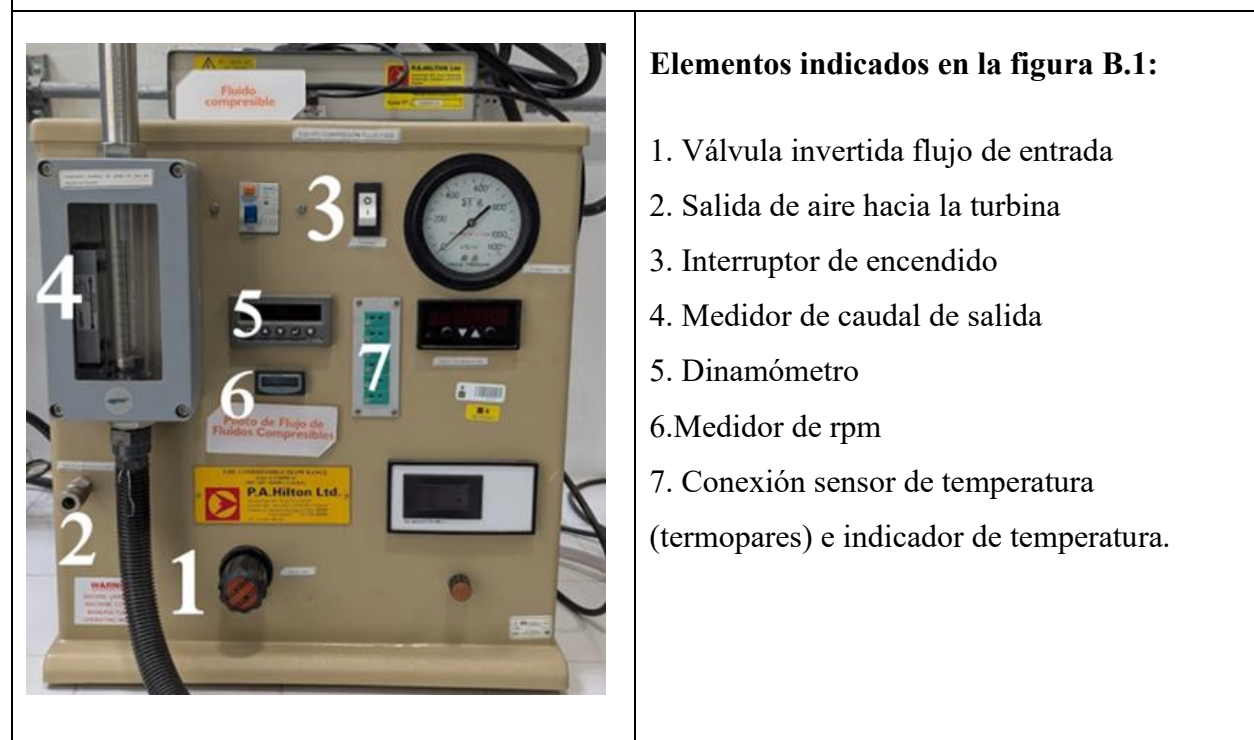
GUÍA DE OPERACIÓN PARA LA TURBINA DE IMPULSO
<p>Pre-Saberes:</p> <ul style="list-style-type: none">• Termodinámica: Primera Ley de la Termodinámica aplicada a sistemas abiertos. Conceptos de entalpía y energía interna. Procesos isoentrópicos y su relación con la eficiencia.• Mecánica de Fluidos (Manejo de fluidos): Flujo compresible y comportamiento del vapor en tuberías. Relación entre presión, temperatura y velocidad del flujo. Coeficiente de fricción y pérdidas en conductos.
<p>Objetivo de aprendizaje:</p> <p>Afianzar los aprendizajes relacionados al tema de flujo compresible mediante el uso de un equipo de turbina de reacción con el fin de observar la relación entre las variables físicas derivadas del trabajo con un flujo de entrada de aire a presión en el equipo, junto con las variables derivadas de la manipulación de este flujo y su. Para este equipo se busca cumplir los siguientes objetivos particulares:</p> <ul style="list-style-type: none">● Realizar gráficas de variables derivadas de los experimentos (Torque, potencia del eje, consumo de aire específico) en la turbina y analizar el comportamiento de cada una de las curvas para explicar los fenómenos físicos y las relaciones entre estos.● Comparar el consumo de aire específico, cuando la salida de la turbina a velocidad constante es controlada por:<ul style="list-style-type: none">a) Flujo regulado.b) Variación del número de válvulas.

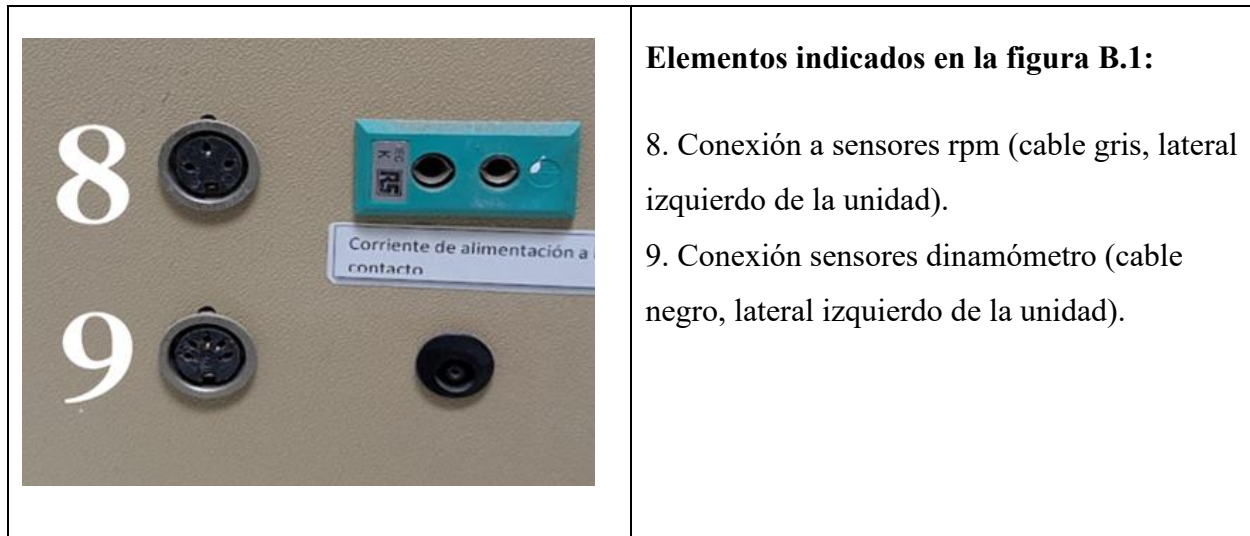
- Aplicar la primera ley de la termodinámica en un sistema abierto simple llevado a un estado estable.
- Determinar la eficiencia isoentrópica de una turbina.
- Construcción de la curva de retardo y la estimación del efecto de las resistencias debido a la fricción mecánica y del fluido.

Tabla 8

Enumeración de partes unidad de conexión principal

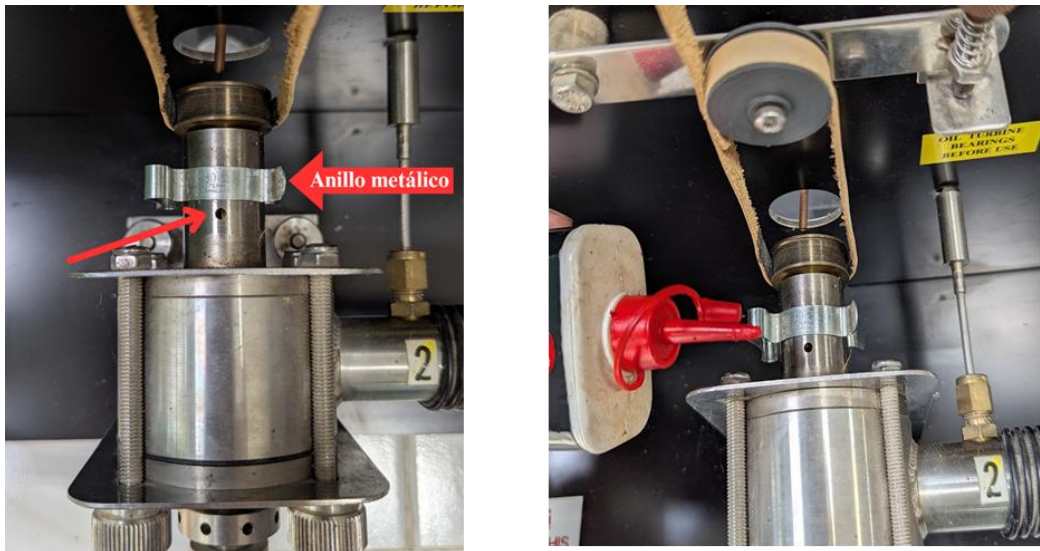
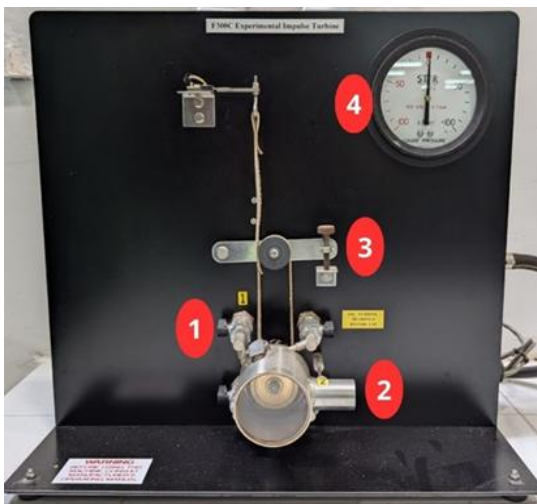
Figura B.1. *Enumeración de partes Unidad de conexión principal*



**Tabla 9**


Consideraciones preliminares y pasos por seguir para el proceso de lubricación

Sí = ✓	Consideraciones preliminares y pasos por seguir para el proceso de lubricación.
EPP	La operación del equipo requiere del uso de (Elementos de protección personal)
	Bata
	Pantalón y zapatos cerrado
	Gafas
	Tapones de protección auditiva.
	El manejo del equipo requiere de una lubricación de la turbina con aceite 3 en 1 antes de su puesta en marcha:
	Ubicar la disponibilidad de lubricante “3 en 1”, si no se encuentra en el área de trabajo, preguntar al técnico encargado del laboratorio).
	Retirar la arandela móvil situada en la parte trasera de la turbina para acceder al espacio de lubricación (Figura C. 2).
	Aplicar 4 gotas del aceite de lubricación y volver a ubicar la arandela móvil.

