



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

**PROPUESTA DE INSTRUCTIVO GUÍA PARA EL DESARROLLO DE  
PRÁCTICAS DE LABORATORIO DEL CURSO TERMODINÁMICA 1**

**Edwin Antonio Andino Paz**

Asesorado por el Ing. Roberto Guzmán Ortiz

Guatemala, Enero de 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE INSTRUCTIVO GUÍA PARA EL DESARROLLO DE  
PRÁCTICAS DE LABORATORIO DEL CURSO TERMODINÁMICA 1**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

**EDWIN ANTONIO ANDINO PAZ**

ASESORADO POR EL ING. ROBERTO GUZMÁN ORTIZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, ENERO DE 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Enrique Alfredo Beber Aceituno
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de Lopéz
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Luis Pedro Ortiz de León
VOCAL V	Br. José Alfredo Ortiz Herincx
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Randolpho Chang Granados
EXAMINADOR	Ing. Pablo Rodolfo Zúñiga Ramírez
EXAMINADOR	Ing. Byron Giovanni Palacios Colindres
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo 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 GUÍA PARA EL DESARROLLO DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO DEL CURSO TERMODINÁMICA 1**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 12 de julio de 2010.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Edwin Antonio Andino Paz', with a double hash symbol (#) at the end.

**Edwin Antonio Andino Paz**

Guatemala 8 de Noviembre de 2010

Ingeniero  
Julio César Campos Paiz  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos  
Presente

Estimado ingeniero Campos:

Atentamente me dirijo a usted con el propósito de presentarle el trabajo de graduación titulado "**Propuesta de instructivo guía para el desarrollo de prácticas de laboratorio del curso termodinámica 1**" elaborado por el estudiante Edwin Antonio Andino Paz con carne 200680038.

A mi juicio el presente trabajo cumple con los objetivos planteados, y creo necesario destacar la utilidad que el mismo puede tener como material guía para el curso de Termodinámica 1 que actualmente se imparte en esta facultad.

Sin otro en particular, me suscribo a usted como su seguro y atento servidor

  
Ing. Roberto Guzmán Ortiz  
Colegiado No. 4465  
Asesor de trabajo de graduación

*Roberto Guzmán Ortiz*  
INGENIERO MECANICO  
Colegiado No. 4,465

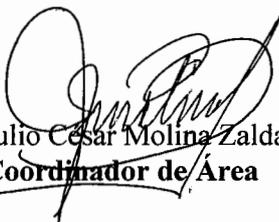
**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

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 GUÍA PARA EL DESARROLLO DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO DEL CURSO TERMODINÁMICA 1, del estudiante Edwin Antonio Andino Paz , recomienda su aprobación.

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

  
Ing. Julio César Molina Zaldaña  
**Coordinador de Área**

Guatemala, noviembre de 2010.

/behdei

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con la aprobación del Coordinador del Área Térmica, al Trabajo de Graduación titulado PROPUESTA DE INSTRUCTIVO GUÍA PARA EL DESARROLLO DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO DEL CURSO TERMODINÁMICA 1, del estudiante **Edwin Antonio Andino Paz**, procede a la autorización del mismo.

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

Ing. Julio César Campos Paiz  
**DIRECTOR**



Guatemala, enero de 2011

JCCP/behdei

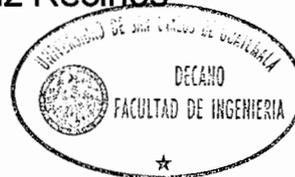


El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **PROPUESTA DE INSTRUCTIVO GUÍA PARA EL DESARROLLO DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO DEL CURSO TERMODINÁMICA 1**, presentado por el estudiante universitario **Edwin Antonio Andino Paz**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

A large, stylized handwritten signature in black ink, consisting of a large loop at the top and a vertical stroke at the bottom.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano



Guatemala, enero de 2011

/cc  
cc. archivo

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	<b>XI</b>
<b>GLOSARIO</b>	<b>XIII</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>XVI</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>XVIII</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>XXI</b>

<b>1. ANTECEDENTES</b>	<b>1</b>
1.1 Historia de la Termodinámica	1
1.1.1 Origen	1
1.1.2 Evolución y unión con la Mecánica	2
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	3
1.2.3 Predicción de resultados al aplicar conocimientos 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	4
1.3.1.1 Unidad 1. Conceptos básicos de la	

	Termodinámica	5
1.3.1.2	Unidad 2. Energía, transferencia de energía, análisis general	5
1.3.1.3	Unidad 3. Propiedades de las sustancias puras	5
1.3.1.4	Unidad 4. Análisis de energía de sistemas cerrados	5
1.3.1.5	Unidad 5. Análisis de masa y energía de volúmenes de control	6
1.3.1.6	Unidad 6. La Segunda Ley de la Termodinámica	6
1.3.1.7	Unidad 7. Entropía	6
1.3.1.8	Unidad 8. Exergía: Una medida del potencial de trabajo	7
1.3.2	Metodología actual del desarrollo del curso	7
1.3.2.1	Clases presenciales	8
1.3.2.2	Trabajo dirigido	8
1.3.3	Metodología de la evaluación del curso	9
1.3.3.1	Exámenes parciales	9
1.3.3.2	Tareas en clase	9
1.3.3.3	Trabajo dirigido	9
1.3.3.4	Proyecto	10
<b>2.</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b>	<b>11</b>
2.1	Conceptos generales, mediciones fundamentales y ley cero de la Termodinámica	11
2.1.1	Definición de Termodinámica	11
2.1.2	Estudio de la Termodinámica a nivel macroscópico	11
2.1.3	Sistemas termodinámicos	12

2.1.3.1	Sistema	12
2.1.3.2	Entorno	12
2.1.3.3	Frontera del sistema	12
2.1.3.4	Sistema aislado	13
2.1.3.5	Volumen de control	13
2.1.3.6	Superficie de control	13
2.1.4	Mediciones fundamentales	14
2.1.4.1	Sistema internacional de unidades SI	15
2.1.4.1.1	Algunas unidades SI fundamentales	15
2.1.4.1.2	Prefijos métricos	16
2.1.5	Factores de conversión y análisis dimensional	17
2.1.5.1	Medición de masa	19
2.1.5.2	Medición de volumen	19
2.1.5.3	Medición de la temperatura	20
2.1.6	Conversión entre unidades métricas y anglosajonas	21
2.1.7	Incertidumbre en las mediciones	24
2.1.8	Propiedades y estados de un sistema	26
2.1.9	Procesos y ciclos	26
2.1.10	Ecuación de estado de un gas ideal	28
2.1.10.1	Ley de Boyle	29
2.1.10.2	Ley de Charles	30
2.1.10.3	Ley de Gay- Lussac	31
2.1.11	Ley cero de la Termodinámica	33
2.2	Sustancias puras	34
2.2.1	Fases de una sustancia pura y equilibrio de fases	34
2.2.2	Diagramas de fases del agua	34
2.2.2.1	Curva T-V	35
2.2.2.1.1	Región líquido comprimido	35
2.2.2.1.2	Punto líquido saturado	35

2.2.2.1.3	Región de mezcla (calidad)	36
2.2.2.1.4	Punto vapor saturado	36
2.2.2.1.5	Región vapor sobrecalentado	36
2.2.2.1.6	Punto crítico	38
2.2.2.2	Curva P-V	38
2.2.2.3	Curva P-T	39
2.2.3	Tablas de vapor	40
2.2.3.1	Identificación de un estado dadas dos de sus propiedades	40
2.2.3.2	Propiedades específicas encontradas en las tablas de vapor	41
2.2.3.3	Volumen	41
2.2.3.4	Energía interna	41
2.2.3.5	Entalpía	41
2.2.3.6	Entropía	42
2.2.4	Calor de vaporización	42
2.3	Trabajo	43
2.3.1	Definición de trabajo	44
2.3.2	Tipos de interacciones de trabajo	45
2.3.2.1	Trabajo de frontera	46
2.3.2.2	Trabajo eléctrico	47
2.3.2.3	Trabajo de eje	48
2.3.2.4	Trabajo de resorte	49
2.4	Calor y primera ley de la Termodinámica	49
2.4.1	Definición de calor	49
2.4.2	Tipos de mecanismos de transferencia de calor	50
2.4.3	Presentación de la primera ley de la Termodinámica	52
2.4.3.1	Aplicada a un ciclo	52
2.4.3.2	Aplicada a un proceso	53

2.4.3.3	Aplicada a sistemas	55
2.4.4	Definición formal de entalpía como combinación de propiedades	59
2.4.5	Calor específico	60
2.4.6	Equivalente mecánico del calor	61
2.4.7	Primera ley de la Termodinámica; Formulación general para volúmenes de control	62
2.4.8	Primera ley simplificada (caso especial: ecuación de Bernouilli)	64
2.5	Primera ley aplicada al análisis de equipo	66
2.5.1	Bombas, compresores y turbinas	67
2.5.2	Toberas y difusores	68
2.5.3	Intercambiadores de calor	69
<b>3. DESARROLLO EXPERIMENTAL DE PRÁCTICAS</b>		<b>71</b>
3.1	Metodología del contenido de cada práctica	71
3.2	Medición de las variables termodinámicas	72
3.3	Sustancias puras (cambio de fase del agua)	82
3.4	Trabajo	89
3.5	Primera ley con transferencia de calor aplicada a un proceso (Calorimetría)	100
3.6	Primera ley aplicada a volúmenes de control y a un proceso	104
3.7	Intercambiador de calor	110
<b>4. POSIBLE IMPLEMENTACIÓN</b>		<b>115</b>
4.1	Número de prácticas y ponderación	115
4.2	Duración sugerida de prácticas	117
4.3	Cronogramas de actividades	117
4.4	Recursos necesarios	121

4.4.1	Equipo	121
4.4.2	Instalaciones	121
4.4.3	Personal docente	122
4.5	Recursos disponibles	123
4.5.1	Centro de Investigaciones	123
4.5.2	Parque de Energía Renovable Escuela de Ingeniería Mecánica	125
4.5.3	Laboratorios de Física S-11	126
4.6	Presentación de reportes científicos	127
4.6.1	Importancia de presentar un reporte científico	127
4.6.2	Contenido sugerido de un reporte científico	127
4.6.2.1	Introducción	128
4.6.2.2	Objetivos	128
4.6.2.3	Hipótesis	129
4.6.2.4	Marco teórico	129
4.6.2.5	Desarrollo experimental	130
4.6.2.6	Resultados	130
4.6.2.7	Conclusiones	130
4.6.2.8	Fuentes de consulta	131
	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>133</b>
	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>135</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>137</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>139</b>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1	Volumen de una caja de un metro cúbico	18
2	Relación entre escalas de temperatura	20
3	Representación de un proceso	25
4	Representación esquemática de un ciclo	26
5	Curva T- v	34
6	Campana de Gauss en diagrama T-v	35
7	Diagrama P- v	36
8	Diagrama P-T	37
9	Trabajo realizado por una fuerza variable	42
10	Trabajo para diferentes trayectorias	45
11	Gráfica para primera ley aplicada a un proceso	50
12	Gráfica exponentes politrópicos para varios procesos	55
13	Gráfico volumen vs. presión	70
14	Gráfico linealizado v vs. u	73
15	Diagrama esquemático del equipo para proceso isotérmico	74
16	Diagrama esquemático del equipo para proceso isobárico	75
17	Diagrama esquemático del equipo para proceso isométrico	76
18	Diagrama agua + cubo de acero para demostración de la ley cero	77

19	Diagrama esquemático del equipo y realización práctica.	80
20	Gráfico de presión vs. temperatura para volumen de agua	81
21	Campana de Gauss	83
22	Equipo de olla de presión modificada para proceso de evaporación	84
23	Representación proceso de compresión del aire	87
24	Gráfica representativa de trabajo para proceso isotérmico	88
25	Fuente de voltaje DC	89
26	Bombilla eléctrica	90
27	Resistencias eléctricas	90
28	Protoboard	90
29	Resorte sin alargamiento	91
30	Resorte con masa colgante	92
31	Diagrama de cuerpo libre para resorte con masa colgante	93
32	Diagramas representativos para calcular el trabajo hecho por el resorte	94
33	Representación de equipo para cálculo de trabajo sobre émbolo	95
34	Diagrama representativo de los calorímetros utilizados	98
35	Muestras de distintos metales para calcular su calor específico	99
36	Calorímetro conteniendo muestra metálica	100
37	Diagrama de bomba centrífuga con manómetros en la entrada y salida	103
38	Diagrama esquemático de la segunda parte del experimento	105

39	Diagrama de volumen de control para la primera parte	108
40	Diagrama de intercambiador de calor con volumen de control diferente	109
41	Cronograma sugerido de prácticas para primer semestre	114
42	Cronograma sugerido de prácticas para segundo semestre	115
43	Cronograma sugerido de 7 prácticas para segundo semestre	116
44	Vista frontal de caldera en centro de investigaciones	119
45	Intercambiadores de calor en centro de investigaciones	120
46	Parque de energía renovable Escuela de Ingeniería Mecánica	121
46	Equipo disponible para práctica de calorimetría	122

## ÍNDICE DE TABLAS

I.	Algunas unidades SI fundamentales	14
II.	Prefijos métricos y sus equivalentes	15
III.	Factores de conversión	21
IV.	Datos de resumen para gráfico volumen vs. presión	70
V.	Datos de resumen para gráfico linealizado	71
VI.	Datos recopilados de presión y temperatura	81
VII.	Recopilación de datos para gráfico de curva isoterma	87

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Definición
$m$	Masa
$t$	Tiempo
$\Psi$	Volumen
$V$	Velocidad
$\rho$	Densidad
$\Delta$	Cambio
$\theta$	Ángulo
$\omega$	Velocidad angular
$\Sigma$	Sumatoria
$\Gamma$	Peso específico
$U$	Energía interna
KE	Energía cinética
PE	Energía potencial
$P$	Presión
$T$	Temperatura
$\bar{R}$	Constante universal de los gases
$n$	Número de moles
$Q$	Transferencia de calor
$Q$	Caudal
$q$	Calor por unidad de masa
$H$	Entalpía
$h$	Entalpía específica
$c_p$	Calor específico a presión constante

$c_v$	Calor específico a volumen constante
$\dot{m}$	Flujo másico
$\dot{W}$	Potencia
$v$	Volumen específico
$\tau$	Torque
$F$	Fuerza
$dV$	Diferencial de volumen
$dW$	Diferencial de trabajo

## GLOSARIO

<b>Adiabático</b>	Proceso en el que no se transfiere energía por calor entre un sistema y su entorno.
<b>Análisis dimensional</b>	Método que se ocupa del análisis de las dimensiones de las magnitudes físicas. Permite establecer directamente las relaciones que intervienen en un proceso, sin necesidad de realizar un análisis completo y detallado.
<b>Calor específico</b>	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 a 15,5° C, a la presión normal; equivale a 4,185 julios.
<b>Cuántica</b>	Teoría formulada por el físico alemán Max Planck que expresa todo lo perteneciente a los cuantos de energía.
<b>Eje</b>	Pieza mecánica que transmite el movimiento de rotación en una máquina.
<b>Energía cinética</b>	Energía que posee un cuerpo en virtud de poseer masa y velocidad.

<b>Energía interna</b>	Toda la energía de un sistema que está asociada con la composición química de sus componentes microscópicos, átomos y moléculas.
<b>Energía potencial</b>	Energía almacenada. Es la energía que un objeto posee en virtud de su posición respecto a un marco de referencia.
<b>Equilibrio</b>	Estado de un cuerpo cuando fuerzas encontradas que obran en él se compensan anulándose mutuamente.
<b>Escala</b>	Graduación empleada en diversos instrumentos para medir una magnitud.
<b>Fase</b>	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.
<b>Fluido</b>	Sustancia en estado líquido o gaseoso.
<b>Homogéneo</b>	Sustancia o mezcla de varias con composiciones y estructura uniformes.
<b>Incerteza</b>	Determinado rango de incertidumbre.
<b>Macroscópico</b>	Todo aquello que se ve a simple vista y sin auxilio del microscopio.

<b>Mecánica</b>	Parte de la Física que estudia el movimiento y el equilibrio de los cuerpos, así como de las fuerzas que los producen.
<b>Mezcla</b>	Composición de diferentes sustancias las cuales pueden ser variantes en proporción.
<b>Molecular</b>	Todo lo que es relativo al mundo microscópico de las moléculas o partículas atómicas.
<b>Moles</b>	Unidad mínima de una sustancia que conserva sus propiedades químicas. Puede estar formada por átomos iguales o diferentes.
<b>Potencia</b>	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).
<b>Torque</b>	Tendencia de una fuerza de hacer girar un cuerpo rígido alrededor de un eje fijo.
<b>Vaporización</b>	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 y 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 ésta 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 y 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 siendo hasta nuestros días.

La Termodinámica puede definirse como la ciencia que se ocupa de analizar los distintos mecanismos de almacenamiento, transformación y transferencia de energía que se presentan en los cuerpos. Explica satisfactoriamente las propiedades generales de la materia y la correlación entre estas propiedades y la mecánica de átomos y moléculas. También explica lo ocurrido con la energía potencial o cinética que un cuerpo posee al llegar éste al reposo, enfatizando en los nuevos métodos en que la energía se ha transformado, incluso explica las transformaciones de energía presentes en un motor de combustión interna o en una caldera.

El desarrollo de la Termodinámica ha sido fundamental para el progreso humano. El perfeccionamiento de la teoría de esta ciencia ha significado un

sustancial avance para la economía mundial, cabe señalar el trascendental invento de la máquina de vapor lo cual impulsó la revolución industrial.

Se han desarrollado teorías que explican los fenómenos termodinámicos a un nivel microscópico, basados en la mecánica estadística; sin embargo, el principal interés para aplicaciones de ingeniería es el enfoque macroscópico, en el cual se estudian sistemas y las interacciones de ellos con su entorno. Además el principal interés se presenta en la relación entre las variables como presión, volumen y temperatura las cuales son de mayor uso. Por lo que se dará dicho estudio a lo largo de este instructivo guía el cual posee la suficiente simplicidad para fines didácticos, pero también el necesario soporte teórico y técnico para la comprensión de los fenómenos que se tratan en los temas del contenido del curso.

La comprensión de los principios básicos de la Termodinámica es un punto de principal interés en la formación académica de los estudiantes de Ingeniería con el fin de facultarles para la comprensión de fenómenos termodinámicos más complejos en los cursos posteriores del área térmica.

## **OBJETIVOS**

### **GENERAL:**

Desarrollar un instructivo guía para la realización de prácticas de laboratorio del curso de Termodinámica 1 de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

### **ESPECÍFICOS:**

1. Facilitar a estudiantes y catedráticos un documento que proporcione apoyo técnico en la implementación de prácticas dirigidas del laboratorio de Termodinámica 1.
2. Brindar a los estudiantes una guía que facilite el aprendizaje de los fundamentos de la Termodinámica mediante la realización de seis prácticas de laboratorio.
3. Verificar la validez de las leyes termodinámicas de una manera experimental.
4. Lograr 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 predecir los resultados.

5. Fomentar en el estudiante la habilidad para desarrollar reportes científicos.
6. 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 obtenidos.
7. Aprovechar los recursos de la Escuela de Ingeniería Mecánica y la Facultad de Ingeniería, debido a que este instructivo pretende el desarrollo de las prácticas de laboratorio con el equipo con el que actualmente se dispone.



## INTRODUCCIÓN

El curso de Termodinámica 1 actualmente constituye la base del área térmica de la carrera de Ingeniería Mecánica, es de vital importancia para la comprensión de cursos posteriores, tales como: Termodinámica 2, Plantas de Vapor, Motores de Combustión Interna, Refrigeración y Aire Acondicionado. El curso constituye una rama de la Física, la cual es una ciencia experimental, que se basa en la observación de los fenómenos, para posteriormente crear sus enunciados a los que llamamos leyes.

Resulta imprescindible la implementación de un laboratorio que cuente con prácticas adecuadas para dicho curso en vista de que actualmente éste cuenta con clases teóricas y trabajo dirigido, mas no con una secuencia de experimentos básicos que constituyen la mejor forma de aprendizaje en el campo que nos compete: La Ingeniería.

El presente trabajo de graduación consta de cuatro capítulos, que en forma resumida, presentan los orígenes de la Termodinámica y su relación con la Mecánica. Se presenta un marco teórico enfocado a servir como soporte para los temas tratados en el desarrollo experimental en el que se plantean seis prácticas de laboratorio las cuales abarcan los temas más importantes del contenido del curso, y por último, se sugiere una posible implementación basada en el tiempo requerido para abarcar en su totalidad el contenido y en los recursos disponibles para su ejecución.

Este manual está desarrollado de tal manera, que pueda sentar las bases para llevar a cabo prácticas de laboratorio de una clase tan importante como lo es la Termodinámica. Se pretende que con su implementación, se complementen los conocimientos impartidos en la clase teórica y que el estudiante de una manera empírica, pueda observar y verificar la validez de los fenómenos termodinámicos básicos y las leyes que los rigen.

Uno de los beneficios que ofrece este instructivo es servir como un apoyo didáctico a los estudiantes, guiándoles en la recopilación de datos para que interpreten resultados, y además, analicen las posibles fuentes de error, para que de esta manera, se continúe con la metodología de laboratorios empleada en sus cursos del área de ciencias. En síntesis se pretende la mejora de la formación académica de los estudiantes de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

## **1. ANTECEDENTES**

### **1.1 Historia de la Termodinámica**

#### **1.1.1 Origen**

Históricamente el perfeccionamiento de la Termodinámica fue paralelo al de la teoría atómica de la materia. 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 el botánico 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 sabemos que la energía interna que 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 poderlos comprender, 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 los procesos donde intervienen variables termodinámicas**

Una vez comprendido un proceso estamos en la capacidad de realizar un análisis del mismo y de las variables termodinámicas que intervienen en él. Esto nos dará la facultad de poder realizar estudios cualitativos de nuestros equipos y comprender las posibles mejoras que podamos 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 conocimientos de las leyes de la Termodinámica**

como veremos más adelante el uso de las leyes de la termodinámica nos facilitará en gran medida la toma de decisiones, ya que con el uso de la matemática podremos anticiparnos a un resultado teórico el cual estará muy cercano al resultado real, así pues podremos seleccionar equipo, accesorios y elementos termodinámicos al haberlos analizado primeramente aplicando las leyes termodinámicas. Dotados de esta poderosa herramienta de análisis sabremos qué tan eficientes son nuestros procesos y que tan factibles pueden ser algunos de nuestros proyectos.

### **1.3 Enseñanza de la Termodinámica en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos 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 como ser 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. En esta ocasión nuestro interés está enfocado en el curso de Termodinámica 1.

#### **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. Dándose una guía y descripción general del mismo, objetivo general, la metodología del desarrollo del curso y la metodología de la evaluación, bibliografía utilizada y la calendarización de actividades. En esta parte se mencionan únicamente los puntos de contenido y bibliografía que son los que competen 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. Conceptos básicos de la Termodinámica:**

- Sistemas cerrados y abiertos
- Propiedades de un sistema
- Temperatura y la ley cero de la termodinámica

### **1.3.1.2 Unidad 2. Energía, transferencia de energía, análisis general**

- Transferencia de energía por calor y por trabajo
- Formas mecánicas del trabajo
- Primera ley de la Termodinámica

### **1.3.1.3 Unidad 3. Propiedades de las sustancias puras**

- Fases de una sustancia pura
- Diagramas de propiedades para procesos de cambios de fase
- Tablas de propiedades
- La ecuación de estado ideal

### **1.3.1.4 Unidad 4. Análisis de energía de sistemas cerrados**

- Trabajo de frontera móvil
- Balance de energía de sistemas cerrados

- Energía interna, entalpía y calores específicos

### **1.3.1.5 Unidad 5. Análisis de masa y energía de volúmenes de control**

- El proceso de flujo estable
- Algunos dispositivos de ingeniería de flujo permanente
- Procesos de flujo no permanente

### **1.3.1.6 Unidad 6. La Segunda Ley de la Termodinámica**

- Equilibrio y la segunda ley
- Depósitos de energía térmica
- Maquinas térmicas, refrigeradores y bombas de calor
- Los principios de Carnot

### **1.3.1.7 Unidad 7. Entropía**

- Principio de incremento de la entropía
- Cambio en entropía, sustancias puras, gases ideales
- Procesos isotrópicos

### **1.3.1.8 Unidad 8. Exergía: Una medida del potencial de trabajo**

- Definición de Exergía
- Formas de medición del potencial de Trabajo

#### **Bibliografía**

- ✓ Cengel, Yunus. Boles, Michael  
Termodinámica. McGraw- Hill  
Quinta edición. Marzo de 2008  
Sexta edición (ingles) THERMODYNAMICS, AND ENGINEERING  
APPROACK agosto de 2006
- ✓ Wark, Kenneth (Jr)  
Termodinámica  
Mc Graw- Hill  
Sexta edición
- ✓ Otras que comprendan el contenido del curso

### **1.3.2 Metodología actual del desarrollo del curso**

Antes de abordarla veremos la descripción del curso y su objetivo general según el programa del mismo.

Descripción del curso: Termodinámica 1 es un curso de conceptos generales sobre los diversos fenómenos de energía y las propiedades relacionadas con la materia, referente a las leyes de la transformación de calor a otras formas de energía y viceversa.

