

# PRINCIPIOS DE TERMODINÁMICA

## Conceptos y aplicaciones



### **Autores:**

Edison Fernando Calderón Freire

Cristian David Redroban Dillon

Verónica Janeth Argüello Pazmiño

Alex Fernando Barrionuevo Remache

# PRINCIPIOS DE TERMODINÁMICA

## Conceptos y aplicaciones

**Autores:**

Edisson Fernando Calderón Freire

Cristian David Redroban Dillon

Verónica Janeth Argüello Pazmiño

Alex Fernando Barrionuevo Remache

**TÍTULO DE LA OBRA:**

PRINCIPIOS DE TERMODINÁMICA: conceptos y aplicaciones

**Editor**

Ing. Eduardo Lascano L.

**Autores**

Edisson Fernando Calderón Freire

Cristian David Redroban Dillon

Verónica Janeth Argüello Pazmiño

Alex Fernando Barrionuevo Remache

**Corrección Idiomática y de estilo**

Lic. Shirley Cedeño Medranda

© **COPY, 2024**

1RA EDICIÓN

**ISBN DIGITAL:** 978-9942-805-25-6

**No. de Registro de derecho de Autor SENADI:** En trámite

**EDICIÓN - IMPRESIÓN****Edicumbre Editorial Corporativa**

Calle: Grecia N32-175 y Granja – EDIFICIO EL NOGAL Piso 2

Tel: 0983855681

E-mail: edicumbreeditorial@hotmail.com

**Diseño Portada**

E-Idea Omwin S. A.

**Diseño Interior**

E-Idea Omwin S. A.

**Editorial:**

E-Idea Omwin S. A.

**Área:**

Derecho Internacional Público

**Páginas:**

162

Reservados todos los derechos. Está prohibido, bajo las sanciones penales y el resarcimiento civil previstos en las leyes, reproducir, registrar o transmitir esta publicación, íntegra o parcialmente, por cualquier sistema de recuperación y por cualquier medio, sea mecánico, electrónico, magnético, electroóptico, por fotocopia o por cualquiera otro, sin la autorización previa por escrito al Editorial E-Idea Omwin S. A.

## DEDICATORIA

Esta obra está fundamentada en los conceptos más básicos de los principios de los procesos termodinámicos. Somos lo que hacemos, y a cada acción le corresponde una reacción. Es por ello que el fruto de este esfuerzo académico es dedicado a mi familia que son quienes son mi pilar y apoyo constantes. A ti mi Ale querida.

*Edisson*

Dedico este libro a mi esposa, mi hijo y mi familia, por ser mi pilar inquebrantable y fuente de inspiración constante. A mis amigos, por su apoyo en cada paso del camino. Y a todos aquellos que buscan transformar el mundo a través del conocimiento y la reflexión.

*Cristian*

A mis hijos, mi esposo, mis padres, mis hermanos y a toda mi familia. Por inspirarme a cumplir este sueño.

*Verónica*

Dedico este libro a mi esposa, mis hijas y mi familia, por ser mi fuente de inspiración constante, por su apoyo en cada paso del camino, a todos aquellos que buscan transformar el mundo a través del conocimiento y en especial ti mi ángel querido y nunca olvidado "JO".

*Alex*

## AGRADECIMIENTO

La presente obra ha sido fruto de varios años de esfuerzo y sacrificio, este es el resultado de la meta inalcanzable por buscar iluminar los pensamientos críticos de la juventud actual.

*Edisson*

Agradezco profundamente a mi familia, amigos y lectores por su apoyo, paciencia y motivación a lo largo de este proceso. Este libro es el fruto no solo de mi esfuerzo, sino también de la colaboración y confianza de quienes siempre han creído en mí.

*Cristian*

Agradezco profundamente a Dios, a mis padres, a mi esposo y a mis hijos, así como a toda mi familia y amigos, quienes me han brindado constante motivación durante el desarrollo de esta investigación y han seguido de cerca cada avance. Su confianza en el resultado final ha sido invaluable.

*Verónica*

Agradezco profundamente a Dios, a mi familia, quienes me han brindado constantemente motivación durante el desarrollo de esta investigación y han seguido de cerca cada avance. Su confianza y comprensión se ve reflejada en el producto final.

*Alex*

# BIOGRAFÍA

## EDISSON FERNANDO CALDERÓN FREIRE

Ingeniero Mecánico, graduado en la Escuela Politécnica Nacional (EPN), Master Universitario en Ingeniería Procesado y Caracterización de Materiales, título obtenido en la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Experiencia en el campo del control de calidad, ensayos no destructivos, en la fabricación de recipientes de presión bajo normativa ASME. Técnico capacitado en la inspección, fiscalización y certificación de estructuras metálicas, destinadas al transporte de pasajeros. Profesor a tiempo completo en el Departamento de Materiales de la Escuela Politécnica Nacional, Coordinador del Laboratorio de Soldadura, competente en la capacitación y certificación de procedimientos de soldadura, además enfocado en la ejecución de proyectos de investigación relacionados con el procesamiento, caracterización de materiales metálicos y la síntesis de materiales compuestos.