Figura B.2.*Localización del orificio de lubricación en las turbinas**Imagen 2. Ubicación del espacio de lubricación en la turbina***OPERACIÓN DE LA UNIDAD TURBINA DE IMPULSO****Tabla 10***Elementos del equipo turbina de impulso***Figura B.3.***Vista frontal turbina de impulso***Elementos del equipo turbina de impulso**

1. Válvulas de cierre parcial de la boquilla de entrada
2. Salida de aire a la unidad de conexión principal
3. Tornillo de ajuste para la polea de frenado
4. Medidor de presión de entrada

Tabla 11*Etapa 1 laboratorio turbina de impulso*

Sí = ✓	Etapa 1: Relación entre torque y potencia vs velocidad
	<p>1. Ajustar la presión de entrada al valor asignado como presión de entrada 1 a su grupo de trabajo (Documento en Excel para el diseño de experimentos) empleando la válvula reguladora de flujo (1) del equipo de conexión principal, esta válvula tiene dos posiciones.</p> <p>Figura B.4. <i>Llave de flujo de entrada en su posición bloqueada y libre</i></p>  <p><i>Imagen 4. llave flujo de aire de entrada, posición bloqueada y libre respectivamente</i></p> <p>Las imágenes muestran las posiciones de la válvula: libre y bloqueada respectivamente, para cambiar entre posiciones es necesario tirar o empujar la válvula según corresponda, esta es una válvula inversa por lo que para abrir el flujo en el equipo se debe girar la válvula en el sentido horario y para cerrarla se debe girar en el sentido antihorario, una vez el flujo inicial aumente la turbina debería comenzar a girar.</p>
	<p>2. Mantener el flujo estable para mantener el valor de presión asignado inicialmente por 90 segundos, aumentar o disminuir el flujo si se llegan a presentar fluctuaciones en la presión de la turbina (Fluctuaciones tolerables de 2 a 4 [kN/m²]).</p>

	3. Anotar los valores de revoluciones por minuto (6), tensión (5) y flujo de aire de salida del rotámetro (4) cuando pasen los 90 segundos.
	4. Ajustar el tornillo de freno hasta disminuir el valor de rpm del paso número 2 en un 15% de su valor inicial, el tornillo tensiona la polea de freno al apretar el tornillo en sentido.
	5. Anotar nuevamente los valores de las variables previamente registradas cuando el sistema se estabilice (se tolera una variación de hasta 1500 revoluciones por minuto o cantidades cercanas al valor objetivo).
	6. Reducir progresivamente las revoluciones por minuto (rpm) de la turbina en intervalos equivalentes al 15% del valor inicial, ajustando la tensión de la polea hasta detener completamente la turbina. Por ejemplo, si la práctica inicia en 10 000 rpm, los registros de datos se realizarán en aproximadamente 8500 rpm, 7000 rpm, 5500 rpm y así sucesivamente hasta llegar a 0 rpm.
	<p>7. Calcular y tabular los datos calculados de torque y potencia del eje para cada una de las mediciones, usando Excel.</p> $T \text{ (Torque)} = \text{Fuerza (Dinamómetro)} [N] \cdot 0.0145 \text{ Radio del eje [m]}$ $T [=] N \cdot m \quad (\text{Ec. 1})$ $P_s \text{ (Potencia del eje)} = T [N \cdot m] \cdot \frac{2\pi}{60} [s^{-1}] \cdot \text{Velocidad rotacional [rpm]}$ $P_s [=] \text{Watts} \quad (\text{Ec. 2})$
	8. Construir en una misma gráfica las relaciones de: Torque Vs Velocidad rotacional y Potencia del eje Vs Velocidad rotacional.
	9. Analizar las interacciones de las gráficas del paso anterior y el porqué de sus comportamientos.

Tabla 12*Etapa 2 laboratorio turbina de impulso*

Sí = ✓	Etapa 2: Consumo de aire específico según el impulso inicial y el número de válvulas.
	1. Verificar que las cuatro válvulas de cierre parcial ubicadas a los laterales de la turbina se encuentren abiertas (ubicadas de manera paralela a cada tubo).
	2. Abrir la válvula de flujo de aire de la unidad de conexión principal (1) hasta que la presión de entrada alcance 60 [kN/m ²].
	3. Ajustar el tornillo de freno hasta que se alcance la velocidad angular asignada al grupo de trabajo.
	4. Una vez los valores se estabilizan, registrar los datos de velocidad rotacional, presión de entrada, fuerza del freno y flujo de aire en el rotámetro (4).
	5. Cerrar la válvula de flujo de la unidad de conexión principal (1) hasta que la presión disminuya hasta alcanzar 40 [kN/m ²]
	6. Aflojar el tornillo de freno de tal manera que la turbina regrese a la velocidad angular asignada inicialmente a cada grupo.
	7. Una vez se estabilice los valores anotar los datos de manera similar al paso 4.
	8. Cerrar una de las válvulas de cierre parcial de la turbina y repetir el procedimiento de los pasos 2 al 8 realizando la respectiva toma de datos.
	9. Repetir el procedimiento hasta que solo quede una válvula de cierre parcial abierta.
	<p>10. Calcular y tabular los datos de potencia del eje y consumo específico del aire para cada una de las mediciones:</p> $P_s \text{ (Potencia del eje)} = T [N \cdot m] \cdot \frac{2\pi}{60} [s^{-1}] \cdot \text{Velocidad rotacional [rpm]} \quad (\text{Ec. 2})$ $\dot{m} = \text{Flujo de aire en el rotámetro (4)}$ $\text{Consumo específico de aire} = \frac{\dot{m}}{P_s} \quad (\text{Ec. 3})$

	11. Realizar una gráfica que compara consumo específico de aire vs potencia del eje y analizar la interacción entre estos dos elementos.
--	--

Tabla 13*Etapas 3 laboratorio turbina de impulso*

Sí = ✓	Etapas 3: Aplicación de la primera ley de la termodinámica a un sistema abierto sencillo sometido a un caudal constante.
	1. Anotar el valor de la temperatura inicial del sistema.
	2. Se debe manipular la válvula de flujo de entrada (1) hasta alcanzar el valor máximo de presión con las 4 válvulas de la turbina abiertas y con el freno completamente libre.
	3. Ajustar el freno de tal forma que se reduzca la velocidad obtenida en el paso anterior a la mitad (normalmente alrededor de 20.000 rpm).
	4. Mantener la configuración lograda en el paso 3 hasta que la temperatura de salida de aire de la turbina se estabilice.
	5. Observar y registrar la medida de todos los sensores (Temperatura, Velocidad de giro y presión) y la fuerza de la banda de freno.
	6. Calcular la potencia del eje con los valores obtenidos en el paso 3: $T \text{ (Torque)} = \text{Fuerza (Dinamómetro)} [N] \cdot 0.0145 \text{ Radio del eje [m]}$ <p style="text-align: right;">(Ec. 1)</p> $T [=] N \cdot m$ $P_s \text{ (Potencia del eje)} = T [N \cdot m] \cdot \frac{2\pi}{60} [s^{-1}] \cdot$ $\text{Velocidad rotacional [rpm]}$ <p style="text-align: right;">(Ec. 2)</p> $P_s [=] \text{Watts}$

	<p>7. Para calcular el cambio de la entalpía se deben usar los valores de la termocupla 1 y 2 vistos en el panel (7), para alternar entre el número de termocuplas es necesario usar los botones de flecha situados en el panel. Asumir la capacidad calorífica C_p del aire a temperatura ambiente como constante, mostrada en las siguientes fórmulas.</p> $C_p(\text{Aire}) = 1.004 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} \right]$ $\Delta h = C_p(t_2 - t_1) \quad (\text{Ec. 4})$
	<p>8. Calcular el calor generado por el sistema a partir de:</p> $Q = \dot{m} [\text{Caudal de salida (4)}] * \Delta h + P_s \quad (\text{Ec. 5})$