Objetivos

General

Proporcionar los conocimientos teóricos básicos sobre las propiedades termodinámicas de la materia, las leyes o principios de la termodinámica y sus consecuencias en el funcionamiento de los procesos donde intervienen cambios en energía y materia para producir trabajo.

#### **1.3.2.1 Clases presenciales**

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

#### **1.3.2.2 Trabajo dirigido**

Por su parte el trabajo dirigido, se impartirá los días martes y jueves, en donde se enfatiza prácticas de solución de problemas. El trabajo dirigido es obligatorio ganarlo con una nota mayor a 12 puntos para tener derecho a nota final.

### **1.3.3 Metodología de la evaluación del curso**

#### **1.3.3.1 Exámenes parciales**

Los exámenes parciales son pruebas escritas realizadas en el salón de clases y a la hora del curso. Se realizarán dos exámenes de manera que en la evaluación, el contenido del curso quede distribuido equitativamente. En ellos lo que se busca es evaluar la comprensión de la teoría impartida en clase y tienen un valor del 40% del total de la nota del curso.

#### **1.3.3.2 Tareas en clase**

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

#### **1.3.3.3 Trabajo dirigido**

Como se mencionó, su desarrollo básicamente consiste en la solución de problemas y su carácter es obligatorio; generalmente lo imparte el auxiliar de clase y su valor es del 20% del total de la nota del curso.

#### **1.3.3.4 Proyecto**

Se trata de un trabajo práctico asignado con el suficiente tiempo a los estudiantes. En el cual se pretende que puedan diseñar algún dispositivo donde puedan aplicar los conocimientos adquiridos en clase y trabajo dirigido. Su valor es del 10% del total de la nota del curso.

La zona mínima es de 36% y la nota de promoción es de 61%

## **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 podemos decir que 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 ella.

#### **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 donde lo que nos interesa es el análisis de sistemas y procesos a una escala con la que estamos familiarizados en nuestra 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 debemos suponer que la materia en el sistema que analicemos está continuamente distribuida en todo el espacio de análisis de esta manera podremos saber 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, éste como se ve es un enfoque de menor interés por ahora para el desarrollo de este manual y si se quiere 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 lo definimos como un lugar en el espacio que nos interesa analizar que contiene determinada cantidad de materia la cual es invariante.

#### **2.1.3.2 Entorno**

Por otra parte el entorno es la parte restante del universo este puede ser tan grande como deseemos, a veces se le conoce con el nombre de medio ambiente.

#### **2.1.3.3 Frontera del sistema**

La parte imaginaria que separa el sistema del universo se le conoce con el nombre de frontera del sistema y es elegida de manera arbitraria, de tal

manera que nos 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 podemos 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 y 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 que los que se dan en un sistema y nos facilita el estudio del funcionamiento de muchos equipos como los compresores, bombas y otros equipos.

#### **2.1.3.6 Superficie de control**

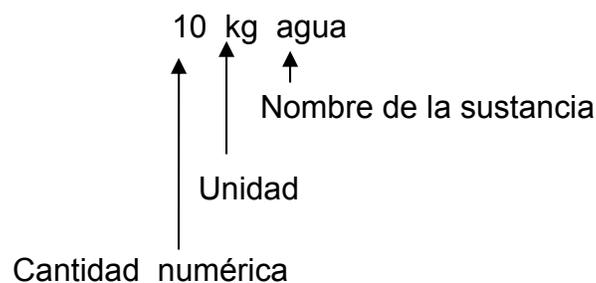
Para que se tenga un volumen de control al igual que para que exista un sistema; estos deben estar separados de su entorno en un sistema a esta

región se le llama frontera del sistema para el caso del volumen de control se le llama superficie de control y es también un región imaginaria la cual 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 Mediciones fundamentales

En todos los campos de la ingeniería es necesario tomar decisiones basados en la recopilación de datos científicos, por lo que es necesario tomar mediciones. Medir es la acción de comparar un instrumento de medición basado en un patrón reconocido con un objeto o fenómeno para obtener un valor dimensional.

Toda medición de una sustancia debe poseer tres partes: un valor numérico, una unidad de medida y el nombre de la sustancia.



Cuando una de estas tres partes falta se considera la medición errónea lo que nos puede llevar a cometer equivocaciones en nuestros cálculos y por ello en nuestros resultados.

#### **2.1.4.1 Sistema internacional de unidades (SI)**

En la actualidad casi todos los países del mundo utilizan un sistema métrico actualizado el cual se conoce como el Sistema Internacional o SI. Este es un sistema que utilizan la mayor parte de científicos y ha sido utilizado por ellos desde hace ya mucho tiempo. El congreso de Estados Unidos respaldó este sistema en 1866 y en 1975 el congreso aprobó la ley de conversión métrica que creó un Consejo Métrico Estadounidense encargado de informar acerca del avance en el cambio voluntario del sistema anglosajón a este sistema. Este cambio ha sido lento, pero hoy día resulta muy ventajoso el uso de un sistema unificado.

El sistema métrico (SI) se basa en el sistema decimal. Por lo tanto a diferencia de las fracciones empleadas en el sistema inglés las cantidades en el sistema SI se suman y restan fácilmente además de que sus conversiones para expresar cantidades mayores o menores que las unidades básicas son rápidas de hacer al utilizar únicamente factores en múltiplos y submúltiplos de diez (prefijos).

Estados Unidos es el único país grande que no ha adoptado totalmente las unidades del sistema internacional. En este instructivo se trabajará únicamente con unidades del sistema internacional.

##### **2.1.4.1.1 Algunas unidades SI fundamentales**

El sistema internacional se le conoce generalmente con el nombre de MKS; Metro, Kilogramo, Segundo, para medir longitud, masa y tiempo

respectivamente. Existen unidades básicas o fundamentales las demás se derivan de estas.

**Tabla I.** Algunas unidades SI fundamentales

<b>ALGUNAS UNIDADES SI FUNDAMENTALES</b>		
<b>Cantidad</b>	<b>Nombre unidad en el SI</b>	<b>Símbolo</b>
Longitud	Metro	M
Masa	Kilogramo	Kg
Temperatura	Kelvin	K
Tiempo	Segundo	S
Cantidad de sustancia	Mol	Mol

Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

#### **2.1.4.1.2 Prefijos métricos**

Como se dijo anteriormente las ventajas de utilizar el sistema métrico es principalmente el uso de múltiplos y submúltiplos de diez para hacer conversiones entre unidades grandes y pequeñas. A estos valores se les

conoce con el nombre de prefijos y modifica el tamaño de la unidad básica. En la siguiente tabla se muestran los prefijos que se utilizan y su equivalente.

**Tabla II.** Prefijos métricos y sus equivalentes

<b>PREFIJOS METRICOS Y SUS EQUIVALENTES</b>			
<b>Prefijo</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Equivalente Decimal</b>	<b>Equivalente Exponencial</b>
Tera	T	1000 000 000 000	$10^{12}$
Giga	G	1000 000 000	$10^9$
Mega	M	1000 000	$10^6$
Kilo	K	1000	$10^3$
Hecto	H	100	$10^2$
Deca	Da	10	$10^1$
		1	$10^0$
Deci	D	0.1	$10^{-1}$
Centi	C	0.01	$10^{-2}$
Mili	M	0.001	$10^{-3}$
Micro	$\mu$	0.000 001	$10^{-6}$
Nano	N	0.000 000 001	$10^{-9}$
Pico	P	0.000 000 000 001	$10^{-12}$

Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

### 2.1.5 Factores de conversión y análisis dimensional

El análisis dimensional es una técnica muy poderosa para resolver problemas, a veces se han cometido graves errores en los cálculos solamente

por no tener unidades consistentes, para evitar este problema es recomendable, al realizar cálculos, involucrar las unidades de medida a lo largo del desarrollo de la solución del problema. De esta manera cuando necesitemos realizar alguna conversión multiplicaremos la cantidad conocida con sus respectivas unidades por uno o más factores de conversión y así obtener la respuesta en las unidades deseadas.

Cantidad conocida y unidades x factor de conversión = cantidad en las unidades deseadas

Así de esta forma podemos decir que un factor de conversión es un cociente de dos cantidades equivalentes las cuales están expresadas en unidades diferentes, entonces un factor de conversión puede escribirse como una igualdad matemática. Por ejemplo

$$1\text{kg} = 1000\text{ g}$$

Y si dividimos ambos lados entre 1000 g obtenemos

$$\frac{1\text{kg}}{1000\text{ g}} = 1$$

O podríamos invertir esta fracción para obtener el recíproco

$$\frac{1000\text{ g}}{1\text{kg}} = 1$$

De esta manera cuando queramos convertir de una de ellas a la otra solamente utilizaremos el factor de conversión adecuado, observando el siguiente ejemplo:

$$2560 \text{ g} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} = 2.560 \text{ kg} \longrightarrow \text{unidades deseadas}$$

Parte de la cantidad      factor de conversión

Conocida

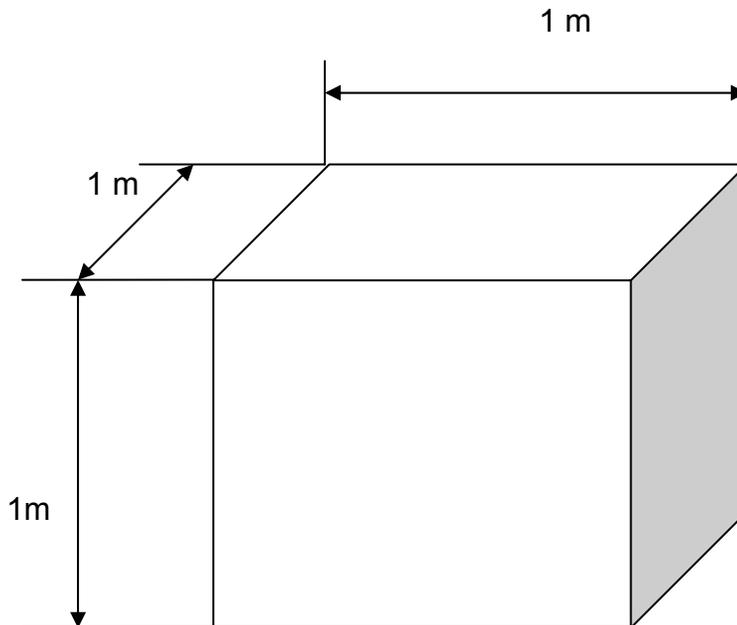
### 2.1.5.1 Medición de masa

Este es un ejemplo de cómo realizar conversiones al momento de medir masa la cual se define como la cantidad de materia que posee una sustancia y su unidad básica en el sistema internacional es el kilogramo (kg) que como vimos es igual a 1000 gramos (g) para realizar mediciones de masa utilizamos como instrumento de medición la balanza las cuales pueden ser simples (mecánicas) o electrónicas.

### 2.1.5.2 Medición de volumen

El volumen es una unidad derivada ya que es producto de un cálculo de varias mediciones lineales, a menudo al volumen se le conoce con el nombre de “capacidad” y sus unidades en el sistema internacional son los metros cúbicos (m<sup>3</sup>) y se define como el volumen de una caja de dimensiones de un metro de largo, alto y ancho.

**Figura 1.** Volumen de una caja de un metro cúbico



Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

### 2.1.5.3 Medición de temperatura

A pesar de ser una de las variables termodinámicas con la que la mayoría de nosotros estamos familiarizados de medir, la temperatura es difícil de definir sin antes haber estudiado la ley cero de la termodinámica, en sí la temperatura es una medida de actividad molecular pero como nuestro estudio está enfocado a escala macroscópica podemos decir que es una medida de cuan caliente o frío está algo; más adelante se definirá formalmente el concepto al introducir la ley cero. Para realizar mediciones de temperatura utilizamos instrumentos llamados termómetros, los cuales están graduados en varias escalas según el sistema de unidades que se desee utilizar el SI o el sistema inglés.

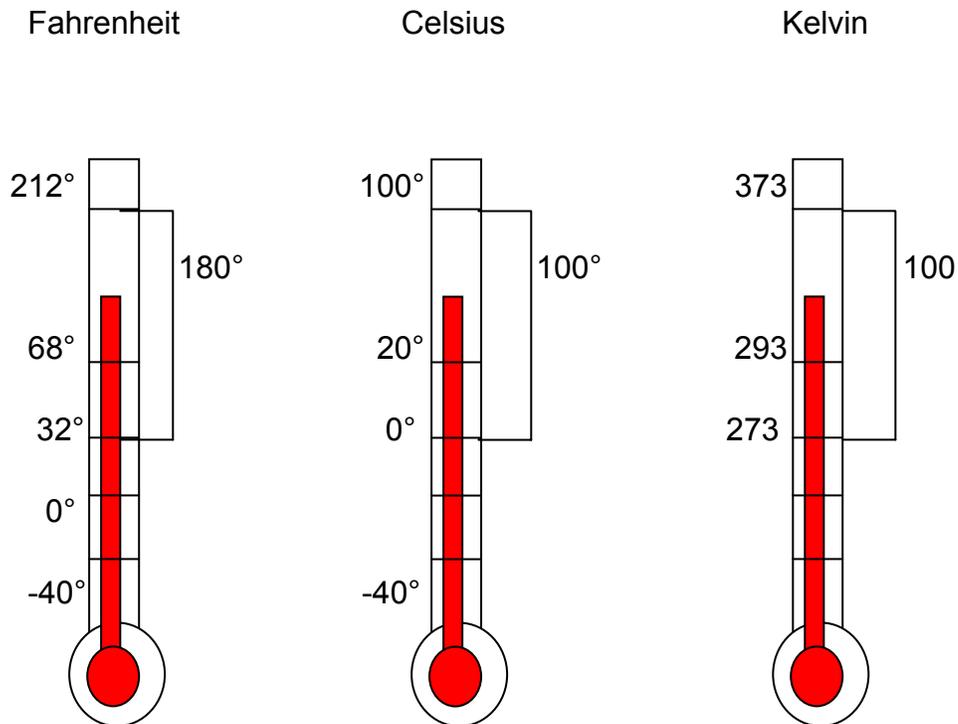
La mayoría de nosotros estamos familiarizados con mediciones de temperatura en grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) o en grados Fahrenheit ambas escalas están dadas por el punto de congelación y ebullición del agua siendo  $0^{\circ}$  y  $100^{\circ}$  para la escala Celsius y  $32^{\circ}$  y  $212^{\circ}$  para la escala Fahrenheit respectivamente sin embargo como se verá más adelante estos puntos no son absolutos y dependen de las condiciones de presión , además se toma como sustancia de referencia el agua debido a esto se les conoce como escalas relativas de temperatura. Por lo que resulta necesario el uso de una escala que sea independiente de la sustancia y no se restrinja únicamente al agua.

Afortunadamente se cuenta con tales escalas y estas registran los valores más bajos de temperatura que se ha establecido teóricamente pueda existir  $- 273.15^{\circ}\text{C}$  que se define como el punto de partida de la escala Kelvin, por consiguiente no existen valores negativos en esta escala la cual es llamada escala absoluta y a este valor de temperatura se le conoce como el cero absoluto; es una ley de la física cuántica que es imposible alcanzar el cero absoluto. La escala Kelvin es llamada así en honor al inglés Lord Kelvin y es una unidad del sistema internacional también podemos utilizar una escala absoluta en el sistema inglés y esta se llama escala Rankine.

### **2.1.6 Conversión entre unidades métricas y anglosajonas**

En este instructivo se trabajará únicamente con unidades en el sistema internacional, sin embargo, a manera de complemento veremos un poco sobre cómo convertir entre unidades del sistema internacional al sistema inglés, lo cual resulta necesario cuando tengamos la necesidad de realizar tales conversiones en nuestros cálculos ilustraremos el ejemplo para el caso de la temperatura:

**Figura 2.** Relación entre escalas de temperatura



Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

En esta ilustración podemos apreciar que un cambio de 180° Fahrenheit es equivalente a un cambio de 100° Celsius y que a pesar de tener diferentes puntos de partida un cambio de un grado Celsius es igual a un cambio en un Kelvin (y no °K como se acostumbra erróneamente). Podemos entonces asumir que:

Un cambio de temperatura de  $1.80\text{ }^{\circ}\text{F} = \text{Un cambio de } 1^{\circ}\text{C}$

Y su relación de conversión viene dada por la ecuación:

$$^{\circ}\text{F} - 32 = 1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Cuando necesitemos cambiar de un sistema a otro podemos emplear esta sencilla ecuación para realizar nuestros cambios; además podemos observar

que para pasar de °C a Kelvin simplemente necesitamos sumar 273.15 a los grados Celsius:

$$K = °C + 273.15$$

Para la escala Rankine que no consideramos en la ilustración la conversión está dada por:

$$R = °F + 460$$

Estos son ejemplos de conversiones entre los distintos sistemas y podemos realizarlos para las unidades que deseemos en la siguiente tabla vemos los factores de conversión para las cantidades más comúnmente utilizadas en termodinámica.

**Tabla III.** Factores de conversión

Cantidad	Símbolo	Unidades SI	Unidades sistema inglés	Para convertir de unidades inglesas a SI multiplique por
Longitud	<i>L</i>	<i>M</i>	Ft	0.3048
Masa	<i>M</i>	<i>Kg</i>	Slug	14.59
Tiempo	<i>T</i>	<i>S</i>	Sec	1
Área	<i>A</i>	<i>m</i> <sup>2</sup>	ft <sup>2</sup>	0.0929
Volumen	<i>V</i>	<i>m</i> <sup>3</sup>	ft <sup>3</sup>	0.02832
Velocidad	<i>V</i>	<i>m/s</i>	ft/sec	0.3048
Aceleración	<i>A</i>	<i>m/s</i> <sup>2</sup>	ft/sec <sup>2</sup>	0.3048
Peso	<i>W</i>	<i>N</i>	Lbf	4.448
Densidad	$\rho$	<i>kg/m</i> <sup>3</sup>	slug/ft <sup>3</sup>	16.02
Peso Específico	$\Gamma$	<i>N/m</i> <sup>3</sup>	lbf/ft <sup>3</sup>	157.1
Presión	<i>P</i>	<i>Kpa</i>	lbf/ft <sup>2</sup>	0.04788
Calor	<i>Q</i>	<i>J</i>	Btu	1055

Energía interna	$U$	$J$	Btu	1055
Volumen espec.	$V$	$m^3/kg$	$ft^3/slug$	0.06242
Potencia	$\dot{Q}$	$W$	Hp	745.7
Flujo de masa	$\dot{m}$	$kg/s$	$slug/s$	0.4536
Caudal	$Q_f$	$m^3/s$	$ft^3/sec$	0.02832

Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

### 2.1.7 Incertidumbre en las mediciones

En la sección de mediciones fundamentales se trató la manera de representar la medición de una sustancia la cual constaba de tres partes:

- Cantidad numérica
- Unidad
- Nombre de la sustancia

Para esta sección veremos que para generalizar una medición para cualquier tipo de variable deberemos introducir el concepto de incertidumbre para contar con una nueva manera de representar las mediciones, esto es equivalente a tomar en cuenta el hecho de que ninguna medición que realicemos es del todo confiable debido a varios factores que nos afectarán la toma de datos. A este hecho se le conoce con el nombre de “incertidumbre en las mediciones”. Por consiguiente toda medición de una variable deberá contar con tres partes:



### **2.1.8 Propiedades y estados de un sistema**

En termodinámica generalmente trabajamos con procesos que ocurren debidos a transferencias de energía, pero para comprenderlos primero deberemos introducir los conceptos de propiedad y estado.

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

- Extensivas: son aquellas que se relacionan con la cantidad de la materia presente, y estas involucran mediciones de masa, volumen y energía cinética son ejemplos
- Intensivas: estas ayudan a identificar o caracterizar un tipo de materia en particular y no dependen de la cantidad de materia, densidad, temperatura y presión son 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 un sistema simple el estado quedará definido al dar valor a dos de sus propiedades específicas).

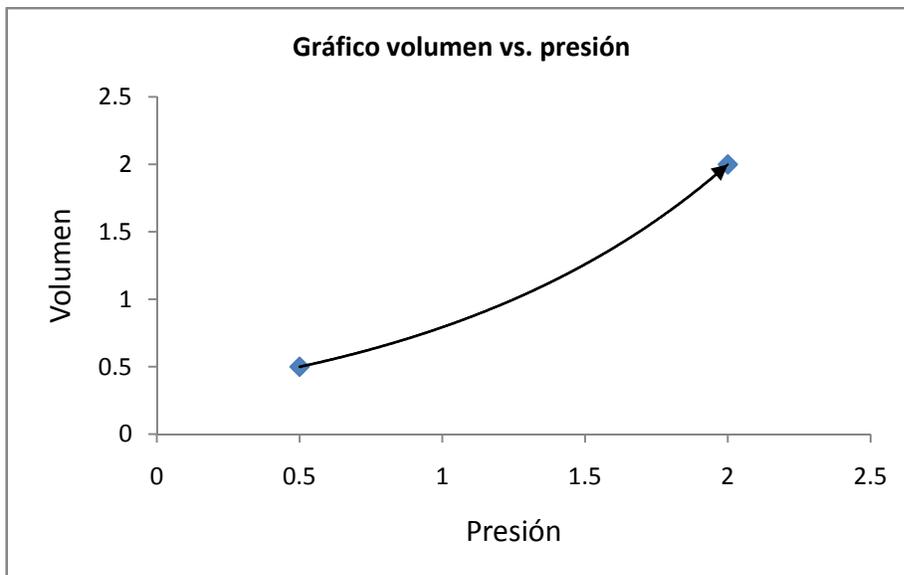
### **2.1.9 Procesos y ciclos**

Una vez introducidos los conceptos de propiedad y estado podremos comprender que es 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 con el nombre de proceso. Si estos ocurren en un cambio que no sea brusco y si podemos conocer el paso entre diferentes estados en un margen muy pequeño se dice que el proceso es un proceso en equilibrio. Un ejemplo de estos sería aumentar la presión en un émbolo al agregarle pesos en forma paulatina y no hacerlo con grandes cambios de masas. Siendo así podemos unir los diferentes estados inicial y final del sistema mediante una línea continua a la que llamaremos trayectoria la cual nos indica el recorrido que ha tenido el sistema durante el proceso.

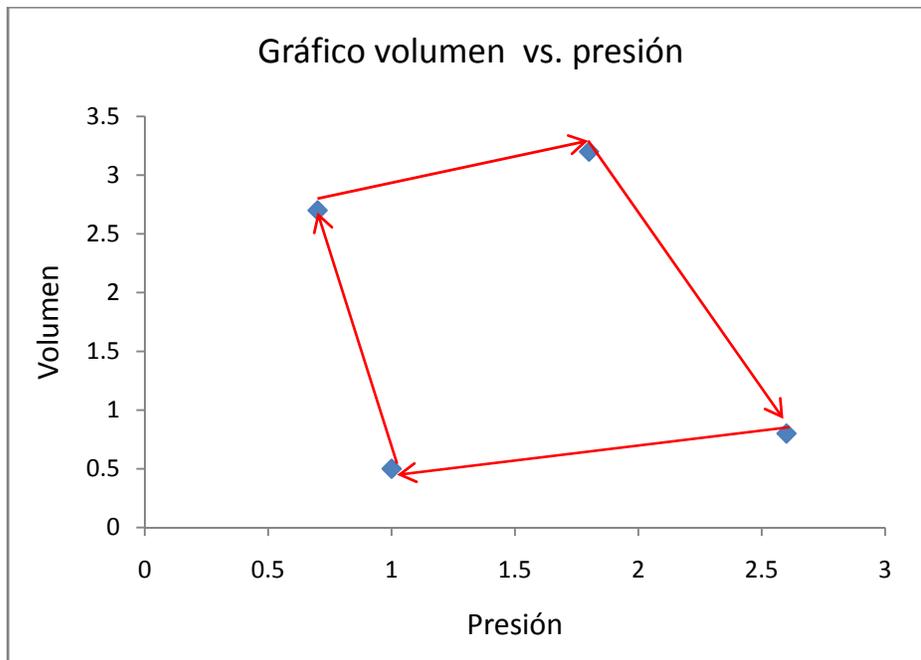
A veces un sistema experimenta varios procesos y pasa por diferentes estados de equilibrio para al final llegar al mismo estado donde se encontraba en un inicio, a esta sucesión de procesos se le conoce con el nombre de ciclo estos son de mucho interés en el estudio de la termodinámica.