CORREO: edisson.calderon@epn.edu.ec

ORCID: 0000-0002-3955-8162

## CRISTIAN DAVID REDROBAN DILLON

Ingeniero Automotriz, graduado en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Master Universitario en Seguridad Industrial Mención Prevención de Riesgos, título obtenido en la Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH). Gratamente docente en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Automotriz, con amplia experiencia en docencia académica impartiendo cátedras como Sostenibilidad Ambiental, Álgebra Lineal, Integración Curricular, Taller Automotriz, forma parte del Grupo de Investigación de Mantenimiento (GIMAN) de la ESPOCH.

CORREO: [David.redroban@epoch.edu.ec](mailto:David.redroban@epoch.edu.ec)

ORCID: 0000-0003-3543-9390



## VERÓNICA JANETH ARGÜELLO PAZMIÑO

Verónica Janeth Argüello Pazmiño es una profesional ecuatoriana con formación sólida en ingeniería de sistemas informáticos, complementada con dos títulos de maestría. Obtuvo su primer título en Ingeniería en Sistemas Informáticos en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en 2014. Posteriormente, continuó sus estudios de posgrado, obteniendo una Maestría en Tecnologías de la Información con mención en Seguridad de Redes y Comunicaciones en la Universidad Particular Internacional SEK en 2018, y una Maestría en Matemática con mención en Modelación y Docencia en 2022, también en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

En su carrera académica, ha desempeñado diversos cargos docentes en prestigiosas instituciones de educación superior, tales como la Universidad Estatal de Bolívar y la Universidad de las Américas. Ha impartido materias en los campos de matemáticas, bioestadística, álgebra lineal, ecuaciones diferenciales, cálculo diferencial e integral, y estadística educativa, destacándose por su enfoque en la enseñanza de herramientas matemáticas aplicadas y su integración con tecnologías de la información. Además, ha sido ponente en varios congresos académicos nacionales e internacionales, en temas relacionados con modelos matemáticos, análisis de datos y tecnologías de la información aplicadas.

También ha realizado investigaciones destacadas, entre las que sobresalen sus trabajos en modelos lineales generalizados para el análisis de defunciones en menores de un año y estudios relacionados con sistemas informáticos en salud. Ha publicado en diversas revistas académicas como la Revista Alfa Publicaciones, la Revista Polo del Conocimiento y la Revista Ibérica de Sistemas y Tecnologías de la Información. Uno de sus libros más destacados es Modelos lineales generalizados para el análisis de defunciones en menores de un año en



## **PRINCIPIOS DE TERMODINÁMICA: CONCEPTOS Y APLICACIONES**

la región Sierra del Ecuador (2023), que refleja su enfoque multidisciplinario entre matemáticas y salud.

Con amplia experiencia tanto en docencia como en investigación, ha contribuido significativamente al ámbito académico en Ecuador, impulsando el uso de tecnologías digitales en la educación y promoviendo el desarrollo de competencias en el área de la matemática aplicada y la estadística.

CORREO: [edisson.calderon@epn.edu.ec](mailto:edisson.calderon@epn.edu.ec)

ORCID: 0000-0002-5508-9538

## ALEX FERNANDO BARRIONUEVO REMACHE

Alex Fernando Barrionuevo Remache es un profesional ecuatoriano con formación sólida en ingeniería automotriz graduado en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Magister en Seguridad Industrial y Salud Ocupacional, mención Gestión de Riesgos por la Universidad Nacional de Chimborazo.

En su trayectoria profesional ha desempeñado diversos cargos prestigiosos tales como: Hospital General Alfredo Noboa Montenegro de la ciudad de Guaranda como técnico de Seguridad Industrial, CNEL-EP Unidad de Negocio Bolívar como Líder de Responsabilidad Social, Seguridad Industrial y Salud Ocupacional, Consorcio La Roca y Vinueza & Vinueza Construcciones como residente de seguridad industrial, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo como analista de Seguridad Industrial, actualmente gerente propietario de la empresa AE Soluciones Integrales, dentro del ámbito de la educación superior es docente en la Universidad Estatal de Bolívar impartiendo las cátedras de matemáticas, bioestadística, física, transferencia de calor, mecánica de fluidos, termodinámica, cálculo diferencial e integral, destacándose por su enfoque en la enseñanza de nuevas herramientas aplicadas y su integración con tecnologías de la información. Además, ha sido ponente en varios congresos académicos nacionales e internacionales, en temas relacionados con la seguridad industrial, física y su aplicación.

Con extensa experiencia tanto en la parte técnica, docencia e investigación, lo cual ha contribuido significativamente al ámbito académico en Ecuador.