Tabla 14*Etapa 4 laboratorio turbina de impulso*



Sí = ✓	Etapa 4: Determinación de la eficacia isentrópica de una turbina.
	1. Lubricar la turbina antes de encenderla.
	2. Ajustar la válvula de presión inicial de la unidad de conexión principal (1) hasta alcanzar la presión inicial 2 indicada al grupo de trabajo, con el tornillo de carga suelto y las 4 válvulas de la turbina abiertas.
	3. Aumentar la tensión del freno hasta reducir las revoluciones a la mitad (50%) de la alcanzada en el paso anterior.
	4. Mantener la configuración lograda en el paso 3 hasta que la temperatura de salida de aire de la turbina se estabilice y se mantenga por un minuto.
	5. Observar y anotar los datos mostrados por los sensores y calcular: <ul style="list-style-type: none"> • Potencia del eje: $T \text{ (Torque)} = \text{Fuerza (Dinamómetro)} [N] \cdot 0.0145 \text{ Radio del eje [m]} \quad (\text{Ec. 1})$ $T [=] N \cdot m$ $P_s \text{ (Potencia del eje)} = T [N \cdot m] \cdot \frac{2\pi}{60} [s^{-1}] \cdot \text{Velocidad rotacional [rpm]} \quad (\text{Ec. 2})$ $P_s [=] \text{Watts}$
	Temperatura absoluta de entrada: $T_1 = T_e + 273 \quad (\text{Ec. 6})$
	Presión absoluta de entrada (1): $P_1 \text{ Absoluta} = P_{atm} + P_{entrada} \quad (\text{Ec. 7})$
	Presión absoluta de salida (2) (ignorando la resistencia del tubo y del caudalímetro): $P_2 \text{ Absoluta} = P_{atm} \quad (\text{Ec. 8})$

	Relación de presión de la turbina: $R_p = \frac{P_1}{P_2}$ (Ec. 9)
	Temperatura de salida después de la expansión isentrópica: $T_y = \frac{T_1}{R_p^{\frac{1.4-1}{1.4}}}$ (Ec. 10)
	Índice del cambio de entalpía isentrópico: $H = m * C_p (T_1 - T_y) [w]$ (Ec. 11)
	Eficacia isentrópica externa: $n = 100\% * \frac{P_s}{H}$ (Ec. 12)

Anexo C. Guía de práctica módulo de turbina de reacción

Tabla 16

Guía pedagógica para el desarrollo de prácticas de laboratorio módulo de turbina de reacción

		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ASIGNATURA: LABORATORIO DE PROCESOS I		
GUÍA PEDAGÓGICA PARA EL DESARROLLO DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO SOBRE FLUJO COMPRESIBLE		
<p>PROPÓSITO DE LAS PRÁCTICAS: Esta guía tiene como propósito fortalecer el proceso de enseñanza-aprendizaje de los conceptos fundamentales del flujo compresible mediante la experimentación directa con módulos de turbinas de una etapa. Se busca que el estudiante interactúe con un sistema real, aplicando herramientas de medición y control que le permitan comprender la relación entre variables termodinámicas y mecánicas, como el torque, la potencia, el consumo específico de aire y la eficiencia isoentrópica. De este modo, se promueve la integración coherente entre los conocimientos teóricos adquiridos en clase y la experiencia práctica en el laboratorio, resaltando la importancia de observar y analizar el comportamiento del sistema en condiciones reales de operación para consolidar una formación técnica más sólida, aplicada y significativa.</p>		
<p>MICROCOMPETENCIAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desarrolla habilidades para evaluar el comportamiento de sistemas reales relacionados con el flujo compresible, fortaleciendo su criterio ingenieril y su capacidad para resolver problemas de manera rigurosa, integrando de manera efectiva los principios de la termodinámica aplicada y la mecánica de fluidos en contextos prácticos de análisis y toma de decisiones. • Analiza e interpreta datos experimentales obtenidos en el laboratorio a través del uso de equipos de flujo compresible, como turbinas de impulso y de reacción, identificando y comprendiendo las relaciones entre variables clave del sistema, y representando gráficamente estas relaciones para explicar las tendencias y variaciones en el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de operación. • Formula informes técnicos claros, concisos y bien estructurados a partir de la práctica experimental con equipos de turbina, empleando terminología técnica apropiada, organizando la información de manera lógica y coherente, utilizando correctamente las fuentes bibliográficas consultadas, y atendiendo a los estándares formales de presentación, redacción y ortografía, demostrando competencia en la comunicación escrita en contextos de ingeniería. • Aporta constructivamente al trabajo colaborativo durante las prácticas de laboratorio, mediante el ejercicio de una comunicación asertiva, la cooperación activa y el liderazgo orientado al logro de metas comunes, comunicando de forma clara y efectiva, tanto oralmente como por escrito, las ideas y explicaciones necesarias para el desarrollo exitoso de la práctica. • Participa activamente en la ejecución de la práctica experimental, colaborando en la recolección y validación de datos, y promoviendo el trabajo en equipo y el intercambio de ideas como estrategias clave para la resolución de problemas técnicos derivados de la actividad. 		

ESTRATEGIAS DE ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE:

- **Preparación previa:** Busca crear en el estudiante un contacto previo con el equipo que contribuya significativamente al aprendizaje mediante el uso de un documento previo que ilustre los diferentes elementos del equipo junto a una explicación breve de su operación, posteriormente se evaluarán los conocimientos previos necesarios para la ejecución de la práctica. Para ello, los estudiantes contestarán un cuestionario antes de participar en la actividad. Esto contribuirá a reducir los accidentes, lograr una buena gestión del tiempo y asegurar el cumplimiento de los implementos de seguridad necesarios.
- **Desarrollo de la experimentación:** Corresponde al desarrollo y aplicación de aspectos prácticos de la temática mediante el desarrollo de experimentos empleando los equipos de turbinas para el estudio del flujo compresible y sus temas relacionados al emplear un modelo de experimentación para mejorar las habilidades en toma de datos, trabajo en equipo y la capacidad de integrar correctamente los conceptos adquiridos en clase y afianzar los temas practicados.
- **Presentación del informe:** El desarrollo y presentación de un informe posterior a la práctica ayuda a integrar el aprendizaje de los estudiantes, ya que les permite analizar de forma crítica los resultados obtenidos, reforzar la comprensión de los principios teóricos aplicados y demostrar su capacidad para resolver los problemas planteados al inicio de la práctica. Mediante la construcción de un informe que presente gráficos que expliquen las relaciones entre los distintos fenómenos físicos presentes en la temática y conclusiones en base a los objetivos de la práctica, con este ejercicio se fortalecen habilidades esenciales como la redacción técnica, la organización de conceptos, la interpretación de datos y la comunicación efectiva de ideas.

CRITERIOS DE EVALUACIÓN (100%):

- **Ejecución efectiva de las actividades propuestas:** El estudiante coopera activamente, escucha a sus compañeros, comparte responsabilidades y apoya al grupo en la resolución de tareas con el fin de llegar a un buen término en el desarrollo de la práctica y la correcta ejecución de todas las fases presentes para cada equipo. **(10%)**
- **Formulación del informe de la práctica:** El estudiante expresa las ideas con claridad y transmite resultados de forma precisa mediante el uso de gráficos y análisis claros y concisos que sean acordes a la capacidad de respuesta ingenieril. Expresa la capacidad de abordar las distintas situaciones que se presenten durante la práctica, propone soluciones viables, justifica decisiones y corrige los errores cometidos para llegar a conclusiones pertinentes acordes a los objetivos de la práctica. **(50%)**
- **Organización y gestión del tiempo:** El estudiante planifica bien sus tareas al cumplir con los plazos establecidos de realización y entrega del informe, y organiza adecuadamente los recursos durante la práctica con el fin de optimizar el tiempo empleado para obtener todos los resultados necesarios para su informe en el tiempo asignado para la realización de la sesión. **(20%)**
- **Análisis de resultados:** El estudiante aplica correctamente las fórmulas e interpreta críticamente las gráficas, explica coherentemente el comportamiento físico observado, da solución a los objetivos planteados en la práctica y es capaz de llegar a conclusiones constructivas con relación al aprendizaje de la temática. **(20%)**

Bibliografía:

P.A HILTON LTD, (2009). Manual de mantenimiento y funcionamiento experimental: Módulo de turbina F300C.

Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). Essentials of Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications. McGraw-Hill Education.

Tabla 17

Guía de operación turbina de reacción.

GUÍA DE OPERACIÓN EXPERIMENTAL EN FLUJO COMPRESIBLE: TURBINA DE REACCIÓN
<p>Pre-Saberes:</p> <ul style="list-style-type: none">• Termodinámica: Primera Ley de la Termodinámica aplicada a sistemas abiertos. Conceptos de entalpía y energía interna. Procesos isoentrópicos y su relación con la eficiencia.• Mecánica de Fluidos (Manejo de F & S): Flujo compresible y comportamiento del vapor en tuberías. Relación entre presión, temperatura y velocidad del flujo. Coeficiente de fricción y pérdidas en conductos.
<p>Objetivos de aprendizaje:</p> <p>Afianzar los aprendizajes relacionados al tema de flujo compresible mediante el uso de un equipo de turbina de reacción, para este equipo se busca cumplir los siguientes objetivos particulares:</p> <ul style="list-style-type: none">• Investigar las características del torque con respecto a la velocidad y la potencia con respecto a la velocidad de una turbina de impulso de una etapa.• Realizar gráficas de variables derivadas de los experimentos (Torque, potencia del eje, consumo de aire específico) en la turbina y analizar el comportamiento de cada una de las curvas.• Aplicar la primera ley de la termodinámica en un sistema abierto simple llevado a un estado estable.• Determinar la eficiencia isoentrópica de una turbina.• Construcción de la curva de retardo y la estimación del efecto de las resistencias debido a la fricción mecánica y del fluido.