**Figura 3.** Representación de un proceso



Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

**Figura 4.** Representación esquemática de un ciclo



Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

### 2.1.10 Ecuación de estado de un gas ideal

En algunos procesos termodinámicos de mucho interés intervienen gases a los que tratamos como ideales (un ejemplo de estos es el aire) para describir con más facilidad lo que ocurre en un cilindro de un motor de combustión interna es necesario hacer esta simplificación la cual es válida ya que el aire presenta un comportamiento muy cercano al de un gas ideal, el cual es nuestro tema de interés en esta sección. Para que un gas sea ideal debe cumplir con tres leyes o postulados:

### 2.1.10.1 Ley de Boyle

Robert Boyle fue un físico y químico irlandés que estableció la relación entre presión y volumen para un gas en 1662. Por medio de un sencillo equipo de laboratorio Boyle demostró que el volumen que ocupa una muestra de gas encerrada es cada vez más pequeño a medida que la presión externa aumenta, esto es una relación inversa entre presión y volumen y es aplicable a todos los gases y se demuestra durante un proceso controlado manteniendo la temperatura constante. Así la ley de Boyle expresa:

Ley de Boyle: a temperatura constante, el volumen  $V$ , que ocupa una muestra de gas es inversamente proporcional a la presión  $P$ .

$$V \propto 1/P$$

Ésta es una proporcionalidad para convertirla en igualdad matemática deberemos de introducir una constante “ $k$ ” la cual representaría a la temperatura (proceso isotérmico)

$$PV = k$$

Con esta ecuación podremos considerar el caso en el que una muestra específica de gas con un volumen  $V_1$  se comprime a un volumen más pequeño  $V_2$  la presión  $P_1$  aumentará a un nuevo valor de presión  $P_2$  y ambos estados quedarán relacionados entre sus condiciones iniciales y finales por la siguiente ecuación:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

### 2.1.10.2 Ley de Charles

A.C. Charles, físico francés en el año de 1787 estudió la relación entre la temperatura y el volumen de los gases, él demostró que cuando un gas se enfría en un proceso en el que la presión se mantiene constante el volumen ocupado por este gas disminuye, cuando el gas se calienta su volumen aumenta, por lo que pudo observar una relación de proporcionalidad directa entre temperatura y volumen sin embargo para que esta relación sea simple es necesario trabajar con escalas de temperaturas absolutas (para el caso del SI: Kelvin). Al decir simples nos referimos que cuando la temperatura se duplica el volumen también se duplica y cuando la temperatura se triplica lo mismo ocurre con el volumen lo cual no resultaría cierto si se trabajara en una escala de temperatura relativa ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Ley de Charles: a presión constante, el volumen que una muestra de gas ocupa es directamente proporcional a su temperatura Kelvin.

$$V \propto T \text{ (con presión y masa constantes)}$$

Nuevamente podemos representar esta relación directa entre ambas variables como una igualdad al introducir una constante de proporcionalidad "k"

$$V = kT$$

Esta constante tiene una interpretación y se refiere a la presión, por consiguiente cuando trabajemos en un proceso que se pase de un estado inicial con condiciones  $V_1, T_1$  a condiciones finales  $V_2, T_2$ , manteniendo la presión constante (proceso isobárico), la relación entre ambos estados quedará definida mediante la ecuación:

$$V_1/T_1 = V_2/T_2$$

### 2.1.10.3 Ley de Gay – Lussac

Esta ley lleva el nombre en honor al químico francés Joseph Gay – Lussac quien realizó experimentos para estudiar la relación entre la presión y la temperatura de los gases aproximadamente en la misma época en que Charles realizaba sus experimentos, Gay – Lussac encontró que mientras se mantenía el volumen constante de una muestra de un gas la presión medida en el recipiente aumentaba a medida que la temperatura absoluta se incrementaba y disminuía a medida que la temperatura absoluta también lo hacía. Aquí también podemos observar una relación directa entre las variables de presión y temperatura

Ley de Gay – Lussac: a volumen constante, la presión que ejerce una muestra específica de gas es directamente proporcional a su temperatura Kelvin.

$$P \propto T \text{ (con volumen y masa constante)}$$

Donde podemos transformar esta relación en una igualdad al agregar nuevamente una constante de proporcionalidad “k”

$$P = kT$$

Para este caso la interpretación de la constante es el volumen, entonces siguiendo la misma lógica de las dos leyes anteriores para gases; en esta ocasión para un proceso a volumen constante (proceso isométrico, isocórico o isovolumétrico):

$$P_1 / T_1 = P_2 / T_2$$

Se han descrito las tres leyes para los gases, como estamos interesados en el caso de los gases ideales debemos unificar estas tres leyes en una que nos permita hacer análisis de procesos que no se restrinja a condiciones de

mantener alguna propiedad constante, tal unificación recibe el nombre de “Ley combinada de los gases”.

$$\text{Ley combinada de los gases: } \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

Ley del gas ideal

Cuando se tenga una muestra determinada de un gas, donde las variables sean presión, volumen y temperatura entonces podemos calcular la cantidad en gramos o moles o la masa molar de dicha muestra. De la ley combinada de los gases:

$$\frac{PV}{T} = k$$

Sabemos que  $k$  es una constante y por la ley de avogadro conocemos que el volumen  $V$ , del gas es proporcional al número de moles “ $n$ ” de gas a presión y temperatura constantes entonces:

$$V \propto kn$$

Entonces de la ley combinada de los gases vemos que el multiplicador que hace falta en el lado derecho de la igualdad es “ $n$ ” que representa el numero de moles y junto con la constante universal de los gases “ $R$ ” en lugar de “ $k$ ” podemos representar una ecuación aun mas general para un gas a la que llamaremos ley del gas ideal:

$$\text{Ley del gas ideal: } PV = n\bar{R}T$$

La constante universal de los gases tiene un valor de  $\bar{R} = 8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$  esto es si se expresa la presión en pascal y el volumen en metros cúbicos. Un gas ideal es aquel que se ajusta a la perfección a la ley del gas ideal en todas las condiciones.

### **2.1.11 Ley cero de la Termodinámica**

Antes de presentarse el enunciado de esta ley se contaba ya con los enunciados de la primera y segunda ley de la termodinámica, sin embargo para comprender dichas leyes resulta necesario conocer el concepto de contacto y equilibrio térmico y su relación con la temperatura; experimentalmente se ha encontrado que cuando dos cuerpos se encuentran a diferentes temperaturas y si estos están aislados de tal manera que solo interactúan entre sí pero no con el medio ambiente, entre ellos ocurre un intercambio de energía aún si no están en contacto físico uno con otro a esta forma de transferencia de energía se le conoce como contacto térmico y el equilibrio térmico es una situación en la que dos o más objetos no intercambian energía por calor o radiación electromagnética si se ponen en contacto térmico.

Si consideramos dos cuerpos A y B que no estén en contacto térmico, y un tercer objeto C, que es un termómetro. Deseamos comprobar si A y B están en equilibrio térmico entre sí; el termómetro se pone en contacto con el objeto A hasta que alcanzan el equilibrio térmico desde ese momento la lectura de la temperatura será constante y la registramos. El termómetro se retira del objeto A y luego se pone en contacto térmico con B, la lectura la registramos después de que también alcanzan el equilibrio térmico, si las dos lecturas son iguales entonces el cuerpo A y el cuerpo B están en equilibrio térmico entre sí. Si se colocan en contacto térmico uno con otro, entre ellos no habrá intercambio de energía.

De este experimento podemos resumir los resultados obtenidos en un enunciado conocido como la Ley Cero de la Termodinámica (ley de equilibrio térmico):

Si los cuerpos A y B están separadamente en equilibrio térmico con un tercer objeto C entonces A y B están en equilibrio térmico entre sí.

Un análisis de esta ley nos lleva a comprender y definir formalmente la temperatura como la propiedad que nos permite saber si dos cuerpos están o no en equilibrio térmico y lo estarán si y solo si poseen la misma temperatura.

## **2.2 Sustancias puras**

### **2.2.1 Fases de una sustancia pura y equilibrio de fases**

Una sustancia pura es aquella que puede existir en más de una fase sin que cambien su composición química como ejemplo tenemos al agua. Una fase es una cantidad de materia que tiene la misma composición química en todo su volumen y que además es homogénea; es toda sólida, líquida o gaseosa. En la naturaleza podemos 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 tres fases del agua a la vez: sólida en la nieve, líquida en la reserva de agua y gaseosa ya que también 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 del agua**

Se les conoce con este nombre ya que estas son curvas características en donde por medio de un análisis gráfico podemos identificar con facilidad la fase o fases que están presentes en determinado estado y en este caso nos enfocamos en la sustancia pura más usada: el agua.

### **2.2.2.1 Curva $T - v$**

Consideremos el experimento de almacenar hielo en un cilindro con un émbolo en la parte superior así de esta manera la presión se mantiene constante y es debida al peso del émbolo que será invariante. Si comenzamos a agregar calor este hielo comenzará a derretirse hasta quedar completamente convertido en líquido.

#### **2.2.2.1.1 Región líquido comprimido**

Si durante el proceso tomamos lecturas de temperatura veríamos 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 continuamos 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 con el nombre de líquido saturado.

### **2.2.2.1.3 Región de mezcla (calidad)**

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

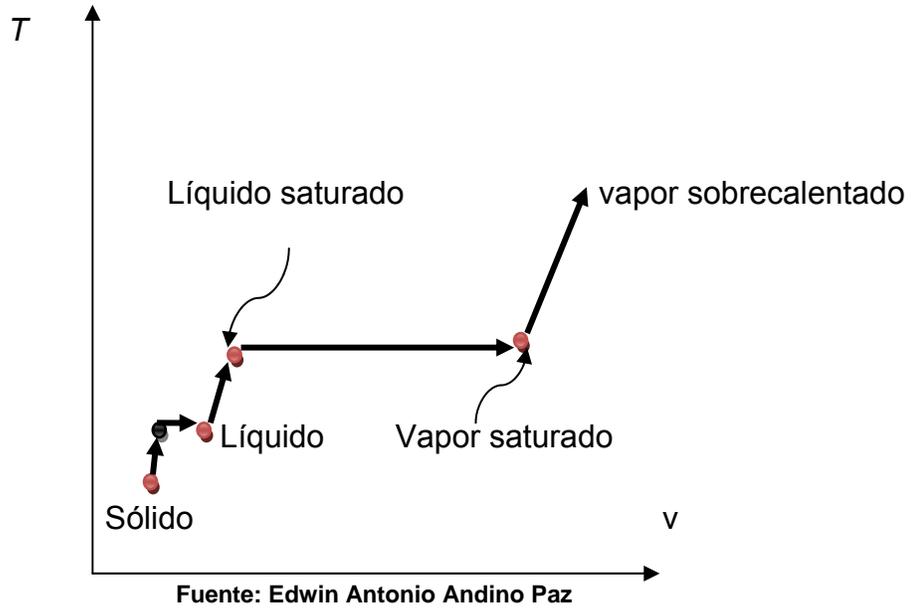
### **2.2.2.1.4 Punto vapor saturado**

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 hemos llegado al punto conocido como punto de vapor saturado.

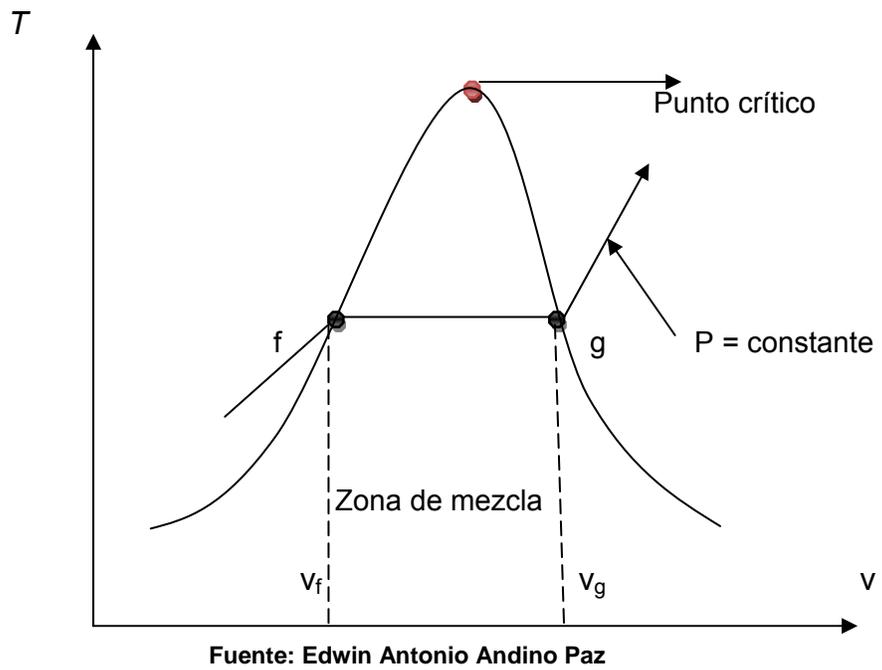
### **2.2.2.1.5 Región de vapor sobrecalentado**

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

**Figura 5. Curva T- v**



**Figura 6. Campana de Gauss en diagrama T-v**



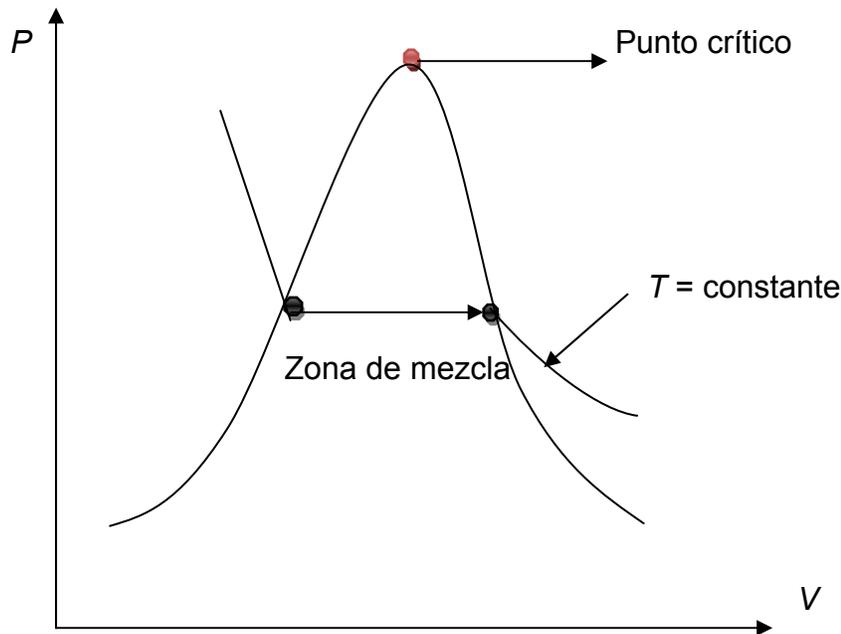
### 2.2.2.1.6 Punto crítico

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

Si cambiamos el enfoque y comenzamos a realizar mediciones de presión y volumen específico en un proceso donde mantenemos la temperatura constante y nuevamente repetimos el experimento con varias temperaturas obtendríamos la curva  $P - v$ . esta curva es similar a la curva  $T - v$  en cuanto a sus puntos de interés y también se usa con bastante frecuencia en el estudio termodinámico de las sustancias puras.

### 2.2.2.2 Curva P- V

Figura 7. Diagrama P-v



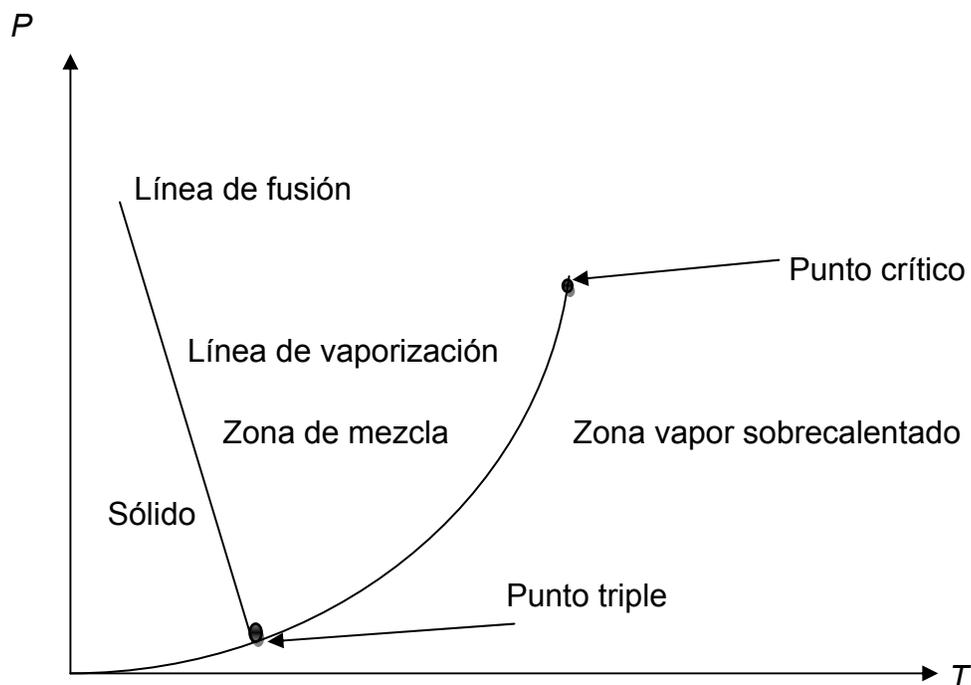
Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

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 realizamos una medición de presión y temperatura obtendríamos una gráfica que nos muestra algunas características importantes como ser el punto triple que ya fue mencionado como el punto donde coexisten las tres fases (sólido, líquido y vapor), así obtenemos el diagrama  $P - T$ .

**Figura 8.** Diagrama  $P-T$



Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

Estas curvas son de gran interés práctico y nos facilitarán nuestros análisis de procesos, podemos ver 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 poder contar con datos que nos muestren valores importantes de propiedades en diferentes estados para poder 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 nos muestran las propiedades de saturación en función de la temperatura, otras nos muestran las propiedades de saturación en función de la presión la información es prácticamente la misma y se utilizan ambas para mayor comodidad nuestra,

obteniendo 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 y estas propiedades se mencionan a continuación.

### **2.2.3.3 Volumen**

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

### **2.2.3.4 Energía interna**

La energía interna se definirá más adelante; por ahora daremos sus unidades de medida que están en  $\text{KJ}/\text{kg}$ . Para el sistema internacional y en  $\text{Btu}/\text{lbm}$  para el sistema inglés.

### **2.2.3.5 Entalpía**

Esta propiedad será definida formalmente más adelante por ahora nos 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 nos proporciona información de la dirección del proceso, sus unidades son de  $\text{kJ/ kg}\cdot\text{K}$ . para el sistema internacional y en  $\text{Btu/lbm}\cdot\text{R}$  para el sistema inglés.

Como las tablas nos 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 y esta se define como la razón entre la masa de vapor saturado y la masa total.

$$x = m_g / m$$

Entonces cuando necesitemos encontrar los valores de las propiedades mencionadas en los puntos de la zona de mezcla podemos utilizar la ecuación:

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

Esta ecuación se usa para cuando lo que buscamos es el valor del volumen específico; si deseamos encontrar los valores de las demás propiedades únicamente deberemos de sustituir la variable que nos 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 y en las tablas de vapor aparece representada por  $h_{fg} = h_g - h_f$

### 2.3 Trabajo

Cuando hablamos de trabajo lo relacionamos generalmente con el concepto que tenemos de él en la vida cotidiana; realizar una determinada tarea, sin embargo desde el punto de vista físico y termodinámico el concepto trabajo está relacionado con un aumento o disminución de la energía de un sistema. Consideremos el caso que aplicamos una fuerza externa a una determinada masa que se encuentra sobre una superficie plana:

- Si aplicamos la fuerza en dirección perpendicular vemos que no obtenemos ningún desplazamiento de dicha masa
- Si repetimos el experimento aplicando la fuerza a un determinado ángulo con la horizontal veremos que si la fuerza aplicada es lo suficientemente grande para vencer la fuerza de fricción, entonces lograremos obtener un desplazamiento de la masa
- Si por último aplicamos la fuerza en una dirección totalmente horizontal entonces la masa se desplazará una distancia mayor.

En este sencillo experimento tiene las bases el concepto de trabajo; el cual relaciona una fuerza aplicada con un desplazamiento producido en dirección de dicha fuerza, al observar los tres casos anteriores vemos que cuando la fuerza es perpendicular a la dirección deseada del desplazamiento entonces no existe desplazamiento alguno, cuando existe determinado ángulo entre los vectores desplazamiento y fuerza obtendremos el máximo recorrido al aplicar la fuerza en dirección paralela al desplazamiento (cuando el ángulo entre los vectores es cero).

### 2.3.1 Definición de trabajo

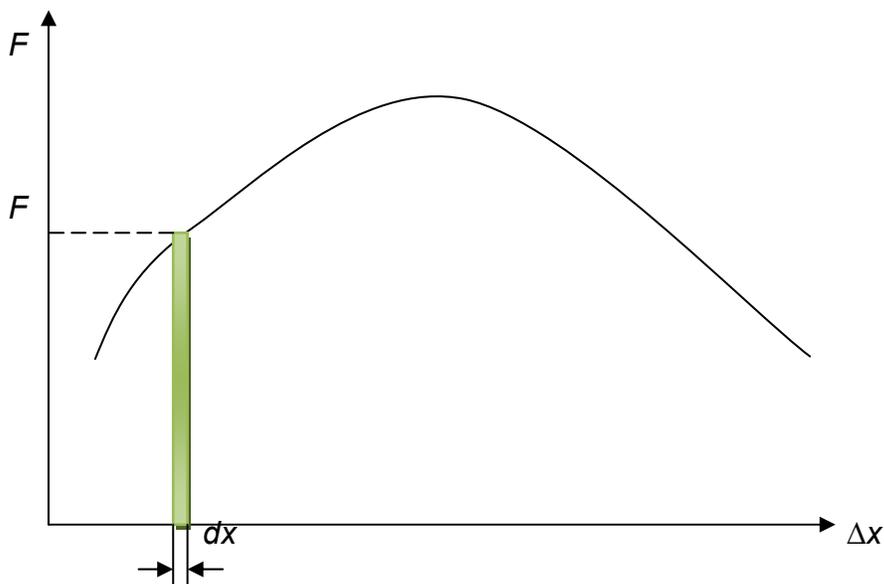
Por lo tanto de estas observaciones vemos que la relación matemática existentes entre ambos vectores es la misma que existe en el producto punto de magnitudes vectoriales y entonces definimos matemáticamente el trabajo como.

$$W = F * \Delta x = F \Delta x \cos\theta$$

Donde: W Representa el trabajo realizado, F la fuerza constante aplicada y  $\Delta x$  el desplazamiento. Este resultado es una cantidad escalar.

La definición dada anteriormente es aplicable en el caso que la fuerza sea constante y no varíe en magnitud ni dirección en el tiempo. Cuando la fuerza es variable debemos considerar pequeños intervalos de aplicación, si por ejemplo consideramos la curva fuerza vs. Desplazamiento (F vs.  $\Delta x$ )

**Figura 9.** Trabajo realizado por una fuerza variable



Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

Podemos observar que el área de este pequeño rectángulo representa el trabajo realizado por la fuerza aproximadamente constante, si tomamos el límite cuando el ancho del elemento diferencial  $dx$  tiende a cero entonces el trabajo total sería el área bajo la curva fuerza vs. Desplazamiento así obtenemos una definición más general de trabajo para el caso que la fuerza no sea necesariamente constante.

$$W = \int_{x_0}^{x_f} F * dx$$

Debemos recordar que el integrando es un producto punto de cantidades vectoriales por lo que deben ser tratadas como tales. El resultado de realizar un trabajo es el aumento de la energía de un sistema, esto nos permite definir el trabajo como un mecanismo de transferencia de energía a través de la frontera de un sistema.

### 2.3.2 Tipos de interacciones de trabajo

La definición dada anteriormente nos da la definición general de trabajo, para una situación en tres dimensiones únicamente debemos sustituir la integral simple por una integral de línea conocida también como integral de trayectoria y la cantidad diferencial por una diferencial de recorrido  $dr$  el cual representa un pequeño desplazamiento vectorial.

Sin embargo en termodinámica pocas veces calculamos el trabajo realizado por o sobre un sistema con el uso de la ecuación anterior, esto se debe a que ésta es una ecuación general y las demás ecuaciones dadas para el caso de los tipos de trabajo que mencionaremos son el resultado simplificado de haber operado matemáticamente las variables de interés. Es importante recordar que

cualquier ecuación que nos defina trabajo ha sido obtenida de la definición básica de trabajo.

### 2.3.2.1 Trabajo de frontera

Como su nombre lo dice este se presenta cuando hay un desplazamiento de la frontera de un sistema (una frontera móvil que generalmente consideramos el mecanismo cilindro-émbolo) y se da por ejemplo en el caso de la expansión de los gases de combustión en un motor de automóvil. Debemos hacer una observación importante y es que el trabajo es una diferencial inexacta (depende de la trayectoria) esto se comprueba al observar que el trabajo representa el área bajo la curva del diagrama  $P-V$ , que puede ser diferente dependiendo de la trayectoria que se elija al pasar entre los punto 1 y 2 de esta manera no podemos decir el trabajo que posee un sistema, debemos decir: el trabajo realizado por o sobre un sistema.