CORREO: [albarrionuevo@ueb.edu.ec](mailto:albarrionuevo@ueb.edu.ec)

ORCID: 0009-0006-2617-801X



# PRÓLOGO

La termodinámica, como rama fundamental de la física, juega un papel crucial en la comprensión y desarrollo de múltiples disciplinas de la ingeniería y la ciencia. A través de sus principios y leyes, la termodinámica nos permite analizar y prever el comportamiento de sistemas en condiciones diversas, desde los motores que impulsan la tecnología moderna hasta los procesos naturales que sustentan la vida en nuestro planeta.

Este libro se ha concebido como una herramienta integral para estudiantes, profesionales e investigadores que buscan profundizar en los conceptos esenciales de la termodinámica. A lo largo de sus capítulos, el lector encontrará una exposición detallada y rigurosa de las propiedades termodinámicas, los principios de conservación de la energía, y los procesos relacionados con gases ideales y sistemas de dos fases. Cada sección está diseñada para ofrecer no solo una base teórica sólida, sino también aplicaciones prácticas que faciliten la comprensión y el dominio de los conceptos.

El contenido de esta obra está organizado de manera lógica y progresiva, comenzando con las definiciones y propiedades fundamentales en el Capítulo 1, y avanzando hacia temas más complejos como la transferencia de calor, las relaciones de energía, y los procesos en sistemas abiertos y cerrados. Los capítulos finales abordan los ciclos de potencia y la segunda ley de la termodinámica, brindando al lector una visión completa de los sistemas térmicos y su análisis.

Además, se ha puesto especial atención en la inclusión de gráficos, figuras y tablas que complementan la información teórica, facilitando la visualización y comprensión de los conceptos presentados. Los ejercicios prácticos y ejemplos de aplicación permiten al lector reforzar el aprendizaje, aplicando los principios termodinámicos a situaciones reales de la ingeniería.

Esperamos que esta obra se convierta en una referencia esencial para aquellos que se adentran en el estudio de la termodinámica, así como para los profesionales que buscan un recurso confiable para la consulta y aplicación de estos principios en su práctica diaria. La termodinámica no es solo una ciencia del calor y la energía, sino una herramienta indispensable para innovar y avanzar en las fronteras del conocimiento técnico y científico.

*Edisson; Cristian; Verónica y Alex*

# INTRODUCCIÓN

La termodinámica, uno de los campos más fundamentales de la física, desempeña un papel central en la comprensión de los procesos energéticos que controlan los sistemas naturales y tecnológicos. La disciplina ha evolucionado significativamente desde su nacimiento en el siglo XIX, proporcionando las herramientas conceptuales y metodológicas necesarias para resolver problemas complejos en diversos campos de la ingeniería, las ciencias aplicadas y la investigación académica. Este artículo titulado "Principios de la termodinámica: conceptos y aplicaciones" es una contribución importante para quienes desean obtener una comprensión profunda de los principios de la termodinámica y su importancia en el contexto moderno.

El estudio de la termodinámica no se limita a describir fenómenos energéticos, sino que también puede interpretar y optimizar sistemas tecnológicos que inciden directamente en el desarrollo social. A través de los fundamentos presentados en este libro, los lectores podrán explorar una variedad de temas, desde las propiedades fundamentales de los sistemas termodinámicos hasta ciclos energéticos complejos y aplicaciones prácticas en ingeniería. Este libro proporciona un enfoque equilibrado entre teoría y práctica, proporcionando herramientas para facilitar el aprendizaje académico y su aplicación en entornos profesionales.

La termodinámica se basa en sus principios básicos: conservación de la energía y aumento de la entropía. Estos conceptos, conocidos respectivamente como primera y segunda leyes de la termodinámica, no solo proporcionan la base para el análisis de los sistemas energéticos, sino que también tienen profundas implicaciones para la eficiencia, la sostenibilidad y la sostenibilidad de la tecnología moderna. Este artículo analiza estos principios en detalle, examinando sus fundamentos teóricos y aplicaciones prácticas en escenarios de la vida real.

Un aspecto importante de este artículo es su método de enseñanza. Los autores estructuran los capítulos de forma secuencial, comenzando con definiciones clave y propiedades termodinámicas básicas como presión, volumen y temperatura. Luego se introducen conceptos avanzados como transferencia de calor, procesos isotérmicos e isentrópicos y análisis de sistemas abiertos y cerrados. Esta progresión lógica permite a estudiantes y profesionales construir una base sólida antes de pasar a temas especializados.

## PRINCIPIOS DE TERMODINÁMICA: CONCEPTOS Y APLICACIONES

Además, el libro incluye estudios de casos extensos, diagramas detallados y ejercicios diseñados para reforzar los conceptos introducidos. Esta combinación de elementos teóricos y visuales no sólo ayuda a la comprensión, sino que también promueve el aprendizaje interactivo. Los ejercicios de aplicación desafían específicamente a los lectores a resolver problemas que simulan situaciones del mundo real y promueven una comprensión integral de los principios termodinámicos.