Tabla 18

Enumeración de partes unidad de conexión principal

Figura C.1. Vista general de partes Unidad de conexión principal

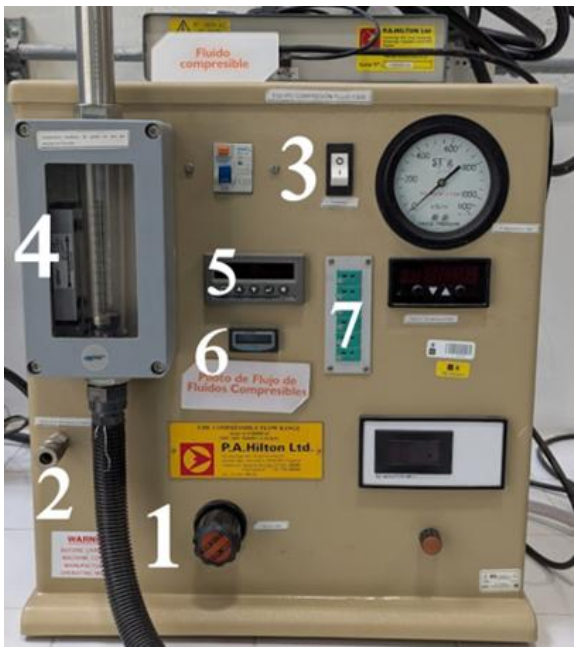

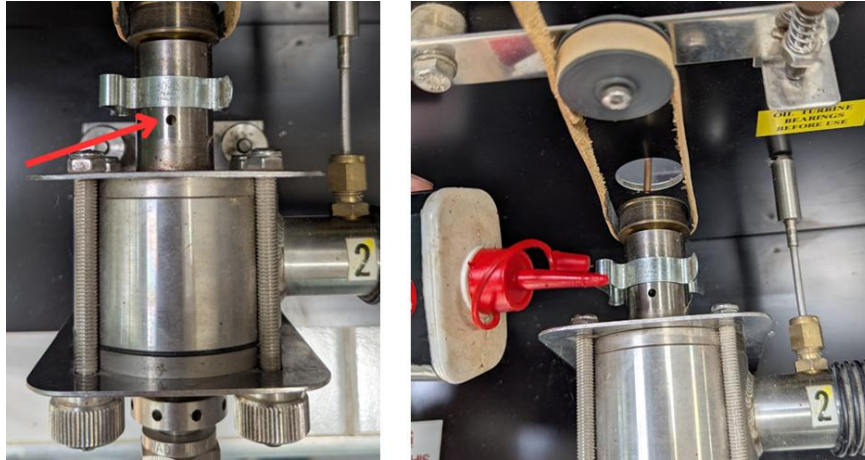
 <p>Una fotografía de la unidad de conexión principal, un panel beige con varios instrumentos y controles. Se ven un medidor de caudal (4), un interruptor (3), un dinamómetro (5), un medidor de rpm (6), un sensor de temperatura (7) y una válvula invertida (1). Hay una salida de aire (2) y un medidor de presión (3). El panel tiene una etiqueta de 'P.A. Hilton Ltd.' y una advertencia de 'Fluido compresible'.</p>	<p>Elementos indicados en la figura C.1:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Válvula invertida flujo de entrada 2. Salida de aire hacia la turbina 3. Interruptor de encendido 4. Medidor de caudal de salida 5. Dinamómetro 6. Medidor de rpm 7. Conexión sensor de temperatura (termopares) e indicador de temperatura.
 <p>Una fotografía de un panel de conexiones con tres puertos de cable. El puerto superior izquierdo (8) es para sensores rpm (cable gris). El puerto inferior izquierdo (9) es para sensores dinamómetro (cable negro). Hay un puerto central negro. Una etiqueta indica 'Corriente de alimentación a contacto'.</p>	<p>Elementos indicados en la figura C.1:</p> <ol style="list-style-type: none"> 8. Conexión a sensores rpm (cable gris, lateral izquierdo de la unidad). 9. Conexión sensores dinamómetro (cable negro, lateral izquierdo de la unidad).

Tabla 19*Consideraciones preliminares y pasos por seguir para el proceso de lubricación*


Sí = √	Consideraciones preliminares y pasos por seguir para el proceso de lubricación.
EPP	La operación del equipo requiere del uso de (Elementos de protección personal)
	Bata
	Pantalón y zapatos cerrado
	Gafas
	Tapones de protección auditiva.
	El manejo del equipo requiere de una lubricación de la turbina con aceite 3 en 1 antes de su puesta en marcha:
	Ubicar la disponibilidad de lubricante “3 en 1”, si no se encuentra en el área de trabajo, preguntar al técnico encargado del laboratorio).
	Retirar la arandela móvil situada en la parte trasera de la turbina para acceder al espacio de lubricación (Figura C. 2).
	Aplicar 4 gotas del aceite de lubricación y volver a ubicar la arandela móvil.

Figura C. 2.*Lubricación turbina de reacción**Imagen 2. Ubicación del espacio de lubricación en la turbina***OPERACIÓN DE LA UNIDAD DE TURBINA DE REACCIÓN****Tabla 20***Partes funcionales turbina de reacción*

	<p>Elementos del equipo de turbina de reacción:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Medidor de presión de entrada 2. Salida de aire a la unidad de conexión principal 3. Tornillo de ajuste para la polea de frenado
--	--

Tabla 21

Etapa 1 laboratorio turbina de reacción.

Sí = ✓	Etapa 1: relación entre Torque y Potencia VS velocidad
	<p>1. Ajustar la presión de entrada al valor asignado como presión de entrada 1 a su grupo de trabajo (Documento en Excel para el diseño de experimentos) empleando la válvula reguladora de flujo (1) del equipo de conexión principal, esta válvula tiene dos posiciones.</p> <p>Figura C. 4. <i>Llave mariposa, posición libre y bloqueada</i></p>  <p><i>Imagen 4. llave mariposa, posición libre y bloqueada</i></p> <p>Las imágenes muestran las posiciones de la válvula: libre y bloqueada respectivamente, para cambiar entre posiciones es necesario tirar o empujar la válvula según corresponda, esta es una válvula inversa por lo que para abrir el flujo en el equipo se debe girar la válvula en el sentido horario y para cerrarla se debe girar en el sentido antihorario, una vez el flujo inicial aumente la turbina debería comenzar a girar.</p>
	<p>2. Mantener el flujo estable para mantener el valor de presión asignado inicialmente por 90 segundos, aumentar o disminuir el flujo si se llegan a presentar fluctuaciones en la presión de la turbina (Fluctuaciones tolerables de 2 a 4 [kN/m²]).</p>

	3. Cuando las condiciones sean estables (después de 90 segundos) anotar los valores de rpm por minuto (6), tensión (5) y flujo de aire de salida del rotámetro (4)
	4. Ajustar el tornillo de freno en sentido horario hasta disminuir el valor de rpm del paso anterior en un 15% de su valor inicial.
	5. Anotar nuevamente los valores de las variables previamente registradas cuando el sistema se estabilice (se tolera una variación de hasta 1500 revoluciones por minuto o cantidades cercanas al valor objetivo).
	6. Reducir progresivamente las revoluciones por minuto (rpm) de la turbina en intervalos equivalentes al 15% del valor inicial, ajustando la tensión de la polea hasta detener completamente la turbina. Por ejemplo, si la práctica inicia en 10 000 rpm, los registros de datos se realizan en aproximadamente 8500 rpm, 7000 rpm, 5500 rpm y así sucesivamente hasta llegar a 0 rpm.
	7. Calcular y tabular los datos calculados de torque y potencia del eje para cada una de las mediciones, usando Excel. $T (\text{Torque}) = \text{Fuerza (Dinamómetro)} [N] \cdot 0.0145 \text{ Radio del eje [m]}$ <div style="text-align: right;">(Ec. 1)</div> $T [=] N \cdot m$ $P_s (\text{Potencia del eje}) = T [N \cdot m] \cdot \frac{2\pi}{60} [s^{-1}] \cdot \text{Velocidad rotacional [rpm]}$ <div style="text-align: center;">(Ec. 2)</div> $P_s [=] \text{Watts}$
	8. Construir en una misma gráfica las relaciones de: Torque Vs Velocidad rotacional y Potencia del eje Vs Velocidad rotacional.
	9. Analizar sus interacciones respectivas y el porqué de sus comportamientos.

Tabla 22

Etapa 2 laboratorio turbina de reacción.

Sí = ✓	Etapa 2, aplicación de la primera ley de la termodinámica a un sistema abierto sencillo sometido a un caudal constante.
	1. Lubricar la turbina antes de ponerla en marcha y anotar el valor de la temperatura inicial del sistema.
	2. Se debe manipular la válvula de flujo de entrada (1) hasta alcanzar la presión máxima con el freno completamente libre (girar tornillo de freno en sentido antihorario para soltar completamente la polea).

	3. Cuando los valores se estabilizan, ajustar el freno de tal forma que se reduzca la velocidad obtenida en el paso anterior a la mitad.
	4. Mantener la configuración lograda en el paso 3 hasta que la temperatura de salida de aire de la turbina se estabilice (visto en el panel de la unidad de conexión principal en el medidor digital con el número 2).
	5. Observar y registrar la medida de todos los sensores y la fuerza de la banda de freno.
	6. Calcular la potencia del eje con los valores obtenidos en el paso 3: $T (\text{Torque}) = \text{Fuerza (Dinamómetro)} [N] \cdot 0.0145 \text{ Radio del eje [m]} \quad (\text{Ec. 1})$ $T [=] N \cdot m$ $P_s (\text{Potencia del eje}) = T [N \cdot m] \cdot \frac{2\pi}{60} [s^{-1}] \cdot \text{Velocidad rotacional [rpm]} \quad (\text{Ec. 2})$ $P_s [=] \text{Watts}$
	7. Asumir el C_p del aire a temperatura ambiente como $1.004 \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$, para calcular el cambio de la entalpía usar: $\Delta h = C_p (t_2 - t_1) \quad (\text{Ec. 4})$
	8. Calcular el calor generado por el sistema a partir de: $\dot{m} = \text{Flujo de aire en el rotámetro (4)}$ $\text{Consumo específico de aire} = \frac{\dot{m}}{P_s} \quad (\text{Ec. 3})$ $Q = \dot{m} * \Delta h + P_s \quad (\text{Ec. 5})$

Tabla 23

Etapa 3 laboratorio turbina de reacción.