Para ejemplificar de una mejor manera consideremos un gas que está contenido en un cilindro equipado con un émbolo móvil en equilibrio, el gas ocupa un volumen  $V$  y ejerce una presión uniforme  $P$  sobre las paredes del cilindro y sobre el émbolo y es  $F = PA$ . si comprimimos el gas de una forma cuasiestáticamente, es decir con suficiente lentitud para permitir que el sistema permanezca en equilibrio durante todo el proceso, cuando el émbolo es empujado hacia abajo por la fuerza externa  $F$  ocurre un desplazamiento  $dy$ , el trabajo realizado sobre el gas es según la definición general de trabajo:

$$dW = F \cdot dy = P \Delta y$$

Acá se supone que la masa del émbolo es insignificante en comparación con la fuerza externa aplicada, como  $\Delta y$  es el cambio en el volumen del gas  $dV$ , se puede expresar el trabajo realizado sobre el gas como

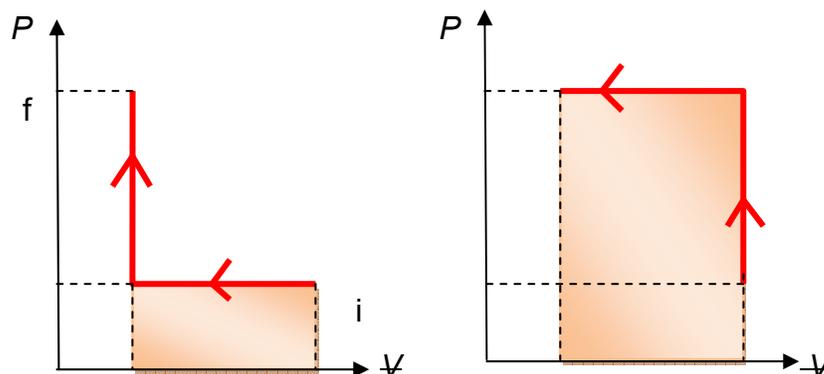
$$dW = P dV$$

Donde el trabajo será positivo en caso de que  $dV$  sea positivo por lo tanto en caso que el desplazamiento del émbolo sea hacia arriba por lo cual el trabajo deberá realizarlo el gas (llamado a veces trabajo útil) también podemos observar que cuando no hay cambio de volumen el trabajo es cero. Para calcular el trabajo total debemos integrar entre los puntos de volumen final  $V_f$  y volumen inicial  $V_i$

$$W = \int_{V_i}^{V_f} P dV$$

En estas gráficas podemos apreciar que el trabajo realizado entre dos estados idénticos depende de la trayectoria tomada entre ambos estados, esto es cierto ya que el área que está bajo cada una de las curvas  $P$ - $V$  es diferente.

**Figura 10.** Trabajo para diferentes trayectorias



Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

### 2.3.2.2 Trabajo eléctrico

La mayoría estamos familiarizados con ejemplos de este tipo de trabajo; cuando usamos duchas con calentadores o cuando deseamos preparar los alimentos en una estufa eléctrica podemos ver que en ambos casos la temperatura se incrementa y esto se debe a que está ocurriendo una

transferencia de energía la cual llamamos trabajo eléctrico debido a la fuente de donde proviene.

$$W_{\text{eléctrico}} = i \Delta V$$

Donde  $i$  representa la corriente en el circuito y  $\Delta V$  el voltaje aplicado

### 2.3.2.3 Trabajo de eje

Podemos transferir energía de un mecanismo a otro a través de un eje giratorio, un motor transfiere energía para hacer funcionar una máquina al realizar un acople entre ejes motor-máquina. Este trabajo es debido a las fuerzas de corte que están presentes a lo largo de la sección transversal del eje y que son variables en dependencia del radio. En algunas ocasiones usamos el término transmitir potencia sin embargo la potencia es la rapidez a la cual se transfiere energía y la usaremos si nos resulta más simple realizar las mediciones necesarias para su cálculo.

$$W = \tau \theta$$

Donde  $\tau$  representa el torque aplicado y  $\theta$  el ángulo de giro

Como se mencionó a veces se utiliza por más comodidad la potencia y esta queda definida como:

$$\dot{W} = \tau \omega$$

Donde  $\tau$  sigue representando el torque transmitido por el eje y  $\omega$  la velocidad angular a la que se encuentra girando dicho eje; siendo sus dimensionales de Newton- metro para el torque y radianes sobre segundo para la velocidad angular.

#### **2.3.2.4 Trabajo de resorte**

Los resortes poseen la capacidad de almacenar energía cuando están desplazados de su posición de equilibrio o sea cuando se han comprimido o estirado, podemos comprender esto si atamos una masa en un extremo del resorte y lo sujetamos del otro y lo comprimimos o estiramos, cuando soltamos la masa esta se mueve y pasa por la posición de equilibrio del resorte con determinada velocidad de esta manera sabemos que posee energía cinética la cual debe de provenir de alguna fuente ya que no podemos crear ni destruir la energía, podemos afirmar que esta energía cinética que ahora posee la masa se encontraba almacenada en el resorte de alguna manera y la llamaremos energía potencial elástica ya que posee “el potencial” de realizar un cambio en la energía del sistema.

$$W = \frac{1}{2} kx^2$$

Donde k representa la constante del resorte y x el desplazamiento desde la posición de equilibrio del resorte.

### **2.4 Calor y primera ley de la Termodinámica**

#### **2.4.1 Definición de calor**

El calor se define como la transferencia de energía a través de la frontera de un sistema debido a la diferencia de temperaturas entre el sistema y su entorno. Entonces al igual que el trabajo, el calor es otro mecanismo de transferencia de

energía y el resultado de esta transferencia es un aumento o disminución de la energía interna de nuestro sistema.

Cuando calentamos una sustancia, a ella transferimos energía al ponerla en contacto con el entorno de una temperatura más elevada. Como ejemplo podemos considerar lo que ocurre cuando colocamos agua fría en una sartén y luego lo colocamos en el quemador de la estufa el cual esta a una temperatura más alta de esta manera se transfiere energía del quemador al sartén en forma de calor provocando que la temperatura del agua se incremente.

#### **2.4.2 Tipos de mecanismos de transferencia de calor**

- **Conducción:** este proceso se debe a un intercambio de energía debido a colisiones que se dan entre partículas y al movimiento de los electrones libres en los átomos a través del material resultando en un cambio en la energía cinética de las moléculas más energéticas a las menos energéticas.

Si por ejemplo se sostiene una barra de acero de un extremo y en el otro extremo colocamos una fuente de calor (una flama o un quemador) resulta que después de determinado intervalo de tiempo el extremo que estamos sosteniendo se sentirá más caliente y podremos verificar que su temperatura ha aumentado, esto es debido al proceso de conducción. Cabe señalar que la conducción ocurrirá sólo si existe un gradiente de temperatura a través del medio conductor.

- **Convección:** se llama convección a la energía transferida de la superficie de un sólido a un fluido en movimiento, y existe de dos tipos:
  - **Convección natural:** se presenta cuando el movimiento resulta de diferencias en la densidad, el caso del aire alrededor de una flama y el aire que circula en una playa son ejemplos de este tipo

también ésta se presenta en el proceso común de hervir agua; debido a corrientes de convección las capas inferiores de agua que están en contacto con la fuente de calor se calientan más que las capas superiores por lo que las capas inferiores se dilatan y suben desplazando a las más frías a la parte inferior y éstas se calientan hasta estar más calientes que las superiores y de esta manera continúan con el proceso sucesivamente hasta que el agua comienza a hervir.

➤ Convección forzada: se da cuando la sustancia se calienta y además es forzada a moverse a través de un ventilador o una bomba, como ejemplos tenemos los sistemas de calefacción de aire y agua caliente.

- Radiación: todos los cuerpos en el universo irradian y absorben energía en forma de ondas electromagnéticas debido a las vibraciones térmicas de las moléculas.

Definimos la radiación entonces como la energía transferida en forma de fotones, de esta manera no es necesario que exista contacto físico entre los medios para que ocurra una transferencia de energía y además puede ocurrir a través de una superficie transparente. Para comprender este mecanismo de transferencia entonces debemos comprender la emisividad que es un indicador de con qué eficiencia la superficie emite energía radiativa y también necesitamos comprender la irradiación que es el flujo total de radiación incidente sobre un cuerpo. De esta manera un absorbedor ideal es un cuerpo que absorbe toda la energía incidente en él y generalmente se conoce como cuerpo negro, en contraste un cuerpo que refleja toda la energía que incide sobre él se conoce como un reflector ideal.

### 2.4.3 Presentación de la primera ley de la Termodinámica

También conocida como ley de la conservación de la energía, esta ley relaciona las transferencias totales de energía (calor y trabajo) con un incremento en la energía interna de un sistema que resulta en cambios mensurables de las variables termodinámicas de interés como presión, temperatura y volumen de un gas por ejemplo. Puede aplicarse a numerosos procesos proporcionándonos una unificación entre el mundo microscópico y macroscópico.

#### 2.4.3.1 Primera ley aplicada a un ciclo

Hemos estudiado los conceptos de trabajo y calor como mecanismos de transferencia de energía ahora podemos presentar la Primera ley de la Termodinámica. Recordemos que una ley no se deduce o establece a partir de principios básicos, sino que es un enunciado que escribimos en base a nuestras observaciones de numerosos experimentos, las leyes que presentaremos se expresaran en el lenguaje de las matemáticas, herramienta que tiende un puente entre la teoría y el experimento. A un principio físico se le llama ley porque nunca se ha observado que han sido violados. Históricamente la primera ley de la termodinámica se expresó primeramente para un ciclo y dice que la transferencia térmica neta es igual al trabajo neto realizado para un sistema que experimenta un ciclo. Matemáticamente:

$$\sum W = \sum Q \quad \text{o} \quad \oint dW = \oint dQ$$

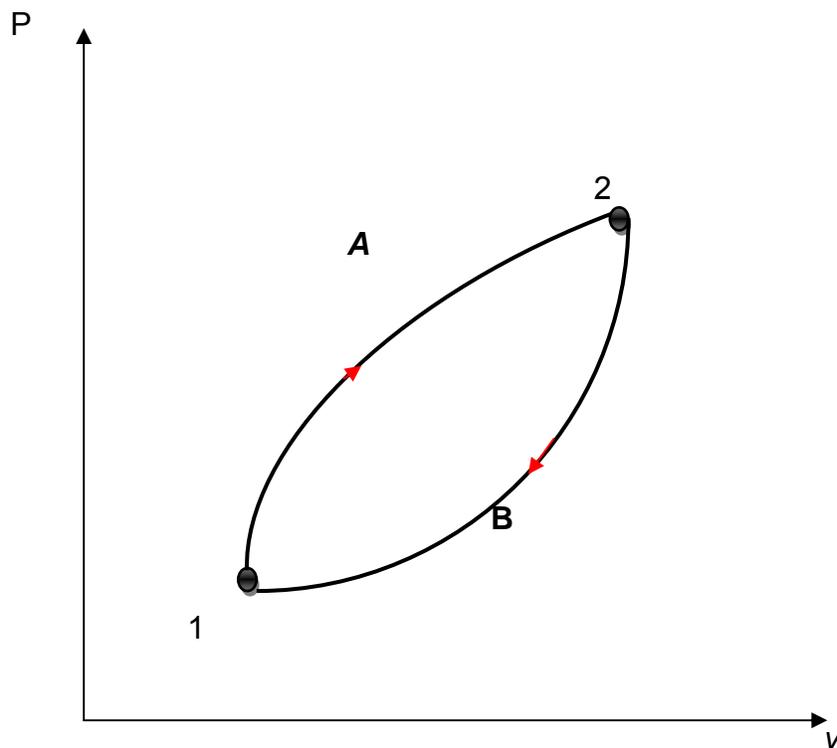
El símbolo  $\oint$  implica que la integración es alrededor de un ciclo completo que como ya mencionó anteriormente es cuando un sistema experimenta

varios procesos pasando por una serie de estados para finalizar en el mismo estado inicial.

### 2.4.3.2 Primera ley aplicada a un proceso

Con mucha frecuencia la primera ley se aplica a un proceso en el cual el sistema cambia de un estado a otro. Si ahora suponemos que existe un ciclo al regresar al estado inicial a lo largo de otra trayectoria diferente a la primera, representadas por trayectorias A y B aplicando la primera ley para el ciclo:

**Figura 11.** Gráfica para primera ley aplicada a un proceso



Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

$$\int_1^2 dQA + \int_2^1 dQB = \int_1^2 dWA + \int_2^1 dWB$$

Si intercambiamos los límites sobre el proceso de 1 a 2 a lo largo de la trayectoria B, podemos reescribir esto como:

$$\int_1^2 dQA - \int_1^2 dQB = \int_1^2 dWA - \int_1^2 dWB$$

O lo que es igual

$$\int_1^2 d(Q - W)A = \int_1^2 d(Q - W)B$$

Esta importante ecuación nos dice que el cambio en la cantidad  $Q - W$  a lo largo de la trayectoria A es igual que a lo largo de la trayectoria B por lo tanto esta cantidad es en sí una propiedad y se puede demostrar que representa la energía del sistema en un estado en particular. Y decimos:

$$d(Q - W) = dE$$

Si integramos esta ecuación obtenemos:

$$Q_{1-2} - W_{1-2} = E_2 - E_1$$

Donde  $Q_{1-2}$  es el calor neto transferido al sistema durante el proceso del estado 1 al 2 y  $W_{1-2}$  es el trabajo realizado por el sistema sobre el entorno durante dicho proceso  $E_2$  y  $E_1$  representan los valores de la energía total en dichos estados la cual incluye energía cinética K, potencial gravitacional y elástica P y energía interna U que incluye la energía química y la energía asociada con las moléculas y átomos.

Entonces podemos expresar la Primera ley de la Termodinámica de la forma:

$$Q_{1-2} - W_{1-2} = KE_2 - KE_1 + PE_2 - PE_1 + U_2 - U_1 = \frac{1}{2}m (V_2^2 - V_1^2) + mg(z_2 - z_1) + U_2 - U_1$$

De esta ecuación vemos que cuando se aplica a un sistema aislado, es decir uno que no está en contacto con su entorno por lo tanto no hay transferencias de energía; entonces:

$Q_{1-2} = W_{1-2} = 0$  y por lo tanto la primera ley se convierte en la ley de la conservación de la energía y nos expresa que:

$$E_2 = E_1$$

La energía interna  $U$  es una propiedad extensiva. Si la dividimos entre la masa obtenemos la propiedad intensiva correspondiente  $u = U/m$ . ya que es una propiedad depende sólo de los valores de presión y temperatura, sin embargo en la región de mezcla para el caso del vapor, su valor estará en dependencia de la calidad del vapor por lo tanto al igual que las demás propiedades en esta región su valor viene dado por:

$$u = u_f + x(u_g - u_f)$$

### 2.4.3.3 Primera ley aplicada a sistemas

Proceso a temperatura constante: para el caso un gas la energía interna depende sólo de la temperatura por lo tanto si el proceso es isotérmico se tiene que su cambio en energía interna será cero y si despreciamos cualquier cambio en energía potencial y cinética; para este proceso obtenemos:

$$Q = \Delta U$$

$$W = \Delta U = 0$$

$$Q = W$$

Con el uso de la ecuación de estado del gas ideal  $PV = nRT$ , podemos encontrar el trabajo en un proceso isotérmico casi en equilibrio que comprenda un sistema así:

$$\int_{V_1}^{V_2} PdV = nRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = nRT \ln \frac{V_2}{V_1} = nRT \ln \frac{P_1}{P_2}$$

Proceso a volumen constante: como este proceso no involucra un cambio en el volumen y por la definición de trabajo  $dV=0$  entonces  $W = 0$ , de esta manera si despreciamos cualquier cambio en energía potencial y cinética para este proceso al aplicar la primera ley obtenemos:

$$Q = \Delta U$$

Existen valores tabulados para obtener  $\Delta U$  para una sustancia, para el caso de un gas ideal suponiendo calor específico constante:

$$Q = mc_v (T_2 - T_1)$$

Proceso a presión constante: para este proceso nuevamente suponemos que los cambios en energía cinética y potencial del sistema son insignificantes (esta suposición es válida para la mayoría de nuestros casos de interés). Entonces la primera ley nos expresa:

$$Q - W = U_2 - U_1$$

Como el proceso es a presión constante el trabajo necesario para esta situación será:

$$W = P(V_2 - V_1)$$

Podemos reescribir entonces la primera ley para este proceso así:

$$Q = (U + PV)_2 - (U + PV)_1$$

La cantidad entre paréntesis será definida más adelante, sin embargo para nuestro interés actual la denotamos como:  $(U + PV)_2 - (U + PV)_1 = mc_p \Delta T$  donde  $c_p$  representa el calor específico de la sustancia el cual también será definido formalmente más adelante.

De esta manera la ecuación de la primera ley queda resumida para este proceso:

$$Q = mc_p \Delta T = mc_p (T_2 - T_1)$$

El proceso adiabático: un proceso adiabático es uno durante el que no entra ni sale energía del sistema por calor, es decir,  $Q = 0$ . Un proceso adiabático se puede alcanzar aislando térmicamente las paredes del sistema, por ejemplo aislando las paredes de un cilindro mientras se comprime el gas contenido en él, también podría alcanzarse si el proceso se hace lo suficientemente rápido de modo que la transferencia de calor es casi insignificante. Si aplicamos la primera ley encontramos que

$$W = \Delta U$$

Los valores de  $\Delta U$  se pueden encontrar de las tablas y de esta manera calcular  $W$

Si deseamos generalizar esta ecuación para el caso de un gas ideal con calores específicos constantes obtendríamos después de realizar simplificaciones matemáticas:

$$TV^{k-1} = \text{constante} \qquad Tp^{(1-k)/k} = \text{constant} \qquad pv^k = \text{constant}$$

Donde  $k = c_p / c_v$ , la relación entre calores específicos a presión y volumen constante respectivamente para el caso de un gas ideal su valor es de 1.67 y para moléculas diatómicas es de 1.40

Proceso politrópico: si examinamos los procesos especiales casi en equilibrio para un gas ideal vemos que cada uno de ellos puede ser escrito de la forma

$$PV^n = \text{constante}$$

Si utilizamos la definición general de trabajo entonces:

$$W = \int_{V_1}^{V_2} PdV = P_1 V_1^n \int_{V_1}^{V_2} V^{-n} dV = P_1 V_1^n (V_2^{1-n} - V_1^{1-n}) / 1-n = P_2 V_2 - P_1 V_1 / 1-n$$

Cada uno de los procesos para un gas ideal está asociado con un valor particular de  $n$  así:

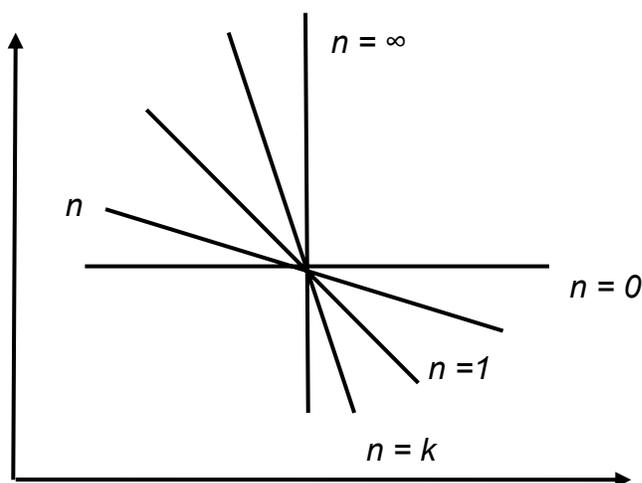
Isotérmico:  $n=1$

Isométrico:  $n= \infty$

Isobárico:  $n= 0$

Adiabático:  $n= k$

**Figura 12.** Gráfica exponentes politrópicos para varios procesos



Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

#### 2.4.4 Definición formal de la entalpía como combinación de propiedades

Para el caso del proceso a presión constante resultó una cantidad de interés que no definimos en ese momento la cual era la suma de la energía interna mas el producto presión-volumen si somos cuidadosos y observamos que las tres cantidades son propiedades de un sistema y por consiguiente su suma también deberá ser una propiedad en sí:

$$P\psi + U = H$$

Donde H representa una nueva propiedad a la que llamamos entalpía, la cual es simplemente una sumatoria de propiedades; energía interna y al producto pv generalmente se le llama energía de flujo ya que representa la energía necesaria para desplazar una determinada masa de un fluido a través del espacio. la entalpía es una propiedad extensiva, si la dividimos entre la masa obtenemos su propiedad específica respectiva:

$$h = pv + u$$

Los valores de entalpía aparecen tabulados en las tablas de vapor, los valores de interés son los cambios en entalpías y no precisamente un valor puntual de ella para el caso de las tablas de vapor el valor de referencia para el agua es el de liquido saturado a 0°C en estos puntos la entalpía y la energía interna son cero.

Ahora analizando nuevamente el proceso a presión constante encontramos:

$$Q = (U + P\psi)_2 - (U + P\psi)_1 = \Delta H$$

De esta manera observamos la utilidad de haber definido esta nueva propiedad.

### 2.4.5 Calor específico

Cuando se agrega energía a un sistema y no hay cambio en la energía cinética o potencial del sistema, la temperatura por lo general se eleva. (Una excepción a este enunciado es el caso en el que un sistema experimenta un cambio de estado, también llamado transición de fase. Si el sistema está formado por una muestra de una sustancia, encontramos que la cantidad de energía necesaria para elevar en cierta cantidad la temperatura de una masa dada de la sustancia varía de una sustancia a otra. Por ejemplo la energía necesaria para elevar en  $1^{\circ}\text{C}$  la temperatura de 1kg de agua es de 4186 J. la capacidad calorífica  $C$  de una muestra de una sustancia se define como la cantidad de energía necesaria para elevar en  $1^{\circ}\text{C}$  la temperatura de esa muestra así de muestra definición vemos que si  $Q$  produce un cambio  $\Delta T$ , entonces

$$Q = C\Delta T$$

El calor específico  $c$  de una sustancia es la capacidad calorífica por unidad de masa. Por lo tanto, si la energía  $Q$  se transfiere a una muestra de una sustancia con masa  $m$  y la temperatura de la muestra cambia en una cantidad  $\Delta T$ , entonces el calor específico de la sustancia es

$$c = Q / m \Delta T$$

El calor específico es en esencia una medida de lo térmicamente insensible que es una sustancia a la suma de energía. Cuanto mayor es el calor específico de un material, mas energía debe agregarse a una masa dada de material para causar un cambio particular de temperatura. De esta definición, podemos relacionar la energía transferida  $Q$  entre una muestra de masa  $m$  de un material y su entorno a un cambio en la temperatura  $\Delta T$  como:

$$Q = mc\Delta T$$

El calor específico varía con la temperatura. Sin embargo, si los intervalos de temperatura no son demasiado grandes, la variación de temperatura se puede despreciar y  $c$  se puede tratar como una constante por ejemplo el calor específico del agua varía solo un 1% de  $0^{\circ}\text{C}$  a  $100^{\circ}\text{C}$  a presión atmosférica.

Los valores medidos de calor específico dependen de las condiciones del experimento. En general, las mediciones hechas en un proceso de presión constante son diferentes a las hechas en un proceso a volumen constante, para sólidos y líquidos la diferencia entre los dos valores suele ser no mayor de unos cuantos puntos porcentuales y con frecuencia se desecha. Para el caso más general podemos definir la transferencia de calor  $Q$ :

$$Q = m \int_{T_1}^{T_2} C_p dT = m\Delta h$$

Esta ecuación nos relaciona el integrando con un cambio de entalpías entre las dos temperaturas consideradas en ambos estados.

#### **2.4.6 Equivalente mecánico del calor**

James Prescott Joule físico inglés realizó investigaciones que lo llevaron al establecimiento del principio de la conservación de la energía. En el año de 1843 presentó un informe donde relacionaba el calor con el trabajo, llamado el equivalente mecánico del calor.

Joule realizó experimentos en el que utilizaba un recipiente que contenía agua el cual estaba térmicamente aislado. Luego introdujo un mecanismo de

rueda de paletas que se sumergía totalmente la cual realiza trabajo sobre el agua, movida por pesados bloques que bajan con rapidez constante. Como resultado obtuvo que la temperatura del agua aumentaba debido a la fricción entre ella y la rueda de paletas. Si suponemos que la fricción es cero en los cojinetes y que no hay energía perdida a través de las paredes del recipiente, entonces la pérdida en energía potencial asociada con los bloques es igual al trabajo realizado por la rueda de paletas sobre el agua. Si los dos bloques bajan una altura  $h$ , la pérdida en energía potencial será  $2mgh$  Joule encontró que la pérdida es proporcional al aumento en la temperatura del agua  $\Delta T$ . Se encontró que la constante de proporcionalidad era aproximadamente  $4.186 \text{ J/g}^\circ\text{C}$ . Por lo tanto  $4.18 \text{ J}$  de energía mecánica hacen subir en  $1^\circ\text{C}$  la temperatura de  $1 \text{ g}$  de agua. Mediciones más precisas tomadas después demostraron que la proporcionalidad es  $4.186 \text{ J/g}^\circ\text{C}$  cuando la temperatura del agua sube de  $14.5^\circ\text{C}$  a  $15.5^\circ\text{C}$ .

$$1\text{cal} = 4.186 \text{ J}$$

Esta igualdad es conocida, por razones históricas, como el equivalente mecánico del calor, donde  $1\text{cal} = 1 \text{ caloría}$

#### **2.4.7 Primera ley de la Termodinámica; formulación general para volúmenes de control**

En gran parte del estudio de la termodinámica al aplicar la primera ley debemos utilizar volúmenes de control para el análisis de los procesos. Hasta este punto únicamente hemos aplicado la primera ley a sistemas en los que la cantidad de materia permanece invariante. Para la aplicación de la ecuación de la energía en un volumen de control en el cual si hay un ingreso y salida de

masa debemos realizar varias simplificaciones como el caso de que tendremos flujo estacionario es decir las variables de flujo no cambian con el tiempo y flujo uniforme; la densidad, presión y velocidad son constante en el área de la sección transversal. El volumen de control debe escogerse de tal manera que la superficie de control quede distribuida de tal manera que las variables de flujo sean funciones uniformes o conocidas sobre las áreas donde entra y sale el fluido del volumen de control. También debemos hacer uso del término flujo másico el cual es la rapidez a la cual la masa atraviesa las fronteras del volumen de control y lo denotamos por  $\dot{m}$ , por conservación de la masa tendremos que la sumatoria de flujos másicos que ingresen al volumen de control será igual a la sumatoria de los flujos másicos que salen esto es equivalente a afirmar que no se almacenará masa en nuestro volumen de control; matemáticamente:

$$\sum_{entradas} \dot{m} = \sum_{salidas} \dot{m}$$

El flujo másico puede representarse en términos de las variables densidad, área y velocidad de la siguiente manera.

$$\dot{m} = \rho AV$$

Con esta información y considerando como ingreso o salida de trabajo el trabajo de eje  $W$  después de varias simplificaciones matemáticas la ecuación de la primera ley adquiere la forma:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} [h_2 - h_1 + g(z_2 - z_1) + \frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2)]$$

Esta ecuación es la más empleada para el análisis de los flujos de gas o vapor

Al igual que en el caso de los procesos y sistemas, los cambios en la energía cinética y potencial son insignificantes en comparación con los cambios

de entalpías, así la primera ley simplificada para volúmenes de control resulta en:

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

O lo que es igual:  $q - w = h_2 - h_1$

Estas formas simplificadas de la primera ley se emplean con mucha frecuencia en el análisis de equipo.