Otro enfoque es la inclusión de aplicaciones específicas de la termodinámica en campos como la ingeniería mecánica, química y ambiental. Por ejemplo, se analizan procesos relacionados con la producción de energía, refrigeración y calefacción, y sistemas de eficiencia energética. Esto resalta la importancia de la termodinámica no sólo como una ciencia abstracta, sino como un tema con consecuencias tangibles para el mundo moderno.

El libro también enfatiza la importancia de la termodinámica en el contexto moderno. Se caracteriza por desafíos globales como el cambio climático y la transición a las energías renovables. Los principios aquí elaborados son esenciales para el desarrollo de tecnologías sostenibles y el uso óptimo de los recursos energéticos. Se enfatizan en la importancia de adoptar enfoques innovadores que combinen la teoría clásica con las necesidades del siglo XXI.

"Principios de termodinámica: conceptos y aplicaciones" es más que un simple libro académico. Es una herramienta integral diseñada para capacitar a la próxima generación de expertos e investigadores, brindándoles el conocimiento que necesitan para resolver problemas complejos y hacer avanzar la ciencia y la tecnología. Su contenido riguroso, enfoque práctico y perspectiva contemporánea hacen de este libro un recurso indispensable para cualquier persona interesada en el estudio y las aplicaciones de la termodinámica.

Esperamos que este libro inspire a los lectores a explorar nuevas fronteras de conocimiento e innovación. Teniendo en cuenta que la termodinámica no es sólo la ciencia del calor y la energía, más bien, es un tema que promueve el progreso en todos los ámbitos de la sociedad.

# CONTENIDO

DEDICATORIA .....	5
AGRADECIMIENTO .....	6
BIOGRAFÍA.....	7
PRÓLOGO.....	12
INTRODUCCIÓN .....	13
CONTENIDO .....	15
ÍNDICE DE FIGURAS.....	20
ÍNDICE DE GRÁFICOS .....	20
ÍNDICE DE TABLAS .....	23
CAPÍTULO 1.....	24
1. PROPIEDADES TERMODINÁMICAS .....	24
1.1 <b>Definiciones</b> .....	24
1.1.1 <b>Sustancia de trabajo</b> .....	25
1.1.2 <b>Estado de agregación</b> .....	26
1.1.3 <b>Fase termodinámica</b> .....	26
1.1.4 <b>Cambio de Fase</b> .....	27
1.1.5 <b>Sistema Termodinámico</b> .....	27
1.1.6 <b>Estado Termodinámico</b> .....	29
1.1.7 <b>Proceso Termodinámico</b> .....	30
1.1.8 <b>Ciclo Termodinámico</b> .....	31
1.2 <b>Propiedades termodinámicas</b> .....	32
1.2.1 <b>Volumen (V)</b> .....	32
1.2.2 <b>Volumen específico (v)</b> .....	33
1.2.3 <b>Peso (W)</b> .....	33
1.2.4 <b>Peso específico (<math>\gamma</math>)</b> .....	33
1.2.5 <b>Masa (m)</b> .....	33
1.2.6 <b>Densidad (<math>\rho</math>)</b> .....	33
1.2.7 <b>Temperatura (T)</b> .....	34
1.2.8 <b>Presión (P)</b> .....	35
1.3 <b>Sistema de unidades</b> .....	35
1.3.1 <b>Sistema Internacional (SI)</b> .....	35
1.3.2 <b>Sistema Ingles</b> .....	36
1.4 <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	38

CAPÍTULO 2.....	40
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA .....	40
<b>2.1 Formas de energía.....</b>	<b>40</b>
<b>2.1.1 Energía.....</b>	<b>40</b>
<b>2.1.2 Masa .....</b>	<b>40</b>
<b>2.1.3 Flujo masico.....</b>	<b>41</b>
<b>2.1.4 Principio de conservación de la masa .....</b>	<b>43</b>
<b>2.1.5 Flujo volumétrico.....</b>	<b>47</b>
<b>2.1.6 Caso especial: flujo incompresible.....</b>	<b>47</b>
<b>2.1.7 Tipos de energía.....</b>	<b>48</b>
<b>2.1.8 Energía Mecánica.....</b>	<b>49</b>
<b>2.2 Primera ley de la termodinámica.....</b>	<b>50</b>
<b>2.2.1 Principio de conservación de la energía .....</b>	<b>51</b>
<b>2.2.2 Eficiencia energética.....</b>	<b>52</b>
<b>2.2.3 Energía Eólica.....</b>	<b>54</b>
<b>2.3 Transferencia de calor.....</b>	<b>55</b>
<b>2.3.1 Conducción .....</b>	<b>57</b>
<b>2.3.2 Convección.....</b>	<b>57</b>
<b>2.3.3 Radiación .....</b>	<b>57</b>
<b>2.4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>59</b>
CAPÍTULO 3.....	61
RELACIONES DE ENERGÍA .....	61
<b>3.1 Sustancia Pura .....</b>	<b>61</b>
<b>3.1.1 Procesos de cambio de fase.....</b>	<b>61</b>
<b>3.1.2 Diagrama de fase .....</b>	<b>62</b>
<b>3.1.3 Interpolación .....</b>	<b>63</b>
<b>3.1.4 Presión y temperatura .....</b>	<b>64</b>
<b>3.1.5 Líquido Comprimido .....</b>	<b>64</b>
<b>3.1.6 Mezcla Saturada.....</b>	<b>65</b>
<b>3.1.7 Vapor Sobrecalentado.....</b>	<b>65</b>
<b>3.1.8 Líquido Saturado .....</b>	<b>66</b>
<b>3.1.9 Vapor Saturado.....</b>	<b>67</b>
<b>3.2 Diagrama de Propiedades .....</b>	<b>67</b>
<b>3.3 Tablas Termodinámicas.....</b>	<b>71</b>
<b>3.3.1 Tabla A4.....</b>	<b>71</b>