Sí = ✓	Etapa 3, determinación de la eficacia isentrópica de una turbina.
	1. Lubricar la turbina antes de encenderla.

	2. Ajustar la válvula de presión inicial hasta alcanzar la presión inicial 2 indicada al grupo con la carga del freno libre.
	3. Aumentar la tensión del freno hasta reducir las revoluciones a la mitad (50%) de la alcanzada en el paso anterior.
	4. Mantener la configuración lograda en el paso 3 hasta que la temperatura de salida de aire de la turbina se estabilice.
	5. Observar y anotar los datos mostrados por los sensores y calcular: Potencia del eje: $T \text{ (Torque)} = \text{Fuerza (Dinamómetro)} [N] \cdot 0.0145 \text{ Radio del eje [m]} \quad (\text{Ec. 1})$ $T [=] N \cdot m$ $P_s \text{ (Potencia del eje)} = T [N \cdot m] \cdot \frac{2\pi}{60} [s^{-1}] \cdot \text{Velocidad rotacional [rpm]} \quad (\text{Ec. 2})$ $P_s [=] \text{Watts}$
	Temperatura absoluta de entrada: $T_1 = T_e + 273 \quad (\text{Ec. 6})$
	Presión absoluta de entrada (1): $P_1 \text{ Absoluta} = P_{atm} \quad (\text{Ec. 7})$
	Presión absoluta de salida (2) (ignorando la resistencia del tubo y del caudalímetro): $P_2 \text{ Absoluta} = P_{atm} \quad (\text{Ec. 8})$
	Relación de presión de la turbina: $R_p = \frac{P_1}{P_2} \quad (\text{Ec. 9})$

	<p>Temperatura de salida después de la expansión isentrópica:</p> $T_y = \frac{T_1}{R_p^{\left(\frac{1.4-1}{1.4}\right)}} \quad (\text{Ec. 10})$
	<p>Índice del cambio de entalpía isentrópico:</p> $H = m * C_p (T_1 - T_y) [w] \quad (\text{Ec. 11})$
	<p>Eficacia isentrópica externa:</p> $n = 100\% * \frac{P_s}{H} \quad (\text{Ec. 12})$

Formulas tomadas de:

P.A HILTON LTD, (2009). Manual de mantenimiento y funcionamiento experimental:
Módulo de turbinas F300C y F300D.

Anexo D. Resultados de prácticas base, prácticas de los grupos de estudiantes y tablas de diseño de experimentos

Imagen D.1

Resultados propuestos por el fabricante para la práctica de turbina de impulso operada a 60 kPa y 20000 rev/min

Resultados propuestos por los autores para la práctica en la turbina de impulso (operada a 60 kPa y 20000 rev/min)										
Etapa 1			Etapa 2							
Torque	RPM	Potencia eje	Valvulas de cierre parcial abiertas	Presión de entrada [kPa]	Fuerza de frenado [N]	Caudal de aire de salida [g/s]	Torque [Nm]	Potencia del eje [Watts]	Consumo específico de aire [kg/kJ]	
0	50000	0	4	60	1,6	4,58	0,023	48,59	0,094	
0,0029	48000	14,5	4	40	0,88	3,75	0,013	26,72	0,140	
0,008887	40000	36,4	3	60	1,15	3,5	0,017	34,92	0,100	
0,013	32000	43,5	3	40	0,65	2,85	0,009	19,74	0,144	
0,018	24000	47,2	2	60	0,7	2,3	0,010	21,26	0,108	
0,023	18000	43,7	2	40	0,4	1,9	0,006	12,15	0,156	
0,0275	12000	34,5	1	60	0,3	1,15	0,004	9,11	0,126	
0,032	6000	20,11	1	40	0,15	0,95	0,002	4,56	0,209	
0,0335	0	0								
Etapa 3					Etapa 4					
Presión de entrada (kPa)	Torque (N-m)	Potencia del eje (W)	Consumo específico de aire (kg/W-h)	Eficiencia isentrópica (%)	Velocidad angular (rpm)	Torque (N-m)	Potencia del eje (W)	Caudal de aire (kg/s)	Eficiencia isentrópica (%)	
20	0,06	125	3,8	38	12 000	0,18	226	0,045	40	
30	0,09	190	3,2	44	16 000	0,15	251	0,047	47	
40	0,12	250	2,9	48	20 000	0,12	251	0,05	50	
50	0,14	295	2,7	46	24 000	0,08	201	0,054	45	

Imagen D.2

Resultados obtenidos por los autores en la prueba base para la práctica de turbina de impulso operada a 60 kPa y 20000 rev/min

Datos obtenidos por los autores en las pruebas iniciales						
Turbina de impulso			Etapa 1			
VARIABLES DE ENTRADA	Presión de entrada [kPa]	Velocidad angular [rev/min]	Fuerza de frenado [N]	Torque [Nm]	Vel. Angular [rev/min]	Potencia del eje [Watts]
Etapa 1	60	-	0	0,000	40000	0,00
Etapa 2	-	20000	0,2	0,003	38000	11,54
Etapa 3	60	-	0,52	0,008	31000	24,48
Etapa 4	60	-	0,86	0,012	24000	31,34
Etapa 5	60	-	1,2	0,017	19000	34,62
			1,5	0,022	14000	31,89
			1,72	0,025	9000	23,51
			1,89	0,027	0	0,00
Etapa 2						
Valvulas de cierre parcial abiertas	Presión de entrada [kPa]	Fuerza de frenado [N]	Caudal de aire de salida [g/s]	Torque [Nm]	Potencia del eje [Watts]	Consumo específico de aire [kg/kJ]
4	60	1,42	4	0,021	43,12	0,093
4	40	0,56	3,2	0,008	17,01	0,188
3	60	1,11	3	0,016	33,71	0,089
3	40	0,54	2,34	0,008	16,40	0,143
2	60	0,65	2,1	0,009	19,74	0,106
2	40	0,12	1,62	0,002	3,64	0,445
1	60	0,22	0,98	0,003	6,68	0,147
1	40	0,09	0,4	0,001	2,73	0,146
Etapa 3		Etapa 4				
Presión de entrada [kPa]	60	Temperatura absoluta de entrada [K]	295			
Temperatura de entrada [°C]	22	Presión atmosférica [kPa]	101			
Temperatura de salida [°C]	18	Presión absoluta de entrada [kPa]	161			
Vel. Angular [rev/min]	20000	Presión absoluta de salida [kPa]	101			
Fuerza de frenado [N]	0,8	Relación de presión en la turbina	1,594059406			
Caudal de aire de salida [g/s]	4,2	Temperatura de salida después de la expansión isoentropica [K]	185,0621118			
Potencia del eje [Watts]	24,295	Tasa de cambio de la entalpía isoentropica [Watts]	463,586087			
Cambio en la entalpía específica [kJ/kg]	-6,32	Eficiencia isoentropica [%]	5,24066271			
Calor generado por el sistema [Watts]	41,09					

Imagen D.3

Graficas comparativos entre los datos de referencia del fabricante con los resultados de la prueba base realizada por los autores a las mismas condiciones de operación en la turbina de impulso

Graficas comparativas datos de referencia del fabricante con los resultados de la prueba base realizada por los autores

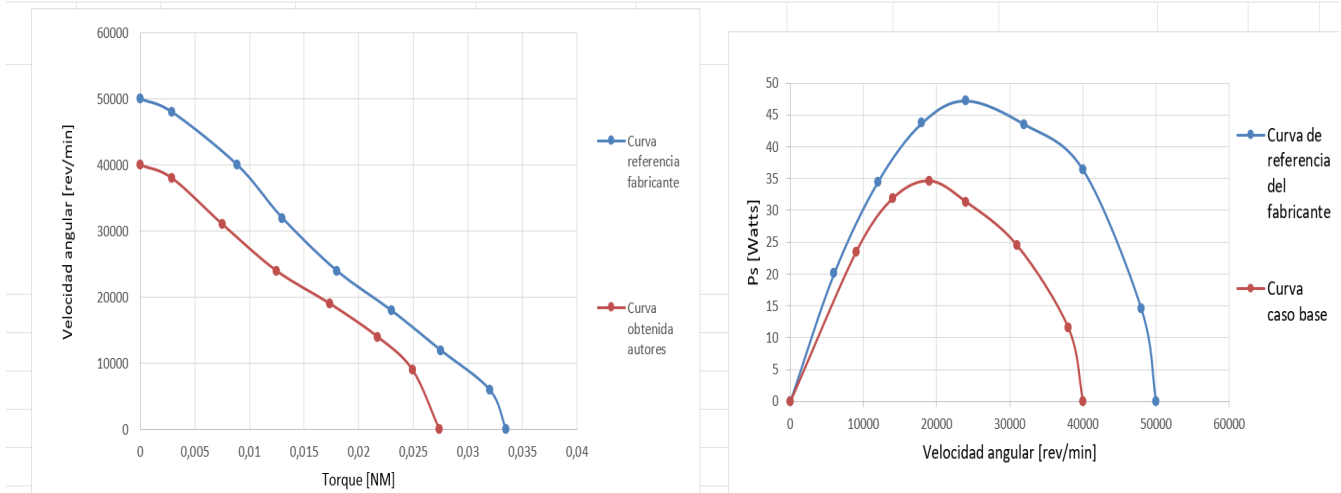


Imagen D.4

Prácticas diseñadas para la turbina de impulso para seis grupos diferentes de condiciones de operación