Si consideramos que el fluido que atraviesa la superficie de control y sabiendo que los líquidos son prácticamente incompresibles, entonces las densidades a la entrada y salida son las mismas  $\rho_2 = \rho_1$  si también despreciamos la transferencia térmica y los cambios en energía interna la ecuación resultante es:

$$-\dot{W} = \dot{m} [P_2 - P_1/\rho + V_2^2 - V_1^2/2 + g(z_2 - z_1)]$$

La cual es la forma que se usa frecuentemente para bombas o hidroturbinas, en el caso que  $\dot{Q}$  o  $\Delta u$  no sean cero deberán incluirse.

#### **2.4.8 Primera ley simplificada (caso especial: Bernouilli)**

Recibe este nombre en honor al físico suizo Daniel Bernouilli el cual realizó importantes descubrimientos en la dinámica de fluidos. Veremos que la ecuación desarrollada por Bernouilli no es más que la ecuación de la primera ley de la termodinámica para un caso especial en que un fluido incompresible (un líquido) no intercambia energía en forma de calor con su entorno.

Consideremos un fluido que se mueve por una región en el espacio donde cambia su rapidez y su elevación sobre el suelo, la presión también se considera que varía con estos cambios la relación entre las variables presión, rapidez y elevación de un fluido la descubrió en 1738 Bernoulli, y las demostraremos de la siguiente manera:

Analicemos un flujo en un segmento de un fluido ideal que pasa por un tubo de sección transversal no uniforme en un intervalo de tiempo  $\Delta t$ , al inicio del intervalo el segmento del fluido del lado derecho está formado por una parte de ancho  $\Delta x_1$  este se mueve con una velocidad  $v_1$  ubicado a una altura  $y_1$  sobre un nivel de referencia (el suelo por ejemplo) en ese mismo intervalo de tiempo el segmento del lado derecho se mueve una distancia  $\Delta x_2$  y avanza a una velocidad  $v_2$  este segmento ahora está a una altura  $y_2$  sobre nuestro nivel de referencia si ahora consideramos las fuerzas ejercidas sobre estos segmentos a la izquierda y derecha encontramos que su magnitud será  $P_1 A_1$  el trabajo realizado durante el intervalo de tiempo  $\Delta t$  es  $W = F_1 \Delta x_1 = P_1 \Psi$ , donde  $\Psi$  es el volumen de la parte 1. Del mismo modo el trabajo realizado por el fluido a la derecha del segmento es en el mismo intervalo de tiempo y tiene un valor de  $W_2 = - P_2 A_2 \Delta x_2 = - P_2 \Psi$ , (el volumen del lado izquierdo es igual al del lado derecho). De esta manera el trabajo total realizado por ambos segmentos es:

$$W = (P_1 - P_2) \Psi$$

Una fracción de este trabajo cambiará la energía cinética del fluido y otra servirá para cambiar la energía potencial el mismo de esta manera el cambio en la energía cinética será:

$$\Delta K = \frac{1}{2} m V_2^2 - \frac{1}{2} m V_1^2$$

El cambio en la energía potencial gravitacional sería:

$$\Delta U = m g y_2 - m g y_1$$

De esta manera el trabajo total realizado sobre el sistema por el fluido fuera del segmento es igual al cambio en la energía mecánica  $W = \Delta U + \Delta K$ , sustituyendo términos obtenemos:

$$(P_1 - P_2)V = \frac{1}{2} mV_2^2 - \frac{1}{2} mV_1^2 + mgy_2 - mgy_1$$

Si dividimos ambos lados de la ecuación entre la masa y reacomodamos obtenemos:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 + \rho gh_2$$

Esta es la ecuación de Bernoulli que se aplica a un fluido ideal con cero transferencias de calor. A veces se expresa de la forma:

$$P + \frac{1}{2} \rho V^2 + \rho gh = \text{constante}$$

Con el uso de esta ecuación podemos analizar de una manera simple y muy eficiente problemas en los que intervenga un fluido ideal que experimente cambios en sus velocidades y elevación. Y dice que a una determinada elevación un aumento en la presión ocasiona una disminución en la velocidad y viceversa.

## 2.5 Primera ley aplicada al análisis de equipo

Cuando utilizamos la primera ley aplicada a volúmenes de control encontramos que nos describe con mucha facilidad varias situaciones de interés, en este caso vamos a analizar equipo como ser: bombas, compresores, turbinas, toberas, difusores y también intercambiadores de calor este equipo se

utiliza con mucha frecuencia en los procesos industriales por lo que su comprensión será muy importante.

### 2.5.1 Bombas, compresores y turbinas

Una bomba es un equipo que transfiere energía al líquido que circula a través de ella, resultando en 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. Una turbina en cambio es un equipo en el que el fluido realiza trabajo sobre un conjunto de paletas ocasionando una pérdida en la energía del fluido que se observa como una caída en su presión o velocidad. Para analizar estos equipos suponemos 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 y los cambios en energía potencial son casi cero. Si además aplicamos el principio que el equipo opera en modo estacionario, la ecuación de la primera ley toma la forma:

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

Donde  $w$  es negativo para un compresor y positivo para una turbina de gas o de vapor.

Para fluidos como el agua, depreciando cambios en la energía potencial y cinética y recordando que es un líquido es prácticamente un fluido incompresible obtenemos al aplicar la primera ley:

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

Esta ecuación es usada para bombas o hidroturbinas si los cambios en energía cinética o potencial son importantes simplemente se deberán incluir.

### 2.5.2 Toberas y difusores

Una tobera es un elemento que se usa para aumentar la velocidad de un líquido en flujo consigue esto al reducir la presión (recordemos el principio de Bernouilli). Un difusor por el contrario es un elemento que aumenta la presión al disminuir la velocidad. Podemos ver que no hay entrada de trabajo para estos elementos y también la transferencia por calor suele ser insignificante si por último agregamos 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 esto es debido a efectos de la turbulencia en el flujo.

### 2.5.3 Intercambiadores de calor

Éste es un equipo termodinámico que tiene mucha aplicación en la ingeniería. Son usados para lograr un intercambio de energía de una sustancia caliente a otra más fría obteniendo 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. Como ejemplos podemos citar un radiador de un automóvil en el que 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 las paredes del mismo. 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 podemos suponer 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 a estos equipos resulta:

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

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

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

El signo negativo es necesario ya que la cantidad del lado izquierdo es positiva, y a que involucra una ganancia en energía, sin embargo la cantidad del lado derecho es negativa ya que esta representa una pérdida de energía, de esta manera estaremos cumpliendo con la igualdad.

Sustituyendo los valores encontramos:

$$\dot{m}_A (h_{A2} - h_{A1}) = - \dot{m}_B (h_{B2} - h_{B1})$$

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.

### 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 con los que cuenta cada una como ser:

- **Objetivos:** los cuales proporcionan los aspectos primordiales de cada práctica y señalan cual es su fin, para de esta manera 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 poder realizarlas el cual se pretende sea lo más accesible en cuanto a adquisición cuando no se cuente con él.
- **Magnitudes físicas y variables termodinámicas a medir:** se trata de una lista con cada una de las magnitudes y variables que deben ser medidas durante el desarrollo de la práctica.
- **Desarrollo experimental:** en esta parte se trata de una manera detallada la forma en que 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 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 pírrex 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 agregaremos una de las 6 masas de 1kg cada una con las que contamos y procederemos a realizar 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 IV.** Datos de resumen para gráfico volumen vs. presión

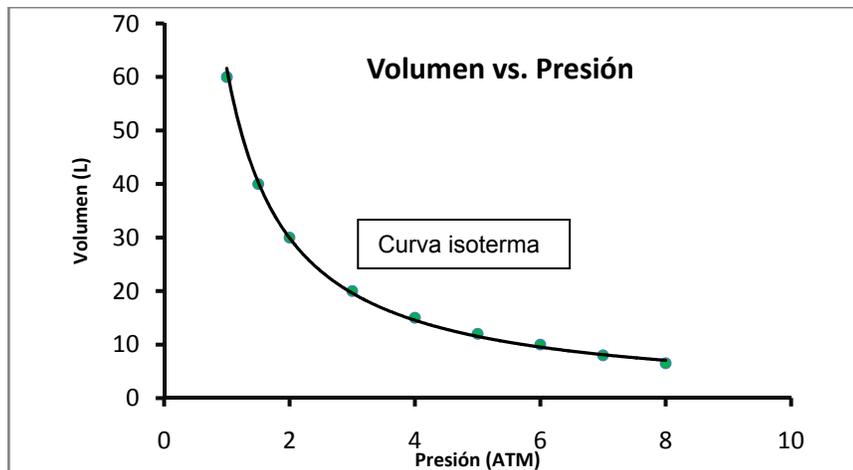
no. datos	Masa	F =mg	Volumen	Presión = Patm.+ F/A
1				

...etc.

Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

e) Proceder a realizar gráfico: volumen “v” versus presión “P”

**Figura 13.** Gráfico volumen vs. presión



Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

f) Cambio de variable en el gráfico: al observar la tendencia de los puntos nos daremos cuenta que tiene la forma funcional  $v = f(P)$ , y en este caso se observará que es muy similar a una hipérbola; entonces el modelo matemático sugerido sería según la ley de Boyle que afirma que: “a temperatura constante la presión de un gas es inversamente proporcional al volumen ocupado por el mismo”  $v = cp^{-1} + b$  donde c y b

son constantes a determinar, para conseguir esto se procede a realizar un cambio de variable siendo  $u = 1/P$ , por lo que si al momento de graficar resultara que los puntos ahora se distribuyen a lo largo de una tendencia lineal, podemos afirmar que hemos escogido un buen modelo de no ser así habría que cambiar la forma funcional del modelo matemático.

g) Proceder a tabular los datos

**Tabla V.** Datos de resumen para gráfico con cambio de variable

no. de datos	Volumen	cambio de variable: $u = 1/P$
1		

Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

h) Realizar el gráfico volumen “v” versus “u” si para esta gráfica encontramos la pendiente y su respectivo intercepto con el eje y estaríamos encontrando las constantes que necesitamos de nuestro modelo de la ley de Boyle.

i) Para encontrar las constantes mencionadas procederemos a trazar dos rectas  $r_1$  y  $r_2$  una con pendiente más pronunciada que la otra; de nuestras primeras enseñanzas de geometría sabemos que una recta queda completamente definida por dos puntos, entonces tomamos dos de estos puntos y encontramos la ecuación de la recta  $r_1$

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = c_1 = \frac{v_2 - v_1}{u_2 - u_1}$$

Como la ecuación de la recta es  $v = c_1u + b_1$  entonces se eligen los valores respectivos de v y de u para despejar b y encontrar su valor.

De esta manera queda definida la primera recta  $r_1$ :  $v_1 = c_1u + b_1$

Ahora repetiremos el mismo procedimiento para definir la segunda recta  $r_2$

$$m = \frac{y_4 - y_3}{x_4 - x_3} \quad c_2 = \frac{v_4 - v_3}{u_4 - u_3}$$

Como la ecuación de la recta es  $v = c_2u + b_2$  entonces se eligen los valores respectivos de  $v$  y de  $u$  para despejar  $b$  y encontrar su valor.

De esta manera queda definida la primera recta  $r_2$ :  $v_2 = c_2u + b_2$

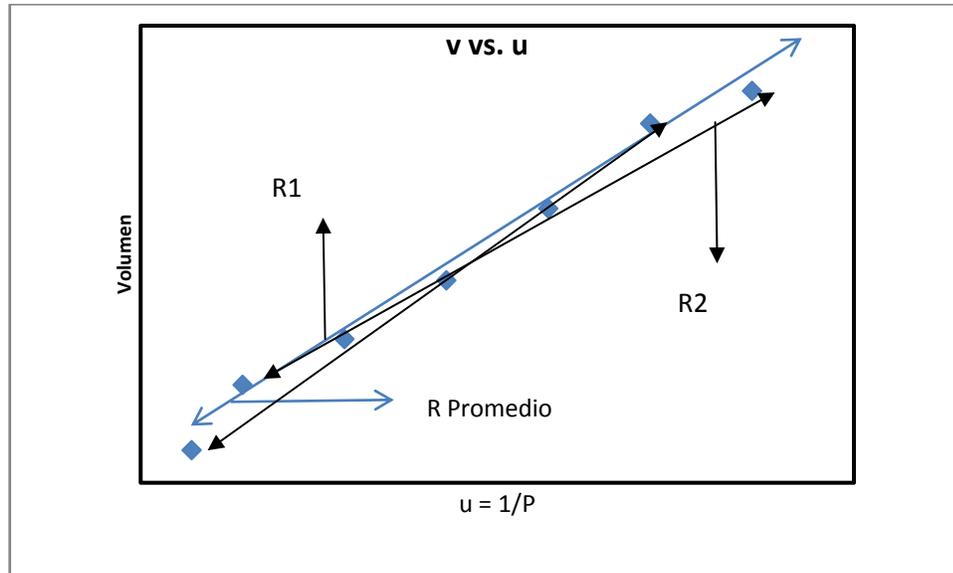
Ahora nos valdremos de estas dos rectas que podrían llamarse “rectas auxiliares” para promediar sus valores de pendiente e intercepto con el eje vertical lo que nos dará el valor medio o más probable de la línea recta para nuestro modelo matemático elegido.

$$\bar{c} = \frac{c_2 + c_1}{2} \quad \text{y} \quad \bar{b} = \frac{b_2 + b_1}{2}$$

Ya estamos en condición de dar valores a nuestras constantes de una manera más precisa y presentamos nuestra ecuación de la forma:

$$v = \bar{c}u + \bar{b}$$

**Figura 14.** Gráfico  $v$  vs.  $u$



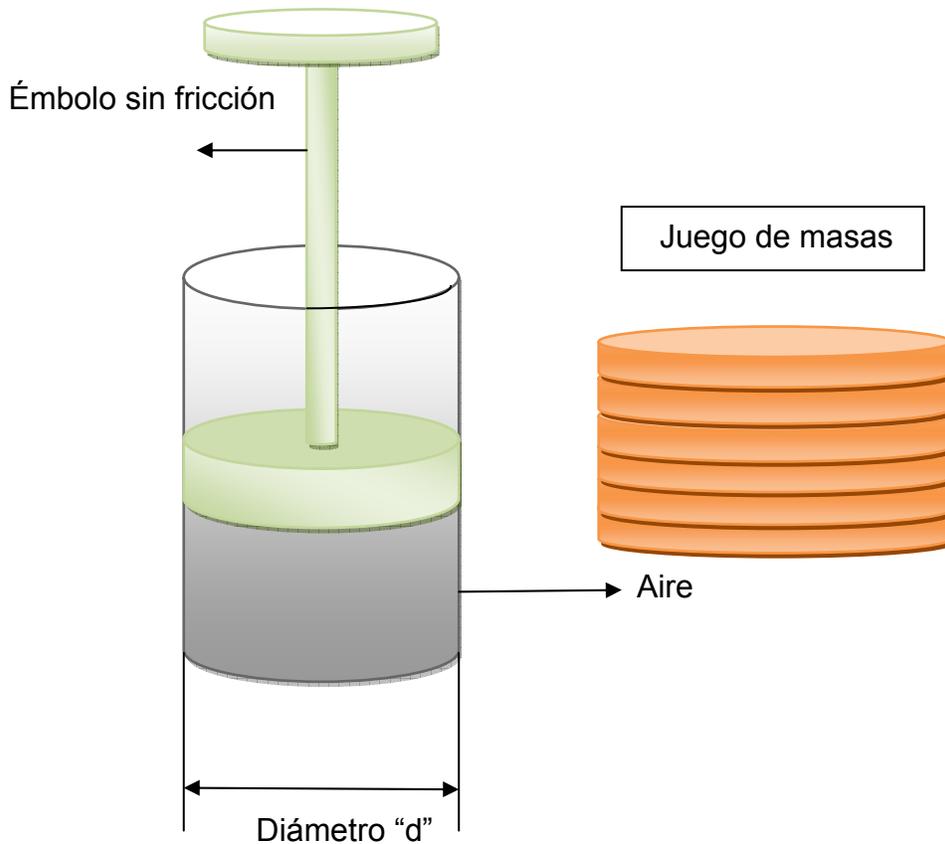
Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

j) ¿Qué interpretación tiene la pendiente de esta recta?

k) 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 aquél 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 las paredes del mismo con su entorno dando lugar a que la temperatura sea prácticamente constante.

**Figura 15.** Diagrama esquemático del equipo para proceso isotérmico



Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

Segunda parte: proceso isobárico

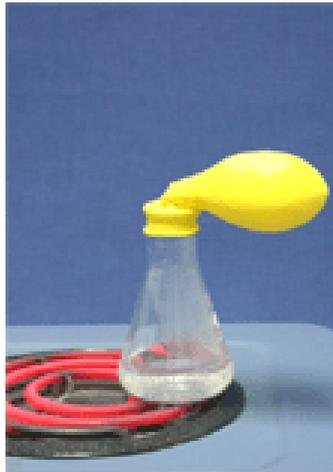
Con este experimento lo que se pretende es demostrar la ley de Charles aplicada a gases ideales (en este caso aire) el cual tiene un comportamiento de gas ideal, dicha ley expresa que "a presión constante el volumen que ocupa un gas es directamente proporcional a la temperatura" para comprobar la validez de este enunciado procederemos a realizar lo siguiente:

- a) Se introduce en el interior un termómetro de manera que quede bien apoyado en el pírex, (el termómetro no debe hacer contacto con el fondo

del pírrex, para esto auxiliarse de un pequeño soporte y colocarlo en la base del termómetro).

- b) Se coloca un globo (sin inflar) en la boquilla del pírrex
- c) Se procede a colocar el pírrex en una fuente de calor (una estufa eléctrica pequeña preferiblemente).
- d) Se espera un par de minutos y se anotan diferentes valores de temperatura (unos 6).
- e) Se observa que le ocurre al globo a medida que la temperatura está en aumento.
- f) Como práctica se convertirán los valores de temperatura anotados a todas las demás escalas; Fahrenheit, kelvin y Rankine. además dar un comentario sobre lo que ocurrió en el experimento en base a la ley de de charles.

**Figura 16.** Diagrama esquemático del equipo para proceso isobárico



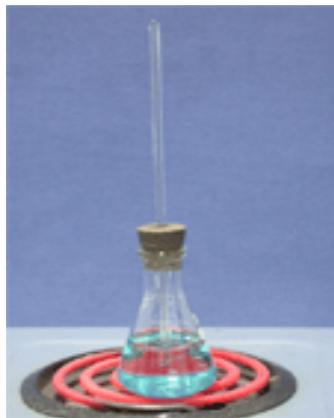
Fuente: [www.fisicarecreativa.com](http://www.fisicarecreativa.com)

Tercera parte: proceso isométrico (isocórico).

Con esta práctica lo que se pretende es demostrar la ley de Gay – Lussac que expresa que “a volumen constante la presión es directamente proporcional a la temperatura” como para este experimento mantendremos el volumen constante un aumento en la temperatura constituye un respectivo aumento en la presión. para comprobar la validez de este enunciado procederemos a realizar lo siguiente:

- a) Agregar agua a un pírex (digamos un 40% de su capacidad).
- b) Colocamos el tubo capilar con su escala graduada en el interior del pírex.
- c) Cerrar el pírex colocando un corcho en su boquilla.
- d) Se procede a colocar el pírex en una fuente de calor (una estufa eléctrica pequeña preferiblemente).
- e) Esperar un par de 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.
- f) Explicar por qué ocurre este fenómeno.

**Figura 17.** Diagrama esquemático del equipo para proceso isométrico



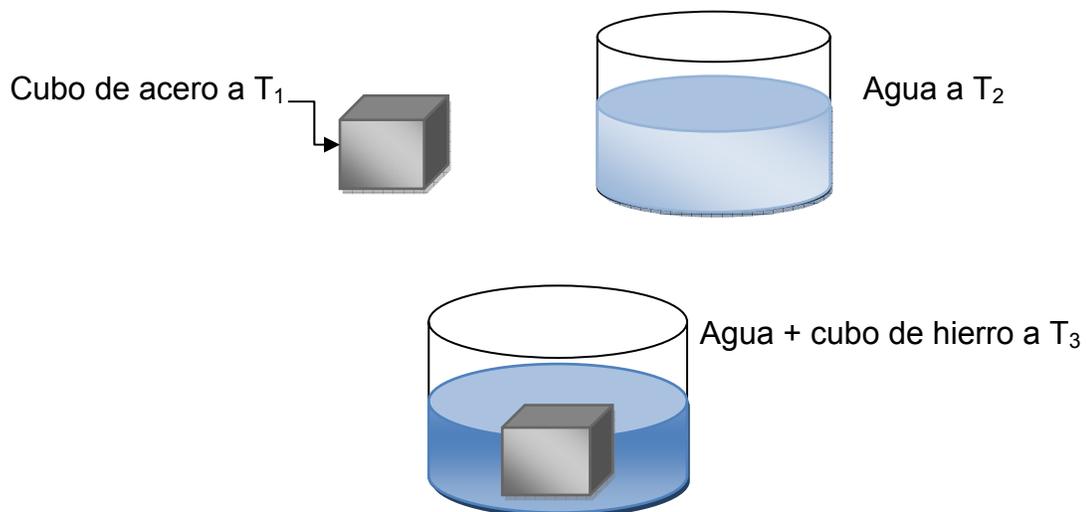
Fuente: [www.fisicarecreativa.com](http://www.fisicarecreativa.com)

#### 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:

- a) Llenar un recipiente con aproximadamente medio litro de agua mineral.
- b) Medir la temperatura ambiente  $t_1$  que será la misma a la que debe estar el agua mineral.
- c) Calentar el cubo de acero hasta que alcance una temperatura  $t_2$  unos  $40^\circ\text{C}$  por encima de la temperatura ambiente, verificar esto con el termómetro.
- d) Introducir la pieza de acero en el volumen de agua y mover durante medio minuto aproximadamente.
- e) Medir la temperatura de equilibrio del agua + cubo de acero  $t_3$
- f) Agregar una conclusión sobre lo ocurrido en esta práctica.

**Figura 18.** Diagrama agua + cubo de acero para demostración de la ley cero



Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

### 3.3 Sustancias puras (cambio de fase del agua)

Objetivos:

- ❖ Demostrar que en los cambios de fase la temperatura es invariante.
- ❖ Utilizar las tablas de vapor.
- ❖ Presentar el concepto de calor de vaporización.
- ❖ Introducción a los diagramas de fase (curva de gauss)
- ❖ Identificar en los diagramas de fase el estado de líquido saturado
- ❖ Identificar en los diagramas de fase el estado de vapor saturado

Equipo:

- ❖ 1 trípode
- ❖ Pinza sujetadora
- ❖ Mordazas para trípode
- ❖ 1 termómetro con escala de 0 – 100 °C
- ❖ Recipiente cilíndrico de vidrio con capacidad de 3 – 4 litros.
- ❖ 2 bandejas llenas con cubitos de hielo
- ❖ 2 litros de agua mineral (a temperatura fría preferiblemente)
- ❖ 1 olla de presión modificada (ver figura en diagrama de equipo)
- ❖ Fuente de calor (estufa eléctrica preferiblemente)
- ❖ 1 balanza
- ❖ Nota: se puede hacer una sustitución de la olla de presión modificada y la fuente de calor o sea la estufa eléctrica por la caldera con la que se cuenta en el centro de investigaciones de la facultad.

Magnitudes físicas y variables termodinámicas a medir:

- ❖ La temperatura inicial de la mezcla agua mineral + cubitos de hielo.
- ❖ La temperatura final del agua una vez que se han derretido totalmente todos los cubitos de hielo.
- ❖ Un volumen pequeño de agua que será contenido en la olla de presión.

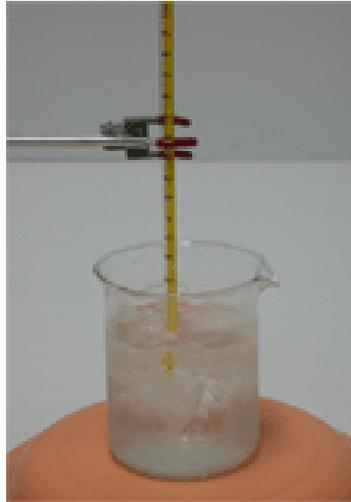
- ❖ La masa de este volumen de agua.
- ❖ La temperatura en la olla de presión 8 diferentes instantes de tiempo.
- ❖ La presión en la olla en 8 diferentes instantes de tiempo.
- ❖ El diámetro “d” de la olla de presión.
- ❖ Los distintos valores indicados por el termómetro en el proceso isobárico.
- ❖ La altura “h” de la olla de presión.
- ❖ En caso de realizar la práctica en el centro de investigaciones de la facultad de ingeniería; lo que se hará será observar el funcionamiento de la caldera y la forma en que esta genera vapor. Después el estudiante deberá presentar una investigación de las partes de la caldera y sus principios de funcionamiento

Desarrollo experimental:

Primera parte: demostración de que la temperatura es constante en un cambio de fase para una sustancia pura (en este caso agua).

