



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**PROPUESTA DE INSTRUCTIVO PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIO DEL CURSO DE
TERMODINÁMICA 2 EN LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

Henry Fernando Duarte García

Asesorado por el Ing. Roberto Guzmán Ortiz

Guatemala, noviembre de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE INSTRUCTIVO PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIO DEL CURSO DE
TERMODINÁMICA 2 EN LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

HENRY FERNANDO DUARTE GARCÍA
ASESORADO POR EL ING. ROBERTO GUZMÁN ORTIZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramirez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Roberto Guzmán Ortíz
EXAMINADOR	Ing. Carlos Enrique Chicol Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Milton Alexander Fuentes Orozco
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**PROPUESTA DE INSTRUCTIVO PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIO
DEL CURSO DE TERMODINÁMICA 2 EN LA ESCUELA DE INGENIERÍA
MECÁNICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS DE GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 9 de marzo de 2015.



Henry Fernando Duarte García



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.EIM.273.2017

Guatemala, 28 de septiembre de 2017

Ingeniero
Roberto Guzmán Ortiz
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería, USAC

Estimado Ing. Guzmán:

Por este medio le informo que ha finalizado la etapa de asesoría del trabajo de graduación titulado: **PROPUESTA DE INSTRUCTIVO PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIO DEL CURSO DE TERMODINÁMICA 2 EN LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS**, realizado por el estudiante **Henry Fernando Duarte García**, CUI 2331685592201, **Reg. Académico No 201212821**, considerando que cumple con el contenido y objetivos propuestos en el protocolo aprobado por la Escuela de Ingeniería Mecánica.

Atentamente,

Id y Enseñad a Todos

Ing. Roberto Guzmán Ortiz
Colegiado No. 4465

Roberto Guzmán Ortiz
INGENIERO MECANICO
COLEGIADO No. 4465

RG/aej
c. Archivo



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.275.2017

El Coordinador del Área Térmica de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **PROPUESTA DE INSTRUCTIVO PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIO DEL CURSO DE TERMODINÁMICA 2 EN LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS** desarrollado por el estudiante **Henry Fernando Duarte García, CUI 2331685592201, Registro Académico 201212821** recomienda su aprobación.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Julio César Campos Paiz
Coordinador Área Térmica
Escuela de Ingeniería Mecánica



MA Ing. Julio César Campos Paiz
Ingeniero Mecánico
Colegiado No. 2701

Guatemala, septiembre 2017



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

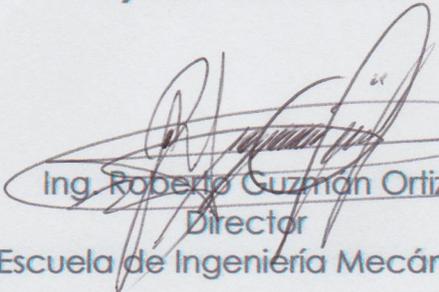
Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.324.2017

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación del Coordinador del Área Térmica del trabajo de graduación titulado: **PROPUESTA DE INSTRUCTIVO PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIO DEL CURSO DE TERMODINÁMICA 2 EN LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS** del estudiante **Henry Fernando Duarte García, CUI 2331685592201, Registro Académico 201212821** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Roberto Guzmán Ortiz
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica



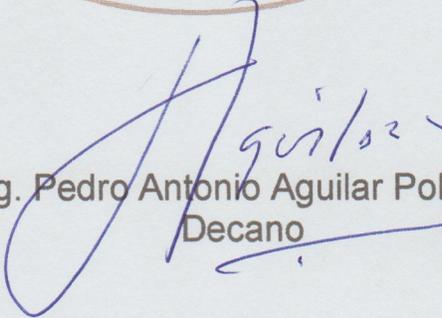
Guatemala noviembre de 2017

/aej



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **PROPUESTA DE INSTRUCTIVO PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIO DEL CURSO DE TERMODINÁMICA 2 EN LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Henry Fernando Duarte García**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, noviembre de 2017

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser el guía e influencia en mi carrera.
Mi madre	Angélica Marisa, por incentivar me y por su amor que ha sido una inspiración en mi vida.
Mis abuelos	Carlos Alberto y Catalina (q. e. p. d.), por sus sabios consejos.
Mis hermanos	Gabriell, Carlos y Brandon, por el apoyo incondicional brindado en estos años de estudio.
Mis primos	Katty, Stephanny, Ronald, Mario y Kevin García, por el soporte brindado en estos años de estudio.
Los ingenieros	Anabela Cordova y Hugo Rivera por compartir sus conocimientos y sabios consejos.
Mis compañeros	Juanma Perez, Joel Arias, Daniel Mendoza, Antonio Camacho, Lino Chavez, Adriana Garcia, Jota Roman, Jeffrey Barrientos, Fabricio Siliezar, Dina Ventura, Reyna Valiente y Luis Vanegas, por el esfuerzo compartido durante la carrera.

Mi asesor

Roberto Guzmán Ortiz, por apoyarme en todo lo posible en la realización de mi trabajo de graduación.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de
San Carlos de
Guatemala**

Por brindarme la oportunidad de realizarme profesionalmente.

Facultad de Ingeniería

Por entregarme las herramientas necesarias para ser un profesional de éxito.

**Mis amigos de la
Facultad**

Por estar conmigo en todas las situaciones vividas dentro de mi periodo de estudiante.

Mis catedráticos

Por compartir el valioso conocimiento que se requiere para ser un profesional de éxito. Especialmente a Julio Campos, por su valioso conocimiento transmitido.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Historia de la termodinámica	1
1.1.1. Origen.....	1
1.1.2. Evolución y unión con la mecánica.....	1
1.2. Importancia del aprendizaje de la termodinámica para el ingeniero.....	2
1.2.1. Comprensión de los fenómenos termodinámicos	2
1.2.2. Análisis de procesos donde intervienen variables termodinámicas	2
1.2.3. Predicción de resultados al aplicar conocimiento de las leyes de la termodinámica.....	3
1.3. Enseñanza de la termodinámica en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala	3
1.3.1. Programa actual del contenido del curso.....	3
1.3.1.1. Unidad 1. Ciclos de potencia	4
1.3.1.2. Unidad 2. Mezcla de gases y vapores.....	4
1.3.1.3. Unidad 3. Principios de combustión.....	4

1.3.1.4.	Unidad 4. Transferencia de calor	4
1.3.1.5.	Unidad 5. Aspectos termodinámicos del flujo de fluidos.....	5
1.3.2.	Metodología actual del desarrollo del curso	6
1.3.3.	Clases presenciales	6
1.3.4.	Trabajo dirigido.....	6
1.3.5.	Metodología de la evaluación del curso	7
1.3.5.1.	Exámenes parciales	7
1.3.5.2.	Tareas en clase.....	7
1.3.5.3.	Trabajo dirigido.....	7
2.	MARCO TEÓRICO	9
2.1.	Conceptos generales, mediciones fundamentales y ley cero de la termodinámica.....	9
2.1.1.	Definición de termodinámica	9
2.1.2.	Estudio de la termodinámica a nivel macroscópico	9
2.1.3.	Sistemas termodinámicos	10
2.1.3.1.	Sistema	10
2.1.3.2.	Entorno.....	10
2.1.3.3.	Frontera del sistema.....	10
2.1.3.4.	Sistema aislado	10
2.1.3.5.	Volumen de control	10
2.1.3.6.	Superficie de control.....	11
2.1.4.	Propiedades y estados de un sistema.....	11
2.1.5.	Procesos y ciclos.....	12
2.2.	Sustancias puras.....	13
2.2.1.	Fases de una sustancia pura y equilibrio de fases.....	13

2.2.2.	Diagramas de fases de agua.....	13
2.2.2.1.	Diagrama T – v	13
2.2.2.1.1.	Región líquido comprimido	14
2.2.2.1.2.	Punto líquido saturado..	14
2.2.2.1.3.	Región de mezcla (calidad).....	14
2.2.2.1.4.	Punto vapor saturado ...	14
2.2.2.1.5.	Región vapor sobrecalentado	15
2.2.2.1.6.	Punto crítico.....	16
2.2.2.2.	Curva P – v	17
2.2.2.3.	Curva P – T.....	17
2.2.3.	Tablas de vapor.....	18
2.2.3.1.	Identificación de un estado dados de sus propiedades.....	19
2.2.3.2.	Propiedades específicas encontradas en las tablas de vapor	19
2.2.3.3.	Volumen	19
2.2.3.4.	Energía interna	19
2.2.3.5.	Entalpia.....	20
2.2.3.6.	Entropía	20
2.2.4.	Calor de vaporización	21
2.3.	Primera ley de la termodinámica aplicada al análisis de equipo.....	21
2.3.1.	Bombas, compresores y turbinas	21
2.3.2.	Toberas y difusores	22
2.3.3.	Intercambiadores de calor	23
2.3.3.1.	Tipos de intercambiadores de calor.....	24

	2.3.3.1.1.	Carcaza y tubo	25
	2.3.3.1.2.	Plato	25
2.3.4.		Ciclos de potencia de gas	26
	2.3.4.1.	Ciclo de Carnot.....	27
	2.3.4.2.	Ciclo de Otto.....	27
	2.3.4.3.	Ciclo Diésel	30
	2.3.4.4.	Ciclo Brayton	31
	2.3.4.4.1.	Ciclo Brayton regenerativo	32
2.3.5.		Ciclos de potencia de vapor.	34
	2.3.5.1.	Ciclo Rankine	34
	2.3.5.2.	Ciclo Rankine recalentado.....	36
	2.3.5.3.	Ciclo Rankine regenerativo	37
3.		DESARROLLO EXPERIMENTAL DE PRÁCTICAS	41
3.1.		Metodología del contenido de cada práctica	41
3.2.		Práctica 1. Medición de variables termodinámicas	42
	3.2.1.	Transferencia de calor, temperatura en una sustancia y balance de energía.....	51
3.3.		Práctica 2. Determinación de la calidad del vapor mediante calentamiento de agua	56
3.4.		Práctica 3. Determinación de la presión de un vapor	62
3.5.		Práctica 4. Balance termodinámico de una caldera	66
3.6.		Práctica 5. Propiedades termodinámicas del vapor de agua ...	72
3.7.		Práctica 6. Curva de equilibrio líquido-vapor de agua	76
3.8.		Práctica 7. Psicometría	81
3.9.		Práctica 8. Intercambiador de calor aire-agua.....	84
3.10.		Práctica 9. Ciclo de potencia de vapor Rankine.....	89
3.11.		Práctica 10. Torre de enfriamiento.	92

4.	POSIBLE IMPLEMENTACIÓN.....	95
4.1.	Número de prácticas y ponderación	95
4.2.	Duración sugerida de las prácticas.....	97
4.3.	Cronograma de actividades.....	97
4.4.	Recursos necesarios	100
4.4.1.	Equipo	100
4.4.2.	Instalaciones.....	100
	CONCLUSIONES	103
	RECOMENDACIONES	105
	BIBLIOGRAFÍA.....	107

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Curva T – v.....	15
2.	Campana de Gauss en diagrama T – v.....	16
3.	Diagrama P – v	17
4.	Ilustración 1, diagrama P –T	18
5.	Ciclo ideal y real en diagrama P-v.....	26
6.	Ciclo de Carnot en diagrama P-v	27
7.	Ciclo de Otto (real) en diagrama P-v.....	29
8.	Ciclo de Otto (ideal) en diagrama P-v y T-s	29
9.	Ciclo Diesel (ideal) en diagrama P-v y T-s	30
10.	Ciclo Brayton (ideal) en diagrama P-v y T-s.....	32
11.	Ciclo Brayton regenerativo en diagrama T-s y P-v.....	33
12.	Diagrama de equipos en ciclo Brayton regenerativo	33
13.	Ciclo Rankine (ideal) en diagrama T-s	35
14.	Diagrama de equipo ciclo Rankine.....	36
15.	Ciclo Rankine recalentado en diagrama T-s	37
16.	Ciclo Rankine regenerativo en diagrama T-s con calentador abierto...	38
17.	Diagrama de equipo ciclo Rankine regenerativo con calentador abierto	39
18.	Ciclo Rankine regenerativo en diagrama T-s con calentador cerrado..	40
19.	Diagrama de equipo ciclo Rankine regenerativo con calentador cerrado.....	40
20.	Volumen – presión	46
21.	Representación de proceso isotérmico	47

22.	Representación de proceso isobárico.....	48
23.	Representación de proceso isocórico.....	50
24.	Representación de proceso ley cero de la termodinámica.....	51
25.	Montaje de material.....	53
26.	Vaso de precipitado de 250 ml en vaso de precipitados de 400 ml.....	55
27.	Montaje de material.....	59
28.	Montaje de calorímetro.....	60
29.	Montaje del equipo de laboratorio.....	64
30.	Sistema constituido por la caldera.....	67
31.	Esquema de intercambiador de calor.....	86
32.	Sección transversal de intercambiador de calor.....	86
33.	Esquema de la planta de vapor.....	90
34.	Esquema del equipo.....	93

TABLAS

I.	Datos de resumen para gráfica.....	45
II.	Temperaturas del proceso de calentamiento de 160 mL de agua.....	55
III.	Resultados de las mediciones de temperaturas durante el proceso de intercambio de calor.....	56
IV.	Toma de datos tiempo y temperatura.....	61
V.	Registro de temperatura y altura de mercurio durante el calentamiento/enfriamiento.....	65
VI.	Obtención de presión manométrica a partir de las diferentes alturas de mercurio.....	66
VII.	Lecturas efectuadas.....	71
VIII.	Toma de datos.....	73
IX.	Datos obtenidos.....	79
X.	Tabla 1. Presión de vapor de agua de 0 °C a 100 °C.....	80

XI.	Toma de temperaturas de los ensayos	83
XII.	Toma de datos	88
XIII.	Toma de datos	91
XIV.	Toma de datos	94
XV.	Resultados	94
XVI.	Cronograma sugerido de prácticas para el primer semestre.....	98
XVII.	Cronograma sugerido de prácticas para el segundo semestre	99

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Q	Caudal
cm	Centímetro
h	Entalpía
H	Entalpía específica
ṁ	Flujo másico
F	Fuerza
°	Grado sexagesimal
°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
kg	Kilogramo
m	Masa
mt	Metro
%	Porcentaje
Ẁ	Potencia
P	Presión
“	Pulgadas
T	Temperatura
q	Transferencia de calor
Vol	Volumen
v	Volumen específico

GLOSARIO

Adiabático	Proceso en el que no se transfiere energía por calor entre un sistema y su entorno.
Análisis dimensional	Método que se ocupa del análisis de las dimensiones de las magnitudes físicas. Permite establecer directamente las relaciones que intervienen en un proceso.
Calor específico	Unidad de energía térmica equivalente a la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de un gramo de agua en un grado centígrado, de 14,5 °C a 15,5 °C, a la presión normal; equivale a 4,185 julios.
Energía cinética	Energía que posee un cuerpo en virtud de poseer masa y velocidad.
Energía interna	Toda la energía de un sistema que está asociada con la composición química de sus componentes microscópicos, átomos y moléculas.
Energía potencial	Energía almacenada. Es la energía que un objeto posee en virtud de su posición respecto a un marco de referencia.

Equilibrio	Estado de un cuerpo cuando fuerzas encontradas que obran en él se compensan anulándose mutuamente.
Escala	Graduación empleada en diversos instrumentos para medir una magnitud.
Fase	Cada una de las partes homogéneas físicamente separables en un sistema, formado por uno o varios componentes y que posee la misma composición química en toda su extensión.
Fluido	Sustancia en estado líquido o gaseoso.
Mecánica	Parte de la física que estudia el movimiento y el equilibrio de los cuerpos, así como de las fuerzas que los producen.
Mezcla	Composición de diferentes sustancias las cuales pueden ser variantes en proporción.
Potencia	Rapidez de cambio de la energía con respecto al tiempo (rapidez con la que se realiza un trabajo o rapidez a la que se entrega calor).
Vaporización	Proceso de conversión de un líquido en vapor por la acción del calor.

RESUMEN

La evolución de la termodinámica ha sido constante, desde sus orígenes el hombre ha intentado comprender muchos fenómenos termodinámicos; con base en sus observaciones experimentales creó, primeramente, postulados los cuales fueron verificados hasta convertirse en leyes. Siglos atrás la termodinámica evolucionaba por separado con la mecánica, debido a que esta no explicaba determinados procesos termodinámicos, en aquel entonces. Fue hasta que notables científicos realizaron experimentos, encabezados por James Prescott Joule, lograron unificar estas dos ramas de la física con lo cual brindaron una visión integral y mejor comprensión de los fenómenos mecánicos y su equivalente calórico. Así, la ley de la conservación de la energía emergió como una ley fundamental de la naturaleza, la cual continúa hasta nuestros días.

Dado esto, en el presente trabajo de graduación se desarrollan y proponen las prácticas necesarias para implementar el laboratorio del curso de Termodinámica 2. La creación del laboratorio de Termodinámica 2, se considera, fortalecerá la formación de ingenieros mecánicos competentes para la demanda de la industria nacional y regional.

OBJETIVOS

General

Crear una guía para la realización de diferentes prácticas de laboratorio del curso de Termodinámica 2 de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Específicos

1. Facilitar un documento que proporcione a los estudiantes y catedráticos apoyo técnico en la implementación de las prácticas de laboratorio del curso de Termodinámica 2.
2. Brindar a los estudiantes una guía que facilite el aprendizaje de los fundamentos de la termodinámica mediante la realización de prácticas de laboratorio.
3. Que el estudiante observe, mida y analice las variables termodinámicas que intervienen en los experimentos planteados, para que con el uso de sus conocimientos teóricos pueda entender los resultados.
4. Proponer un análisis de los fenómenos termodinámicos de manera empírica para que el estudiante identifique que las fuentes de error en las mediciones siempre estarán presentes y que pueda interpretar su influencia en los resultados.