Práctica 1	Etapa 1: Relación entre torque y Potencia con la velocidad angular					Etapa 2: Consumo de aire específico según el impulso inicial y el número de válvulas.					
	Presión de trabajo 10 [kPa]					Velocidad angular 22000 [rev/min]					
	Ajustar velocidad angular	Medir		Calcular		Ajustar		Medir		Calcular	
	Momento	Fuerza de freno [N]	Velocidad angular, W [rev/min]	Potencia del eje [Watts]	Torque [Nm]	Número de valvulas de cierre parcial abiertas	Presion de entrada [kPa]	Caudal de salida aire, ṁ [kg/s]	Fuerza del freno, F [N]	Potencia del eje, Ps [Watts]	Consumo específico del aire, CEA [kg/kJ]
0	F0	W max	Ps0	T0	4	50	ṁ1	F1	Ps 1	CEA 1	
1	F1	85% Wmax	Ps1	T1	4	35	ṁ2	F2	Ps 2	CEA 2	
2	F2	70% Wmax	Ps2	T2	3	50	ṁ3	F3	Ps 3	CEA 3	
3	F3	55% Wmax	Ps3	T3	3	35	ṁ4	F4	Ps 4	CEA 4	
4	F4	40% Wmax	Ps4	T4	2	50	ṁ5	F5	Ps 5	CEA 5	
5	F5	25% Wmax	Ps5	T5	2	35	ṁ6	F6	Ps 6	CEA 6	
6	F6	10% Wmax	Ps6	T6	1	50	ṁ7	F7	Ps 7	CEA 7	
7	F7	0% Wmax	Ps7	T7	1	35	ṁ8	F8	Ps 8	CEA 8	

Etapa 3: Aplicación de la primera ley de la termodinámica a un sistema abierto sencillo sometido a un caudal constante.				Etapa 4: Determinación de la eficacia isentrópica de una turbina.			
Presión de trabajo 50 [kPa]				Presión de trabajo 40 [kPa]			
Ajustar	Medir	Calcular	Ajustar	Medir	Calcular		Eficacia isentrópica externa, n
Velocidad angular, W [rev/min]	Fuerza del freno [N]	Potencia del eje [Watts]	Velocidad angular, W [rev/min]	Fuerza del freno [N]	Potencia del eje, Ps [W]	Relación de presión de la turbina, Rp	
50% W max		Cambo de entalpía, ΔH [kJ/kg]	50% W max		Temperatura absoluta de entrada, tea [°K]	Temperatura de salida despues de la Expansión isoentrópica, Ty [°K]	
	Temperatura entrada y Salida [°C]	Calor generado por el sistema, Q [W]		Temperatura entrada [°C]	Presion absoluta de entrada, Pa [kPa]	Índice del cambio de entalpía isentrópico, H [W]	

Práctica 2	Etapa 1: Relación entre torque y Potencia con la velocidad angular					Etapa 2: Consumo de aire específico según el impulso inicial y el número de válvulas.				
	Presión de trabajo 20 [kPa]					Velocidad angular 20000 [rev/min]				
	ustar velocidad angul	Medir		Calcular		Ajustar		Medir		Calcular
	Momento	Fuerza de freno [N]	Velocidad angular, W [rev/min]	Potencia del eje [Watts]	Torque [Nm]	Número de valvulas de cierre parcial abiertas	Presion de entrada [kPa]	Caudal de salida aire, m [kg/s]	Fuerza del freno [N]	Potencia del eje [Watts]
0	F0	W max	Ps0	T0	4	50	m1	F1	Ps 1	CEA 1
1	F1	85% Wmax	Ps1	T1	4	35	m2	F2	Ps 2	CEA 2
2	F2	70% Wmax	Ps2	T2	3	50	m3	F3	Ps 3	CEA 3
3	F3	55% Wmax	Ps3	T3	3	35	m4	F4	Ps 4	CEA 4
4	F4	40% Wmax	Ps4	T4	2	50	m5	F5	Ps 5	CEA 5
5	F5	25% Wmax	Ps5	T5	2	35	m6	F6	Ps 6	CEA 6
6	F6	10% Wmax	Ps6	T6	1	50	m7	F7	Ps 7	CEA 7
7	F7	0% Wmax	Ps7	T7	1	35	m8	F8	Ps 8	CEA 8

Etapa 3: Aplicación de la primera ley de la termodinámica a un sistema abierto sencillo sometido a un caudal constante.			Etapa 4: Determinación de la eficacia isentrópica de una turbina.				
Presión de trabajo 40 [kPa]			Presión de trabajo 20 [kPa]				
Ajustar	Medir	Calcular	Ajustar	Medir	Calcular		
Velocidad angular, W [rev/min]	Presion de entrada [kPa]	Potencia del eje [Watts]	Velocidad angular, W [rev/min]	Presion de entrada [kPa]	Potencia del eje, Ps [W]	Relación de presión de la turbina, Rp	Eficacia isentrópica externa, n
50% W max	Fuerza del freno [N]	Cambo de entalpía, ΔH [kJ/kg]	50% W max	Fuerza del freno [N]	Temperatura entrada absoluta, tea [°K]	Temperatura salida despues de la Expansión isoentrópica, Ty [°K]	
	Temperatura entrada y Salida [°C]	Calor generado por el sistema, Q [W]		Temperatura entrada [°C]	Presion absoluta de entrada, Pa [kPa]	Índice del cambio de entalpía isentrópico, H [W]	

Práctica 3	Etapa 1: Relación entre torque y Potencia con la velocidad angular				Etapa 2: Consumo de aire específico según el impulso inicial y el número de válvulas.						
	Presión de trabajo 30 [kPa]				Velocidad angular 17500 [rev/min]						
	Ajustar velocidad angu	Medir		Calcular		Ajustar		Medir		Calcular	
	Momento	Fuerza de freno [N]	Velocidad angular, W [rev/min]	Potencia del eje [Watts]	Torque [Nm]	Número de valvulas de cierre parcial abiertas	Presion de entrada [kPa]	Caudal de salida aire, m [kg/s]	Fuerza del freno [N]	Potencia del eje [Watts]	Consumo especifico del aire, CEA [kg/kJ]
0	F0	W max	Ps0	T0	4	50	m1	F1	Ps 1	CEA 1	
1	F1	85% Wmax	Ps1	T1	4	35	m2	F2	Ps 2	CEA 2	
2	F2	70% Wmax	Ps2	T2	3	50	m3	F3	Ps 3	CEA 3	
3	F3	55% Wmax	Ps3	T3	3	35	m4	F4	Ps 4	CEA 4	
4	F4	40% Wmax	Ps4	T4	2	50	m5	F5	Ps 5	CEA 5	
5	F5	25% Wmax	Ps5	T5	2	35	m6	F6	Ps 6	CEA 6	
6	F6	10% Wmax	Ps6	T6	1	50	m7	F7	Ps 7	CEA 7	
7	F7	0% Wmax	Ps7	T7	1	35	m8	F8	Ps 8	CEA 8	

Etapa 3: Aplicación de la primera ley de la termodinámica a un sistema abierto sencillo sometido a un caudal constante.				Etapa 4: Determinación de la eficacia isentrópica de una turbina.				
Presión de trabajo 35 [kPa]				Presión de trabajo 15 [kPa]				
Ajustar	Medir		Calcular	Ajustar	Medir	Calcular		
Velocidad angular, W [rev/min]	Presion de entrada [kPa]		Potencia del eje [Watts]	Velocidad angular, W [rev/min]	Presion de entrada [kPa]	Potencia del eje, Ps [W]	Relación de presión de la turbina, Rp	Eficacia isentrópica externa, n
50% W max	Fuerza del freno [N]		Cambo de entalpia, ΔH [kJ/kg]	50% W max	Fuerza del freno [N]	Temperatura entrada absoluta, tea [°K]	Temperatura salida despues de la Expansión isoentrópica, Ty [°K]	
	Temperatura entrada y Salida [°C]		Calor generado por el sistema, Q [W]		Temperatura entrada [°C]	Presion absoluta de entrada, Pa [kPa]	Índice del cambio de entalpía isentrópico, H [W]	