- a) Se procede a armar el equipo como se muestra en el esquema del diagrama experimental.
- b) Agregar aproximadamente 2 litros de agua fría en el recipiente de vidrio
- c) Se agregan los cubitos de hielo en el agua fría
- d) Colocar el termómetro dentro de la mezcla y se mide la temperatura  $t_1$  inicial
- e) Se espera a que pase un minuto aproximadamente y se anota nuevamente el valor de temperatura  $T_2$  que indica el termómetro
- f) Repetir el inciso “e” unas 8 veces más, de manera de recopilar unas 10 mediciones de temperatura

**Figura 19.**Diagrama esquemático del equipo y realización práctica.



Fuente: [www.fisicarecreativa.com](http://www.fisicarecreativa.com)

g) Con esta práctica se comprobará que durante del cambio de fase de sólido a líquido (fusión) del agua la temperatura es constante hasta que la última porción de hielo termina a convertirse en agua líquida.

h) Dar conclusiones de este fenómeno.

Segunda parte: seguimiento de cambio de fase agua – vapor (vaporización)

a) Se mide la masa de un volumen de agua pequeño.

b) Se agrega este volumen de agua en la olla de presión modificada (debe ser un volumen pequeño de manera que cuando todo esté en estado gaseoso su volumen específico sea menor al que podría caber dentro de la olla de presión modificada).

c) Cerrar la olla de presión modificada asegurándonos que quede perfectamente sellada.

d) Colocar la olla de presión en nuestra fuente de calor.

e) Esperar un par de minutos hasta observar que tanto la temperatura como presión comienzan a aumentar sus valores

- f) Tomar lectura de las medidas de presión y temperatura indicadas por el manómetro y el termómetro respectivamente.
- g) Repetir el inciso “f” unas 8 veces cada 30 segundos aproximadamente.
- h) Ordenar los datos experimentales en una tabla

**Tabla VI.** Datos recopilados de presión y temperatura

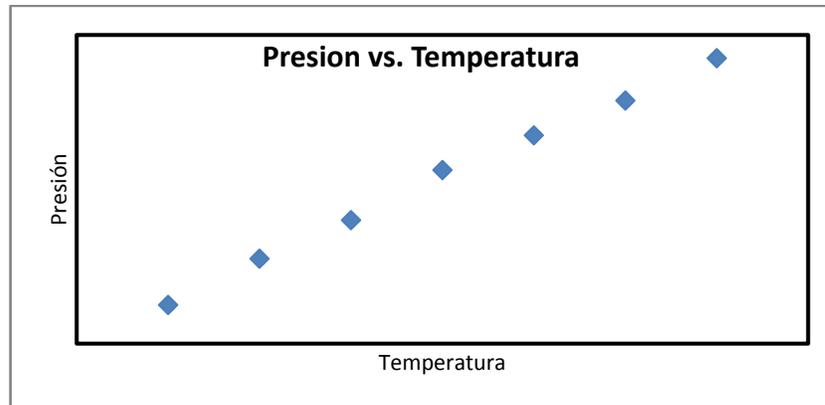
no. de datos	Presión	Temperatura
1		

....etc

Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

- i) Proceder a realizar gráfico presión versus temperatura

**Figura 20.** Gráfico de presión vs. temperatura para volumen de agua

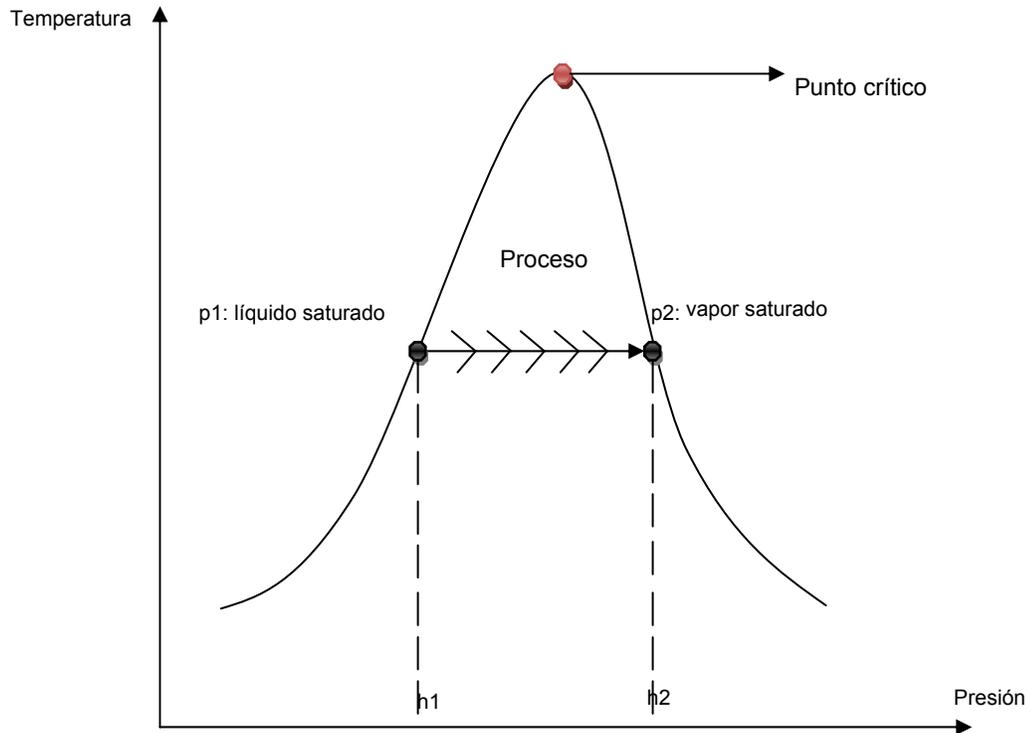


Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

- j) ¿Se distribuyen los puntos sobre una recta imaginaria? dar comentario.

- k) Esperar hasta que tanto las indicaciones de presión y temperatura sean invariantes en los instrumentos de medición; este será el estado de líquido saturado
- l) Utilizar las tablas de vapor y calcular todos los valores de las propiedades para este punto según sea la lectura de presión y temperatura que se indique.
- m) Esperar nuevamente hasta que las lecturas de presión y temperatura comiencen a aumentar nuevamente; este será el estado de vapor saturado.
- n) Con la ayuda de las tablas de vapor calcular los valores de todas las propiedades en este punto para la misma presión y temperatura del estado líquido saturado, entonces  $P_2 = P_1$ ,  $T_2 = T_1$ ; pero con valores de volumen específico diferentes  $v_2 = v_g$  siendo  $v_g$  el volumen específico del gas.
- o) Ubicar estos dos puntos en un plano cartesiano y trazar gráfica según la curva de Gauss.

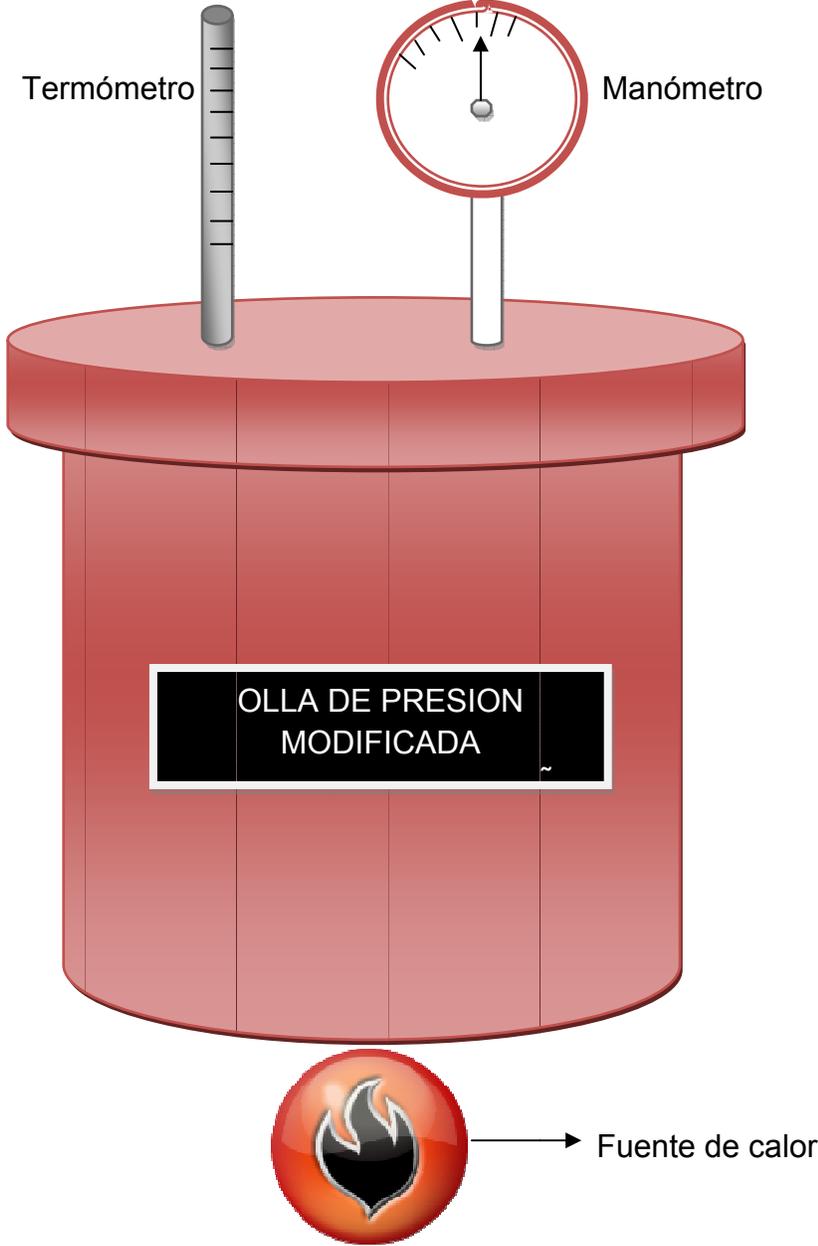
**Figura 21. Campana de Gauss**



Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

- p) Realizar la resta de entalpías entre los estados 1 y 2 dicha diferencias de entalpías nos dará el calor de vaporización entonces  $h_2 - h_1 =$  calor de vaporización del agua
- q) Indicar las simplificaciones y posibles fuentes de error en este experimento

**Figura 22.** Equipo de olla de presión modificada para proceso de evaporación



Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

### 3.4 Trabajo

Objetivos:

- ❖ Introducción del concepto de trabajo
- ❖ Definir los diferentes métodos para realizar trabajo (trabajo de frontera, eléctrico, trabajo de resorte, trabajo realizado por la gravedad)
- ❖ Identificar cuando se realiza trabajo sobre un sistema y cuando es realizado por el sistema.
- ❖ Calcular el trabajo para un proceso isotérmico mediante el cálculo del área bajo la curva  $p - v$
- ❖ Calcular experimentalmente la constante “k” de un resorte.

Equipo:

- ❖ Cilindro transparente con escala milimétrica y émbolo (supuesto ideal; sin fricción)
- ❖ Juego de 6 masas
- ❖ Metro
- ❖ Fuente eléctrica de voltaje continuo
- ❖ Amperímetro
- ❖ Juego de resistencias
- ❖ 1 protoboard o placa de pruebas
- ❖ Una bombilla
- ❖ 2 resortes de idéntica constante “k”
- ❖ Una esfera metálica de unos 50 gramos
- ❖ 1 riel de aproximadamente 70 cm. de longitud
- ❖ 1 soporte vertical par resorte
- ❖ Fuente de calor (preferiblemente estufa eléctrica)

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.
- ❖ El diámetro “d” del cilindro
- ❖ La diferencia en volúmenes entre cada estado
- ❖ El voltaje proporcionado por la fuente
- ❖ Los valores de resistencias
- ❖ La corriente en el circuito
- ❖ La masa de la esfera metálica
- ❖ La altura “h” que desciende la masa al unirla al resorte
- ❖ La distancia  $\Delta x$  que se comprime el resorte
- ❖ La altura máxima “h” que sube la esfera por el riel
- ❖ La masa del émbolo que descansa sobre el cilindro
- ❖ La distancia  $\Delta x$  que se comprime el resorte para la última parte experimental

Desarrollo experimental:

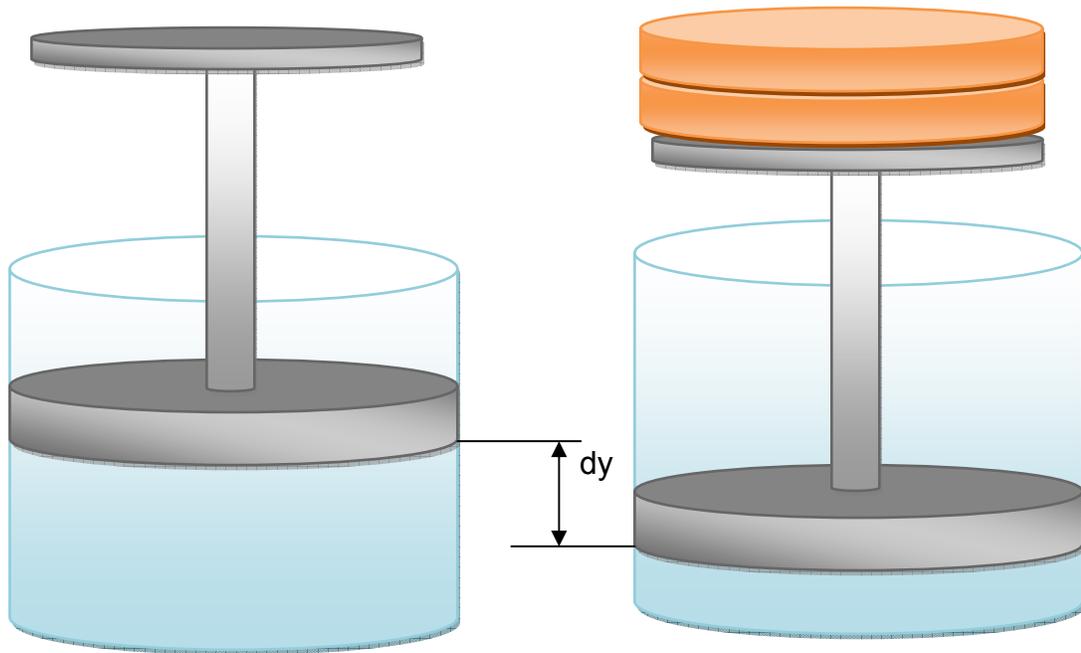
Primera parte: cálculo de trabajo de frontera

Realizando un análisis gráfico se puede determinar el trabajo de frontera en este caso realizado sobre un sistema se puede calcular mediante el concepto de que el trabajo es el área bajo la curva P-v para esta parte práctica supondremos un proceso isotérmico.

- a) Para la realización de este experimento de 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.

- b) Luego agregaremos una de las 6 masas con las que contamos y procederemos a realizar el cálculo para el nuevo valor de presión y a medir el volumen correspondiente a esta condición.

**Figura 23.** Representación proceso de compresión del aire



Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

- c) Repetir este proceso hasta obtener 7 datos experimentales.  
d) Ordenar los datos experimentales en una tabla

**Tabla VII.** Recopilación de datos para gráfico de curva isoterma

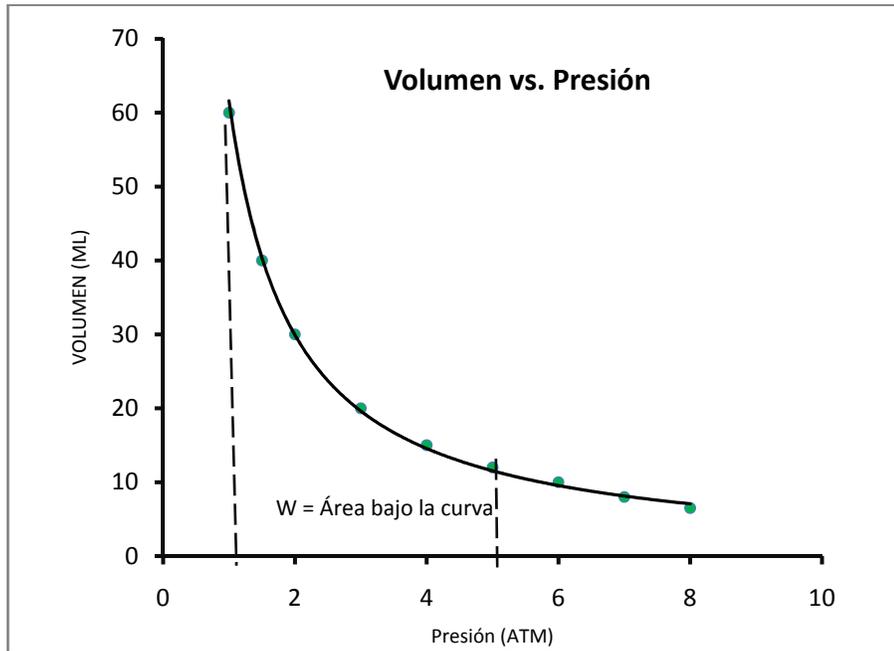
no. datos	Masa	$F = mg$	Volumen	presion = $p_{atm.} + F/A$
1				

...etc.

Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

e) Proceder a realizar gráfico: volumen “v” versus presión “P”

**Figura 24.** Gráfica representativa de trabajo para proceso isotérmico



Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

f) Conociendo la ecuación de estado del gas ideal  $Pv = m \bar{R}t$  entonces resulta que en el caso del aire que es un gas ideal podríamos calcular el trabajo para un proceso isotérmico de la siguiente manera sabiendo que  $F = P \cdot A$ ;  $dW = F \cdot dy$  entonces  $w = \int P \cdot A dy$  pero  $A dy = dv$  resultando en  $W = \int_{v_0}^{v_f} P dv$  y despejando  $P = \frac{m \bar{R}T}{v}$  entonces sustituyendo en la ecuación del trabajo finalmente resulta  $w = \int_{v_0}^{v_f} \frac{m \bar{R}T}{v} dv = m \bar{R}T \ln \left( \frac{v_f}{v_0} \right)$  que gráficamente representa el área bajo la curva de nuestro proceso isotérmico donde  $m$  = masa del aire contenida en el cilindro,  $v_f$  = volumen en el estado final para el que se quiera calcular el trabajo

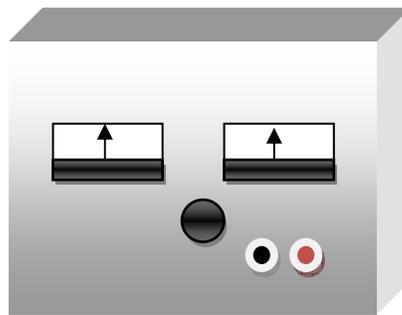
$v_0$  = volumen inicial de la masa de aire en el cilindro y  $\bar{R}$  = constante del aire.

- g) Proceda a calcular la cantidad de trabajo para cada uno de los procesos.
- h) Dar conclusión de los resultados obtenidos.

Segunda parte: trabajo eléctrico

- a) Conectar la fuente de voltaje directo
- b) Ajustar la fuente a un voltaje arbitrario (10 voltios es un buen valor)
- c) Conectar la fuente a diferentes resistencias por medio del protoboard
- d) Medir los distintos valores de corriente en cada circuito
- e) Observar lo que sucede en las resistencias después de varios minutos de estar conectadas a la fuente
- f) Conectar la bombilla a la fuente y observar el resultado

**Figura 25.** Fuente de voltaje DC



Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

**Figura. 26** Bombilla eléctrica



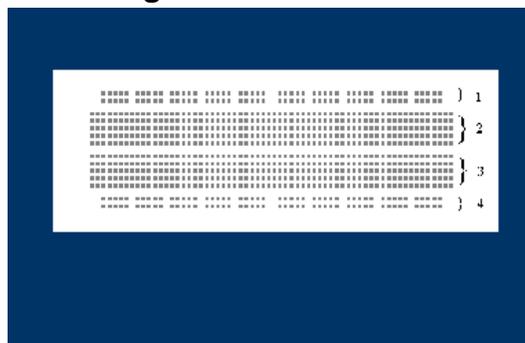
Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

**Figura 27.** Resistencias eléctricas



Fuente: [www.fisicarecreativa.com](http://www.fisicarecreativa.com)

**Figura 28.** Protoboard



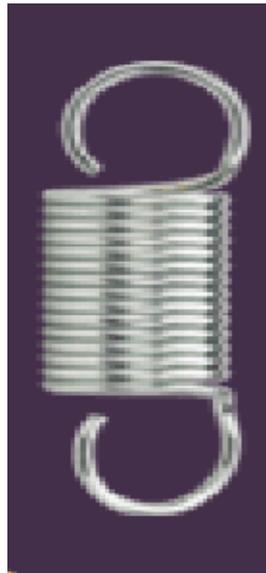
Fuente: [www.fisicarecreativa.com](http://www.fisicarecreativa.com)

- g) Dejar transcurrir un par de minutos para cada caso y calcular el trabajo sabiendo que  $p = iv$  y además que  $p = W/t$  donde:  $p$ = potencia,  $i$ = corriente,  $v$  = voltaje,  $W$ = trabajo y  $t$ = tiempo de ésta manera midiendo la corriente, el voltaje y el tiempo podremos encontrar el trabajo eléctrico para cada configuración.

Tercera parte: trabajo de resorte

- a) Medir la masa de la esfera que colgará del resorte
- b) Primero se procede a medir indirectamente la constante “k” del resorte para esto se coloca el resorte como en el esquema experimental.

**Figura 29.** Resorte sin alargamiento



Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

**Figura 30.** Resorte con masa colgante



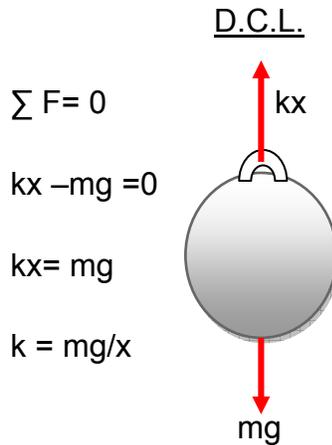
Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

Según la ley de Hooke la fuerza necesaria para estirar un resorte es directamente proporcional a la distancia que este se deforma, así de manera de igualdad se presenta la ecuación:

$F = k x$  siendo “k” la constante de elasticidad del resorte, “x” la distancia que se deformó y “F” la fuerza externa aplicada.

Ahora aplicaremos la segunda ley de Newton a la masa ya que esta está en equilibrio la sumatoria de fuerzas debe ser cero. Realizando un diagrama de cuerpo libre (D.C.L.) de la manera siguiente:

**Figura 31.** Diagrama de cuerpo libre par resorte con masa colgante



Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

- c) Con el valor de la constante del resorte ahora procederemos a calcular el trabajo realizado según la ecuación :

$$dw = F \cdot dx \text{ entonces } w = \int_{x_0}^{x_f} F \cdot dx = \int_{x_0}^{x_f} kx \, dx = \frac{kx_f^2}{2} - \frac{kx_0^2}{2} \text{ siendo:}$$

$x_f$  = la posición final del resorte,  $x_0$  = la posición inicial del resorte antes de estirarse o comprimirse para el caso en que elegimos  $x_0 = 0$  entonces el trabajo solamente es la primer parte de esta expresión así:  $W = \frac{kx_f^2}{2}$  ahora se procede a calcular la validez de esta expresión con un experimento sencillo.