INTRODUCCIÓN

El curso de Termodinámica 2 de la Escuela de Ingeniería Mecánica constituye una fuerte base del área térmica de la carrera de Ingeniería Mecánica; es muy importante para la comprensión de los cursos posteriores: plantas de vapor, motores de combustión interna y refrigeración y aire acondicionado. Este curso constituye una rama de la física, una ciencia experimental que se basa en la observación de los fenómenos para posteriormente crear sus propios enunciados y leyes.

La implementación del laboratorio del curso de Termodinámica 2 resulta imprescindible para la formación de ingenieros mecánicos. Un laboratorio con prácticas adecuadas para dicho curso debido a que actualmente solo cuenta con clases teóricas impartidas tres días a la semana y un trabajo dirigido, dos días a la semana; no con una secuencia de experimentos básicos que constituyen la mejor forma de aprendizaje en el campo de la ingeniería.

Esta propuesta de instructivo está desarrollada de tal manera que pueda sentar las bases para llevar a cabo prácticas de laboratorio de una rama de la física tan importante como la termodinámica. Se pretende que con esta propuesta se pueda implementar el laboratorio para que se complementen y refuercen los conocimientos impartidos en la clase teórica y que el estudiante observe y verifique la validez de los fenómenos termodinámicos y las leyes que rigen en el estudio de los ciclos de potencia, la psicometría del aire y su aplicación en el acondicionamiento del aire, mezclas reactivas y la transferencia de calor.

1. ANTECEDENTES

1.1. Historia de la termodinámica

1.1.1. Origen

En la década de 1820, experimentos químicos realizados habían dado una sólida evidencia de la existencia de los átomos. En aquel tiempo, los científicos reconocieron que debía existir un enlace entre la termodinámica y la estructura de la materia. En 1827, Robert Brown reportó que granos de polen suspendidos en un líquido se movían erráticamente de un lugar a otro como si estuvieran en agitación constante. En 1905 Albert Einstein utilizó la teoría cinética para explicar la causa de este errático movimiento que hoy se conoce como movimiento browniano. Einstein explicó este fenómeno al suponer que los granos de polen eran 'bombardeados' por moléculas invisibles en el líquido. Esta explicación dio a otros sabios el conocimiento del concepto de movimiento molecular y dio crédito a la idea de que la materia está formada por átomos. De esta manera se formó un enlace entre el mundo macroscópico y el mundo microscópico de elementos diminutos que forman este mundo.

1.1.2. Evolución y unión con la mecánica

Hacia 1850, se consideraba que los campos de la termodinámica y mecánica eran dos ramas distintas de la ciencia y la ley de conservación de la energía parecía describir solo ciertas clases de sistemas mecánicos. Poco después, experimentos realizados a mediados del siglo XIX por el inglés James Joule y otros científicos demostraron que había un fuerte enlace entre la

transferencia de energía por calor en procesos térmicos y la transferencia de energía por trabajo en procesos mecánicos. Hoy en día, se sabe que la energía interna, es toda la energía asociada a las moléculas, puede transformarse en energía mecánica. Una vez generalizado el concepto de energía mecánica para abarcar también a la energía interna, la ley de la conservación de la energía se convirtió en una ley universal de la naturaleza.

1.2. Importancia del aprendizaje de la termodinámica para el ingeniero

1.2.1. Comprensión de los fenómenos termodinámicos

El estudio de la termodinámica para el ingeniero es vital ya que actualmente en la industria se cuenta con innumerables procesos donde ocurren fenómenos termodinámicos por lo que se hace necesario su conocimiento para comprenderlos: podemos mencionar el uso de calderas para la generación de vapor al cual luego se le dan muchas utilidades en diferentes equipos, el uso de torres de enfriamiento, intercambiadores de calor o el análisis de accesorios en una red de distribución de agua o vapor entre otros.

1.2.2. Análisis de procesos donde intervienen variables termodinámicas

Una vez comprendido un proceso se está en la capacidad de realizar su análisis y de sus variables termodinámicas. Esto ayudará para realizar estudios cualitativos de los equipos y comprender las posibles mejoras que se pueda realizar en cualquier parte del proceso termodinámico, de esta manera se podrían evitar gastos innecesarios en la producción.

1.2.3. Predicción de resultados al aplicar conocimiento de las leyes de la termodinámica

El uso de las leyes de la termodinámica facilitará en gran medida la toma de decisiones; con el uso de la matemática se anticipará un resultado teórico el cual estará muy cercano al resultado real; así pues, se puede seleccionar equipo, accesorios y elementos termodinámicos al haberlos analizado primeramente con las leyes termodinámicas. Con esta poderosa herramienta de análisis se sabrá qué tan eficientes son los procesos y que tan factibles pueden ser algunos de los proyectos.

1.3. Enseñanza de la termodinámica en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala de Guatemala

Actualmente, la termodinámica es impartida en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala en dos asignaturas: Termodinámica 1 y Termodinámica 2 las cuales representan las bases para cursos más avanzados: plantas de vapor, refrigeración y aire acondicionado y motores de combustión interna. Esto es para el programa de estudio completo para la carrera de ingeniería mecánica, escuela a la cual pertenecen dichas asignaturas.

1.3.1. Programa actual del contenido del curso

Al igual que todos los cursos en la Facultad de Ingeniería, la termodinámica cuenta con un programa bien estructurado en el que se exponen los aspectos más importantes de la asignatura. Con una guía y su descripción general, objetivo general, metodología, evaluación, bibliografía y la calendarización de actividades. En esta parte se mencionan únicamente los

puntos de contenido y bibliografía competentes al desarrollo de este trabajo. De esta manera se pretende que los demás puntos importantes sean tratados por separado.

1.3.1.1. Unidad 1. Ciclos de potencia

- De vapor
- De aire
- De refrigeración

1.3.1.2. Unidad 2. Mezcla de gases y vapores

- Leyes termodinámicas
- Mezcla de gases ideales con un vapor condensable
- Propiedades del aire atmosférico
- Mezclas no reactivas

1.3.1.3. Unidad 3. Principios de combustión

- Ecuaciones químicas de la combustión
- Poder calorífico de los combustibles
- Calor de combustión
- Temperatura teórica de flama

1.3.1.4. Unidad 4. Transferencia de calor

- Introducción (conducción, convección, radiación)
- Conducción

- Ecuación general
- Pared plana
- Sistemas radiales
- Resistencia de paredes en serie

- Convección
 - Ecuación general
 - Condiciones de contorno
 - Coeficiente global de transferencia
 - Aislantes térmicos

- Radiación
 - Propiedades y definiciones
 - Intercambio de radiación
 - Cuerpo negro
 - Cuerpo gris

- Intercambiadores de calor
 - Tipos de intercambiadores
 - Diferencia media de temperatura
 - Calculo de transferencia de calor

1.3.1.5. Unidad 5. Aspectos termodinámicos del flujo de fluidos

- Velocidad del sonido

- Flujo isotrópico
- Condiciones de choque normal
- La carta psicométrica

1.3.2. Metodología actual del curso

Antes de abordarla se plantea la descripción del curso y su objetivo general según su programa.

- Descripción: es un curso teórico que explica los conceptos y principios fundamentales de la termodinámica, como parte operativa de la ciencia de ingeniería en aplicaciones y funcionamiento de maquinaria y equipos.
- Objetivo general: proporcionar los conocimientos teóricos básicos para el cálculo de fenómenos de transformación de energía en los procesos cuyo destino emboca el beneficio directo de la humanidad mediante aplicaciones ingenieriles.

1.3.3. Clases presenciales

Se imparten clases dirigidas por el catedrático los días lunes, miércoles y viernes con los contenidos con énfasis en los conceptos y la solución de problemas.

1.3.4. Trabajo dirigido

Por su parte, el trabajo dirigido se imparte los días martes y jueves; enfatiza prácticas de solución de problemas por parte del estudiante y la

atención directa del docente ante sus dudas. El trabajo dirigido es obligatorio ganarlo con una nota mayor a 12,2 puntos para tener derecho a nota final.

1.3.5. Evaluación del curso

1.3.5.1. Exámenes parciales

Los exámenes parciales son pruebas escritas realizadas en el salón de clases durante la hora del curso. Se realizan dos exámenes de manera que, en la evaluación, el contenido del curso quede distribuido equitativamente. Se busca evaluar la comprensión de la teoría impartida en clase; tienen un valor del 50 % del total de la nota del curso.

1.3.5.2. Tareas en clase

Se trata de la solución de problemas que el catedrático asigna en la clase teórica para resolverlos durante dicho periodo y una serie de problemas para ser entregados en determinada fecha (generalmente, el día de los exámenes parciales); con estas tareas se busca que el estudiante tenga la habilidad para realizar satisfactoriamente sus exámenes parciales.

1.3.5.3. Trabajo dirigido

Como se mencionó, su desarrollo básicamente consiste en la solución de problemas y su carácter es obligatorio; generalmente, lo imparte un ingeniero quien no imparte el curso teórico; su valor es del 20 % del total de la nota del curso.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Conceptos generales, mediciones fundamentales y ley cero de la termodinámica

2.1.1. Definición de termodinámica

A manera de resumen, la termodinámica es la ciencia que se ocupa del estudio de la materia y todo lo relacionado a los mecanismos de almacenamiento, transformación y transferencia de energía que están presentes en esta.

2.1.2. Estudio de la termodinámica a nivel macroscópico

El enfoque que se dará a la termodinámica en este instructivo será el estudio a nivel macroscópico, lo que interesa es el análisis de sistemas y procesos a una escala con la que se está familiarizado en la vida diaria, es útil hacer este enfoque ya que para el ingeniero es de interés principal el análisis de sistemas a gran escala; para esto se debe suponer que la materia en el sistema que se analiza está continuamente distribuida en todo el espacio de análisis, de esta manera se sabrá el estado del sistema al dar valor a un par de sus propiedades; ya que los sistemas también podrían ser descritos por un modelo microscópico el cual se concentra en el estudio de las partículas y en el que gobiernan las leyes de Newton de manera estadística donde el azar está presente en cada proceso; este, como se ve es un enfoque de menor interés por ahora para el desarrollo de este manual; para un análisis a nivel microscópico se pueden consultar textos de termodinámica estadística.

2.1.3. Sistemas termodinámicos

2.1.3.1. Sistema

Un sistema en termodinámica se define como un lugar en el espacio que interesa analizar con una determinada cantidad de materia la cual es invariante.

2.1.3.2. Entorno

Por otra parte, el entorno es la parte restante del universo que puede ser tan grande como se desee; a veces se le conoce con el nombre de medioambiente.

2.1.3.3. Frontera del sistema

La parte imaginaria que separa al sistema del universo se le conoce como frontera del sistema, elegida de manera arbitraria; de tal manera que pueda simplificar el análisis de procesos según sea el caso en estudio.

2.1.3.4. Sistema aislado

Es aquel que no interactúa con su entorno por lo que ninguna cantidad de energía entra o sale del sistema; de esta manera se puede afirmar que en un sistema aislado la energía se conserva en el mismo al no existir ningún tipo de transferencia.

2.1.3.5. Volumen de control

Un volumen de control es una región desde o hacia la cual ingresa una sustancia; esa cantidad de sustancia a diferencia de los sistemas puede ser

variable. Esta manera de análisis resulta muy conveniente de utilizar en el estudio de procesos más complejos de los que se dan en un sistema y facilita el estudio del funcionamiento de muchos equipos: compresores, bombas y otros equipos.

2.1.3.6. Superficie de control

Para que se tenga un volumen de control al igual que para que exista un sistema, estos deben estar separados de su entorno en un sistema; a esta región se le llama frontera del sistema; al volumen de control se le llama superficie de control, también, una región imaginaria que rodea completamente el volumen de control y a través de la cual pueden existir transferencias de energía, como se verá más adelante.

2.1.4. Propiedades y estados de un sistema

En termodinámica generalmente se trabaja con procesos que ocurren debido a transferencias de energía, pero para comprenderlos primero se deberá introducir los conceptos de propiedad y estado.

Una propiedad: es una variable susceptible a ser medida y representa una cantidad que sirve para describir un sistema. Existen diferentes tipos de propiedades:

- Extensivas: se relacionan con la cantidad de la materia presente; involucran mediciones de masa, volumen y energía cinética, por ejemplos.

- Intensivas: ayudan a identificar o caracterizar un tipo de materia en particular y no dependen de la cantidad de materia, densidad, temperatura y presión, por ejemplos.
- Específicas: es el resultado de dividir una propiedad extensiva entre la masa.

Estado: un estado termodinámico es una condición en la que se encuentra un sistema y queda definido al dar valor a sus propiedades (para termodinámica en un sistema simple el estado quedará definido al dar valor a dos de sus propiedades específicas).

2.1.5. Procesos y ciclos

Una vez introducidos los conceptos de propiedad y estado se puede comprender lo que ocurre cuando hay un cambio de estado; a este fenómeno, en el que un sistema pasa de un estado termodinámico a otro diferente se le conoce como proceso. Si estos ocurren en un cambio que no sea brusco y si se puede conocer el paso entre diferentes estados en un margen muy pequeño, el proceso es un proceso en equilibrio.

Un ejemplo sería aumentar la presión en un émbolo al agregarle pesos en forma paulatina y no hacerlo con grandes cambios de masas. Se pueden unir los diferentes estados inicial y final del sistema mediante una línea continua a la que se le llamará trayectoria la cual indica el recorrido del sistema durante el proceso.

A veces un sistema experimenta varios procesos y pasa por diferentes estados de equilibrio para al final llegar al mismo estado donde se encontraba al

un inicio; a esta sucesión de procesos se le conoce como ciclo; estos son de mucho interés en el estudio de la termodinámica.

2.2. Sustancias puras

2.2.1. Fases de una sustancia pura y equilibrio de fases

Una sustancia pura puede existir en más de una fase sin que cambien su composición química, por ejemplo, al agua. Una fase es una cantidad de materia con la misma composición química en todo su volumen, además es homogénea: sólida, líquida o gaseosa. En la naturaleza se puede observar que pueden coexistir más de una fase a la vez, por ejemplo, en los picos de las montañas donde se acumula nieve y existe alguna reserva de agua coexisten las tres fases del agua: sólida en la nieve, líquida en la reserva de agua y gaseosa, el agua se encuentra suspendida en el aire en pequeñas partículas en forma de vapor. Para este caso se dice que existe un triple equilibrio de fases.

2.2.2. Diagramas de fases de agua

Se les conoce con este nombre ya que estas son curvas características en donde por medio de un análisis gráfico se identifica con facilidad las fases presentes en determinado estado y en este caso se enfoca en la sustancia pura más usada: el agua.

2.2.2.1. Diagrama T – v

Se considera el experimento de almacenar hielo en un cilindro con un émbolo en la parte superior; de esta manera la presión se mantiene constante y

es debida al peso del émbolo que será invariante. Si se agrega calor este hielo comenzará a derretirse hasta quedar completamente convertido en líquido.

2.2.2.1.1. Región líquido comprimido

Si durante el proceso se toman lecturas de temperatura se vería que esta permanece constante hasta que la última parte de hielo se convierte en estado líquido; a toda la región donde ocurre este proceso se le conoce como región de líquido comprimido o subenfriado.

2.2.2.1.2. Punto líquido saturado

Si se continúa agregando más calor al cilindro, la temperatura comienza a incrementarse hasta llegar a un punto en el que el agua comenzará a hervir (punto de ebullición); a este punto se le conoce como líquido saturado.

2.2.2.1.3. Región de mezcla (calidad)

Durante todo el proceso de vaporización es necesario agregar más calor, generalmente, es la zona donde más energía es necesaria para obtener dicho cambio; se le conoce como región de mezcla; en esta zona coexisten las fases vapor y líquido.

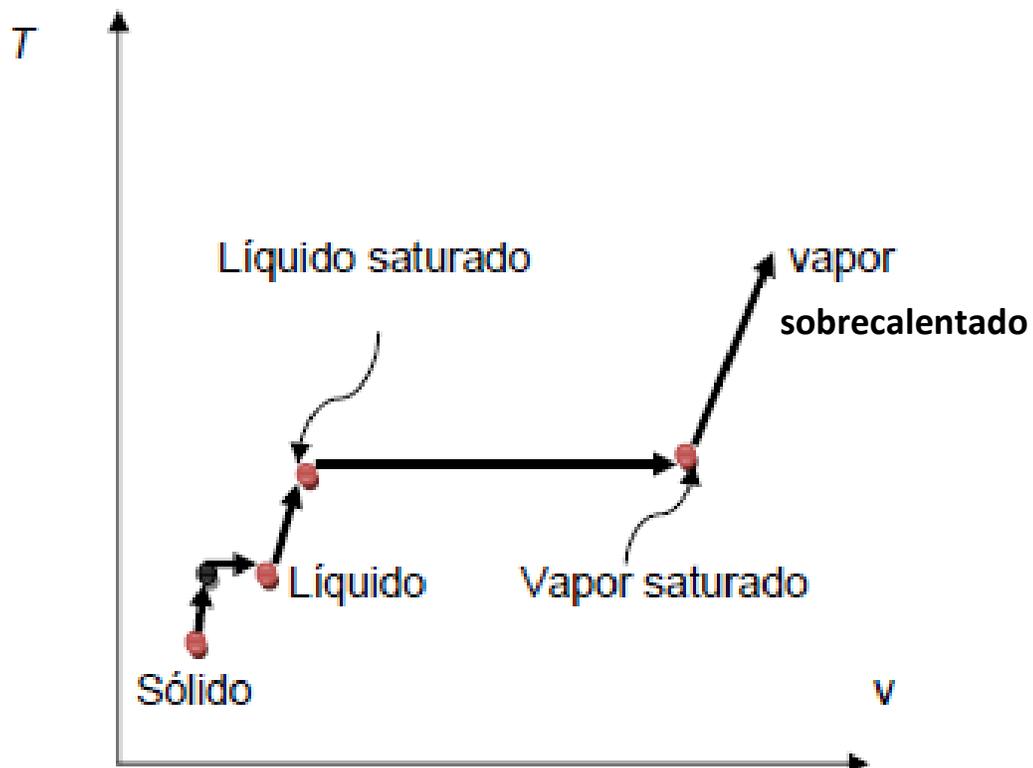
2.2.2.1.4. Punto vapor saturado

Durante el cambio de fase de líquido a vapor llamado vaporización, la temperatura permanece constante hasta que se haya evaporado la última gota de líquido; cuando esto ocurre se ha llegado al punto conocido como punto de vapor saturado.