3.3.2	<b>Tabla A5</b> .....	72
3.3.3	<b>Tabla A6</b> .....	72
3.3.4	<b>Tabla A7</b> .....	73
3.4	<b>Gases Ideales</b> .....	74
3.5	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	75
CAPÍTULO 4.....		77
GASES IDEALES .....		77
4.1	<b>Trabajo de frontera</b> .....	77
4.1.1	<b>Definición:</b> .....	77
4.1.2	<b>Expresión matemática</b> .....	79
4.2	<b>Procesos</b> .....	85
4.2.1	<b>Proceso isentrópico</b> .....	85
4.2.2	<b>Proceso isobárico</b> .....	87
4.2.3	<b>Proceso isotérmico</b> .....	88
4.2.4	<b>Proceso politrópico</b> .....	90
4.3	<b>Balance de energía en sistemas cerrados</b> .....	90
4.3.1	<b>Ecuación General</b> .....	91
4.4	<b>Calores específicos</b> .....	93
4.5	<b>Gases ideales</b> .....	94
4.5.1	<b>Energía interna-entalpía</b> .....	94
4.6	<b>Tablas Termodinámicas</b> .....	94
4.6.1	<b>Descripción</b> .....	94
4.6.2	<b>Tabla A1</b> .....	96
4.6.3	<b>Tabla A-2E<sup>a</sup></b> .....	96
4.6.4	<b>Tabla A-2E-b</b> .....	98
4.6.5	<b>Tabla A-2E-c</b> .....	98
4.7	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	100
CAPÍTULO 5.....		102
PROCESOS, CON APLICACIÓN A GASES IDEALES.....		102
5.1	<b>Conservación de la masa</b> .....	102
5.1.1	<b>Definición</b> .....	102
5.1.2	<b>Flujo másico</b> .....	103
5.1.3	<b>Flujo volumétrico</b> .....	105
5.2	<b>Balance de energía en sistemas abiertos</b> .....	106
5.2.1	<b>Sistemas Abiertos</b> .....	106

5.2.2	<i>Trabajo de Flujo</i>	107
5.2.3	<i>Energía total en movimiento</i>	108
5.3	<i>Ejercicios de aplicación</i>	108
5.4	<i>Dispositivos de Ingeniería</i>	110
5.4.1	<i>Toberas</i>	110
5.4.2	<i>Difusores</i>	113
5.4.3	<i>Turbinas</i>	115
5.4.4	<i>Compresores</i>	117
5.4.5	<i>Válvulas de estrangulamiento</i>	119
5.4.6	<i>Intercambiadores de calor</i>	121
5.4.7	<i>Cámaras de mezclado</i>	123
5.4.8	<i>Tuberías</i>	124
5.5	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	126
<b>CAPITULO 6</b>		128
<b>SISTEMA DE DOS FASES</b>		128
6.1	<i>Segunda ley de la termodinámica</i>	128
6.1.1	<i>Maquinas térmicas</i>	129
6.1.2	<i>Refrigeradores</i>	130
6.1.3	<i>Bombas de calor</i>	131
6.2	<i>Procesos</i>	132
6.2.1	<i>Procesos Reversibles</i>	133
6.2.2	<i>Procesos Irreversibles</i>	134
6.2.3	<i>Irreversibilidades</i>	135
6.3	<i>Ejercicios de aplicación</i>	136
6.3.1	<i>Sistemas de Refrigeración</i>	136
6.4	<i>Entropía</i>	138
6.4.1	<i>Diagrama de Propiedades</i>	139
6.4.2	<i>Relación <math>T ds</math></i>	140
6.5	<i>Cambio de la entropía de líquidos a sólidos</i>	141
6.5.1	<i>Gases Ideales</i>	142
6.5.2	<i>Calores específicos constantes (análisis aproximado)</i>	143
6.5.3	<i>Calores específicos variables (análisis exacto)</i>	144
6.5.4	<i>Procesos isentrópicos en gases ideales</i>	145
6.6	<i>Ciclos de Potencia</i>	147
6.6.1	<i>Ciclo Rankine</i>	148

<b>6.6.2</b>	<b><i>Ciclo Otto</i></b> .....	152
<b>6.6.3</b>	<b><i>Ciclo Diesel</i></b> .....	156
<b>6.7</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	159