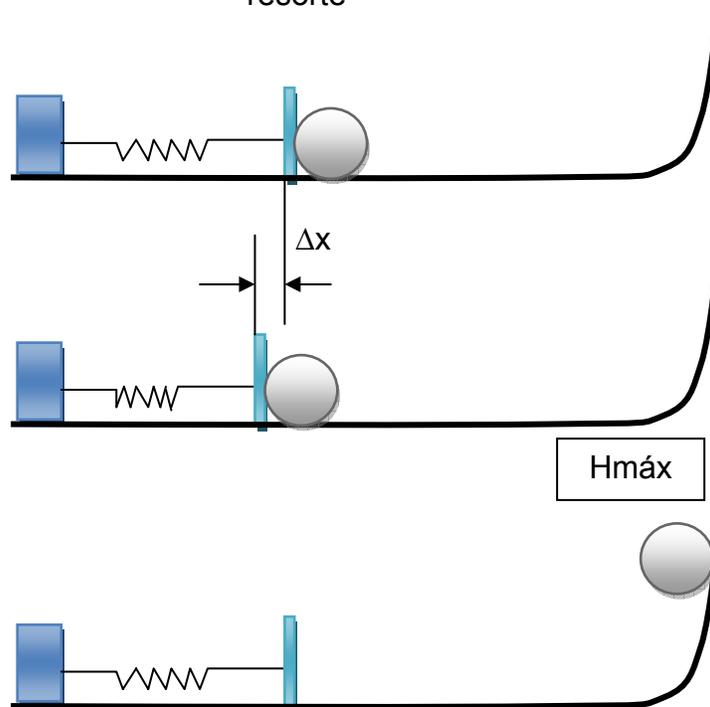
- d) Se procede a colocar el resorte en su soporte respectivo y en posición horizontal
- e) Se coloca el riel de manera que comience donde se encuentra la parte final del resorte el cual cuenta con una pequeña base.
- f) Se apoya la esfera metálica en la base y se comprime el resorte una distancia "x"

- g) Vamos a suponer que para esta parte la fricción no realiza trabajo al momento de desplazarse la esfera sobre el riel esto equivale a decir que la esfera experimenta un movimiento de rodadura pura por lo que la energía se conserva en cualquier punto del sistema así que soltamos la esfera y medimos la altura máxima “h” alcanzada por la esfera en el riel y decimos que la energía final = energía inicial.
- h) Proceder a calcular el trabajo hecho por el resorte y compararlo con el trabajo realizado por la gravedad así:

$$\frac{kx^2}{2} = mgh_{\text{máx}}$$

- i) Dar conclusión de los resultados obtenidos

**Figura 32.** Diagramas representativos para calcular el trabajo hecho por el resorte

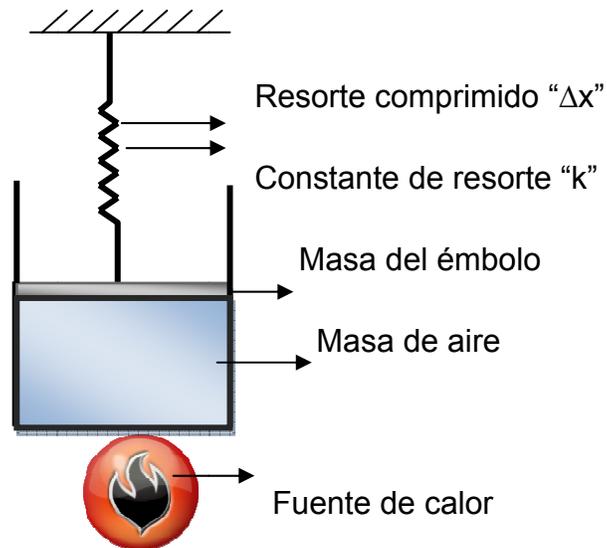


Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

Cuarta parte: cálculo de trabajo de frontera realizado por el sistema

- a) Colocar el equipo según se indica en el esquema del experimento
- b) Medir el diámetro “d” del cilindro
- c) Medir la masa “m” del émbolo
- d) Calcular entonces la presión existente inicialmente en el cilindro debida al peso del embolo por unidad de área del mismo
- e) Medir la altura a la que se encuentra el émbolo y calcular el volumen inicial
- f) Medir la temperatura ambiente existente
- g) Con estos datos calcular la masa “m” del aire contenida en el interior del cilindro valiéndonos de la ecuación de estado del gas ideal
- h) Agregar calor al cilindro hasta que el émbolo se desplace una cantidad “ $\Delta x$ ”
- i) Calcular el trabajo de frontera realizado por el sistema.

**Figura 33.** Representación de equipo para cálculo de trabajo sobre émbolo



Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

### 3.5 Primera ley con transferencia de calor aplicada a un proceso (calorimetría)

Objetivos:

- ❖ Presentar la primera ley de la termodinámica
- ❖ Determinar el calor específico de varias sustancias
- ❖ Aplicar la primera ley de la termodinámica a un proceso
- ❖ Estudiar la transferencia de energía en forma de calor
- ❖ Verificar experimentalmente la ley de conservación de la energía cuando no hay interacciones de trabajo

Equipo:

- ❖ 2 calorímetros
- ❖ Fuente de calor (estufa eléctrica preferiblemente)
- ❖ Recipiente metálico para hervir agua
- ❖ Termómetro con escala mayor a 100°C
- ❖ 1 litro de agua mineral fría
- ❖ 1 litro de agua mineral al tiempo.
- ❖ 1 balanza

Magnitudes físicas y variables termodinámicas a medir:

- ❖ La masa “m” de un calorímetro vacío
- ❖ La masa del calorímetro con agua fría
- ❖ La masa del calorímetro con agua caliente
- ❖ Las temperaturas  $T_{\text{cal}}$  y  $T_{\text{fría}}$  respectivas
- ❖ La temperatura  $T_{\text{final}}$  de equilibrio para la primera parte
- ❖ La masa “m” de cada una de las muestras metálicas
- ❖ La temperatura inicial de cada una de las muestras metálicas
- ❖ La masa de agua caliente para la segunda parte del experimento

- ❖ La temperatura de equilibrio del agua mas muestra metálica

Desarrollo Experimental:

Primera parte:

- Determine la masa de un calorímetro vacío,  $m_{cal}$  y llénelo con agua fría hasta aproximadamente un 30% de su capacidad.
- Determine la masa del calorímetro con agua,  $m_{cal} +$  agua fría.
- Hacer lo mismo con otro calorímetro y agua caliente (aproximadamente  $25^{\circ}C$  por encima de la temperatura ambiente).
- Medir  $T_{cal}$  y  $T_{fría}$ , las temperaturas correspondientes.
- Mezclar el agua caliente con el agua fría y revuelva con el termómetro hasta que se estabilice la temperatura.
- Anote la temperatura de la mezcla,  $T_{final}$ .
- Repita el experimento dos veces para distintas masas de agua a diferentes temperaturas.
- Usando las siguientes ecuaciones, calcule  $Q_{cal}$  y  $Q_{fría}$ , el calor intercambiado por el agua caliente y fría, respectivamente.

La primera ley expresa que:

$$Q - W = \Delta E_{sistema}$$

$$\Delta E_{sistema} = \Delta E_{potencial} + \Delta E_{cinética} + \Delta E_{interna}$$

Para este caso con  $\Delta E_{potencial} = \Delta E_{cinética} = 0$  además reconociendo que no hay ninguna interacción de trabajo  $W = 0$ ; Esto es debido a que el sistema se encuentra cerrado y cualquier trabajo que realicen las moléculas del agua al evaporarse y salir de la superficie líquida es muy pequeño en comparación con la cantidad de calor que se agrega al sistema además dichas moléculas no abandonan el sistema ya que como se mencionó anteriormente este es un sistema cerrado, entonces la primera ley adquiere la forma:

$$Q = \Delta u = m c_p \Delta T \text{ donde:}$$

$c_p \Delta T = \Delta u$   $c_p$  es el calor específico del agua a presión constante

$$c_p = 1 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$$

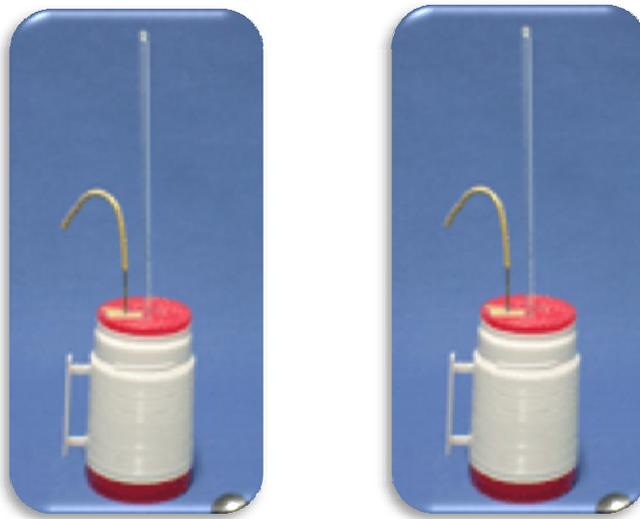
Entonces sabemos que:

$$Q_{\text{cal}} = (m_{\text{agua, cal}}) (\Delta T_{\text{cal}}) \cdot 1 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$$

$$Q_{\text{fría}} = (m_{\text{agua, fría}}) (\Delta T_{\text{fría}}) \cdot 1 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$$

De los datos experimentales, ¿podemos concluir que "se conserva la energía"?

**Figura 34.** Diagrama representativo de los calorímetros utilizados



Fuente: [www.fisicarecreativa.com](http://www.fisicarecreativa.com)

Segunda parte: cálculo del calor específico de varios metales

- Medir la masa de cada una de las muestras metálicas a saber (aluminio, hierro, bronce y cobre).
- Calentar uno de los objetos metálicos hasta una temperatura de aproximadamente unos  $80^\circ\text{C}$  (comprobar esto midiendo con el termómetro). esta será  $T_2$
- Medir la masa del agua " $m_{\text{agua}}$ " y su temperatura inicial la cual será  $T_1$

- d) Introducir el objeto caliente en el agua y revolver durante aproximadamente un minuto en este punto se puede considerar que el sistema alcanza el equilibrio térmico.
- e) Con el uso de la ecuación:  $Q_{\text{entra}} = - Q_{\text{sale}}$  el signo negativo es necesario ya que el lado derecho de la ecuación es una cantidad positiva por ser una entrada de energía y el lado izquierdo es negativo por ser energía cedida; Entonces la ecuación resultante sería:

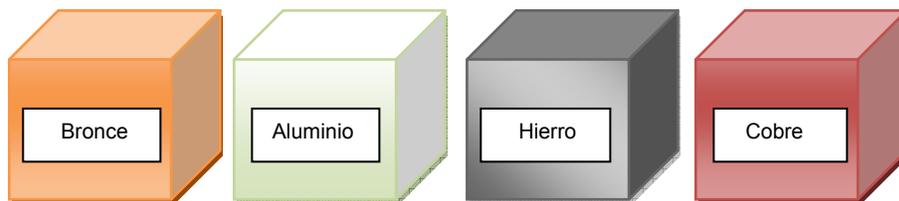
$$m_{\text{agua}} C_{\text{pagua}} (T_f - T_1) = m_{\text{objeto}} C_{\text{pobjeto}} (T_f - T_2)$$

Despejando para  $C_{\text{pobjeto}}$ :

$$C_{\text{pobjeto}} = m_{\text{agua}} C_{\text{pagua}} (T_f - T_1) / m_{\text{objeto}} (T_f - T_2)$$

- f) Repetir los pasos del inciso “a” al inciso “e” para cada muestra metálica
- g) Dar conclusión de los resultados obtenidos e indicar las simplificaciones y posibles fuentes de error.

**Figura 35.** Muestras de distintos metales para calcular su calor específico



Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

**Figura 36.** Calorímetro conteniendo muestra metálica



Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

### 3.6 Primera ley aplicada a volúmenes de control y a un proceso

Objetivos:

- ❖ Aplicar la primera ley de la termodinámica a un volumen de control
- ❖ Identificar un volumen de control
- ❖ Aplicar la ecuación de continuidad para un fluido incompresible
- ❖ Predecir experimentalmente la altura máxima a la que se puede bombear agua con una determinada bomba
- ❖ Utilizar la ecuación de energía de la forma planteada por Bernouilli
- ❖ Predecir experimentalmente el trabajo necesario para bombear una determinada cantidad de agua

Equipo:

- ❖ 2 depósitos de agua de gran capacidad

- ❖ 2 manómetros de carátula
- ❖ 1 bomba centrífuga pequeña
- ❖ Tubería de pvc de 1/2 pulgada para conducción del agua
- ❖ Cronómetro
- ❖ Depósito con volumen conocido para realizar aforo
- ❖ Nota: con todo este equipo se cuenta en la escuela de ingeniería mecánica

Magnitudes físicas y variables termodinámicas a medir:

- ❖ La potencia en hp de la bomba centrífuga
- ❖ El tiempo “t” para llenar un recipiente con volumen conocido
- ❖ Los diámetros de tubería a la entrada y salida de la bomba
- ❖ La presión de agua en la entrada de la bomba
- ❖ La presión de agua en la salida de la bomba
- ❖ La altura “h” entre el depósito de agua ubicado en la parte superior y la bomba centrífuga
- ❖ El tiempo “t” necesario para bombear el agua entre los dos depósitos

Desarrollo experimental:

Primera parte: primera ley aplicada a un volumen de control

- a) Conectar la bomba a uno de los depósitos grandes con agua
- b) Cebiar la bomba (para que no se dañe con el vacío provocado por la succión inicial)
- c) Encender la bomba y ponerla a trabajar
- d) Medir las diferencias de presiones a la entrada y salida de la bomba con los manómetros
- e) Tomar aforo del caudal que suministra la bomba de la siguiente manera:
  - Con un volumen conocido calcular el tiempo “t” en que se llena el recipiente
  - Calcular indirectamente el caudal mediante la ecuación:

Caudal = volumen / tiempo

- f) Aplicando el principio de continuidad para un fluido incompresible “agua” podremos conocer las velocidades tanto a la entrada como a la salida de la bomba con la siguiente ecuación:

$$Q_1 = Q_2$$

$$A_1V_1 = A_2V_2$$

- g) Medir los diámetros tanto a la entrada como salida de la bomba para encontrar cada una de las áreas y conocer sus velocidades
- h) Verificar la potencia de la bomba (según placa)
- i) Convertir la potencia en hp a unidades del sistema internacional con la conversión:

$$746 \text{ watt} = 1 \text{ hp}$$

- j) Introducir los valores en la ecuación de energía y despejar la cantidad

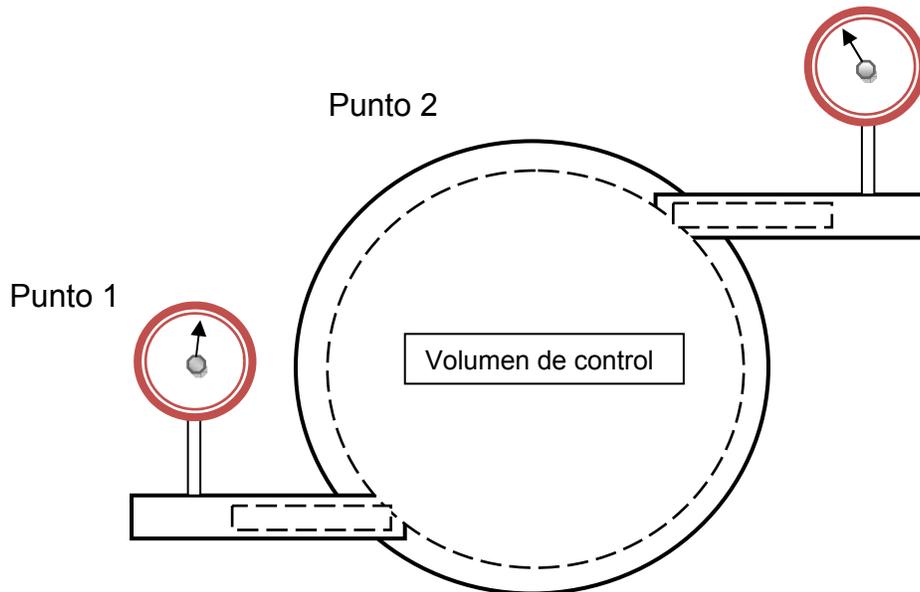
$$\Delta P = P_2 - P_1$$

$$\dot{W} = \dot{m} \left( \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} \right) \text{ donde } \dot{m} = \rho Q$$

- k) Comparar con los valores de presión encontrados medidos directamente de los manómetros y concluir acerca de los resultados obtenidos de la medición directa e indirectamente.
- l) Sabiendo que  $P = \rho g h$  entonces  $\Delta P = \rho g \Delta h$  despejando:

$\Delta h = \Delta P / \rho g$  ¿qué significado tiene  $\Delta h$ ?

**Figura 37.** Diagrama de bomba centrífuga con manómetros en la entrada y salida



Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

Segunda parte: primera ley aplicada a un proceso

- Llenar el depósito de agua colocado en la parte inferior del sistema
- Conectar la bomba centrífuga a las líneas de conducción de pvc
- Colocar los manómetros en las posiciones respectivas según diagrama del equipo utilizado
- Medir la altura "h" que existe entre la salida de la bomba centrífuga y el depósito de agua ubicado en la parte superior
- Conectar la bomba
- Cebiar la bomba (para evitar producido por la succión al inicio la daño)
- Encender la bomba y poner en marcha
- Anotar las lecturas de presión indicadas en los manómetros a la entrada y salida de la bomba respectivamente

- i) Tomar el tiempo que se tarda en bombear todo el volumen de agua hasta el depósito superior.
- j) Si se simplifica la ecuación de energía para un proceso sin interacciones de calor entonces se convierte en la ecuación de Bernoulli:  $Q - W = \Delta E$  se supondrá que las interacciones de calor son despreciables así que de esta manera la ecuación se simplifica y para un proceso adiabático:  $W = \Delta E$  por lo que la cantidad  $P + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{constante}$  (ecuación de Bernoulli).

$$P_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + W_b = P_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

Donde:  $\rho$  = densidad del agua,  $g$  = aceleración de la gravedad (9.8m/s<sup>2</sup> aprox.) y  $h$  = altura desde la bomba centrífuga hasta el punto donde está el depósito 2. Además la velocidad entre los puntos 1 y 2 es la misma ya que la tubería se elige de tal manera que tenga el mismo diámetro en toda su longitud, de ésta manera el trabajo de bomba quedaría determinado entonces mediante la ecuación:

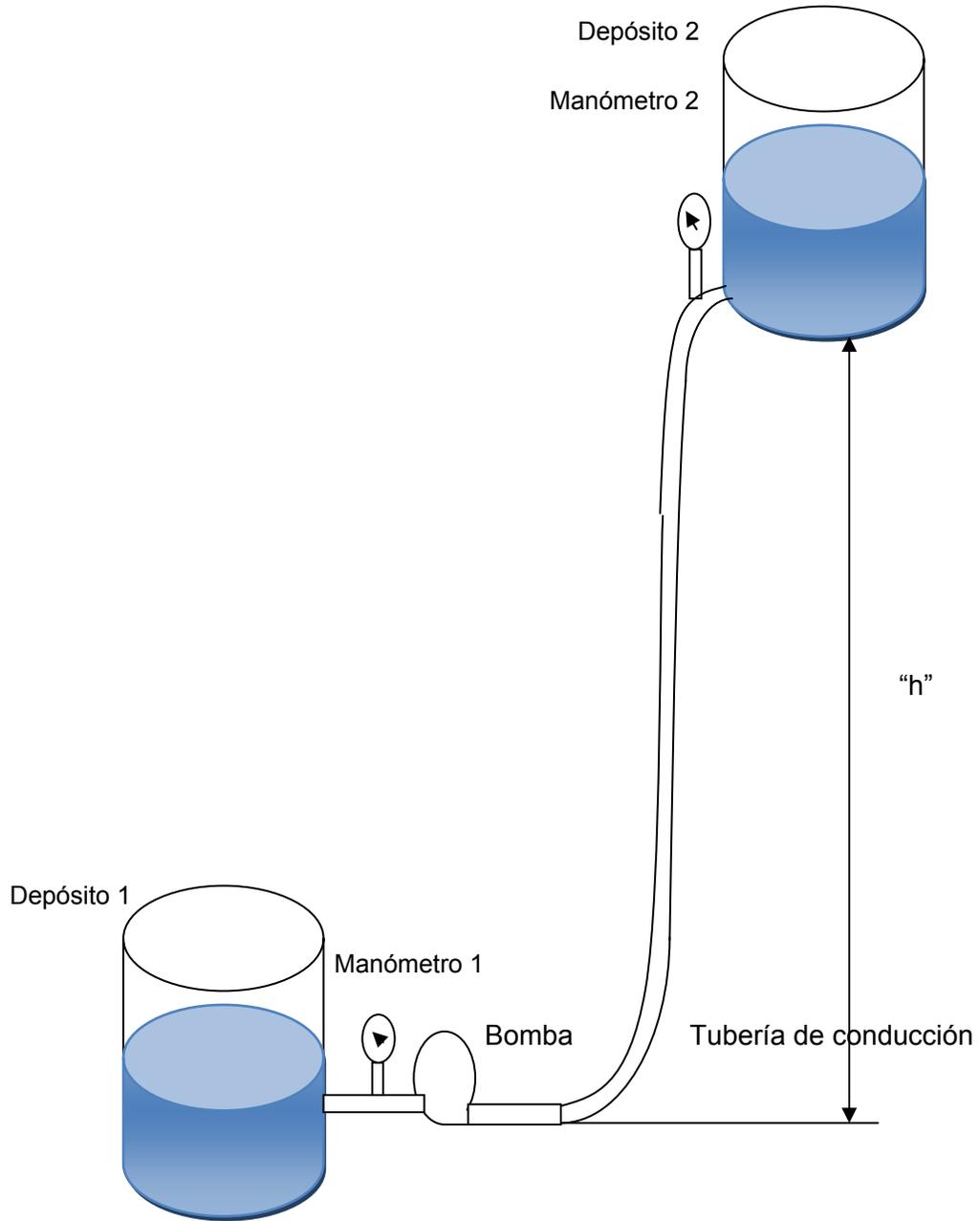
$$W_b = \rho gh_2 + P_2 - P_1$$

Si sabemos que  $\text{pot} = W_b / t$ ; entonces:  $\text{pot} * t = W_b$

El cual nos muestra el trabajo de bomba teórico.

- k) Con el tiempo “t” tomado en el que se bombeo todo el volumen de agua podemos calcular el trabajo empírico (real) con la ayuda de la potencia real de la bomba indicada en su placa de información.
- l) ¿Están próximos los valores teóricos y empíricos del trabajo necesario para bombear el agua al depósito superior?
- m) Dar conclusión e indicar las simplificaciones y posibles fuentes de error a lo largo de todo el experimento.

**Figura 38.** Diagrama esquemático de la segunda parte del experimento



Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

### 3.7 Intercambiador de calor (centro de investigaciones)

Objetivos:

- ❖ Comprender el principio de funcionamiento de un intercambiador de calor
- ❖ determinar la transferencia de calor desde un fluido a otro por conducción y convección
- ❖ Cálculo experimental de la tasa de flujo másico de vapor que se está generando
- ❖ Comprender como se condensa el vapor de agua en una tubería de conducción
- ❖ Aprovechar los recursos de equipo con que se cuenta en la facultad en el centro de investigaciones
- ❖ Lograr predecir el flujo másico necesario de agua de enfriamiento requerida

Equipo:

- ❖ Un equipo de intercambio de calor
- ❖ 1 balón de vidrio para calentamiento
- ❖ Fuente de calor
- ❖ 1 recipiente de vidrio para la recolección del condensado
- ❖ Mangueras para conexión de intercambiador de calor
- ❖ Agua de enfriamiento
- ❖ 1 termómetro
- ❖ 1 cronómetro
- ❖ 1 balanza
- ❖ Nota: actualmente en el centro de investigaciones de ingeniería se cuenta con una caldera y dos juegos de intercambiadores de calor por lo

que esta práctica se podría implementar en esta área sustituyendo la fuente de calor y el balón de vidrio para calentamiento por la caldera.