2.2.2.1.5. Región vapor sobrecalentado

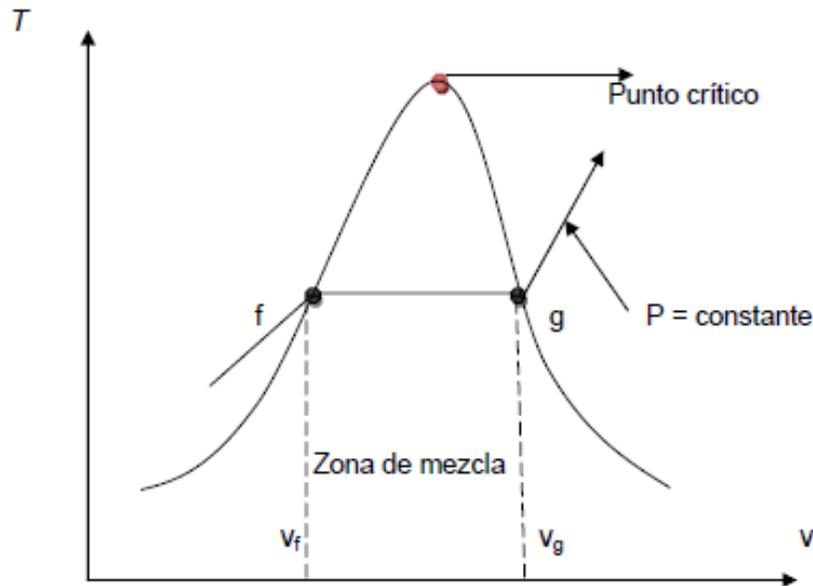
Si se continúa agregando calor al cilindro, entonces, la temperatura comienza de nuevo a incrementarse nuevamente en un amplio rango; a esta región se le conoce como región de vapor sobrecalentado. Si también, se registra el volumen específico de la muestra junto con la temperatura, se obtendría una curva de dicho proceso; si después se utilizan diferentes presiones, lo que resultaría sería un diagrama $T - v$.

Figura 1. Curva $T - v$



Fuente: elaboración propia.

Figura 2. **Campana de Gauss en diagrama T – v**



Fuente: elaboración propia.

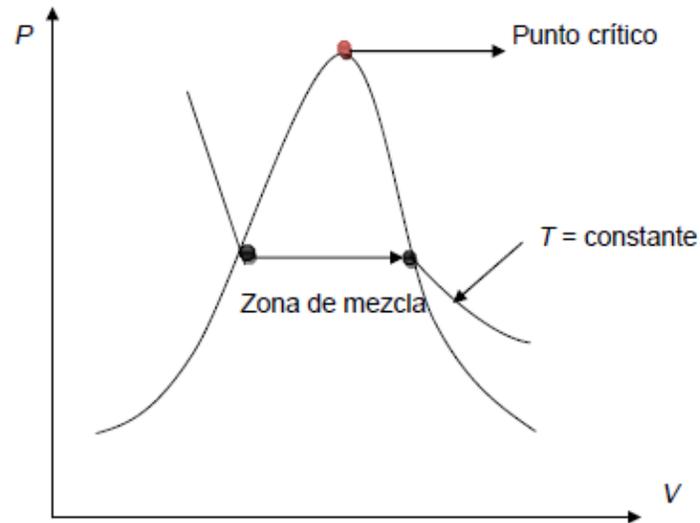
2.2.2.1.6. **Punto crítico**

Al punto más alto de la curva se le conoce con el nombre de punto crítico; en este estado el líquido cambia a vapor sin un proceso de vaporización.

Si se cambia el enfoque y se realizan mediciones de presión y volumen específico en un proceso donde se mantiene la temperatura constante y nuevamente se repite el experimento con varias temperaturas se obtendría la curva $P - v$; esta curva es similar a la curva $T-v$ en cuanto a sus puntos de interés, también, se usa con bastante frecuencia en el estudio termodinámico de las sustancias puras.

2.2.2.2. Curva P – v

Figura 3. Diagrama P – v



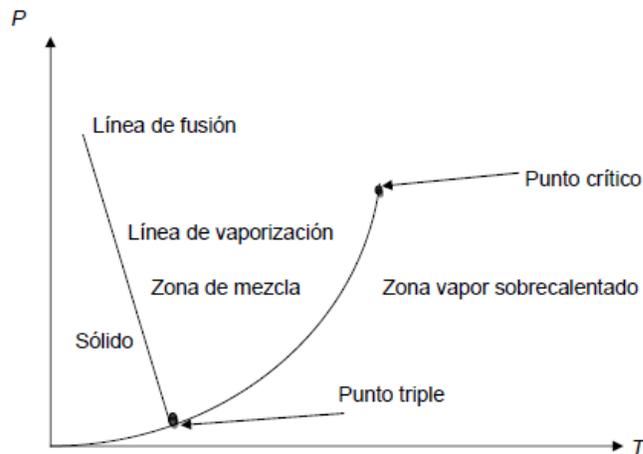
Fuente: elaboración propia.

Donde los puntos de mayor interés siguen siendo los de saturación y la zona de mezcla.

2.2.2.3. Curva P – T

Si, por último, se realiza una medición de presión y temperatura se obtendría una gráfica que muestra algunas características importantes como el punto triple que ya fue mencionado como el punto donde coexisten las tres fases (sólido, líquido y vapor); así se obtiene el diagrama P – T.

Figura 4. Diagrama P –T



Fuente: elaboración propia.

Estas curvas son de gran interés práctico y facilitarán los análisis de procesos; se ve a grandes rasgos que mientras ocurre un cambio de fase a presiones baja se presenta un gran cambio en el volumen específico a medida que aumenta la temperatura; sin embargo, cuando las presiones aumentan, la diferencia de volúmenes entre los estados de líquido saturado y vapor saturado van disminuyendo hasta alcanzar el punto crítico donde su diferencia es cero.

2.2.3. Tablas de vapor

Como en los procesos industriales en su gran mayoría se utiliza vapor, es de gran ayuda contar con datos que muestren valores importantes de propiedades en diferentes estados para analizar los procesos. Para esto se han recopilado una serie de datos ordenados en tablas a las que se les conoce como tablas de vapor.

2.2.3.1. Identificación de un estado dadas dos de sus propiedades

Las tablas de vapor se han elaborado para varias sustancias puras las cuales son de mayor uso en los procesos industriales; estas muestran las propiedades de saturación en función de la temperatura, otras muestran las propiedades de saturación en función de la presión la información es prácticamente la misma; se utilizan ambas para mayor comodidad; si se obtienen dos de sus propiedades específicas quedará totalmente definido el estado del sistema.

2.2.3.2. Propiedades específicas encontradas en las tablas de vapor

Para las propiedades específicas más importantes de dichas sustancias para los valores de saturación se utilizarán los subíndices 'f' y 'g' para denotar los estados de líquido y vapor, respectivamente; estas propiedades se mencionan a continuación.

2.2.3.3. Volumen

El volumen específico se muestra en unidades de m^3/kg para el sistema internacional y ft^3/lbm para el sistema inglés.

2.2.3.4. Energía interna

La energía interna se definirá más adelante; por ahora se darán sus unidades de medida que están en KJ/kg para el sistema internacional y en Btu/lbm para el sistema inglés.

2.2.3.5. Entalpia

Esta propiedad será definida formalmente más adelante, por ahora basta saber sus unidades de medida; las cuales son iguales a las de la energía interna.

2.2.3.6. Entropía

Una propiedad abstracta que proporciona información de la dirección del proceso; sus unidades son de kJ/kg*K, para el sistema internacional y en Btu/lbm*R para el sistema inglés.

Como las tablas dan los valores de saturación y a veces el estado se encuentra en un intermedio entre ambos es necesario introducir el concepto de 'calidad (x)' del vapor; esta se define como la razón entre la masa de vapor saturado y la masa total.

$$x = m_g / m$$

Entonces, cuando se necesitan encontrar los valores de las propiedades mencionadas en los puntos de la zona de mezcla se utiliza la ecuación:

$$v = v_f + x (v_g - v_f)$$

Esta ecuación se usa para cuando lo que se busca es el valor del volumen específico; si se desean encontrar los valores de las demás propiedades únicamente se deberá sustituir la variable que interesa en lugar del volumen específico.

2.2.4. Calor de vaporización

Es la cantidad de energía en forma de calor que se debe agregar a una sustancia mantenida a presión constante para que ocurra un cambio de fase; es la diferencia de entalpías entre los estados de saturación de líquido y vapor; en las tablas de vapor aparece representada por:

$$h_{fg} = h_g - h_f$$

2.3. Primera ley de la termodinámica aplicada al análisis de equipo

Cuando se utiliza la primera ley de la termodinámica aplicada a volúmenes de control describe con facilidad varias situaciones de interés; en este caso, se analizarán equipos como: bombas, compresores, turbinas, toberas, difusores e intercambiadores de calor; estos equipos se utilizan con mucha frecuencia en los diferentes procesos industriales; por lo que su comprensión será muy importante.

2.3.1. Bombas, compresores y turbinas

Una bomba es un equipo que transfiere energía al líquido que circula a través de esta, lo que da como resultado un incremento en la presión. Los compresores y ventiladores también caen en esta categoría, pero tienen como objetivo primordial incrementar la presión de un gas (esto diferencia a una bomba de un compresor o ventilador). Una turbina en cambio es un equipo donde el fluido realiza un trabajo sobre un conjunto de paletas que ocasionan una pérdida en la energía del fluido que se observa como una caída en su presión o velocidad. Para analizar estos equipos se supone que las transferencias por calor son insignificantes; también, lo serán los cambios en

energía cinética ya que estos equipos son diseñados generalmente de manera que el área de la sección transversal a la entrada es la misma que a la salida; los cambios en energía potencial son cercanos a cero. Si, además, se aplica el principio que el equipo opera en modo estacionario, la ecuación de la primera ley toma la forma:

$$-\dot{W} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad \text{o} \quad -w = h_2 - h_1$$

Nota: w es negativo para un compresor y positivo para una turbina de gas o de vapor.

Para fluidos como el agua, despreciando los cambios en la energía potencial y cinética y recordando que es un líquido. Es prácticamente un fluido incompresible, se obtiene al aplicar la primera ley:

$$-\dot{W} = \dot{m} (P_2 - P_1) / \rho$$

Nota: esta ecuación es utilizada para bombas, si los cambios en energía cinética o potencial son importantes simplemente se deberán incluir.

2.3.2. Toberas y difusores

Una tobera es un elemento que se utiliza para aumentar la velocidad de un líquido, consigue esto al reducir la presión (recuérdese el principio de Bernouilli). Un difusor, por el contrario, es un elemento que aumenta la presión al disminuir la velocidad. Se ve que no hay entrada de trabajo para estos elementos, también, la transferencia por calor suele ser insignificante si por último se agrega la simplificación que los cambios en energía potencial son despreciables (lo cual es válido ya que su centro geométrico en la entrada y

salida esta esencialmente a la misma altura). Entonces, la ecuación de la energía resulta en:

$$0 = (V_2^2 - V_1^2)/2 + h_2 - h_1$$

Como una tobera ocasiona un aumento en la velocidad, es de esperarse que su área sea decreciente y un difusor tenga un área creciente; esto es esencialmente cierto para un flujo subsónico de un gas. Sin embargo, si el flujo es supersónico, entonces, ocurre lo contrario: la tobera tendrá un área creciente y un difusor un área decreciente debido a efectos de la turbulencia en el flujo.

2.3.3. Intercambiadores de calor

Este es un equipo termodinámico con mucha aplicación en la ingeniería. Son usados para lograr un intercambio de energía de una sustancia caliente con otra fría para obtener, de esta manera, una disminución en la temperatura de la sustancia más caliente. Generalmente ambas están en movimiento y están separadas por una pared por lo cual la transferencia de energía es por conducción y convección.

Por ejemplo, un radiador de un automóvil donde el fluido al cual se pretende disminuir su temperatura es el agua que circula por las tuberías, esto es necesario ya que esta misma agua debe recorrer nuevamente las paredes de los cilindros del motor para enfriarlos y así mantener estable la temperatura del motor; de esta manera el agua transfiere la energía en el radiador al aire que incide en sus paredes. La mayoría de los intercambiadores de calor utilizan un sistema de canal por el cual entra el fluido y sale a una temperatura diferente; la velocidad es aproximadamente la misma por lo que se supone un cambio insignificante en la energía cinética; las caídas de presión, también,

suelen ignorarse y, también, los cambios en energía potencial son básicamente despreciables. De esta manera, al aplicar la primera ley de la termodinámica a estos equipos resulta:

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

Si ahora se considera que la energía debe conservarse, es decir, la energía que el fluido a enfriarse cede al fluido que está calentándose producto de la interacción en el equipo se puede decir que el calor que ingresa al fluido *A* es igual al calor que sale del fluido *B* así:

$$Q_{entra} = -Q_{sale}$$

El signo negativo es necesario ya que la cantidad del lado izquierdo es positiva, ya que involucra una ganancia en energía; sin embargo, la cantidad del lado derecho es negativa ya que esta representa una pérdida de energía, con esto se logra que se cumpla con la igualdad. Sustituyendo los valores se tiene:

$$m_A (h_{A2} - h_{A1}) = m_B (h_{B2} - h_{B1})$$

Para el caso de que uno de los fluidos sea agua u otro líquido, entonces, los cambios en entalpías pueden sustituirse por el producto del calor específico y los respectivos cambios de temperatura.

2.3.3.1. Tipos de intercambiadores de calor

Se presentan en una inimaginable variedad de formas y tamaños; la construcción de los intercambiadores está incluida en alguna de las dos

siguientes categorías: carcaza y tubo, plato. Como en cualquier dispositivo mecánico, cada uno de estos presenta ventajas o desventajas en su aplicación.

2.3.3.1.1. Carcaza y tubo

Este tipo de intercambiador consiste en un conjunto de tubos en un contenedor llamado carcaza. El flujo de fluido dentro de los tubos se le denomina comúnmente flujo interno; y aquel que fluye en el interior del contenedor como fluido de carcaza o fluido externo. En los extremos de los tubos, el fluido interno es separado del fluido externo de la carcasa por la(s) placa(s) del tubo. Los tubos se sujetan o se sueldan a una placa para proporcionar un sello adecuado. En sistemas donde los dos fluidos presentan una gran diferencia entre sus presiones, el líquido con mayor presión se hace circular típicamente a través de los tubos; el líquido con una presión más baja se circula del lado de la cáscara. Esto es debido a los costos en materiales, los tubos del intercambiador de calor se pueden fabricar para soportar presiones más altas que la cáscara del cambiador con un costo mucho más bajo.

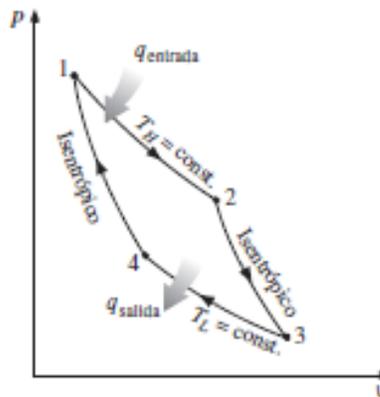
2.3.3.1.2. Plato

Consiste de placas en lugar de tubos para separar a los dos fluidos caliente y frío. Los líquidos calientes y fríos se alternan entre cada una de las placas y los baffles dirigen el flujo del líquido entre las placas. Ya que cada una de las placas tiene un área superficial muy grande, las placas proveen un área extremadamente grande de transferencia de térmica a cada uno de los líquidos. Por lo tanto, un intercambiador de placa es capaz de transferir mucho más calor con respecto a un intercambiador de carcaza y tubos con volumen semejante; esto es debido a que las placas proporcionan una mayor área que la de los tubos. El intercambiador de calor de plato, debido a la alta eficacia en la

2.3.4.1. Ciclo de Carnot

Este ciclo se compone de cuatro procesos totalmente reversibles: adición de calor isotérmica, expansión isentrópica, rechazo de calor isotérmico y compresión isentrópica. Este ciclo puede ser ejecutado en un sistema cerrado (un dispositivo de cilindro-embolo) o en un sistema de flujo estacionario (usando dos turbinas y dos compresores) y puede emplearse gas o vapor como fluido de trabajo. El ciclo de Carnot es el ciclo más eficiente que puede ejecutarse entre una fuente de energía térmica a temperatura alta y un sumidero a temperatura baja.

Figura 6. **Ciclo de Carnot en diagrama P-v**



Fuente: CENGEL, Y.A.; BOLES, M.A. *Termodinámica*. p. 504.

2.3.4.2. Ciclo de Otto

Es el ciclo ideal para las maquinas recíprocantes de encendido por chispa. Recibe el nombre en honor a Nikolaus A. Otto, quien, en 1876, en Alemania, construyó una exitosa máquina de cuatro tiempos utilizando el ciclo propuesto por Beau de Rochas en 1862.

En la mayoría de las máquinas de encendido por chispa, el émbolo ejecuta cuatro tiempos completos dentro del cilindro y el cigüeñal completa dos revoluciones por cada ciclo termodinámico; estas máquinas son llamadas máquinas de combustión interna de cuatro tiempos. Inicialmente, tanto la válvula de admisión como la de escape están cerradas y el émbolo se encuentra en su posición más baja (PMI).

Durante la carrera de compresión, el émbolo se mueve hacia arriba y comprime la mezcla de aire y combustible.