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Sistema de ingeniería, sistema solar para calentar agua .....	25
Figura 2 Aplicaciones de la termodinámica.....	25
Figura 3 Estado de la materia .....	26
Figura 4 Sistema en dos estados diferentes.....	30
Figura 5 Ejemplo de diagrama de procesos .....	31
Figura 6 Análisis de masa y energía de volúmenes de control.....	44
Figura 7 Primera ley de la termodinámica.....	51
Figura 8 Desempeño de una turbina hidráulica-generador .....	54
Figura 9 Principios físicos de la termodinámica .....	56
Figura 10 Vapor saturado .....	67
Figura 11 Tabla A4. Agua saturada. Tabla de temperaturas .....	71
Figura 12 Tabla A5. Agua saturada. Tabla de presiones.....	72
Figura 13 Tabla A6. Vapor de agua sobrecalentado .....	73
Figura 14 Tabla A7. Agua líquida comprimida.....	73
Figura 15 Calor específico .....	93
Figura 16 Descripción Tabla A4 agua saturada. Tabla de temperaturas .....	95
Figura 17 Tabla A1 masa molar, constante de gas y propiedades del punto crítico .....	96
Figura 18 Tabla A2 a 300 °K.....	97
Figura 19 Tabla A-2E a diversas alturas .....	98
Figura 20 Tabla A-2E como una función de la temperatura.....	99
Figura 21 Imagen de Lavoisier y conservación de la materia .....	102
Figura 22 La tubería en forma de T sirve como cámara de mezclado de agua caliente y fría.....	124
Figura 23 El flujo por una tubería podría implicar más de una forma de trabajo .....	125
Figura 24 El café caliente no se pondrá más caliente en una habitación más fría.....	129
Figura 25 El calor que recibe una máquina térmica se convierte en trabajo.....	130
Figura 26 Componentes de un sistema de refrigeración y sus condiciones de operación .....	131
Figura 27 Una bomba extrae energía fría del exterior y lleva al interior caliente.....	132
Figura 28 Dos procesos reversibles comunes.....	133
Figura 29 Sistema de refrigeración en cascada de dos etapas y el mismo.....	138
Figura 30 T ds es válida en procesos reversibles, irreversibles, sistemas cerrados y abiertos.....	141
Figura 31 El ciclo Rankine ideal simple .....	149
Figura 32 Ciclos real e ideal en motores de encendido por chispa y sus diagramas P-v .....	152

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Proceso termodinámico .....	27
Gráfico 2 Tipos de sistemas termodinámicos.....	29
Gráfico 3 Ciclo termodinámico .....	32
Gráfico 4 Conservación de la masa .....	41
Gráfico 5 Rapidez de cambio respecto al tiempo.....	42

Gráfico 6 Flujo másico .....	43
Gráfico 7 Sección de un flujo másico .....	43
Gráfico 8 Conservación de la masa .....	44
Gráfico 9 Superficie de control respecto al ángulo de flujo .....	45
Gráfico 10 Superficie de control normal al flujo .....	45
Gráfico 11 Principio de conservación de la masa .....	46
Gráfico 12 Flujo volumétrico .....	47
Gráfico 13 Compresor de aire .....	48
Gráfico 14 Dispositivo cilindro-embolo presión hacia afuera .....	49
Gráfico 15 Dispositivo cilindro-embolo presión hacia adentro .....	49
Gráfico 16 Ciclo en sentido horario .....	50
Gráfico 17 Ciclo en sentido antihorario .....	50
Gráfico 18 Principio de la conservación de la energía .....	51
Gráfico 19 Conservación de la energía .....	52
Gráfico 20 Ejemplo de la conservación de la energía .....	52
Gráfico 21 Ejemplificación de la eficiencia energética .....	53
Gráfico 22 Sistema termodinámico .....	56
Gráfico 23 Dirección de la transferencia de energía .....	57
Gráfico 24 Diagrama de fases .....	61
Gráfico 25 Diagrama del proceso de cambio de fase .....	62
Gráfico 26 Diagrama T-v de una sustancia pura .....	63
Gráfico 27 Diagrama de interpolación .....	63
Gráfico 28 Recta de interpolación .....	64
Gráfico 29 Ejemplo de interpolación .....	64
Gráfico 30 Dispositivo cilindro-embolo de líquido comprimido .....	65
Gráfico 31 Cilindro-embolo con mezcla saturada .....	65
Gráfico 32 Vapor sobrecalentado .....	66
Gráfico 33 Líquido saturado .....	66
Gráfico 34 Diagrama T-v para el proceso de calentamiento de agua a presión constante .....	67
Gráfico 35 Curva de saturación de una sustancia pura .....	68
Gráfico 36 Ilustración del diagrama Temperatura-volumen específico .....	69
Gráfico 37 Diagrama T-v de procesos de cambio de fase a .....	69
Gráfico 38 Diagrama P-v de una sustancia pura .....	70
Gráfico 39 Diagrama T-v de sustancias puras .....	71
Gráfico 40 Dispositivo cilindro-embolo con frontera móvil .....	78
Gráfico 41 El trabajo realizado por una frontera móvil se llama trabajo de frontera ....	79
Gráfico 42 Diagrama presión-volumen .....	81
Gráfico 43 El área bajo la curva de proceso es un diagrama P-V del trabajo de frontera .....	83
Gráfico 44 Expansión de un gas por frontera móvil .....	84
Gráfico 45 Esquema de expansión y diagrama P-V para el ejercicio .....	84
Gráfico 46 Esquema y diagrama P-V para el ejemplo .....	86
Gráfico 47 Esquema y diagrama P-V para el ejercicio .....	87
Gráfico 48 Esquema y diagrama P-V para el ejercicio .....	89
Gráfico 49 Diagrama T-V para el ejercicio .....	92
Gráfico 50 Conservación de la masa durante una reacción química .....	103
Gráfico 51 Representación de un flujo masico .....	104