Práctica 4	Etapa 1: Relación entre torque y Potencia con la velocidad angular					Etapa 2: Consumo de aire específico según el impulso inicial y el número de válvulas.					
	Presión de trabajo 40 [kPa]					Velocidad angular 15000 [rev/min]					
	Ajustar velocidad angu	Medir		Calcular		Ajustar		Medir		Calcular	
	Momento	Fuerza de freno [N]	Velocidad angular, W [rev/min]	Potencia del eje [Watts]	Torque [Nm]	Número de valvulas de cierre parcial abiertas	Presion de entrada [kPa]	Caudal de salida aire, \dot{m} [kg/s]	Fuerza del freno [N]	Potencia del eje [Watts]	Consumo específico del aire, CEA [kg/kJ]
0	F0	W max	Ps0	T0	4	50	$\dot{m}1$	F1	Ps 1	CEA 1	
1	F1	85% Wmax	Ps1	T1	4	35	$\dot{m}2$	F2	Ps 2	CEA 2	
2	F2	70% Wmax	Ps2	T2	3	50	$\dot{m}3$	F3	Ps 3	CEA 3	
3	F3	55% Wmax	Ps3	T3	3	35	$\dot{m}4$	F4	Ps 4	CEA 4	
4	F4	40% Wmax	Ps4	T4	2	50	$\dot{m}5$	F5	Ps 5	CEA 5	
5	F5	25% Wmax	Ps5	T5	2	35	$\dot{m}6$	F6	Ps 6	CEA 6	
6	F6	10% Wmax	Ps6	T6	1	50	$\dot{m}7$	F7	Ps 7	CEA 7	
7	F7	0% Wmax	Ps7	T7	1	35	$\dot{m}8$	F8	Ps 8	CEA 8	

Etapa 3: Aplicación de la primera ley de la termodinámica a un sistema abierto sencillo sometido a un caudal constante.				Etapa 4: Determinación de la eficacia isentrópica de una turbina.				
Presión de trabajo 30 [kPa]				Presión de trabajo 30 [kPa]				
Ajustar	Medir	Calcular		Ajustar	Medir	Calcular		
Velocidad angular, W [rev/min]	Presion de entrada [kPa]	Potencia del eje [Watts]		Velocidad angular, W [rev/min]	Presion de entrada [kPa]	Potencia del eje, Ps [W]	Relación de presión de la turbina, Rp	Eficacia isentrópica externa, n
50% W max	Fuerza del freno [N]	Cambo de entalpía, ΔH [kJ/kg]		50% W max	Fuerza del freno [N]	Temperatura entrada absoluta, tea [°K]	Temperatura salida despues de la Expansión isoentrópica, Ty [°K]	
	Temperatura entrada y Salida [°C]	Calor generado por el sistema, Q [W]			Temperatura entrada [°C]	Presion absoluta de entrada, Pa [kPa]	Índice del cambio de entalpía isentrópico, H [W]	

Práctica 5	Etapa 1: Relación entre torque y Potencia con la velocidad angular					Etapa 2: Consumo de aire específico según el impulso inicial y el número de válvulas.					
	Presión de trabajo 50 [kPa]					Velocidad angular 12500 [rev/min]					
	Ajustar velocidad angu	Medir		Calcular		Ajustar		Medir		Calcular	
	Momento	Fuerza de freno [N]	Velocidad angular, W [rev/min]	Potencia del eje [Watts]	Torque [Nm]	Número de valvulas de cierre parcial abiertas	Presion de entrada [kPa]	Caudal de salida aire, m [kg/s]	Fuerza del freno [N]	Potencia del eje [Watts]	Consumo específico del aire, CEA [kg/kJ]
	0	F0	W max	Ps0	T0	4	50	m1	F1	Ps 1	CEA 1
	1	F1	85% Wmax	Ps1	T1	4	35	m2	F2	Ps 2	CEA 2
	2	F2	70% Wmax	Ps2	T2	3	50	m3	F3	Ps 3	CEA 3
	3	F3	55% Wmax	Ps3	T3	3	35	m4	F4	Ps 4	CEA 4
	4	F4	40% Wmax	Ps4	T4	2	50	m5	F5	Ps 5	CEA 5
	5	F5	25% Wmax	Ps5	T5	2	35	m6	F6	Ps 6	CEA 6
	6	F6	10% Wmax	Ps6	T6	1	50	m7	F7	Ps 7	CEA 7
	7	F7	0% Wmax	Ps7	T7	1	35	m8	F8	Ps 8	CEA 8

Etapa 3: Aplicación de la primera ley de la termodinámica a un sistema abierto sencillo sometido a un caudal constante.				Etapa 4: Determinación de la eficacia isentrópica de una turbina.				
Presión de trabajo 25 [kPa]				Presión de trabajo 35 [kPa]				
Ajustar	Medir	Calcular		Ajustar	Medir	Calcular		
Velocidad angular, W [rev/min]	Presion de entrada [kPa]	Potencia del eje [Watts]		Velocidad angular, W [rev/min]	Presion de entrada [kPa]	Potencia del eje, Ps [W]	Relación de presión de la turbina, Rp	Eficacia isentrópica externa, n
50% W max	Fuerza del freno [N]	Cambo de entalpía, ΔH [kJ/kg]		50% W max	Fuerza del freno [N]	Temperatura entrada absoluta, tea [°K]	Temperatura salida despues de la Expansión isoentrópica, Ty [°K]	
	Temperatura entrada y Salida [°C]	Calor generado por el sistema, Q [W]			Temperatura entrada [°C]	Presion absoluta de entrada, Pa [kPa]	Índice del cambio de entalpía isentrópico, H [W]	

Práctica 6	Etapa 1: Relación entre torque y Potencia con la velocidad angular					Etapa 2: Consumo de aire específico según el impulso inicial y el número de válvulas.					
	Presión de trabajo 45 [kPa]					Velocidad angular 10000 [rev/min]					
	Ajustar velocidad angu	Medir		Calcular		Ajustar		Medir		Calcular	
	Momento	Fuerza de freno [N]	Velocidad angular, W [rev/min]	Potencia del eje [Watts]	Torque [Nm]	Número de valvulas de cierre parcial abiertas	Presion de entrada [kPa]	Caudal de salida aire, m [kg/s]	Fuerza del freno [N]	Potencia del eje [Watts]	Consumo específico del aire, CEA [kg/kJ]
	0	F0	W _{max}	Ps0	T0	4	50	m1	F1	Ps 1	CEA 1
	1	F1	85% W _{max}	Ps1	T1	4	35	m2	F2	Ps 2	CEA 2
	2	F2	70% W _{max}	Ps2	T2	3	50	m3	F3	Ps 3	CEA 3
	3	F3	55% W _{max}	Ps3	T3	3	35	m4	F4	Ps 4	CEA 4
4	F4	40% W _{max}	Ps4	T4	2	50	m5	F5	Ps 5	CEA 5	
5	F5	25% W _{max}	Ps5	T5	2	35	m6	F6	Ps 6	CEA 6	
6	F6	10% W _{max}	Ps6	T6	1	50	m7	F7	Ps 7	CEA 7	
7	F7	0% W _{max}	Ps7	T7	1	35	m8	F8	Ps 8	CEA 8	

Etapa 3: Aplicación de la primera ley de la termodinámica a un sistema abierto sencillo sometido a un caudal constante.			Etapa 4: Determinación de la eficacia isentrópica de una turbina.				
Presión de trabajo 15 [kPa]			Presión de trabajo 25 [kPa]				
Ajustar	Medir	Calcular	Ajustar	Medir	Calcular		
Velocidad angular, W [rev/min]	Presion de entrada [kPa]	Potencia del eje [Watts]	Velocidad angular, W [rev/min]	Presion de entrada [kPa]	Potencia del eje, Ps [W]	Relación de presión de la turbina, Rp	Eficacia isentrópica externa, n
50% W _{max}	Fuerza del freno [N]	Cambo de entalpia, ΔH [kJ/kg]	50% W _{max}	Fuerza del freno [N]	Temperatura entrada absoluta, tea [°K]	Temperatura salida despues de la Expansión isoentrópica, Ty [°K]	
	Temperatura entrada y Salida [°C]	Calor generado por el sistema, Q [W]		Temperatura entrada [°C]	Presion absoluta de entrada, Pa [kPa]	Índice del cambio de entalpía isentrópico, H [W]	

Imagen D.5

Prácticas diseñadas para la turbina de reacción para seis grupos diferentes de condiciones de operación

Práctica 1	Etapla 1: Relación entre torque y Potencia con la velocidad angular				
	Presión de trabajo 10 [kPa]				
	Ajustar velocidad angul	Medir		Calcular	
	Momento	Fuerza de freno [N]	Velocidad angular, W [rev/min]	Potencia del eje [Watts]	Torque [Nm]
	0	F0	W max	Ps0	T0
	1	F1	85% Wmax	Ps1	T1
	2	F2	70% Wmax	Ps2	T2
	3	F3	55% Wmax	Ps3	T3
	4	F4	40% Wmax	Ps4	T4
	5	F5	25% Wmax	Ps5	T5
6	F6	10% Wmax	Ps6	T6	
7	F7	0% Wmax	Ps7	T7	

Etapla 2: Aplicación de la primera ley de la termodinámica a un sistema abierto sencillo sometido a un caudal constante.			Etapla 3: Determinación de la eficacia isentrópica de una turbina.				
Presión de trabajo 50 [kPa]			Presión de trabajo 40 [kPa]				
Ajustar	Medir	Calcular	Ajustar	Medir	Calcular		
Velocidad angular, W [rev/min] hasta 50% W max	Presion de entrada [kPa]	Potencia del eje [Watts]	Velocidad angular, W [rev/min] hasta 50% W max	Presion de entrada [kPa]	Potencia del eje, Ps [W]	Relación de presión de la turbina, Rp	Eficacia isentrópica externa, n
	Fuerza del freno [N]	Cambo de entalpía, ΔH [kJ/kg]		Fuerza del freno [N]	Temperatura entrada absoluta, tea [°K]	Temperatura salida despues de la Expansión isoentrópica, Ty [°K]	
	Temperatura entrada y Salida [°C]	Calor generado por el sistema, Q [W]		Temperatura entrada [°C]	Presion absoluta de entrada, Pa [kPa]	Índice del cambio de entalpía isentrópico, H [W]	