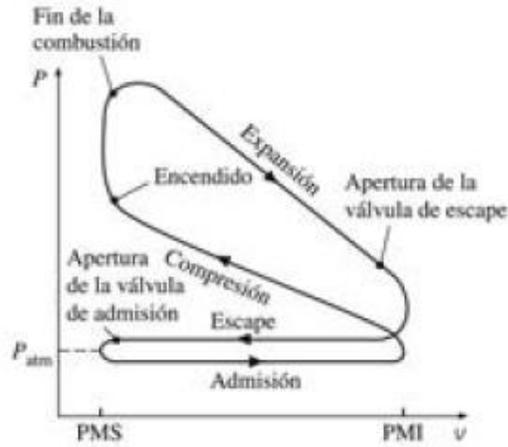
Un poco antes de que el émbolo alcance su posición más alta (PMS), la bujía produce una chispa y la mezcla se enciende, con lo cual aumenta la presión y la temperatura del sistema.

Los gases de alta presión impulsan al émbolo hacia abajo, el cual a su vez obliga a rotar al cigüeñal, lo que produce una salida de trabajo útil durante la carrera de expansión o carrera de potencia. Al final de esta carrera, el émbolo se encuentra en su posición más baja (la terminación del primer ciclo mecánico) y el cilindro se llena con los productos de la combustión.

Después, el émbolo se mueve hacia arriba una vez más y evacua los gases de escape por la válvula de escape (carrera de escape), para descender por segunda vez extrayendo una mezcla fresca de aire y combustible a través de la válvula de admisión (carrera de admisión).

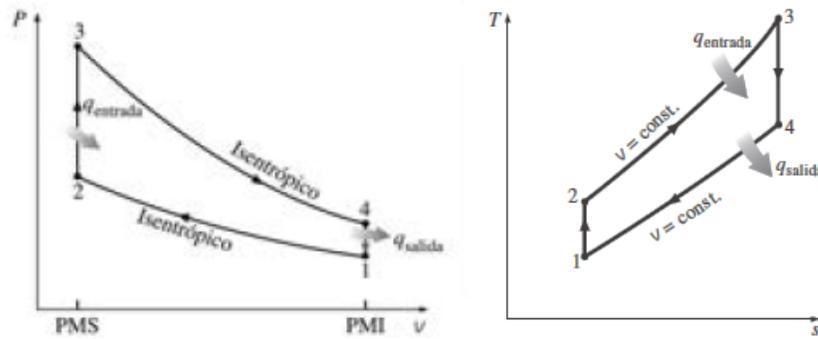
Observe que la presión en el cilindro está un poco arriba del valor atmosférico durante la carrera de escape y un poco abajo durante la carrera de admisión.

Figura 7. **Ciclo de Otto (real) en diagrama P-v**



Fuente: CENGEL, Y.A.; BOLES, M.A. *Termodinámica*. p. 506.

Figura 8. **Ciclo de Otto (ideal) en diagrama P-v y T-s**



Fuente: CENGEL, Y.A.; BOLES, M.A. *Termodinámica*. p. 506.

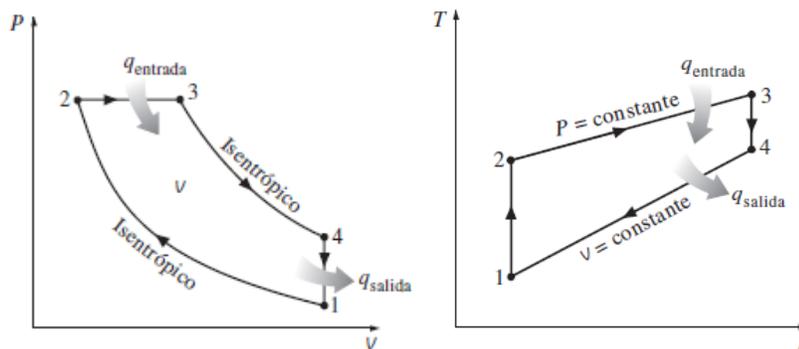
2.3.4.3. Ciclo Diésel

El ciclo Diésel es el ciclo ideal para las máquinas recíprocantes ECOM. El motor ECOM fue por primera vez propuesto por Rudolph Diesel en la década de 1890. En los motores de encendido por chispa (conocidos también como motores de gasolina), la mezcla de aire y combustible se comprime hasta una temperatura inferior a la temperatura de autoencendido del combustible y el proceso de combustión se inicia al encender una bujía.

En los motores ECOM (también, conocidos como motores diésel) el aire se comprime hasta una temperatura que es superior a la temperatura de autoencendido del combustible; la combustión inicia al contacto, cuando el combustible se inyecta dentro de este aire caliente.

Por lo tanto, en los motores diésel la bujía y el carburador son sustituidos por un inyector de combustible.

Figura 9. **Ciclo Diesel (ideal) en diagrama P-v y T-s**



Fuente: CENGEL, Y.A.; BOLES, M.A. *Termodinámica*. p. 508.

2.3.4.4. Ciclo Brayton

Fue propuesto por George Brayton por vez primera para usarlo en el motor recíprocante que quemaba aceite desarrollado por él alrededor de 1870.

Actualmente, se utiliza en turbinas de gas donde los procesos tanto de compresión como de expansión suceden en maquinaria rotatoria. Las turbinas de gas generalmente operan en un ciclo abierto.

Se introduce aire fresco en condiciones ambiente dentro del compresor, donde su temperatura y presión se elevan.

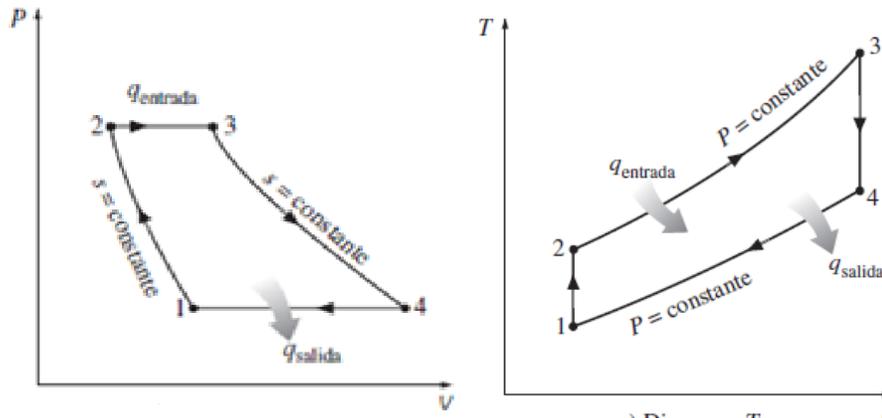
El aire de alta presión sigue hacia la cámara de combustión, donde el combustible se quema a presión constante.

Los gases de alta temperatura que resultan entran a la turbina, donde se expanden hasta la presión atmosférica que producen potencia. Los gases de escape que salen de la turbina se expulsan hacia fuera (no se recirculan), que causan que el ciclo se clasifique como un ciclo abierto.

El ciclo de turbina de gas abierto descrito anteriormente puede modelarse como un ciclo cerrado, empleando las suposiciones de aire estándar.

En este caso los procesos de compresión y expansión permanecen iguales, pero el proceso de combustión se sustituye por uno de adición de calor a presión constante desde una fuente externa, mientras que el proceso de escape se reemplaza por otro de rechazo de calor a presión constante hacia el aire ambiente.

Figura 10. **Ciclo Brayton (ideal) en diagrama P-v y T-s**



Fuente: CENGEL, Y.A.; BOLES, M.A. *Termodinámica*. p. 510.

2.3.4.4.1. **Ciclo Brayton regenerativo**

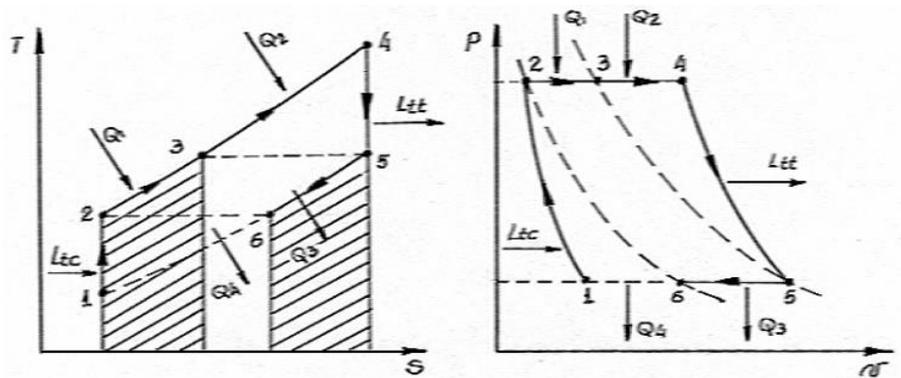
En las máquinas de turbinas de gas la temperatura de los gases de escape que salen de la turbina suele ser considerablemente mayor que la del aire que sale del compresor. Por lo tanto, el aire de alta presión que sale del compresor puede calentarse transfiriéndole calor desde los gases de escape calientes mediante un intercambiador de calor a contraflujo, el cual se conoce también como regenerador o recuperador.

La eficiencia térmica del ciclo Brayton aumenta como resultado de la regeneración, ya que la porción de energía de los gases de escape que normalmente se libera hacia los alrededores ahora se usa para precalentar el aire que entra a la cámara de combustión.

Esto a su vez disminuye los requerimientos de entrada de calor, por ende, de combustible, para la misma salida de trabajo neto. El uso de un regenerador

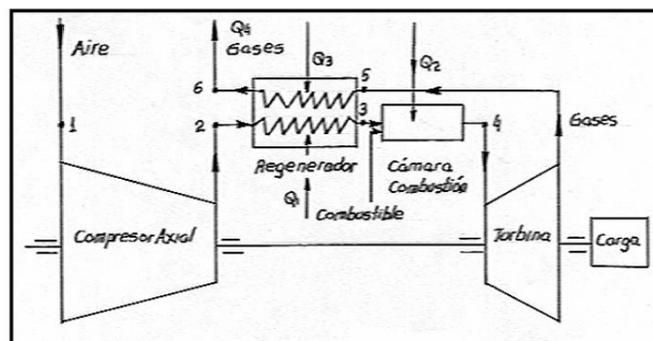
solo se recomienda cuando la temperatura de escape de la turbina es más alta que la temperatura de salida del compresor. De otro modo, el calor fluiría en la dirección inversa (hacia los gases de escape) y la eficiencia se reducirá. Esta situación se encuentra en las máquinas de turbina de gas que operan con relaciones de presión muy altas.

Figura 11. **Ciclo Brayton regenerativo en diagrama T-s y P-v**



Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Diagrama de equipos en Ciclo Brayton regenerativo**



Fuente: elaboración propia.

2.3.5. Ciclos de potencia de vapor

Se consideran ciclos de potencia de vapor en los que el fluido de trabajo se evapora y condensa alternadamente. Así mismo, se analiza la generación de potencia acoplada con un proceso de calentamiento llamada cogeneración. La constante demanda de eficiencias térmicas más altas ha producido algunas modificaciones innovadoras en el ciclo básico de potencia de vapor.

Entre éstos, se estudian ciclos con recalentamiento y regenerativo, así como ciclos combinados de potencia de gas y vapor. El vapor de agua es el fluido de trabajo usado más comúnmente en ciclos de potencia de vapor debido a sus muchas y atractivas características, como bajo costo, disponibilidad y alta entalpía de vaporización.

2.3.5.1. Ciclo Rankine

Es posible eliminar muchos de los aspectos imprácticos asociados con el ciclo de Carnot si el vapor es sobrecalentado en el generador de vapor y condensado por completo en el condensador. Lo que resulta es el ciclo Rankine, el cual es el ciclo ideal para las centrales eléctricas de vapor. El ciclo Rankine ideal no incluye ninguna irreversibilidad interna y está compuesto de cuatro procesos:

- 1-2 compresión isentrópica en una bomba
- 2-3 adición de calor a presión constante en una caldera
- 3-4 expansión isentrópica en una turbina
- 4-1 rechazo de calor a presión constante en un condensador

El trabajo de salida de la turbina se representa por la diferencia entre los estados 3 y 4.

$$W_T = h_3 - h_4$$

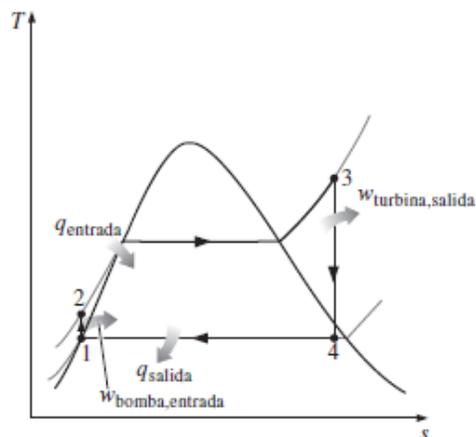
El calor de entrada o suministrado por la caldera, es la diferencia entre los estados 3 y 2.

$$q_{in} = h_3 - h_2$$

La eficiencia térmica del ciclo Rankine se determina de la siguiente forma:

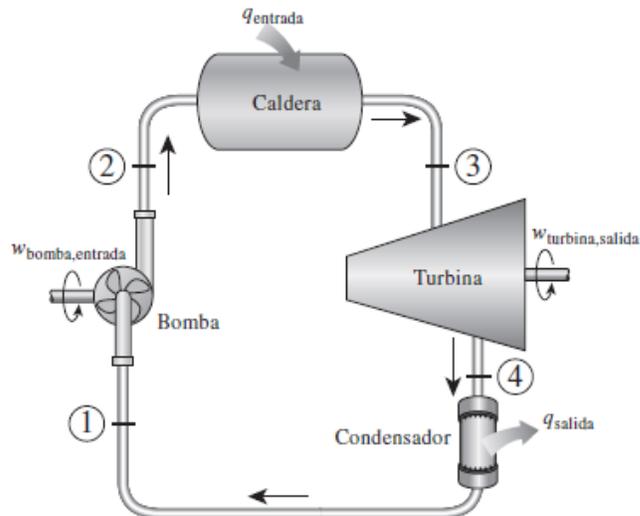
$$\eta_T = \frac{w_{neto}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}}$$

Figura 13. **Ciclo Rankine (ideal) en diagrama T-s**



Fuente: CENGEL, Y.A.; BOLES, M.A. *Termodinámica*. p. 506.

Figura 14. **Diagrama de equipo ciclo Rankine**



Fuente: CENGEL, Y.A.; BOLES, M.A. *Termodinámica*. p. 506.

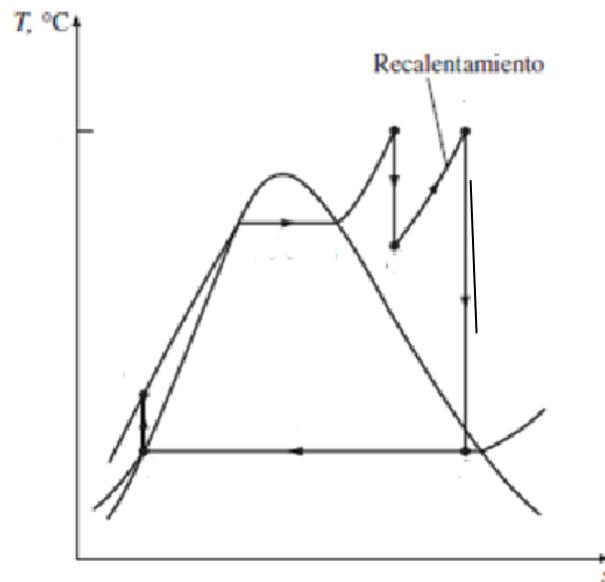
2.3.5.2. **Ciclo Rankine recalentado**

El ciclo Rankine ideal con recalentamiento difiere del ciclo Rankine ideal simple donde el proceso de expansión sucede en dos etapas. En la primera etapa (turbina de alta presión), el vapor se expande isentrópicamente hasta una presión intermedia y regresa al generador de vapor donde se recalienta a presión constante; por lo general, hasta la temperatura de entrada de la turbina de la primera etapa. Después, el vapor se expande isentrópicamente en la segunda etapa (turbina de baja presión) hasta la presión del condensador.

La incorporación de un recalentamiento simple en una central eléctrica moderna mejora la eficiencia del ciclo en un porcentaje bastante pequeño, ya que se incrementa la temperatura promedio a la cual el calor se transfiere al vapor. La temperatura promedio durante el proceso de recalentamiento puede

incrementarse, el único propósito del ciclo de recalentamiento es reducir el contenido de humedad del vapor en las etapas finales del proceso de expansión.

Figura 15. **Ciclo Rankine recalentado en diagrama T-s**



Fuente: elaboración propia.

2.3.5.3. **Ciclo Rankine regenerativo**

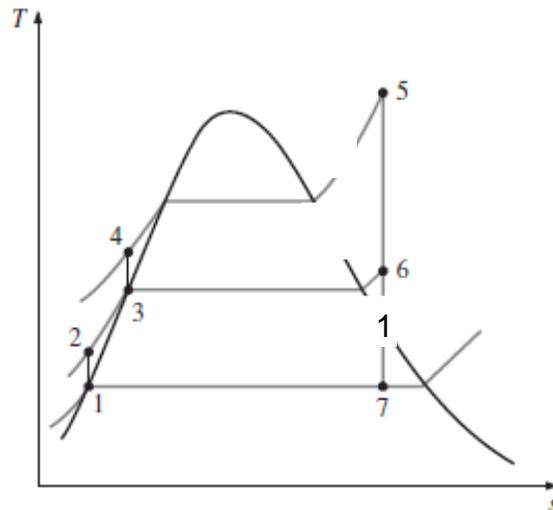
Un proceso de regeneración práctico en las centrales eléctricas de vapor se logra con la extracción o 'drenado' o 'purga' del vapor de la turbina en diversos puntos. Este vapor, que podría producir más trabajo si se expandiera aún más en la turbina, se utiliza en cambio para calentar el agua de alimentación.