## PRINCIPIOS DE TERMODINÁMICA: CONCEPTOS Y APLICACIONES

Gráfico 52 Representación gráfica del ejercicio .....	104
Gráfico 53 Representación gráfica del ejercicio .....	105
Gráfico 54 Balance de masas para un sistema cerrado .....	106
Gráfico 55 Un sistema cerrado con una frontera móvil .....	107
Gráfico 56 Esquema para trabajo de flujo .....	107
Gráfico 57 Imagen del ejercicio de aplicación .....	108
Gráfico 58 Representación de una tobera .....	111
Gráfico 59 Ilustración ejercicio de aplicación .....	112
Gráfico 60 Representación de un difusor .....	113
Gráfico 61 Ilustración del ejercicio de aplicación .....	114
Gráfico 62 Representación de una turbina.....	115
Gráfico 63 Ilustración ejercicio de aplicación.....	116
Gráfico 64 Representación compresor de aire .....	118
Gráfico 65 Ilustración ejercicio de aplicación.....	118
Gráfico 66 Las válvulas de estrangulamiento causan grandes caídas de presión en el fluido .....	119
Gráfico 67 Ilustración del ejercicio de aplicación .....	120
Gráfico 68 Un intercambiador de calor es tan simple como dos tuberías concéntricas. ....	122
Gráfico 69 Ilustración del ejercicio de aplicación .....	122
Gráfico 70 Representación cámara de mezclado .....	124
Gráfico 71 Representación de los procesos .....	135
Gráfico 72 Procesos de compresión y expansión irreversibles .....	136
Gráfico 73 El cambio neto en el volumen durante un ciclo siempre es cero .....	139
Gráfico 74 En un diagrama T-S, el área bajo la curva representa la transferencia de calor. ....	140
Gráfico 75 Bajo la suposición el calor específico es constante en algún valor promedio .....	143
Gráfico 76 Se puede usar la idealización para el análisis de procesos complejos ....	148
Gráfico 77 Diagrama T-s para el ciclo Otto.....	153
Gráfico 78 Los motores diésel la bujía se reemplaza por un inyector que comprime el aire.....	157
Gráfico 79 Diagramas T-s y P-v para el ciclo Diesel ideal.....	158

# CAPÍTULO I



PROPIEDADES  
TERMODINÁMICAS

# CAPÍTULO 1

## 1. PROPIEDADES TERMODINÁMICAS

### 1.1 Definiciones

#### Termodinámica y energía

La termodinámica nació en 1824 con el científico francés Nicolas Leonard Sadi Carnot, más conocido como Sadi Carnot mediante su libro titulado Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las maquinas propias para desarrollar esta potencia. Este libro, junto a De revolutionibus orbium coelestium, publicado en 1543, y el de Isaac Newton, Principios matemáticos de la filosofía natural, en 1687, constituyen muy probablemente los 3 pilares más importantes que apuesta el hombre para el entendimiento de los fenómenos naturales y su interpretación.

El término termodinámica proviene de las palabras griegas therme (calor) y dynamis (fuerza), lo cual corresponde a lo más descriptivo de los primeros esfuerzos por convertir el calor en energía. La termodinámica es la rama de la física que estudia la transformación de la energía y en particular la transformación de la energía calorífica (calor) en otras formas de energía y viceversa. En general puede decirse que energía es la capacidad que posee un cuerpo o un sistema de cuerpos para poder desarrollar un trabajo.

Algunos ejemplos de la transformación de energía que se estudiaran pueden ser:

1. La transformación de calor en trabajo mecánico, mediante una maquina térmica.
2. La conversión de energía eléctrica en calor, por medio de una resistencia.
3. La conversión de trabajo mecánico para obtener refrigeración.

El estudio de la termodinámica, se basa en dos principios fundamentales, los cuales son los siguientes:

1. El primer principio o "Primera ley de la termodinámica", el cual es una consecuencia del principio de la conservación de la energía, que además establece la relación entre el calor y el trabajo mecánico. Éste expresa que,

durante una interacción, la energía puede cambiar de una forma a otra, pero su cantidad total permanece constante. Es decir, la energía no se crea ni se destruye.