Etapa 1: Relación entre torque y Potencia con la velocidad angular					
Presión de trabajo 20 [kPa]					
Práctica 2	Ajustar velocidad angular	Medir		Calcular	
	Momento	Fuerza de freno [N]	Velocidad angular, W [rev/min]	Potencia del eje [Watts]	Torque [Nm]
	0	F0	W max	Ps0	T0
	1	F1	85% Wmax	Ps1	T1
	2	F2	70% Wmax	Ps2	T2
	3	F3	55% Wmax	Ps3	T3
	4	F4	40% Wmax	Ps4	T4
	5	F5	25% Wmax	Ps5	T5
	6	F6	10% Wmax	Ps6	T6
	7	F7	0% Wmax	Ps7	T7

Etapa 2: Aplicación de la primera ley de la termodinámica a un sistema abierto sencillo sometido a un caudal constante.			Etapa 3: Determinación de la eficacia isentrópica de una turbina.					
Presión de trabajo 40 [kPa]			Presión de trabajo 20 [kPa]					
Ajustar	Medir	Calcular	Ajustar	Medir	Calcular			
Velocidad angular, W [rev/min] hasta 50% W max	Presión de entrada [kPa]	Potencia del eje [Watts]	Velocidad angular, W [rev/min] hasta 50% W max	Presión de entrada [kPa]	Potencia del eje, Ps [W]	Relación de presión de la turbina, Rp		Eficacia isentrópica externa, n
	Fuerza del freno [N]	Cambio de entalpía, ΔH [kJ/kg]		Fuerza del freno [N]	Temperatura entrada absoluta, tea [°K]	Temperatura salida después de la Expansión isoentrópica, Ty [°K]		
	Temperatura entrada y Salida [°C]	Calor generado por el sistema, Q [W]		Temperatura entrada [°C]	Presión absoluta de entrada, Pa [kPa]	Índice del cambio de entalpía isentrópico, H [W]		

Práctica 3	Etapas 1: Relación entre torque y Potencia con la velocidad angular				
	Presión de trabajo 30 [kPa]				
	Ajustar velocidad angul	Medir		Calcular	
	Momento	Fuerza de freno [N]	Velocidad angular, W [rev/min]	Potencia del eje [Watts]	Torque [Nm]
	0	F0	W max	Ps0	T0
	1	F1	85% Wmax	Ps1	T1
	2	F2	70% Wmax	Ps2	T2
	3	F3	55% Wmax	Ps3	T3
	4	F4	40% Wmax	Ps4	T4
	5	F5	25% Wmax	Ps5	T5
6	F6	10% Wmax	Ps6	T6	
7	F7	0% Wmax	Ps7	T7	

Etapas 2: Aplicación de la primera ley de la termodinámica a un sistema abierto sencillo sometido a un caudal constante.			Etapas 3: Determinación de la eficacia isentrópica de una turbina.					
Presión de trabajo 35 [kPa]			Presión de trabajo 15 [kPa]					
Ajustar	Medir	Calcular	Ajustar	Medir	Calcular			
Velocidad angular, W [rev/min] hasta 50% W max	Presion de entrada [kPa]	Potencia del eje [Watts]	Velocidad angular, W [rev/min] hasta 50% W max	Presion de entrada [kPa]	Potencia del eje, Ps [W]	Relación de presión de la turbina, Rp		Eficacia isentrópica externa, n
	Fuerza del freno [N]	Cambo de entalpía, ΔH [kJ/kg]		Fuerza del freno [N]	Temperatura entrada absoluta, tea [°K]	Temperatura salida despues de la Expansión isoentrópica, Ty [°K]		
	Temperatura entrada y Salida [°C]	Calor generado por el sistema, Q [W]		Temperatura entrada [°C]	Presion absoluta de entrada, Pa [kPa]	Índice del cambio de entalpía isentrópico, H [W]		

Práctica 4	Etapa 1: Relación entre torque y Potencia con la velocidad angular				
	Presión de trabajo 40 [kPa]				
	Ajustar velocidad angul	Medir		Calcular	
	Momento	Fuerza de freno [N]	Velocidad angular, W [rev/min]	Potencia del eje [Watts]	Torque [Nm]
	0	F0	W max	Ps0	T0
	1	F1	85% Wmax	Ps1	T1
	2	F2	70% Wmax	Ps2	T2
	3	F3	55% Wmax	Ps3	T3
	4	F4	40% Wmax	Ps4	T4
	5	F5	25% Wmax	Ps5	T5
6	F6	10% Wmax	Ps6	T6	
7	F7	0% Wmax	Ps7	T7	

Etapa 2: Aplicación de la primera ley de la termodinámica a un sistema abierto sencillo sometido a un caudal constante.			Etapa 3: Determinación de la eficacia isentrópica de una turbina.					
Presión de trabajo 30 [kPa]			Presión de trabajo 30 [kPa]					
Ajustar	Medir	Calcular	Ajustar	Medir	Calcular			
Velocidad angular, W [rev/min] hasta 50% W max	Presion de entrada [kPa]	Potencia del eje [Watts]	Velocidad angular, W [rev/min] hasta 50% W max	Presion de entrada [kPa]	Potencia del eje, Ps [W]	Relación de presión de la turbina, Rp		Eficacia isentrópica externa, n
	Fuerza del freno [N]	Cambo de entalpía, ΔH [kJ/kg]		Fuerza del freno [N]	Temperatura entrada absoluta, tea [°K]	Temperatura salida despues de la Expansión isoentrópica, Ty [°K]		
	Temperatura entrada y Salida [°C]	Calor generado por el sistema, Q [W]		Temperatura entrada [°C]	Presion absoluta de entrada, Pa [kPa]	Índice del cambio de entalpía isentrópico, H [W]		

Práctica 5	Etapla 1: Relación entre torque y Potencia con la velocidad angular				
	Presión de trabajo 50 [kPa]				
	Ajustar velocidad angul	Medir		Calcular	
	Momento	Fuerza de freno [N]	Velocidad angular, W [rev/min]	Potencia del eje [Watts]	Torque [Nm]
	0	F0	W max	Ps0	T0
	1	F1	85% Wmax	Ps1	T1
	2	F2	70% Wmax	Ps2	T2
	3	F3	55% Wmax	Ps3	T3
	4	F4	40% Wmax	Ps4	T4
	5	F5	25% Wmax	Ps5	T5
6	F6	10% Wmax	Ps6	T6	
7	F7	0% Wmax	Ps7	T7	

Etapla 2: Aplicación de la primera ley de la termodinámica a un sistema abierto sencillo sometido a un caudal constante.			Etapla 3: Determinación de la eficacia isentrópica de una turbina.				
Presión de trabajo 20 [kPa]			Presión de trabajo 35 [kPa]				
Ajustar	Medir	Calcular	Ajustar	Medir	Calcular		
Velocidad angular, W [rev/min] hasta 50% W max	Presion de entrada [kPa]	Potencia del eje [Watts]	Velocidad angular, W [rev/min] hasta 50% W max	Presion de entrada [kPa]	Potencia del eje, Ps [W]	Relación de presión de la turbina, Rp	Eficacia isentrópica externa, n
	Fuerza del freno [N]	Cambo de entalpía, ΔH [kJ/kg]		Fuerza del freno [N]	Temperatura entrada absoluta, tea [°K]	Temperatura salida despues de la Expansión isoentrópica, Ty [°K]	
	Temperatura entrada y Salida [°C]	Calor generado por el sistema, Q [W]		Temperatura entrada [°C]	Presion absoluta de entrada, Pa [kPa]	Índice del cambio de entalpía isentrópico, H [W]	

Práctica 6	Etapa 1: Relación entre torque y Potencia con la velocidad angular				
	Presión de trabajo 45 [kPa]				
	Ajustar velocidad angul	Medir		Calcular	
	Momento	Fuerza de freno [N]	Velocidad angular, W [rev/min]	Potencia del eje [Watts]	Torque [Nm]
	0	F0	W max	Ps0	T0
	1	F1	85% Wmax	Ps1	T1
	2	F2	70% Wmax	Ps2	T2
	3	F3	55% Wmax	Ps3	T3
	4	F4	40% Wmax	Ps4	T4
	5	F5	25% Wmax	Ps5	T5
6	F6	10% Wmax	Ps6	T6	
7	F7	0% Wmax	Ps7	T7	

Etapa 2: Aplicación de la primera ley de la termodinámica a un sistema abierto sencillo sometido a un caudal constante.			Etapa 3: Determinación de la eficacia isentrópica de una turbina.					
Presión de trabajo 15 [kPa]			Presión de trabajo 25 [kPa]					
Ajustar	Medir	Calcular	Ajustar	Medir	Calcular			
Velocidad angular, W [rev/min] hasta 50% W max	Presion de entrada [kPa]	Potencia del eje [Watts]	Velocidad angular, W [rev/min] hasta 50% W max	Presion de entrada [kPa]	Potencia del eje, Ps [W]	Relación de presión de la turbina, Rp		Eficacia isentrópica externa, n
	Fuerza del freno [N]	Cambo de entalpía, ΔH [kJ/kg]		Fuerza del freno [N]	Temperatura entrada absoluta, tea [°K]	Temperatura salida despues de la Expansión isoentrópica, Ty [°K]		
	Temperatura entrada y Salida [°C]	Calor generado por el sistema, Q [W]		Temperatura entrada [°C]	Presion absoluta de entrada, Pa [kPa]	Índice del cambio de entalpía isentrópico, H [W]		