El dispositivo donde el agua de alimentación se calienta mediante regeneración se llama calentador de agua de alimentación (CAA).

La regeneración no solo mejora la eficiencia del ciclo, también, proporciona un medio conveniente de 'desairear' el agua de alimentación (al eliminar el aire que se filtra al condensador) para evitar la corrosión en la caldera.

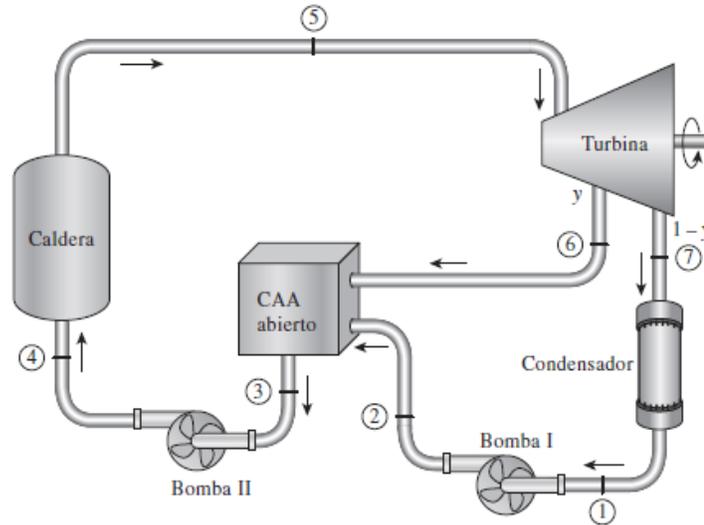
Asimismo, ayuda a controlar el gran flujo volumétrico del vapor en las etapas finales de la turbina (debido a los grandes volúmenes específicos a bajas presiones). Por consiguiente, la regeneración se utiliza en todas las centrales eléctricas de vapor modernas desde su introducción a principios de la década de 1920.

Figura 16. **Ciclo Rankine regenerativo en diagrama T-s con calentador abierto**



Fuente: CENGEL, Y.A.; BOLES, M.A. *Termodinámica*. p. 505.

Figura 17. **Diagrama de equipo ciclo Rankine regenerativo con calentador abierto**

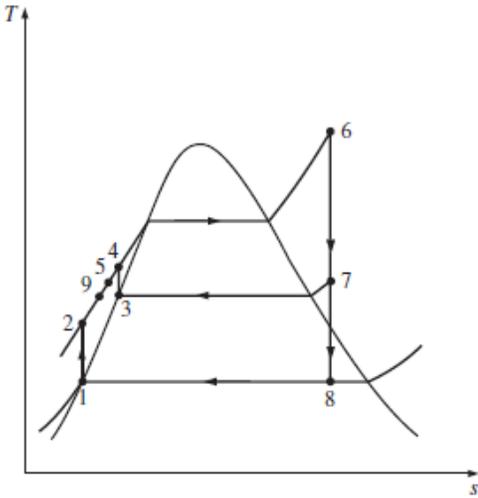


Fuente: CENGEL, Y.A.; BOLES, M.A. *Termodinámica*. p. 505.

Otro tipo de calentador de agua de alimentación frecuentemente utilizado en las centrales eléctricas de vapor es el calentador cerrado de agua de alimentación, donde el calor se transfiere del vapor extraído hacia el agua de alimentación sin que suceda ninguna mezcla.

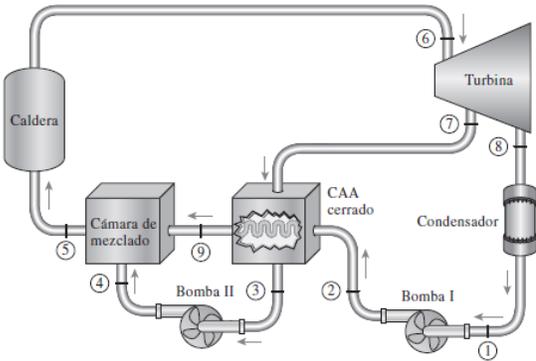
Los dos flujos pueden estar a presiones diferentes, puesto que no se mezclan. En un calentador cerrado de agua de alimentación ideal el agua de alimentación se calienta hasta la temperatura de salida del vapor extraído, que idealmente sale del calentador como líquido saturado a la presión de extracción.

Figura 18. **Ciclo Rankine regenerativo en diagrama T-s con calentador cerrado**



Fuente: CENGEL, Y.A.; BOLES, M.A. *Termodinámica*. p. 505.

Figura 19. **Diagrama de equipo ciclo Rankine regenerativo con calentador cerrado**



Fuente: CENGEL, Y.A.; BOLES, M.A. *Termodinámica*. p. 505.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL DE PRÁCTICAS

3.1. Metodología del contenido de cada práctica

Las prácticas de laboratorio están elaboradas de tal manera que el estudiante pueda comprender en una forma clara todos los aspectos de cada una:

- **Objetivos:** son los que proporcionan los aspectos primordiales de cada una de las prácticas y señalan cuál es su fin, para hacer énfasis en el estudiante de los puntos que debe analizar con más cuidado antes de llegar a tener contacto con el equipo de laboratorio.
- **Equipo:** se detalla en cada una de las prácticas el equipo necesario para realizarlas, el cual se pretende sea lo más accesible en cuanto a adquisición cuando no se cuente con este.
- **Magnitudes físicas a medir:** se trata de cada una de las magnitudes que deben ser medidas durante el desarrollo de cada una de las prácticas.
- **Variables termodinámicas a medir:** se trata de cada una de las variables y propiedades que deben ser medidas durante el desarrollo de cada una de las prácticas. Así mismo, deberán determinarse los procesos termodinámicos y los aportes energéticos de acuerdo a la aplicación ingenieril.

- Desarrollo experimental: en esta parte se trata de una manera detallada la forma como deben realizarse las mediciones de las magnitudes físicas y de las variables termodinámicas además de los cuidados que deben seguirse durante cada uno de los procesos que se realizarán en el laboratorio, se adjuntan tablas en los casos donde deben tomarse varias medidas de una misma variable, los cálculos a realizar, como también gráficas donde se ejemplifica los posibles resultados a obtener, de los cuales el estudiante deberá dar sus respectivas conclusiones.

3.2. Práctica 1. Medición de variables termodinámicas

- Objetivos
 - Definir sistemas termodinámicos.
 - Que el estudiante de una manera experimental logre observar procesos termodinámicos (isotérmico, isobárico, isométrico).
 - Que por medio de un análisis gráfico el estudiante compruebe la validez de las leyes de los gases ideales.
 - Introducción de la ley cero de la termodinámica
- Equipo
 - Cilindro transparente con escala milimétrica y émbolo (supuesto ideal; sin fricción).
 - Juego de 6 masas.

- Metro.
- 1 globo.
- 2 termómetros con escala hasta 100°C.
- Juego de pírex de vidrio.
- 1 corcho.
- 1 tubo capilar graduado con escala milimétrica.
- 1 pinza metálica (alicate).
- Fuente de calor (estufa eléctrica preferiblemente).
- 1 recipiente pequeño para agua.
- 1 cubo de acero pequeño.
- 1 litro de agua mineral.
- 1 balanza.
- Magnitudes físicas y variables termodinámicas a medir
 - El volumen inicial de una masa de aire contenido en el cilindro émbolo.

- La masa de cada una de las pesas que se colocan sobre el émbolo.
- La altura 'h' que desciende el émbolo.
- El diámetro 'd' del cilindro.
- Los distintos valores indicados por el termómetro en el proceso isobárico.
- La altura 'h' que alcanza la columna de agua del tubo capilar en el proceso isométrico.
- El volumen y la temperatura del agua para la demostración de la ley cero.
- La temperatura de la pieza del cubo de acero pequeño.
- La temperatura de equilibrio del agua + cubo de cobre.
- Desarrollo experimental
 - Primera parte: proceso isotérmico
 - Para la realización de este experimento se colocará el cilindro-émbolo y se anotará el valor del volumen inicial de aire contenido en el cilindro; como el sistema se encuentra en equilibrio la fuerza que ejerce este volumen de aire verticalmente hacia arriba, equilibra el peso del émbolo y

sabiendo que $P = F/A + \text{presión atmosférica}$ donde 'F' es la fuerza que en este caso es igual al peso del émbolo y que 'A' es el área transversal de cilindro, además 'P' es equivalente a la presión absoluta contenida dentro del mismo.

- Luego se agregará una de las 6 masas de 1kg cada una y se realizará el cálculo para el nuevo valor de presión y a medir el volumen correspondiente a esta condición.
- Repetir este proceso hasta obtener 7 datos experimentales.
- Ordenar los datos experimentales en una tabla

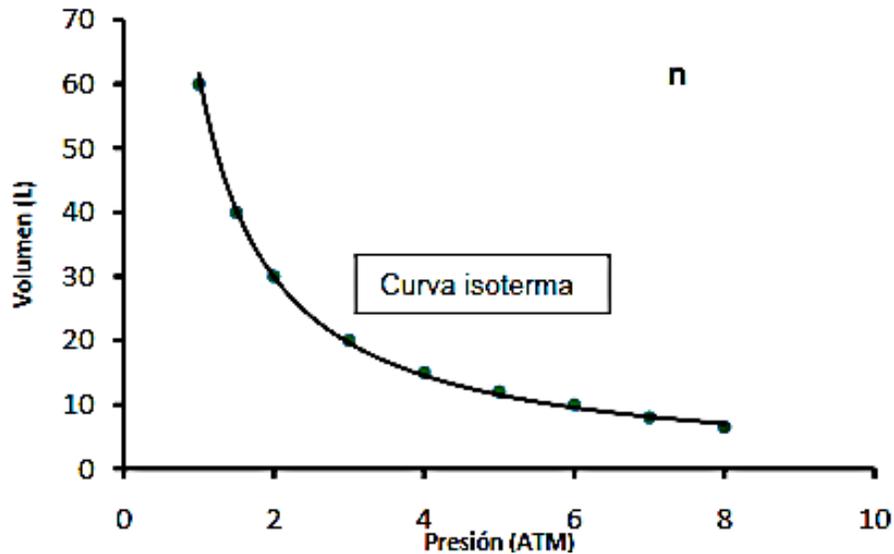
Tabla I. **Datos de resumen para gráfica**

Número de dato	Masa	$F=m \cdot g$	Volumen	Presión= $P_{\text{atm}} + (F/A)$
1	### (kg o slug)	### (N o lb)	### (ml)	### (Pascal o PSI)
2	### (kg o slug)	### (N o lb)	### (ml)	### (Pascal o PSI)
etc	etc	etc	etc	etc

Fuente: elaboración propia.

- Proceder a realizar gráfico: volumen 'v' (columna 4) versus presión 'P' (columna 5).

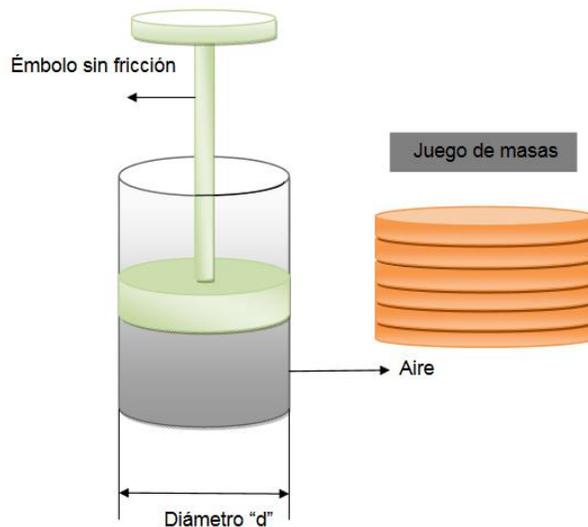
Figura 20. **Volumen – presión**



Fuente: elaboración propia

- Dar conclusiones e indicar las simplificaciones realizadas al experimento que puedan trascender en los resultados como posibles fuentes de error.
- Comentario: un proceso isotérmico es aquel en el que la temperatura permanece invariable en los diferentes estados en que se encuentra el sistema ya en equilibrio. Para este experimento, por motivos de simplicidad, se asumirá que esta condición se cumple ya que el proceso se realiza en forma lenta dando lugar a que cualquier incremento en la temperatura del aire contenida en el interior del émbolo pueda ser transferida a través de sus paredes con su entorno dando lugar a que la temperatura sea prácticamente constante.

Figura 21. **Representación de proceso isotérmico**



Fuente: CANTO, Emiliano. *Manual de prácticas de termodinámica*. p. 107.

- Segunda parte: proceso isobárico
 - Con este experimento se pretende demostrar la ley de Charles aplicada a gases ideales (en este caso aire) el cual tiene un comportamiento de gas ideal, esta ley expresa que 'a presión constante el volumen que ocupa un gas es directamente proporcional a la temperatura'; para comprobar la validez de este enunciado se realiza lo siguiente:
 - Se introduce en el interior de un pírex un termómetro de manera que quede bien apoyado; (el termómetro no debe hacer contacto con el fondo del pírex, para esto debe auxiliarse de un pequeño soporte y colocarlo en la base del termómetro).

- Se coloca un globo (sin inflar) en la boquilla del pírex.
- Se procede a colocar el pírex en una fuente de calor (deseable una estufa eléctrica pequeña).
- Se espera un par de minutos (3 minutos) y se anotan diferentes valores de temperatura (6 valores).
- Se observa que le ocurre al globo a medida que la temperatura está en aumento.
- Como práctica, se convertirán los valores de temperatura anotados a todas las demás escalas: Fahrenheit, Kelvin y Rankine. Realizar un comentario sobre lo que ocurrió en el experimento con base en la ley de Charles.

Figura 22. **Representación de proceso isobárico**



Fuente: CANTO, Emiliano. *Manual de prácticas de termodinámica*. p. 108.

- Tercera parte: proceso isométrico (isocórico)
 - Con esta práctica se pretende demostrar la ley de Gay–Lussac, dicha ley expresa que ‘a volumen constante la presión es directamente proporcional a la temperatura’. Para este experimento se mantendrá el volumen constante, un aumento de temperatura constituye un respectivo aumento en la presión, se comprobará la validez de éste enunciado. Se realizará lo siguiente:
 - Agregar agua a un pírex (40 ml o 40 % de su capacidad).
 - Se colocará el tubo capilar con su escala graduada en el interior del pírex.
 - Cerrar el pírex colocando un corcho en su boquilla.
 - Se procede a colocar el pírex en una fuente de calor (deseable una estufa eléctrica pequeña).
 - Esperar un par de minutos (2 o 3 minutos) y hacer anotaciones de la columna de agua que empieza a ascender en el tubo capilar; realizar unas 4 anotaciones de la altura de esta.

Figura 23. **Representación de proceso isocórico**

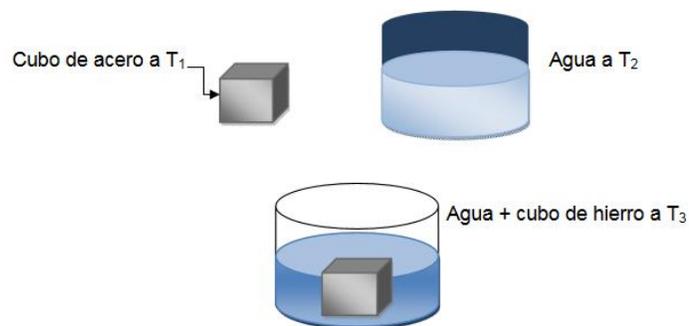


Fuente: CANTO, Emiliano. *Manual de prácticas de termodinámica*. p.108.

- Cuarta parte: demostración de la ley cero de la termodinámica
 - Lo que se pretende es comprobar la ley cero, también conocida como ley del equilibrio térmico, con el siguiente experimento sencillo:
 - Llenar un recipiente con 500 ml de agua mineral.
 - Medir la temperatura ambiente t_1 , será la misma a la que debe estar el agua mineral.
 - Calentar el cubo de acero hasta que alcance una temperatura t_2 ; unos 40 °C por encima de la temperatura ambiente, verificarlo con el termómetro.
 - Introducir la pieza de acero en el volumen de agua y mover durante medio minuto.

- Medir la temperatura de equilibrio del agua + cubo de acero t_3 .
- Realizar una conclusión sobre lo ocurrido en esta práctica.

Figura 24. **Representación de proceso ley cero de la termodinámica**



Fuente: elaboración propia.

3.2.1. **Transferencia de calor, temperatura en una sustancia y balance de energía**

- **Objetivo**

El estudiante deberá aprender a relacionar la cantidad de flujo de calor transferido hacia una sustancia con la variación de temperatura de la misma, producida por el flujo de calor.

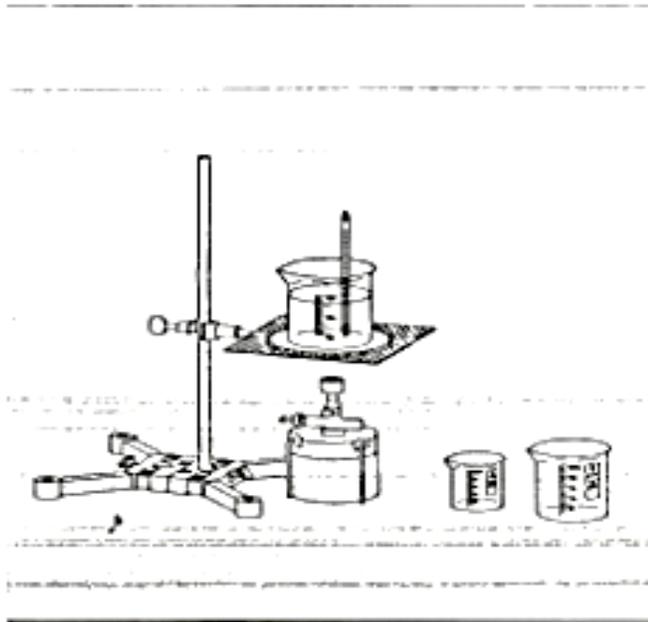
Cuando se produce un flujo de calor hacia una sustancia, la energía interna de esta sustancia se incrementa, generando con este incremento una variación de temperatura que es de acuerdo a la cantidad de calor absorbido. El

calor es la cantidad total de energía cinética molecular que pasa de un cuerpo a otro cuando se ponen en contacto estando a distinta temperatura.