Magnitudes físicas y variables termodinámicas a medir:

- ❖ La masa “ $m$ ” del recipiente en forma de balón con una muestra de agua
- ❖ El tiempo “ $t$ ” desde que el agua contenida en el balón de vidrio empieza a hervir hasta un segundo tiempo “ $t_2$ ”(aproximadamente 5 a 7 minutos)
- ❖ La masa “ $m_2$ ” del recipiente una vez que han transcurrido estos minutos
- ❖ La temperatura “ $T_1$ ” del agua de enfriamiento a la entrada del intercambiador de calor
- ❖ La temperatura “ $T_1^b$ ” del vapor de agua a la entrada del intercambiador de calor
- ❖ La temperatura “ $T_2^b$ ” del condensado en el recipiente de recolección temperatura debe de ser de alrededor de unos  $80^\circ\text{C}$ )
- ❖ La temperatura “ $T_2$ ” de salida del agua de enfriamiento

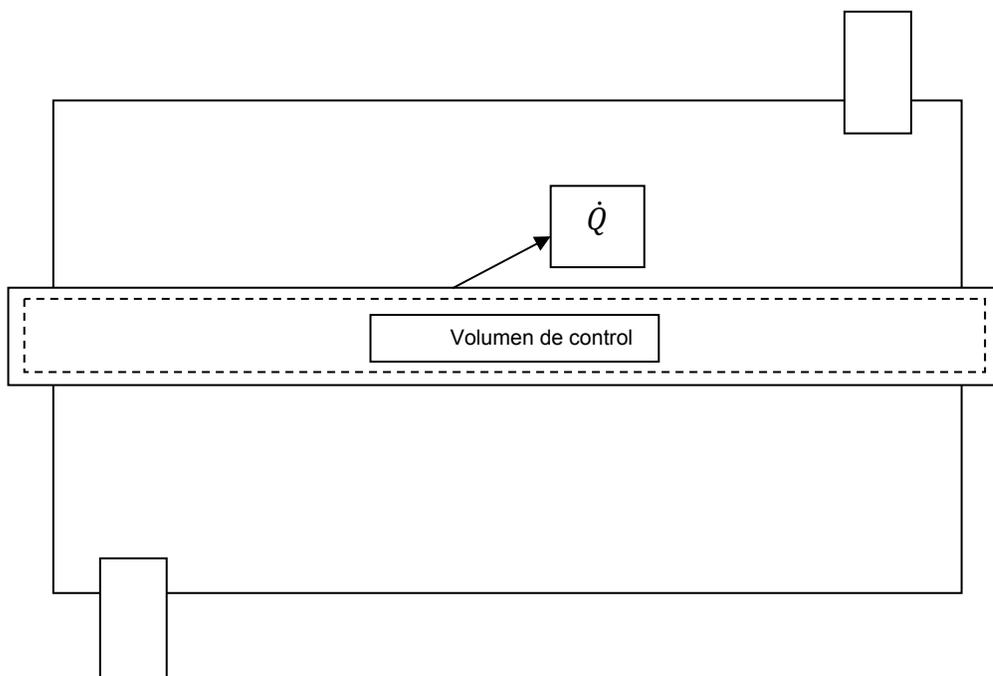
Desarrollo experimental:

- a) Se coloca un volumen de agua (aproximadamente 2 litros) en el recipiente de vidrio en forma de balón
- b) Se procede a medir la masa de este volumen + el recipiente
- c) Se enciende la fuente de calor
- d) Se espera hasta que se observe que el agua comienza a hervir
- e) Cuando el agua comienza a hervir se empieza a tomar el tiempo de aproximadamente 5 a 7 minutos
- f) Retirar el balón de vidrio de la fuente de calor y aislar su base para proceder a medir su masa “ $m_2$ ” en la balanza
- g) Como se ha evaporado cierta cantidad de agua en este intervalo de tiempo, entonces se procede a calcular el flujo másico que se estará generando de la siguiente forma:

$$\dot{m} = \Delta \text{masa} / \Delta \text{tiempo} = \text{masa inicial} - \text{masa final} / \text{tiempo transcurrido}$$

- h) Medir las temperaturas del agua de enfriamiento tanto a la entrada como a la salida del intercambiador de calor
- i) Medir la temperatura del vapor generado a la entrada del intercambiador de calor
- j) Medir la temperatura del condensado a en el recipiente de recolección del mismo
- k) Teniendo en cuenta el esquema del intercambiador de calor :

**Figura 39.** Diagrama de volumen de control para la primera parte



Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

Si suponemos que el intercambiador de calor está aislado; entonces no se transmite calor desde el sistema, solamente entre sus componentes y de la primera ley resulta:

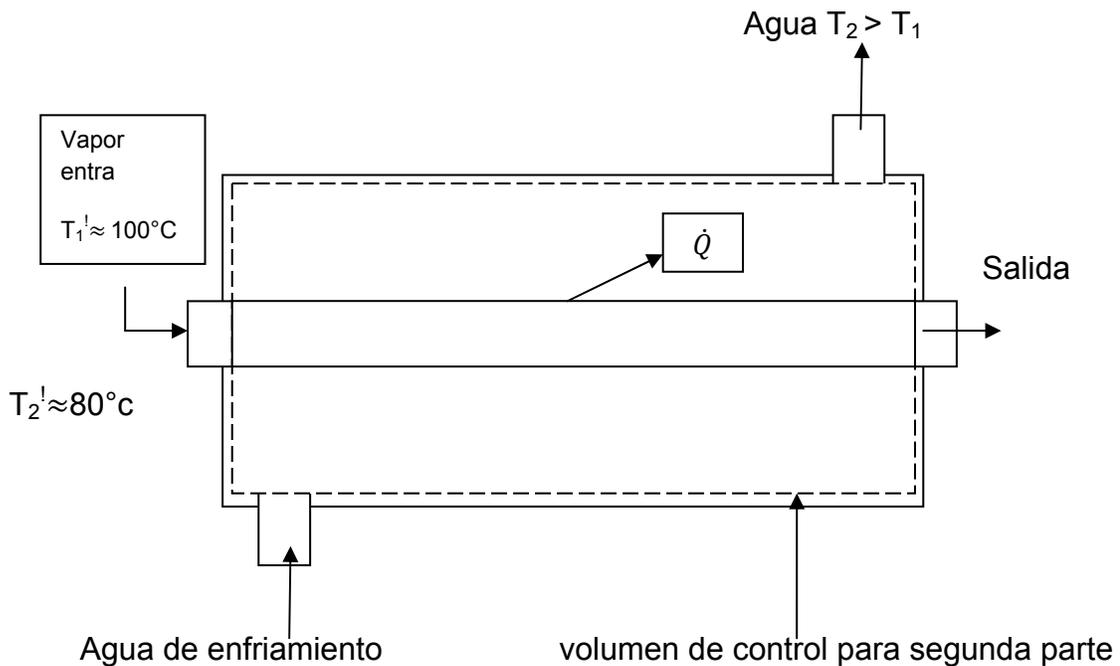
$$\dot{Q}_{\text{entra}} = - \dot{Q}_{\text{sale}}$$

Donde:  $\dot{Q}_{\text{entra}} = \dot{m}_{\text{agua enfriamiento}} c_p \Delta t$  como  $\dot{m} = \rho Q$

Q = caudal el cual puede ser medido con un aforo experimentalmente

$$\dot{Q}_{\text{sale}} = \dot{m}_{\text{vapor}} (h_s - h_e)$$

**Figura 40.** Diagrama de intercambiador de calor con volumen de control diferente



Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

$$\dot{m}_{\text{agua}} c_p T_2 - \dot{m}_{\text{agua}} c_p T_1 = - \dot{m}_{\text{vapor}} (h_s - h_e)$$

De donde necesitamos encontrar el  $\dot{m}_{\text{agua enfriamiento}}$  de una manera teórica:

$$\dot{m}_{\text{agua enfriamiento}} = \frac{\dot{m}_{\text{vapor}} (h_s - h_e)}{c_p T_1 - c_p T_2}$$

Ecuación que nos predice de una forma teórica el flujo másico necesario para lograr condensar el vapor en las condiciones dadas.

- l) Comparar el resultado del flujo másico obtenido teóricamente con el medido en el laboratorio a partir del aforo del caudal
- m) ¿Están de acuerdo los modelos teóricos con los resultados obtenidos experimentalmente?
- n) Conclusiones
- o) Indicar las simplificaciones realizadas al experimento y las posibles fuentes de error que influyen en los resultados obtenidos.

## **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 del mismo 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 1 que actualmente se encuentra entre 300 a 350. Para lograr abarcar esta cantidad de alumnos es necesario que los laboratorios sean impartidos los días martes y jueves en tres horarios, uno en la mañana de 11:00 a 12:40 horas y dos horarios en la tarde el primero de 14:00 a 15:40 horas y el segundo de 16:00 a 17:40 horas. En cada horario se asignarán un máximo de 60 alumnos, los cuales deberán ser divididos en dos grupos iguales (de aproximadamente 30 personas) de ésta manera las prácticas serán realizadas por cada grupo de estudiantes cada quince días y así se logrará abarcar a una población de 360 alumnos. Otros aspectos importantes a considerar son: los periodos de tiempo necesario para realizar las prácticas, el equipo necesario para poder llevarlas a cabo, el número sugerido de prácticas, las instalaciones y el personal docente que se necesitarán. Esta última parte se puede catalogar como los recursos necesarios, ahora bien, 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 seis prácticas de laboratorio que incluyen los temas que más se abarcan durante el desarrollo del curso teórico, mas es primordial saber que no todos los temas son abarcados en este

manual; por ejemplo no abarca los temas de entropía y exergía ya que son temas relacionados con propiedades hasta cierto punto “abstractas” para las cuales la realización de prácticas sería bastante compleja en cuanto al equipo para poderlas demostrar. A pesar de esto, 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 práctica número uno llamada “Medición de las variables Termodinámicas” puede dividirse en dos; la primera práctica debería abarcar entonces hasta el proceso de linealización del gráfico presión volumen y la segunda práctica debería ser enfocada solamente a los diferentes procesos y a la ejemplificación de la ley cero de la termodinámica. Así el número de prácticas que se sugiere puede ser de seis o siete. Se recomienda por motivos de tiempo que para el primer semestre del año el número prácticas sea de seis y para el segundo semestre del año perfectamente puede realizarse en siete o mantener el mismo número. Para el caso de escuela de vacaciones de los meses de junio y diciembre el número es recomendable que sea de seis.

La ponderación total de las prácticas se sugiere que sea de un 15% de la nota del curso. Como punto adicional es recomendable que los estudiantes realicen las practicas vistiendo una bata al igual que en los laboratorios del área de química esto para mejorar su presentación y como protección a su persona. El equipo de seguridad está en dependencia de cada práctica debido a las diferentes actividades que se realizarán; sin embargo como medida general se puede sugerir el uso obligatorio de gafas para todos y mallas para recoger el cabello en las mujeres.

## **4.2 Duración sugerida de prácticas**

Las prácticas están desarrolladas de tal manera que se puedan realizar en un periodo de tiempo no menor dos horas clase (1 hora con 40 minutos) ya que se desea que puedan ser elaboradas con el cuidado necesario por parte del estudiante, de tal manera que cualquier inquietud que se le presente pueda ser resuelta en el laboratorio, se sugiere este tiempo para que la toma de datos sea lo más precisa posible y así evitar los errores involuntarios que pudieran cometer los estudiantes, existen otros motivos por los cuales se requiere de este tiempo y no de una hora clase solamente, entre los que podemos mencionar que en todas las prácticas se necesita preparar un equipo el cual deberá montarse en la forma que se ilustra en cada una de las distintas prácticas , esto conlleva tiempo para el estudiante además recordando que en los laboratorios de termodinámica se tratan temas como calor, es necesario que los estudiantes tengan cuidado con los equipos que sirven como fuente de calor para evitar lesiones.

Antes de la realización de cada práctica es necesario que el ingeniero o auxiliar encargado del laboratorio de una presentación, explicación y de ser necesario una demostración de la manera de armar el equipo y de cómo realizar las mediciones, esto para facilitarle al estudiante la comprensión de lo que hará durante el desarrollo del laboratorio. El tiempo sugerido para realizar esto es de unos 20 minutos de tal manera que los estudiantes tendrán un periodo de tiempo de cuando mínimo 1 hora para la toma de datos y para dejar el equipo limpio y ordenado nuevamente.

## **4.3 Cronogramas de actividades**

Se presentan tres cronogramas de actividades los primeros dos están hechos de tal manera que las prácticas de laboratorio se realicen en un número

de seis para ambos semestres, sin embargo como ya se ha mencionado; el número puede ser de siete para el segundo semestre, por lo tanto se sugiere un tercer cronograma para el caso que se deseara implementar de esta manera.

**Figura 41.** Cronograma sugerido de prácticas para primer semestre

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA													
CALENDARIZACIÓN DE LABORATORIOS DE TERMODINÁMICA 1 PARA PRIMER SEMESTRE													
PRÁCTICA	ENERO			FEBRERO			MARZO			ABRIL			MAYO
	2da. semana	3er. semana	4ta. semana	1er. semana	2da. semana	3er. semana	4ta. semana	1er. semana	2da. semana	3er. semana	4ta. semana	5ta. semana	6ta. semana
Medición de las variables termodinámicas													
Sustancias puras (cambio de fase del agua)													
Trabajo													
Primera ley con transferencia de calor aplicada a un proceso (calorimetría)													
Primera ley aplicada a volúmenes de control y a un proceso													
Intercambiador de calor													

Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

Figura 42. Cronograma sugerido de prácticas para segundo semestre

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA													
CALENDARIZACIÓN DE LABORATORIOS DE TERMODINÁMICA 1 PARA SEGUNDO SEMESTRE													
PRÁCTICA	JULIO			AGOSTO			SEPTIEMBRE			OCTUBRE			NOVIEMBRE
	1ra semana	2da semana	3ra semana	1ra semana	2da semana	3ra semana	1ra semana	2da semana	3ra semana	1ra semana	2da semana	3ra semana	4ta semana
Medición de las variables termodinámicas													
Sustancias puras (cambio de fase del agua)													
Trabajo													
Primera ley con transferencia de calor aplicada a un proceso (calorimetría)													
Primera ley aplicada a volúmenes de control y a un proceso													
Intercambiador de calor													

Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

**Figura 43.** Cronograma sugerido de 7 prácticas para segundo semestre

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA		CALENDARIZACIÓN DE LABORATORIOS DE TERMODINÁMICA 1 PARA SEGUNDO SEMESTRE														
		JULIO			AGOSTO			SEPTIEMBRE			OCTUBRE			NOVIEMBRE		
PRÁCTICA	2da semana	3ra semana	4ta semana	1ra semana	2da semana	3ra semana	4ta semana	1ra semana	2da semana	3ra semana	4ta semana	1ra semana	2da semana	3ra semana	4ta semana	
	Medición de las variables termodinámicas # 1															
Medición de las variables termodinámicas # 2																
Sustancias puras (cambio de fase del agua)																
Trabajo																
Primera ley con transferencia de calor aplicada a un proceso (calorimetría)																
Primera ley aplicada a volúmenes de control y a un proceso																
Intercambiador de calor																

Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

#### **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 en su adquisición sea mínimo. También debe de considerarse las instalaciones y el personal docente necesario para integrar las necesidades correspondientes.

##### **4.4.1 Equipo**

Éste 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 una de ellas, 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 de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala para lograr obtener el máximo provecho de los recursos disponibles, se sobreentiende que todas las instalaciones aquí mencionadas pertenecen a esta universidad. Se recomienda que la primera práctica sea desarrollada en la Escuela de Ingeniería Mecánica en los salones adjuntos a los laboratorios de procesos de manufactura, para poder realizarlas es necesaria la adquisición de equipo de laboratorio el cual como ya se mencionó anteriormente es un equipo económico y de fácil adquisición. La segunda

práctica puede desarrollarse perfectamente en el Centro de Investigaciones el cual consta con el equipo necesario para el desarrollo de esta, la tercera y cuarta práctica se sugiere se realice con el apoyo de los laboratorios de física del edificio S-11 ya que aquí se cuenta con la mayoría del equipo requerido para dichas prácticas, sin embargo estas deberán ser desarrolladas en otras instalaciones. La quinta práctica está planeada para poderse desarrollar en el parque de energía renovable de la escuela de ingeniería mecánica que cuenta con la mayoría del equipo necesario, sin embargo deberá adquirirse equipo de medición adicional. La última práctica está enfocada para desarrollarse también en el centro de investigaciones de la facultad sin embargo también podría desarrollarse en la escuela de ingeniería mecánica pero para ello deberá adquirirse el equipo correspondiente.

#### **4.4.3 Personal docente**

Es esencial que se cuente con una persona debidamente capacitada y familiarizada con el equipo y los procesos termodinámicos para poder dirigir las prácticas de laboratorio, la cual puede ser un ingeniero o un auxiliar de clase con sólidos conocimientos del tema. Esta persona deberá ante los estudiantes presentar el tema, dar una breve explicación de la teoría que se pretende comprobar y de ser posible realizar una demostración de la forma cómo deben realizarse los experimentos y la toma de datos, también estará encargada de mantener el orden dentro del laboratorio así como señalar los cuidados al equipo y las medidas de seguridad que se deben tomar en consideración, al encargado los estudiantes deberán entregar siempre después de la realización de cada práctica una hoja con los nombres y número de carné de los integrantes del grupo (no mayor de 5 individuos por cada grupo y un máximo de 6 grupos por periodo de laboratorio) y los datos de todas las mediciones realizadas.

## **4.5 Recursos disponibles**

### **4.5.1 Centro de Investigaciones**

Éste se encuentra localizado en el edificio T-5 de la Facultad de Ingeniería y actualmente es utilizado para laboratorios del área de química para la comprensión de las clases termodinámicas correspondientes al pénsum de dicha carrera.

Los recursos con los que se cuentan en el centro de investigaciones pueden ser utilizados para el desarrollo de las prácticas dos y seis presentadas en este instructivo de laboratorio, ya que acá se cuenta con una caldera con sus instrumentos de medición en buen estado y además se poseen tres juegos de intercambiadores de calor, de esta manera resulta más que satisfactorio el equipo disponible y es uno de los objetivos de este proyecto el poder aprovechar dichos recursos. A continuación se presentan ilustraciones del equipo y las instalaciones:

**Figura 44.** Vista frontal de caldera en centro de investigaciones (USAC)



Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

**Figura 45** Intercambiadores de calor en centro de investigaciones (USAC)



Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

#### 4.5.2 Parque de Energía Renovable Escuela de Ingeniería Mecánica

Se encuentra ubicado en la Escuela de Ingeniería Mecánica y acá se cuenta con equipo donde se analizan las maneras para aprovechar la energía con fuentes naturales, como la energía hidráulica. Se utilizará éste para la realización de la práctica número cinco del presente instructivo el cual posee la mayoría de equipo necesario para dicho desarrollo. A continuación se presentan ilustraciones de este parque:

**Figura 46.** Parque de Energía Renovable Escuela de Ingeniería Mecánica



Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

### 4.5.3 Laboratorios de Física S-11

Actualmente estas instalaciones son utilizadas para desarrollar los laboratorios de Física básica, Física 1, Física 2 y Física 3. De esta forma lo que se pretende aprovechar son los recursos de equipo con los que actualmente se cuenta en el área de FISILAB ya que las instalaciones se mantienen en un uso continuo para cubrir los laboratorios de los cursos mencionados anteriormente. En estos laboratorios se cuenta con parte del equipo necesario para la realización de la práctica número tres sin embargo, será necesaria la adquisición de equipo adicional. La práctica número cuatro propuesta en este instructivo está encaminada a poderse realizar totalmente con el equipo disponible en estas instalaciones. De esta manera se estarían aprovechando los recursos ya utilizados anteriormente cuando el estudiante cursaba el área de ciencias. Acá vemos ilustraciones del equipo:

**Figura 47.** Equipo disponible para práctica de calorimetría



Fuente: Edwin Antonio Andino Paz

## **4.6 Presentación de reportes científicos**

### **4.6.1 Importancia de presentar un reporte científico**

Es importante que, una vez el estudiante ha cursado cada una de las prácticas de laboratorio, prepare un informe detallado con los datos recopilados con la ayuda del instructivo guía. La importancia de realizar estos reportes radica en que capacitan al estudiante para el análisis de datos empíricos recopilados por él mismo y con éstos después de determinados cálculos se obtienen resultados, los cuales podrá comparar con la teoría y verificar la validez de los mismos. Este ejercicio es importante debido a que en su mayoría los procesos industriales son analizados con base en la recopilación de datos y la toma de decisiones se basa en su interpretación. Por otra parte, al presentar los reportes científicos, el estudiante desarrollará la capacidad de presentar sus resultados de una manera ordenada y que pueda ser comprendido por otras personas. Además, realizará sugerencias y posibles mejoras al experimento y también desarrollará su habilidad para redactar conclusiones. En síntesis; la presentación de reportes científicos de laboratorio fortalecerá las capacidades de los estudiantes en lo concerniente a la Ingeniería.

### **4.6.2 Contenido sugerido de un reporte científico**

Es muy amplia la variedad de criterios para considerar el contenido que un reporte científico debe poseer, esto se puede comprobar incluso dentro de

nuestra propia facultad, donde el contenido requerido de los reportes de laboratorio presentados en el área de química son muy diferentes a los requerimientos del área de física, sin embargo, se puede sugerir un contenido básico de los puntos que deben de tratarse en un reporte científico con el objetivo de capacitar al estudiante y además lograr una adecuada comprensión de lo realizado en los laboratorios, estos puntos son descritos a continuación:

#### **4.6.2.1 Introducción**

Esta es la parte que nos presentará en una forma resumida la información que posee nuestro reporte científico, de que se trata nuestro estudio, la importancia de haber realizado dichas experimentaciones así como también una justificación del por qué es necesario poseer los conocimientos adquiridos en la práctica considerada y el alcance de la misma. Una buena introducción es aquella que nos dice los resultados que se obtuvieron, la principal conclusión a la que se llegó con estos resultados y si se llegó o no a verificar la teoría.

#### **4.6.2.2 Objetivos**

Deberán estar divididos en la siguiente manera:

- Un objetivo General: se presenta lo que primordialmente se busca con la realización de la práctica y debe ser resumido (no muy extenso), congruente, contundente y claro.
- Objetivos Específicos: en estos se detallan los puntos clave presentados en el objetivo general haciendo énfasis en otras partes importantes de la

realización del laboratorio. No hay un número para la cantidad de objetivos específicos, ya que varían según lo extenso del tema, sin embargo un número de tres es recomendable.

#### **4.6.2.3 Hipótesis**

Una hipótesis es una explicación tentativa de un hecho, es presentar una suposición lógica por adelantado de los resultados que se obtendrán los cuales como se menciona deben ser congruentes y lógicos, no elegidos al azar sino fundamentados en la teoría. Es dar nuestro punto de vista acerca de lo visto durante el desarrollo práctico que pensamos nos llevará a obtener determinado resultado.

#### **4.6.2.4 Marco Teórico**

Se trata de realizar una investigación detallada y recopilar la información acerca del tema, después presentar una síntesis del contenido más importante y no solamente citar párrafos de un libro o de una página web, sino los aspectos más trascendentales de nuestra investigación que facilitarán a cualquier otra persona que lea el informe la comprensión del mismo. No tiene que ser tan corto como para dejar cabida a ambigüedades ni tan extenso como para desmotivar al lector para su estudio.

#### **4.6.2.5 Desarrollo Experimental**

En esta parte se adjuntarán los datos recopilados durante el laborat, así como también se incluirán todos los cálculos y gráficas correspondientes, un diagrama del equipo utilizado en el laboratorio y las magnitudes físicas y termodinámicas a medir. Es quizá la parte más trabajosa del contenido del reporte científico y deberá ser presentada en forma clara, incluyendo todas las ecuaciones utilizadas y debe tratarse de no simplificar demasiado los cálculos ya que la persona que los califique podría no comprender en su totalidad la forma en que se procedió a realizarlos.

#### **4.6.2.6 Resultados**

En esta sección se debe presentar en forma ordenada los resultados obtenidos de los cálculos realizados en el desarrollo experimental en forma de tablas debidamente identificadas, debe darse una comparación de los resultados de la práctica y los resultados teóricos.

#### **4.6.2.7 Conclusiones**

En ellas deben presentarse nuestras observaciones de los resultados, deben ir de la mano de los objetivos (llenó nuestras expectativas el laboratorio) y de la hipótesis (se corroboró la validez de la hipótesis o hay que replantearla) las conclusiones son quizá la parte más importante del reporte científico ya que

reflejan nuestro criterio propio, nuestra forma de interpretar resultados y nuestras opiniones como futuros ingenieros. En ellas se pueden adjuntar cualquier mejora que se sugiera implementar en el laboratorio y hacer énfasis en las posibles fuentes de error que influyeron en nuestros resultados.

#### **4.6.2.8 Fuentes de consulta**

Se trata de los libros de texto, páginas web, folletos o cualquier otra información que hayamos consultado para realizar nuestro marco teórico deberán presentarse en cualquiera de los sistemas especiales APA, IICA o cualquiera que maneje formatos reconocidos, además deberán estar ordenadas alfabéticamente.



## CONCLUSIONES

1. Finalizado el presente trabajo de graduación se han desarrollado prácticas de laboratorio las cuales al realizar el estudiante podrá adquirir un aprendizaje integral teórico- práctico.
2. Se verificó que se aprovecharán los recursos con los que cuenta actualmente la Facultad de Ingeniería. Recursos de instalaciones y equipo que al utilizarse beneficiarán a los estudiantes que decidan cursar la asignatura de termodinámica 1, la cual es la base del área térmica del pènsum de estudio de la carrera de Ingeniería Mecánica.
3. Con la realización de este instructivo, se ha comprobado 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.



## RECOMENDACIONES

Pensando en la óptima implementación de este instructivo para llevar a cabo las prácticas de laboratorio se dan las siguientes recomendaciones:

1. Organizar los laboratorios en secciones de manera que el número de estudiantes por cada una no sea mayor a 60 esto con el fin de que se tenga mejor control en el desarrollo de las prácticas.
2. Desarrollar una guía de las normas de seguridad que el estudiante deba seguir dentro de las instalaciones donde se realizarán las prácticas, para evitar accidentes en el grupo.
3. Mantener actualizados los conocimientos de los instructores de laboratorio mediante capacitación continua.
4. Suministrar equipo de laboratorio que se encuentre en óptimas condiciones para reducir los riesgos de falla en los experimentos y también los riesgos de lesiones en los estudiantes debido a equipo defectuoso.
5. Para evitar extravíos del equipo se sugiere que se realicen inventarios del mismo por cada sección de laboratorio
6. 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 la clase teórica



## BIBLIOGRAFÍA

1. Burns Ralph A. **Fundamentos de Química**. 4ta. Edición, México, Editorial PEARSON, 2003.
2. Potter Merle C. / Scott Elaine P. **Termodinámica**. 1era. Edición, México, Editorial THOMSON, 2006.
3. Sears, Zemansky, Young, Freedman. **Física Universitaria**. 11ava. Edición, México, Editorial ADDISON, Vol. 1, 2004.
4. Serway, Raymond. **Física para Ciencias e Ingeniería**. 6ta. Edición, México, Editorial THOMSON, Vol. 1, 2006.
5. [http://www.fisicarecreativa.com/libro/indice\\_exp.htm](http://www.fisicarecreativa.com/libro/indice_exp.htm)
6. <http://search.conduit.com/ResultsExt.aspx?ctid=CT1351364&q=experimentos%20de%20termodinamica&SearchSource=15>



## ANEXOS

Tabla de calores específicos de algunas sustancias

Sustancia	Calor específico J/kg*°C
Hierro	448
Aluminio	900
Cobre	387
Bronce	380
Plata	234
Oro	129
Vidrio	837
Plomo	128
Germanio	322
Berilio	1830
Mármol	860
Madera	1700
Alcohol	2400
Hielo	2090
Agua	4186
Vapor	2010

Nota: los valores presentados en la tabla están dados a una temperatura de 25°C y a presión atmosférica.