- Equipo
 - Trípode variable
 - Varilla soporte de 250mm y 600mm
 - Rejilla con porcelana
 - Vaso de precipitados de 250ml y 400ml
 - Matraz Erlenmeyer 100ml
 - 2 termómetros
 - Cronómetro
 - Mechero de gas butano
 - Fosforoso o encendedor
 - Multímetro
 - Mangueras para gas
 - Termopares tipo K

- Nuez doble
- Aro con nuez
- Juego de 6 masas
- Desarrollo experimental
 - Primera parte: metodología
 - Montar con cuidado el material de soporte según figura.

Figura 25. **Montaje de material**



Fuente: CANTO, Emiliano. *Manual de prácticas de termodinámica*. p. 108.

- Poner en el matraz Erlenmeyer 100 ml de agua a temperatura ambiente.
 - Colocar el matraz en el interior del vaso de precipitados de 400 ml vacío, centrarlo sin que toquen las paredes.
 - Colocar los dos termómetros en el soporte para tubos de vidrio. El de vástago más largo se sumerge en el matraz Erlenmeyer. El otro termómetro se coloca de manera que, entre lo más profundo posible en el vaso de precipitados, sin que toque las paredes del matraz.
 - Verter 160 ml de agua en el vaso de precipitados de 250 ml.
 - Utilizar el mechero (con precaución para evitar accidentes).
 - Realizar los cálculos para determinar el balance de flujo de calor.
- Segunda parte: procedimiento
- Calentar los 160 ml de agua hasta 80 °C (en el vaso de precipitados de 250 ml).
 - Anotar los valores de temperatura (hasta alcanzar los 80 °C)

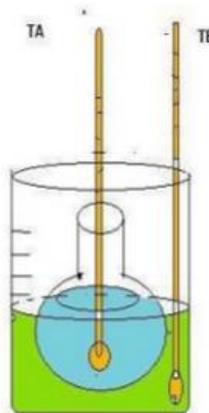
Tabla II. **Temperaturas del proceso de calentamiento de 160 mL de agua**

Temperatura °C	Tiempo (min)
T inicial	0
	Intervalos de 0,5
80 °C	tiempo total

Fuente: elaboración propia.

- Verter el vaso de precipitados de 250 ml (agua a 80 °C) en el vaso de precipitados de 400 ml. Utilizar guantes de protección.

Figura 26. **Vaso de precipitado de 250 ml en vaso de precipitados de 400 ml**



Fuente: CANTO, Emiliano. *Manual de prácticas de termodinámica*. p. 109.

- Comprobar que los termómetros no toquen las paredes del matraz y poner en marcha el cronometro.

- Medir las dos temperaturas del agua (ambos termómetros) y anotarlas en la tabla, intervalos de 30 segundos.

Tabla III. **Resultados de las mediciones de temperaturas durante el proceso de intercambio de calor**

Temperatura A °C	Temperatura B °C	Tiempo (min)	Observaciones
temperatura inicial	80	0.0	

Fuente: elaboración propia.

- Analizar datos recabados y resultados obtenidos.
- Expresión de balance de energía

$$E_{total} = E_{in} - E_{out}$$

$$Eficiencia = \frac{energíautíl}{energíasuministrada}$$

3.3. **Práctica 2. Determinación de la calidad del vapor mediante calentamiento de agua**

- Objetivo

El alumno deberá comprender el concepto de la propiedad termodinámica de la calidad y humedad de un vapor húmedo o mezcla de vapor y líquido.

El calor está definido como la forma de energía que se transfiere entre dos sistemas, o entre un sistema y sus alrededores, debido exclusivamente a una

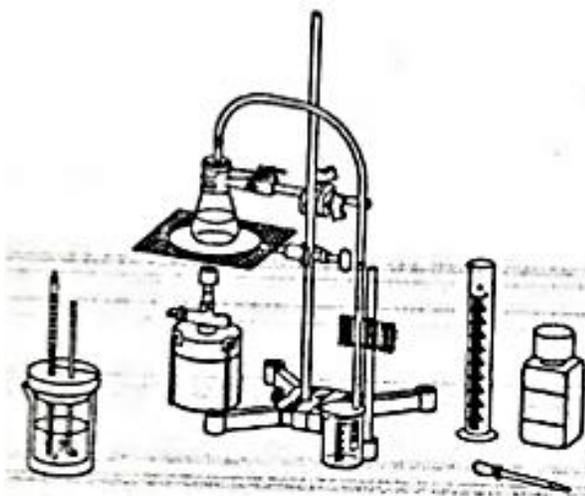
diferencia de temperaturas. El calor sensible se le denomina a la cantidad de calor que recibe una sustancia y toda la energía absorbida en incrementar su energía interna y por esto en aumentar su temperatura.

- Equipo
 - Tapa para calorímetro
 - Agitador
 - Planchas de fieltro
 - Vaso de precipitados de 250 ml y 400 ml
 - Matraz Erlenmeyer 100 ml (o de mayor tamaño)
 - Pipeta con caperuza de goma
 - Probeta graduada
 - Termómetro y termopar
 - Cronómetro
 - Tubos de vidrio de 80 ml y 250 ml
 - Tubo flexible transparente
 - Gas butano

- Piedras para fácil ebullición, 200 g
- Encendedor
- Balanza universal
- Glicerina
- Bloque de hielo seco (como aislante térmico)
- Aro con nuez
- Nuez doble
- Tapón de goma (uno o dos orificios)
- Soporte para tubo de vidrio
- Rejilla con porcelana
- Pinza universal
- Guantes
- Desarrollo experimental
 - Primera parte: metodología

- Montar el material de soporte; colocar la rejilla cerca de 2cm de la cabeza del mechero.

Figura 27. **Montaje de material**



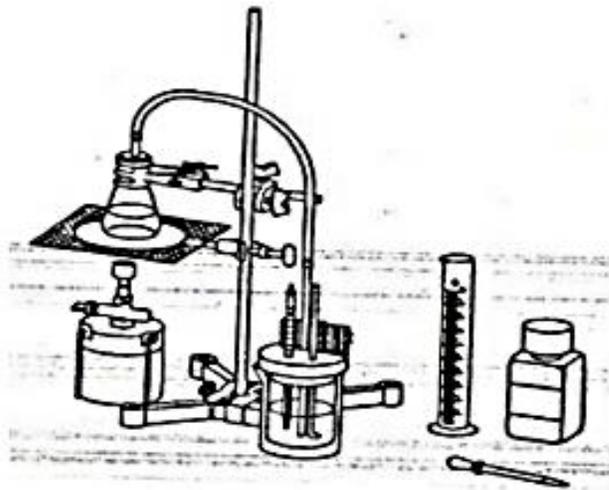
Fuente: CANTO, Emiliano. *Manual de prácticas de termodinámica*. p. 110.

- Montar un recipiente aislado (calorímetro) con dos vasos de precipitados (250 ml y 400 ml) e insertar las dos placas de fieltro.
- Colocar el tubo de vidrio con el tubo flexible que viene del tapón del Erlenmeyer.
- Colocar el termómetro (8 mm) y el agitador (5 mm) en los orificios correspondientes de la tapa del calorímetro. Si se utiliza el tapón de hule de dos orificios, introducir el termómetro en uno y el tubo de vidrio en el otro, hacerlo con cuidado para no quebrarlos; utilizar un poco de

glicerina; si tiene el tapón de un orificio, insertar solo el tubo de vidrio con el flexible.

- Colocar el calorímetro ya conformado dentro de la cavidad del bloque de hielo seco del diámetro del vaso exterior del calorímetro.

Figura 28. **Montaje de calorímetro**



Fuente: CANTO, Emiliano. *Manual de prácticas de termodinámica*. p. 110.

- Por el tubo flexible y el tubo de vidrio que se inserta en el calorímetro pasa vapor de agua, que está caliente a 100 °C, debe mantenerse siempre el orificio salida del tubo de vidrio hacia abajo para no dirigir el vapor que saldrá hacia la cara o alguna parte del cuerpo.

- Al medir los volúmenes de agua, hacerlo con certeza para evitar errores y arrojar malos resultados.
 - Introducir 2 piedrecillas al agua del matraz Erlenmeyer para mejorar la ebullición y colocarlo en la rejilla y sujetarlo con la pinza universal.
- Segunda parte: procedimiento
- Verter 200 ml de agua fría en el calorímetro; medirlo con la probeta graduada y pipeta. Anotar el valor del volumen V_1 .
 - Con el termómetro del calorímetro medir la temperatura del agua y anotar T_1 .

Tabla IV. **Toma de datos tiempo y temperatura**

Tiempo	Temperatura del agua a vaporizar	Temperatura del agua del calorímetro

Fuente: elaboración propia.

- Verter suficiente agua en el matraz Erlenmeyer y calentar el agua hasta que hierva; si se posee el tapón de dos orificios, medir la temperatura inicial con el termómetro y anotar también el tiempo de medición; utilizar el cronometro.

- Observar si en el extremo del tubo de vidrio insertado en la manguera flexible sale vapor de agua.
- Cuando el agua del matraz Erlenmeyer esté hirviendo (aproximadamente 2 minutos) y se observe que no salen gotas de agua, solo vapor, tomar el tubo de vidrio por el soporte e introducirlo en el orificio grande de la ranura de la tapa del calorímetro hasta que su extremo se sumerja en el agua del interior.

- Durante 2 minutos (aproximadamente), permitir el paso de vapor hacia el agua del calorímetro hasta que alcance una temperatura de 60 °C el agua; agitar constantemente y con cuidado para acelerar la mezcla.

- Retirar el mechero y el tubo de vidrio del calorímetro sujetándolo en la varilla, apagar el mechero.

- Agitar cuidadosamente el agua de la mezcla y tomar la lectura de su temperatura T_m , anotarla; también medir el volumen de mezcla auxiliándose de la probeta graduada y anotarla en V_m .

3.4. Práctica 3. Determinación de la presión de un vapor

- Objetivo

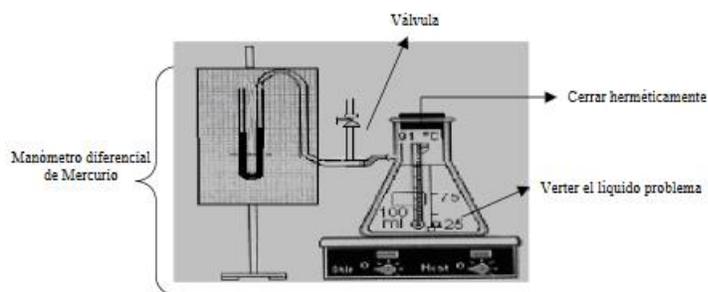
Obtener mediante la experimentación el comportamiento de la presión de vapor de un líquido puro sometido a diferentes temperaturas.

La presión de vapor es una de las propiedades más útil de los líquidos; es una variable importante en el diseño y operación de procesos industriales químicos, físicos y biológicos como consecuencia de la existencia de una interface líquido-vapor. La presión de vapor de un líquido es la presión gaseosa que ejercen las moléculas vaporizadas en equilibrio con el líquido. La presión de vapor o presión de saturación es la presión a la que a cada cambio de temperatura la fase líquida y vapor se encuentran en equilibrio. En equilibrio las fases reciben el nombre de líquido saturado y vapor saturado.

- Equipo
 - Matraz Erlenmeyer 250 ml
 - Estufa de calentamiento
 - Manguera de látex
 - Manómetro diferencial
 - Termómetro de 0 °C-150 °C
 - 250 ml de agua
 - Pinzas de presión
 - Barómetro
 - Baño de agua fría

- Tapón para matraz Erlenmeyer
- Desarrollo experimental
 - Metodología
 - Montar el equipo de laboratorio como se ilustra en la Figura 29; el matraz debe contener el líquido (250 ml de agua); cerrar el sistema de tal manera que solo esté conectada la salida de vapor al manómetro diferencial y verificar que la válvula esté abierta antes de iniciar el calentamiento.
 - Encender la estufa de calentamiento. Calentar el sistema hasta la ebullición del agua. Verificar que no se encuentren fugas en el sistema.

Figura 29. **Montaje del equipo de laboratorio**



Fuente: JIMÉNEZ, Amelia. *Manual de prácticas de termodinámica*. p. 63.

- Una vez que se alcanza la temperatura de ebullición, se permite escapar vapor para desalojar el aire atrapado en la

manguera de látex; después de unos segundos, cerrar la válvula ubicada en la manguera de látex (precaución: al cerrar el sistema este se encuentra a alta temperatura) para registrar las variaciones de presión en el manómetro diferencial de mercurio, anotar la altura en milímetros de mercurio; al aumentar 0,5 °C la temperatura del agua.

Tabla V. **Registro de temperatura y altura de mercurio durante el calentamiento/enfriamiento**

Temperatura °C	Altura en mm Hg

Fuente: elaboración propia.

- Ya que se han tomado los suficientes datos de alturas e intervalos de T sin rebasar la escala del manómetro diferencial, suspender el calentamiento. Retirar el matraz de la estufa y colocarlo sobre la mesa. Registrar el enfriamiento del agua a intervalos de 0,5 °C y anotar las correspondientes alturas de mercurio (presiones de vacío) en mm Hg. Mientras el sistema se enfría hasta alcanzar de 30 °C a 28 °C, es necesario cubrir el matraz con un manto frío para alcanzar la temperatura.
- Registrar la presión atmosférica de la ciudad de Guatemala.

- Realizar los cálculos necesarios para transformar la altura o elevación del fluido manométrico (mm Hg) a presión absoluta de saturación (Pa, kPa).

Tabla VI. **Obtención de presión manométrica a partir de las diferentes alturas de mercurio**

Temperatura °C	Temperatura K273,15 + °C	Altura en mm Hg	Presión manométrica, kPa $P_{man} = \rho gh = \gamma h$

Fuente: elaboración propia.

- Determinar el comportamiento del líquido mediante un diagrama de fases.

3.5. **Práctica 4. Balance termodinámico de una caldera**

- Objetivo

Realizar un análisis simple de una caldera con exactitud aceptable.

Para tener un análisis simple, pero con exactitud aceptable es necesario hacer algunas simplificaciones como las siguientes:

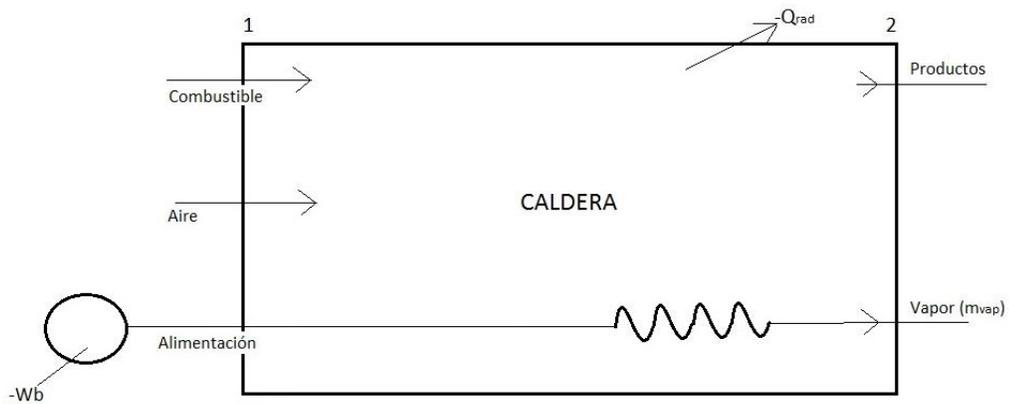
- Las variaciones de energía cinética son despreciables. Esta hipótesis debe hacerse con cuidado pues se presentan casos donde existe variación de este tipo de energía.

- Las variaciones de energía potencial son despreciables.
- La combustión es perfecta.

Esta hipótesis no forzosamente debe cumplirse, pues en caso sea una mezcla rica, se debe tener en cuenta la entalpia de combustión de los productos.

El sistema constituido por la caldera se ha representado en el gráfico 6. En este gráfico las corrientes de aire y de combustible penetran por (1) y lo abandonan por (2) como productos de combustión.

Figura 30. **Sistema constituido por la caldera**



Fuente: elaboración propia.

La caldera se considera como un sistema abierto con circulación estacionaria.

El trabajo es W y es el trabajo de la bomba de alimentación (generalmente este trabajo se desprecia). Siempre tiene lugar una cierta transferencia de calor

al exterior por radiación, convección y conducción; se denominan al conjunto pérdidas por radiación (-Q_{rad}) que generalmente se determinan por diferencia.

La ecuación de la energía para un sistema de circulación en régimen estacionario aplicada a este sistema da:

$$Q_{rad} - W_b = (h_{p2} - h_{r1}) + rh_{vap}(h_2 - h_1)$$

Donde:

- Q_{rad} = pérdidas por radiación
- W_b = trabajo de la bomba
- h_{p2} = entalpia de los productos de combustión
- h_{r1} = entalpia de los reactivos
- h_1 = entalpia del agua de alimentación
- h_2 = entalpia del vapor producido
- rh_{vap} = masa de agua evaporada por unidad de tiempo.

En conclusión:

$$Q_{com} + h_1 + (-W_b) = (-Q_{rad}) + (h_{p2} - h_{p1}) + h_2$$

- Desarrollo experimental
 - Metodología
 - Con la caldera existente en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería, se efectúan los pasos siguientes:
 - Efectuar cinco pruebas tomando lecturas de:
 - ✓ Consumo de combustible.
 - ✓ Muestra de gases de escape para ser analizados en el aparato Orsat o Bacara.
 - ✓ Tomar temperaturas de gases de escape.
 - ✓ Tomar temperatura y presión de salida del vapor.
 - ✓ Tomar temperatura de agua de alimentación.
 - ✓ Anotar trabajo de la bomba.
 - Con los datos anteriores calcular las entalpías en los diferentes puntos.
 - Realizar el balance en función de un tiempo unitario.

- Trabajo a realizar
 - La caldera tiene un medidor de consumo de combustible el cual se debe leer para cada prueba, anotando el tiempo de operación. Efectuar por lo menos cuatro lecturas.
 - Tomar una muestra de los productos de combustión y hacer el análisis Orsat.
 - Para determinar la entalpía de vapor saturado se debe leer la temperatura a que está saliendo el vapor de la caldera.
 - Se toma la lectura de temperatura del agua de alimentación después de que esta ha sido tratada; con esa temperatura se conoce su entalpía de líquido saturado.
 - Si se considera necesario se indica el trabajo realizado por la bomba en cada prueba, $W_b = V_f \Delta P$.

El procedimiento es el siguiente: después de encender la caldera y esperar que los aparatos que utilizan vapor sean encendidos para que exista un consumo de la producción del vapor, se procede de la siguiente manera:

- Se determinarán las cantidades de agua y combustible suministradas en un determinado tiempo de operación. Para el consumo de agua y de combustible se tiene en cuenta la unidad de medida de galones.
- Se toma la temperatura de salida de los gases de la chimenea y también el rango en que variaba la presión del vapor producido.

- Se toma una muestra de los gases para hacerles el análisis Orsat.

Tabla VII. **Lecturas efectuadas**

Lectura	Comb. (gal)	Presión (psig)	T vap °F	T agua °F	Tiempo (hr)
1		100		100	
2		100		100	
3		100		100	
4		100		100	
5		100		100	

Fuente: elaboración propia.

- A partir del poder calorífico del combustible (14 000 BTU/lb) se calcula el calor suministrado por el combustible. Sabiendo que la caldera quema 38,72 lb en una hora.

$$Q_{comb} = 14\,000 \frac{BTU}{lb} * 38.72 \frac{lb}{hr} = 542\,080 \frac{BTU}{hr}$$

- En el balance de energía se puede observar que son varios los factores a considerar y que, por lo tanto, es necesario tener mucho cuidado al efectuar las mediciones.
- Para la realización de esta práctica se necesita como mínimo dos horas (120 minutos), pues el tiempo aconsejable para cada prueba es de 30 minutos, debido a que el consumo de vapor que tiene el laboratorio es poco.

3.6. Práctica 5. Propiedades termodinámicas del vapor de agua

- Objetivo

Determinar las propiedades termodinámicas de una sustancia a partir de un calorímetro de estrangulamiento.

- Equipo

- Planta de vapor
- Termómetro de 0 °C a 200 °C
- Barómetro.

- Desarrollo experimental

- Metodología
 - Revisar que exista suministro de agua en la red.
 - Asegurarse que el nivel de agua en la caldera sea el adecuado verificando en el indicador de nivel que sea su máximo permisible.
 - Comprobar que el equipo se encuentre conectado a red eléctrica.
 - Abrir válvula del sistema de agua de enfriamiento.

- Accionar interruptores de resistencias eléctricas, están en el panel del equipo.
- Esperar a que la temperatura y presión empiecen a incrementarse; cuando esto suceda, abrir la válvula de control de flujo de vapor para purgar el aire que se encuentra dentro de la caldera.
- Cerrar la válvula de control de flujo de vapor y esperar a que la presión en la caldera se incremente hasta 50 psi; abrir la válvula de presión de control del flujo de vapor; cuando la presión descienda a 43 psi, tomar las lecturas de presión y temperatura en la caldera así como la presión y temperatura en el calorímetro. Anotarlas en la siguiente tabla:

Tabla VIII. **Toma de datos**

Concepto	Caldera		Calorímetro		Atmósfera
Lectura	Presión (kPa)	Temperatura (°C)	Presión (kPa)	Temperatura (°C)	Presión (mmHg)

Fuente: elaboración propia.

Nota: la presión en la caldera se controla incrementando o disminuyendo la energía suministrada; por lo tanto, si la presión excede a más de 50 psi, desactive una de las resistencias; cuando la presión empiece a disminuir, active nuevamente la resistencia.

Al finalizar la toma de lecturas realice las siguientes acciones:

- Apagar las resistencias.
- Abrir las válvulas de control de la caldera y el calorímetro para que el vapor escape.
- Una vez que ya no haya flujo de vapor, cerrar la válvula de agua de enfriamiento.
- Desconectar el equipo del suministro electrónico.
- Obtener la presión atmosférica en el barómetro del laboratorio.

Realizando el estudio en el calorímetro de estrangulamiento y aplicando la primera ley de la termodinámica, se concluye que el proceso interno que se lleva a cabo en el calorímetro es isoentálpico; es decir, a entalpia constante $h_1 = h_2$.

Aplicando la primera ley de la termodinámica:

$$Q + W = \Delta E$$

$$Q + w = \Delta E_p + \Delta U + \Delta E_c + W_f$$

Al hacer el análisis correspondiente, se concluye que:

- $Q=0$, debido a que no se suministra calor al sistema.

- $W=0$, ya que el sistema no entrega trabajo.
- $\Delta E_p=0$, ya que tanto en la caldera como en el calorímetro se encuentran prácticamente a la misma temperatura y presión.
- $\Delta E_c=0$, debido a que no hay variación de la velocidad del fluido a la entrada y salida.

Por tanto:

$$\Delta U + W_f = 0$$

Donde:

- ΔU : incremento de energía interna
- W_f : trabajo de flujo.

Aplicada a la entrada y salida del calorímetro:

$$U_2 - U_1 = 0$$

Y la energía térmica específica:

$$u_2 - u_1 = 0$$

Empleando la definición de entalpía, se tiene:

$$h = Pv + u$$

$$u_2 = h_2 - P_2 v_2$$

$$u_1 = h_1 - P_1 v_1$$

$$(h_2 - P_2 v_2) - (h_1 - P_1 v_1) = 0$$

$$h_2 - P_2 v_2 - h_1 + P_1 v_1 = 0$$

Esto implica que el proceso si es isoentálpico, es decir:

$$h_2 - h_1 = 0$$

O bien:

$$h_2 = h_1$$

3.7. Práctica 6. Curva de equilibrio líquido-vapor de agua

- Objetivo

Observar la variación de la temperatura de ebullición del agua con la presión. Determinar el calor de vaporización del agua a partir de la medida de su presión de vapor a distintas temperaturas, entre 20 °C y 100 °C.

- Equipo

- Matraz con agua
- Estufa eléctrica
- Termómetro

- Refrigerador de serpentín
 - Balón grande que evita que el vapor condense en el manómetro
 - Manómetro de mercurio
 - Tubos de conexión con llaves de paso
 - Bomba de vacío de tipo ‘trompa de agua’
- Desarrollo experimental

La presión de equilibrio p (presión de la fase de vapor en equilibrio con la fase líquida) se denomina presión de vapor. Si v^v representa el volumen específico del vapor, entonces $v^v \gg v^l$ y $v^v - v^l \approx v^v$. Aproximando el volumen específico del vapor $v^v = RT/p$, como un gas ideal, se obtiene:

$$\frac{dp}{p} = \frac{L_v}{RT^2} dT$$

Ecuación que, por integración admitiendo L_v constante en el intervalo de temperaturas considerado, queda:

$$\ln \frac{P_2}{P_1} = \frac{L_v}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

Donde p es la presión del vapor de agua correspondiente a la temperatura T .

Donde:

- L_v es el calor latente de cambio de fase
 - v^v es el volumen específico de la fase de vapor
 - v^l es el volumen específico de la fase de líquido
- Metodología
 - A presión constante se suministra calor a un sistema líquido + vapor de agua + aire, la temperatura crece mientras se elimina inicialmente el aire disuelto en el líquido en forma de burbujas. La temperatura permanece constante creando burbujas de agua en ebullición. La presión de vapor de estas burbujas es la misma del sistema aire + vapor de la fase gaseosa, que se mide mediante el manómetro de mercurio. La presión cambia cuando se admite aire al interior del aparato.
 - Se abre la llave y se conecta la trompa de agua, se comprueba que las llaves de paso están cerradas. Se crea el vacío, se desconecta la trompa, y se cierra la llave que conecta con la trompa. Se deja transcurrir unos minutos para comprobar que no hay pérdidas y no debe haber variación en las alturas del manómetro.
 - Se establece la menor presión posible (unos 20 mmHg). Se debe dejar abierto el sistema de refrigeración para evitar que se condense agua en el manómetro.

- Estabilizada la temperatura de ebullición y la presión, se anota en la tabla IX. Para calcular la presión del sistema, a la diferencia de alturas entre las dos ramas del manómetro de mercurio se le debe restar la presión atmosférica.
- Después de hacer la primera toma de datos, se aumenta la presión en 0,5 cm de Hg; esto se hace abriendo la llave que se encuentra conectada al matraz. Así se hace con todos los pasos anteriores para obtener una segunda toma de datos.
- Para aumentar la presión, se enciende la estufa eléctrica. Se espera hasta que alcance de nuevo la ebullición en el fluido, es decir, el líquido hierve y la acción del agua fría que circula por el serpentín de refrigeración hace que se condense y vuelva al matraz, encontrándose el sistema en estado estacionario.

Tabla IX. **Datos obtenidos**

Temperatura (°C)	Presión de vapor experimental p	Presión de vapor leída en tabla adjunta P_{tab}

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. Presión de vapor de agua de 0 °C a 100 °C

t/°C	P/kPa	P/mmHg	t/°C	P/kPa	P/mmHg
0.0000	0.61129	4.5851	51.000	12.970	97.283
1.0000	0.65716	4.9291	52.000	13.623	102.18
2.0000	0.70605	5.2958	53.000	14.303	107.28
3.0000	0.75813	5.6864	54.000	15.012	112.60
4.0000	0.81359	6.1024	55.000	15.752	118.15
5.0000	0.87260	6.5450	56.000	16.522	123.93
6.0000	0.93537	7.0159	57.000	17.324	129.94
7.0000	1.0021	7.5164	58.000	18.159	136.20
8.0000	1.0730	8.0482	59.000	19.028	142.72
9.0000	1.1482	8.6122	60.000	19.932	149.50
10.000	1.2281	9.2115	61.000	20.873	156.56
11.000	1.3129	9.8476	62.000	21.851	163.90
12.000	1.4027	10.521	63.000	22.868	171.52
13.000	1.4979	11.235	64.000	23.925	179.45
14.000	1.5988	11.992	65.000	25.022	187.68
15.000	1.7056	12.793	66.000	26.163	196.24
16.000	1.8185	13.640	67.000	27.347	205.12
17.000	1.9380	14.536	68.000	28.576	214.34
18.000	2.0644	15.484	69.000	29.852	223.91
19.000	2.1978	16.485	70.000	31.176	233.84
20.000	2.3388	17.542	71.000	32.549	244.14
21.000	2.4877	18.659	72.000	33.972	254.81
22.000	2.6447	19.837	73.000	35.448	265.88
23.000	2.8104	21.080	74.000	36.978	277.36
24.000	2.9850	22.389	75.000	38.563	289.25
25.000	3.1690	23.769	76.000	40.205	301.56
26.000	3.3629	25.224	77.000	41.905	314.31
27.000	3.5670	26.755	78.000	43.665	327.51
28.000	3.7818	28.366	79.000	45.487	341.18
29.000	4.0078	30.061	80.000	47.373	355.33
30.000	4.2455	31.844	81.000	49.324	369.96
31.000	4.4953	33.718	82.000	51.342	385.10
32.000	4.7578	35.686	83.000	53.428	400.74
33.000	5.0335	37.754	84.000	55.585	416.92
34.000	5.3229	39.925	85.000	57.815	433.65
35.000	5.6267	42.204	86.000	60.119	450.93
36.000	5.9453	44.593	87.000	62.499	468.78
37.000	6.2795	47.100	88.000	64.958	487.23
38.000	6.6298	49.728	89.000	67.496	506.26
39.000	6.9969	52.481	90.000	70.117	525.92
40.000	7.3814	55.365	91.000	72.823	546.22
41.000	7.7840	58.385	92.000	75.614	567.15
42.000	8.2054	61.546	93.000	78.494	588.75
43.000	8.6463	64.853	94.000	81.465	611.04
44.000	9.1075	68.312	95.000	84.529	634.02
45.000	9.5898	71.929	96.000	87.688	657.71
46.000	10.094	75.711	97.000	90.945	682.14
47.000	10.620	79.657	98.000	94.301	707.32
48.000	11.171	83.789	99.000	97.759	733.25
49.000	11.745	88.095	100.00	101.32	759.96
50.000	12.344	92.588			

Fuente: HAAR, L.; GALLAGHER, J.S.; KELL, G.S. *NBS/NRC steam tables*. p. 673.

3.8. Práctica 7. Psicometría

- Objetivo

Reconocer los aspectos fundamentales del estudio de las propiedades termodinámicas de psicometría, presencia de humedad en el aire u otros gases. Reconocer valores de estado: punto de rocío, punto de escarcha, humedad relativa, humedad absoluta.

- Equipo

- Un psicrómetro
- 2 termistores, uno para TBH y otra para TBS
- Una batería de 12 V
- Diagrama psicométrico
- Una malla o porción de yute
- Multímetro

Se realizarán cinco tipos de ensayos distintos con el psicrómetro, para esto en el ducto de entrada se debe colocar el yute, bajo distintas condiciones:

- Yute a condiciones normales

- Yute semi húmedo con agua a condiciones normales
- Yute humedecido con agua a condiciones normales
- Yute seco empapado con hielo
- Yute humedecido con agua helada
- Yute seco calentado con una cocina
- Yute humedecido con agua caliente

Con la finalidad de simular distintas condiciones ambientales.

El procedimiento será el siguiente para cada uno de los cinco ensayos.

- Verificar el estado de los termistores, mojar una pequeña porción de algodón y cubrir uno de los termistores.
- Conectar los bornes del motor del ventilador del psicrómetro a la batería de 12 V.
- Instalar el yute en el ducto de entrada del psicrómetro.
- Dejar que se establezca el régimen de trabajo del ventilador del psicrómetro un promedio de 5 minutos.
- Tomar los valores de las resistencias que consigna cada termistor y compararlos con las curvas patrones del psicrómetro.

- Tomar tres valores y sacar un promedio.
- Realizar los 5 ensayos y llenar el siguiente cuadro.

Tabla XI. **Toma de temperaturas de los ensayos**

VALORES	TBS (°C)	TBH (°C)
Ensayo 01		
Ensayo 02		
Ensayo 03		
Ensayo 04		
Ensayo 05		

Fuente: elaboración propia.

Para cada uno de los ensayos, con la ayuda de una carta psicométrica determinar:

- Humedad relativa
- Humedad absoluta
- Temperatura de rocío

- Humedad de saturación por enfriamiento adiabático
- Humedad de la saturación a la temperatura que se encuentra
- Calor específico
- Volumen específico
- Entalpía específica
- Así mismo, determinar los mismos parámetros en forma teórica
- En función a los resultados obtenidos, ¿cómo varían el TBS y TBH en función a las condiciones ambientales simuladas?

3.9. Práctica 8. Intercambiador de calor aire-agua

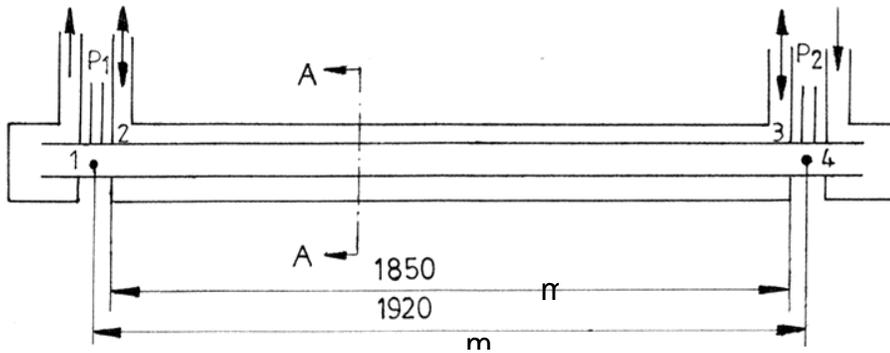
- Objetivo

Determinar la tasa de transferencia de calor en intercambiadores de simple fase, con flujo paralelo.

- Equipo
 - Se necesita un aparato que es esencialmente un intercambiador de calor de tubo concéntrico, donde fluye aire caliente por el tubo central y es enfriado por agua que fluye en el anillo.
 - Un ventilador de velocidad variable suministra aire filtrado.

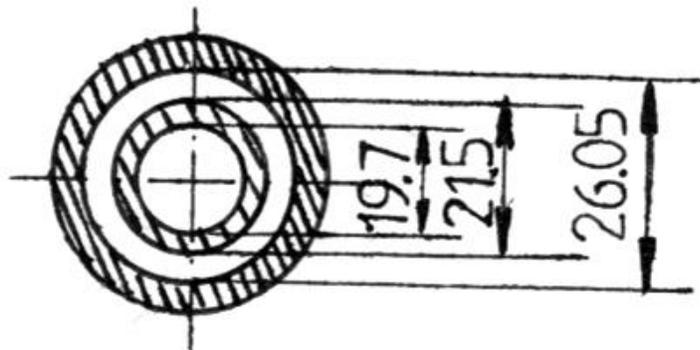
- Un calentador eléctrico de control variable suministra el calor al aire.
 - Termocoplas de cobre constantano: dos para medir la temperatura del aire a la entrada y a la salida de la longitud de prueba y dos conectadas en los mismos puntos anteriores para medir la temperatura del tubo de cobre. Estas termocoplas van conectadas a un termómetro electrónico.
 - Dos termómetros de Hg que miden la temperatura del agua a la entrada y salida.
 - Dos manómetros que miden la presión estática del aire a la salida del tubo (rango 0 a 300mm H₂O) y la caída de presión del aire a través de longitud de prueba (rango 0 a 200 mm H₂O).
 - Para medir flujo de agua se utiliza un vaso graduado y un cronometro.
 - Un tanque con agua colocado en la parte superior provee de un flujo constante de agua.
- Desarrollo experimental
 - Esquema

Figura 31. **Esquema de intercambiador de calor**



Fuente: CANTO, Emiliano. *Manual de prácticas de termodinámica*. p. 115.

Figura 32. **Sección transversal de intercambiador de calor**



Fuente: CANTO, Emiliano. *Manual de prácticas de termodinámica*. p. 111.

- Metodología
 - Encerar manómetros.
 - Comprobar baterías de termómetros electrónicos y encerrarlo.

- Abrir suministro de agua, con el flujo máximo por tres minutos, elegir el sentido del mismo.
- Cerrar las llaves de salida de agua.
- Abrir válvula de entrada de agua.
- Conectar interruptor, cuidando que el reóstato del calentador se halle en su posición más baja.
- Incrementar cuidadosamente la velocidad en el ventilador.
- Asegurar que el agua este fluyendo y el ventilador soplando antes de accionar el control variable del calentador. La temperatura del aire no debe exceder de los 160 °C.
- Ajustar el flujo de agua con el fin de obtener una elevación apreciable de temperatura.
- Inicialmente dejar de 20 a 30 minutos para que las temperaturas se estabilicen, antes de tomar cualquier dato. Toma de datos en Tabla XII.
- Dar nuevas condiciones de prueba y esperar 15 minutos para que las condiciones se estabilicen.
- Una vez terminada la práctica, permitir que el ventilador gire a su máxima velocidad de 5 a 10 minutos, de manera que el aparato se haya enfriado. Finalmente, drenar toda el agua del aparato.

Tabla XII. Toma de datos

INTERCAMBIADOR DE CALOR: AIRE- AGUA TIPO DE FLUJO: PARALELO							
PARÁMETRO	SIMBOLOGÍA	UNIDAD	1	2	3	4	5
Temperatura del aire de entrada.	T_1	°C					
Temperatura del aire de salida.	T_2	°C					
Temperatura del tubo a la entrada.	T_{o1}	°C					
Temperatura del tubo a la salida.	T_{o2}	°C					
Temperatura del agua de entrada.	t_1	°C					
Temperatura del agua de salida.	t_2	°C					
Volumen de agua.	\bar{V}	L.					
Tiempo de recolección.	t	s					
Presión estática del aire a la salida.	P_1	mmH ₂ O					
Caída de presión del aire a lo largo del tubo.	P	mmH ₂ O					
Amperaje.	I	A					
Voltaje	Volt.	V					
Temperatura del ambiente.	T_a	°C					

Fuente: elaboración propia.

El sistema está protegido por un termostato, como precaución; corta el suministro de energía al calentador si la temperatura del aire a la entrada del tubo excede de los 260 °C.

3.10. Práctica 9. Ciclo de potencia de vapor Rankine

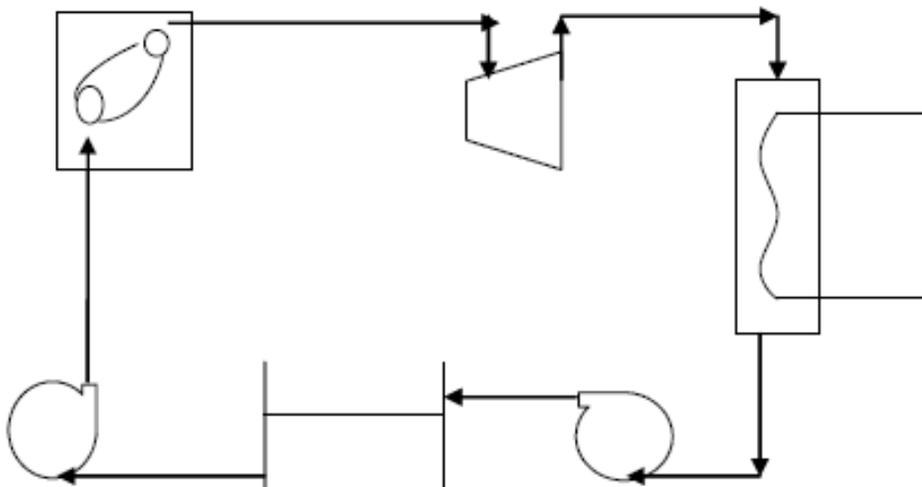
- Objetivo

Determinar el rendimiento térmico de la planta de generación de potencia de vapor basado en el funcionamiento del ciclo de Rankine.

- Equipo
 - Planta de vapor
- Desarrollo experimental
 - Se colocará en servicio la planta térmica de vapor.
 - Se debe medir la temperatura del agua que va a entrar al generador de vapor.
 - Se deberá suministrar agua al generador de vapor, al abrir la llave a la salida del tanque de agua de alimentación.
 - Encender la bomba de alimentación hacia el generador de vapor.
 - Encender el quemador.
 - Se aislará el tanque de combustible y el tanque de agua de alimentación (se cierran las entradas de alimentación de ambos tanques).

- Una vez alcanzada la temperatura de estabilización en el generador de vapor se toma nota de la presión, la cual se asume como la presión de entrada a la caldera (tabla XIII).
- Al llenar el depósito de vapor se mide la presión de salida. (tabla XIII).
- Se abre la válvula del depósito de vapor que va hacia la turbina, momento en el cual se leerá la temperatura de entrada, presión de entrada, temperatura de salida y presión de salida en la turbina (tabla XIII).
- Luego se medirá la presión en el condensador. (tabla XIII).

Figura 33. **Esquema de la planta de vapor**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Toma de datos**

Equipo	Presión		Temperatura	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Caldera				
Turbina				
Condensador				
Bomba				

Fuente: elaboración propia.

- Ecuaciones a emplear:

$$Q_{caldera} = h_{sal} - h_{ent}$$

$$Q_{condensador} = h_{ent} - h_{sal}$$

$$W_{turb} = h_{ent} - h_{sal}$$

$$W_{bomba} = h_{sal} - h_{ent}$$

Rendimiento térmico de la planta de vapor:

$$\eta = \frac{W_{turbina} - W_{bomba}}{Q_{caldera}}$$

Nota: puede utilizar el diagrama de Mollier del agua como material de apoyo para ubicar la Entalpia que considere necesaria.

3.11. Práctica 10. Torre de enfriamiento

- Objetivo

Realizar un balance de energía de las corrientes de aire y de agua que circulan en contra flujo a través de la torre. Desarrollar destrezas en el uso de las cartas psicométricas.

- Equipo

- La torre de enfriamiento posee un ventilador que envía el aire desde la parte inferior de la torre hacia arriba, dicho aire sale como una chimenea; con las compuertas se puede regular el flujo de aire; la curvatura en la tubería sirve para que el aire gane turbulencia.
- Finalmente, la función de las resistencias en calentar el agua.

- Desarrollo experimental

- Esquema

- Repetir el proceso regulando el caudal. Tomar los datos en la tabla XIV y resultados en tabla XV.

Tabla XIV. **Toma de datos**

Resistencia [KW]	Entrada			Salida	
	Contenido de Agua [lbm agua/ lbm aire seco]	Entalpía [BTU/lbm aire seco]	Volumen Específico [pie ³ /lbm aire seco]	Contenido de Agua [lbm agua/ lbm aire seco]	Entalpía [BTU/lbm aire seco]
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Resultados**

Resistencia [KW]	Caudal de Aire [m ³ /h]	Caudal de Agua [lt/min]	Calor ganado por el aire [BTU/h]	Calor de salida del sistema [BTU/h]
1				
2				
3				
4				
1				
2				
3				
4				

Fuente: elaboración propia.

4. POSIBLE IMPLEMENTACIÓN

4.1. Número de prácticas y ponderación

Para la realización de las prácticas propuestas de laboratorio es necesario contar con una posible implementación en la cual se tomen en cuenta aspectos importantes que tienen que ver con la distribución del tiempo a lo largo del semestre, el cual estará en función del número de estudiantes que cursen la clase de Termodinámica 2 que actualmente se encuentra entre 60 a 80.

Para abarcar esta cantidad de alumnos es necesario que los laboratorios sean impartidos los días martes y jueves en dos horarios; ambos horarios en la tarde: el primero de 14:00 a 15:40 horas y el segundo de 16:30 a 18:10 horas.

En cada horario se asignarán un máximo de 40 alumnos, los cuales deberán ser divididos en dos grupos iguales (de aproximadamente 20 personas como lo estipula la acreditación de la Escuela de Ingeniería Mecánica), de esta manera las prácticas serán realizadas por cada grupo de estudiantes cada semana y así se logrará abarcar a una población de 80 alumnos.

Otros aspectos importantes a considerar son: los periodos de tiempo necesario para realizar las prácticas, el equipo necesario para llevar a cabo dichas prácticas, el número sugerido de prácticas, las instalaciones y el personal docente necesarios. Esta última parte se puede catalogar como los recursos necesarios.

Es necesario señalar que actualmente en la facultad se cuentan con recursos que no están siendo del todo aprovechados; por lo cual, la implementación del desarrollo de estas prácticas está dirigida a aprovechar dichos recursos.

Este instructivo guía propuesto se elaboró con un número de prácticas de laboratorio que incluyen el desarrollo del curso teórico; es primordial saber que no todos los temas son abarcados en este manual.

Sin embargo, las prácticas con las que se cuentan están destinadas a complementar en gran medida los conocimientos teóricos de la termodinámica a través de un contacto con equipo de laboratorio.

Se sugiere que el número de prácticas no sea menor al número propuesto ya que se cuenta con el tiempo necesario a lo largo del semestre para poderlas desarrollar de una manera óptima; sin embargo, la practica uno llamada 'Medición de las variables Termodinámicas' puede dividirse en dos. Así, el número de prácticas que se sugiere puede ser de nueve o diez. Se recomienda que por motivos de tiempo para el primer semestre del año, el número de prácticas sea de nueve y para el segundo semestre del año sea de diez o mantener el mismo número.

Para el caso de escuela de vacaciones de los meses de junio y diciembre el número recomendable de prácticas es de siete (esto dependerá de la programación del catedrático laboratorista y catedrático del curso).

La ponderación total de las practicas se sugiere que sea de un 20 % de la nota total del curso. Es recomendable que los estudiantes realicen las prácticas portando su vestimenta de seguridad y laboratorio.

4.2. Duración sugerida de las prácticas

Las prácticas están desarrolladas de tal manera que se puedan realizar en un periodo de tiempo no menor dos horas clase (100 minutos) ya que se desea que sean elaboradas con el cuidado necesario por parte del estudiante; de tal manera que cualquier inquietud pueda ser resuelta en el laboratorio; se sugiere este tiempo para que la toma de datos sea lo más precisa posible para evitar los errores involuntarios de los estudiantes.

Antes de realizar cada práctica es necesario que el catedrático laboratorista realice una inducción de la práctica y, de ser necesario, una demostración de la manera de cómo realizar las mediciones y cómo se debe montar el equipo; esto para facilitarle al estudiante la comprensión de lo que realizará durante la práctica.

El tiempo sugerido para realizar la inducción es de unos 15 minutos máximo de tal manera que los estudiantes tendrán un periodo de tiempo adecuado para la toma de datos y para dejar el área de trabajo limpia y ordenada después de realizada la práctica.

4.3. Cronograma de actividades

Se presentan dos cronogramas de actividades los cuales están hechos de tal manera que las prácticas de laboratorio se realicen en un número de nueve para ambos semestres; sin embargo, como ya se había mencionado, el número puede ser menor para el primer semestre.

Tabla XVI. Cronograma sugerido de prácticas para primer semestre

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA												
CALENDARIZACIÓN DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO TERMODINÁMICA 2. PRIMER												
PRÁCTICA	ENERO			FEBRERO				MARZO			ABRIL	
	4ta Semana	3ra Semana	2da Semana	4ta Semana	3ra Semana	2da Semana	1ra Semana	3ra Semana	2da Semana	1ra Semana	4ta Semana	3ra Semana
Medición de las variables												
Determinación de la calidad del vapor mediante												
Determinación de la presión de un vapor												
Balance termodinámico de una												
Propiedades termodinámicas del												
Curva de equilibrio líquido-vapor de agua.												
Psicometría												
Intercambiador de calor aire-agua												
Ciclo de potencia de vapor Rankine												

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. Cronograma sugerido de prácticas para segundo semestre

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA		CALENDARIZACIÓN DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO, TERMODINÁMICA 2. SEGUNDO SEMESTRE											
		OCTUBRE			SEPTIEMBRE			AGOSTO			JULIO		
PRÁCTICA	3ra Semana												
	2da Semana												
	1ra Semana												
	3ra Semana												
	2da Semana												
	1ra Semana												
	4ta Semana												
	3ra Semana												
	2da Semana												
	1ra Semana												
	4ta Semana												
	3ra Semana												
2da Semana													
Medición de las variables termodinámicas													
Determinación de la calidad del vapor mediante calentamiento de agua													
Determinación de la presión de un vapor													
Balance termodinámico de una caldera													
Propiedades termodinámicas del vapor de agua													
Curva de equilibrio líquido-vapor de agua													
Psicometría													
Intercambiador de calor aire-agua													
Ciclo de potencia de vapor Rankine													

Fuente: Elaboración propia.

4.4. Recursos necesarios

Son determinantes para realizar las prácticas. Este instructivo ha sido desarrollado para prácticas planificadas de tal manera que los recursos necesarios sean lo más factible que se pueda para que, en caso de no contar con el equipo necesario para determinada práctica, el gasto de su adquisición sea el mínimo. También, deben considerarse las instalaciones y el personal docente necesario para integrar las necesidades correspondientes.

4.4.1. Equipo

Este es uno de los puntos principales a considerar para la implementación de las prácticas de laboratorio. Para este caso se planificó la utilización de un equipo sencillo, económico de fácil adquisición y en otras prácticas, equipo ya disponible en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. El equipo necesario para cada práctica se detalla al inicio de cada, en el capítulo del desarrollo experimental de prácticas.

4.4.2. Instalaciones

Para la realización de las prácticas es necesario el uso de diferentes instalaciones dentro la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala; se recomienda hacer un espacio físico adecuado y con el equipo necesario para la realización de estas prácticas, con el fin de obtener el máximo provecho de los recursos disponibles; se sobreentiende que todas las instalaciones mencionadas pertenecen a esta universidad. Se recomienda que la primera práctica se desarrolle en la Escuela de Ingeniería Mecánica en los salones adjuntos a los laboratorios de procesos de manufactura; para realizarlas es necesaria la adquisición de equipo de laboratorio el cual, como ya

se mencionó anteriormente, es un equipo económico y de fácil adquisición. De la misma manera, se propone que en conjunto con la Escuela de Ingeniería Química se utilice el generador de vapor que dicha escuela posee para realizar las prácticas de esta propuesta de instructivo.

CONCLUSIONES

1. Con la realización de este instructivo, se podrá comprobar que el estudiante desarrollará una mejor comprensión de los fenómenos termodinámicos, mejorando de esta forma sus aptitudes para que profesionalmente pueda analizar e intervenir en los múltiples procesos industriales donde estos principios básicos son aplicados.
2. Se verificará que se aprovechen los recursos con los que cuenta actualmente la Facultad de Ingeniería. recursos de instalaciones y equipo que al utilizarse beneficiarán a los estudiantes que cursan la asignatura de Termodinámica 2, la cual es importante para entender los procesos y fenómenos que se estudiarán en los cursos posteriores.
3. Finalizando el presente trabajo de graduación se han desarrollado prácticas de laboratorio las cuales al realizar los estudiantes podrán adquirir un aprendizaje íntegro de lo teórico y práctico que mejorará su entendimiento de los procesos termodinámicos y del funcionamiento de los equipos que intervienen en dichos procesos.
4. La formación académica de los estudiantes que cursen la asignatura de Termodinámica 2 es necesaria e importante, ya que esta es la base de los fenómenos que se analizan a profundidad en los cursos posteriores.

RECOMENDACIONES

1. Conocer y sepan cuál es la guía de las normas de seguridad que el estudiante debe seguir dentro de las instalaciones donde se realizarán las prácticas para evitar accidentes durante su realización.
2. Mantener actualizados los conocimientos del instructor de laboratorio mediante capacitación continua.
3. Organizar los laboratorios en secciones de manera que el número de estudiantes por cada una no sea mayor a 20, con el fin de tener mejor control en el desarrollo de las prácticas.
4. Realizar las prácticas de laboratorio en el orden propuesto en este instructivo ya que están desarrolladas de tal forma que tengan un orden secuencial con el contenido de la clase teórica.
5. El equipo de laboratorio debe estar en óptimas condiciones para reducir los riesgos de falla en los experimentos, también, los riesgos de lesiones en los estudiantes debido a equipo defectuoso.
6. Para evitar extravíos del equipo se sugiere realizar un inventario al inicio y al final de cada práctica en cada una de las secciones de laboratorio.

BIBLIOGRAFÍA

1. CANTO, Emiliano, *Manual de prácticas de termodinámica*. México: McGraw-Hill, 2012. 152 p.
2. CENGEL Yunus.A, BOLES M.A. *Termodinámica*. 7a ed. México: McGraw-Hill, 2009. 1041.
3. MORAN, M.J.; SHAPIRO, H.N. *Fundamentos de termodinámica técnica*. 2a ed. México: McGraw Hill, 2000. 888 p.
4. POTTER Merle C., SCOTT Elaine P., *Termodinámica*. México: McGraw-Hill, 2006. 173 p.
5. SERWAY, Raymond, *Física para ciencias e ingeniería*. 6a ed. México: McGraw-Hill, 2006. 723 p.
6. WARK K., RICHARDS D.E, *Termodinámica*. 6a ed. España: McGraw-Hill, 2001. 1070p.