2. El segundo principio o "Segunda ley de la termodinámica", conocido también como "Principio De Carnot Clases", que se refiere al grado de facilidad o dificultad para la conversión del calor en trabajo, o del trabajo en calor.

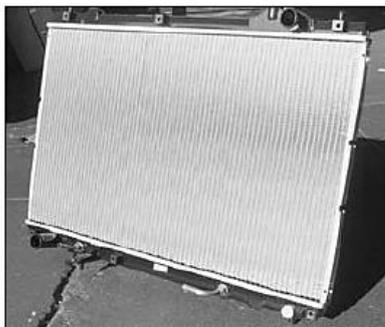


Figura 1 Sistema de ingeniería, sistema solar para calentar agua

Fuente: (Cengel,2006, pág. 3)

### 1.1.1 Sustancia de trabajo

Una sustancia de trabajo se define como la parte del universo objeto de estudio. Este sistema termodinámico puede ser una célula, una persona, plantas de generación eléctrica, sistemas de calefacción y refrigeración, celdas de combustible, aerogeneradores, turbinas, procesos de combustión, automóviles entre otros.



Radiadores de automóviles



Plantas de energía



Sistemas de refrigeración

Figura 2 Aplicaciones de la termodinámica

Fuente:(Cengel,2006, pág. 4)

### 1.1.2 Estado de agregación

La palabra estado expresa la condición de un sistema definido por el conjunto de sus propiedades, puesto que normalmente existe relación entre dichas propiedades el estado puede especificarse, a menudo, suministrando los valores de los subconjuntos de estas. Cuando cualquiera de las propiedades de un sistema cambia su estado cambia y se dice que el sistema ha sufrido un proceso. Un proceso es una transformación de un estado a otro. Los estados de agregación son los estados naturales de la materia, es decir, la forma como comúnmente observamos las sustancias en la naturaleza, son tres: el sólido, el líquido y gaseoso, a veces se suele considerar que el gas ionizado, llamado plasma, constituye un cuarto estado de la materia. Dadas las condiciones existentes en la superficie terrestre, sólo algunas sustancias pueden hallarse de modo natural en los tres estados, tal es el caso del agua.



*Figura 3 Estado de la materia*

Obtenido de:(Significados.com,2019)

### 1.1.3 Fase termodinámica

Se define fase como aquella porción de un sistema que es microscópicamente homogénea en cuanto a sus propiedades fisicoquímicas y se encuentra separada de otras porciones similares por regiones límites bien definidas, llamadas interfases. Fase no es equivalente a compuesto, ya que un mismo compuesto puede coexistir en una o varias fases, por ejemplo, agua y hielo a  $0^{\circ}\text{C}$ . Los sistemas constituidos por una fase se denominan homogéneos, mientras que aquéllos formados por dos o más fases se llaman heterogéneos.



Gráfico 1 Proceso termodinámico

Fuente: Autores

#### 1.1.4 Cambio de Fase

En condiciones normales, las sustancias en la naturaleza se encuentran en un estado de agregación o en una fase termodinámica, la más probable posible y en una condición de equilibrio estable. Por lo tanto, para modificar esta condición de equilibrio es necesario el suministro de energía o el rechazo de esta, en consecuencia, podemos analizar algunos procesos termodinámicos:

**Tabla 1**  
*Cambios de estado de la materia*

Fase Inicial	Aumento (+) / Disminución (-)	Energía	Fase final	Proceso
Sólido	+	E	Líquido	Fusión
Líquido	+	E	Gaseoso	Evaporación
Gaseoso	-	E	Líquido	Condensación
Líquido	-	E	Sólido	Solidificación

Fuente: Autores

#### 1.1.5 Sistema Termodinámico

Es cualquier porción del espacio que se aísla para su estudio y que está delimitada por una o varias superficies, denominadas paredes o límites, que pueden ser reales o imaginarias. Todo aquello que es exterior al sistema y que puede interactuar con él se denomina entorno. El conjunto formado por el sistema y el entorno recibe el nombre de universo termodinámico.

Las fronteras se clasifican de la siguiente manera:

1. Paredes aislantes: son las que no toleran interacción de ningún tipo entre el sistema y el medio exterior; es decir, las paredes de esta clase no permiten intercambios de energía calorífica, química, eléctrica, magnética, etcétera.
2. Paredes adiabáticas: son aquellas que toleran intercambios energéticos de origen esencialmente mecánico. Aunque más adelante se aclarará con suficiente extensión la diferencia cualitativa entre las diversas manifestaciones energéticas, afirmaremos que las paredes de este tipo impiden la transmisión calórica.
3. Paredes diatérmanas: son las que, a diferencia de las anteriores, toleran la transferencia energética de naturaleza térmica, es decir, permiten el paso del calor a su través y pueden o no tolerar los intercambios de cualquier otro tipo, según los casos.

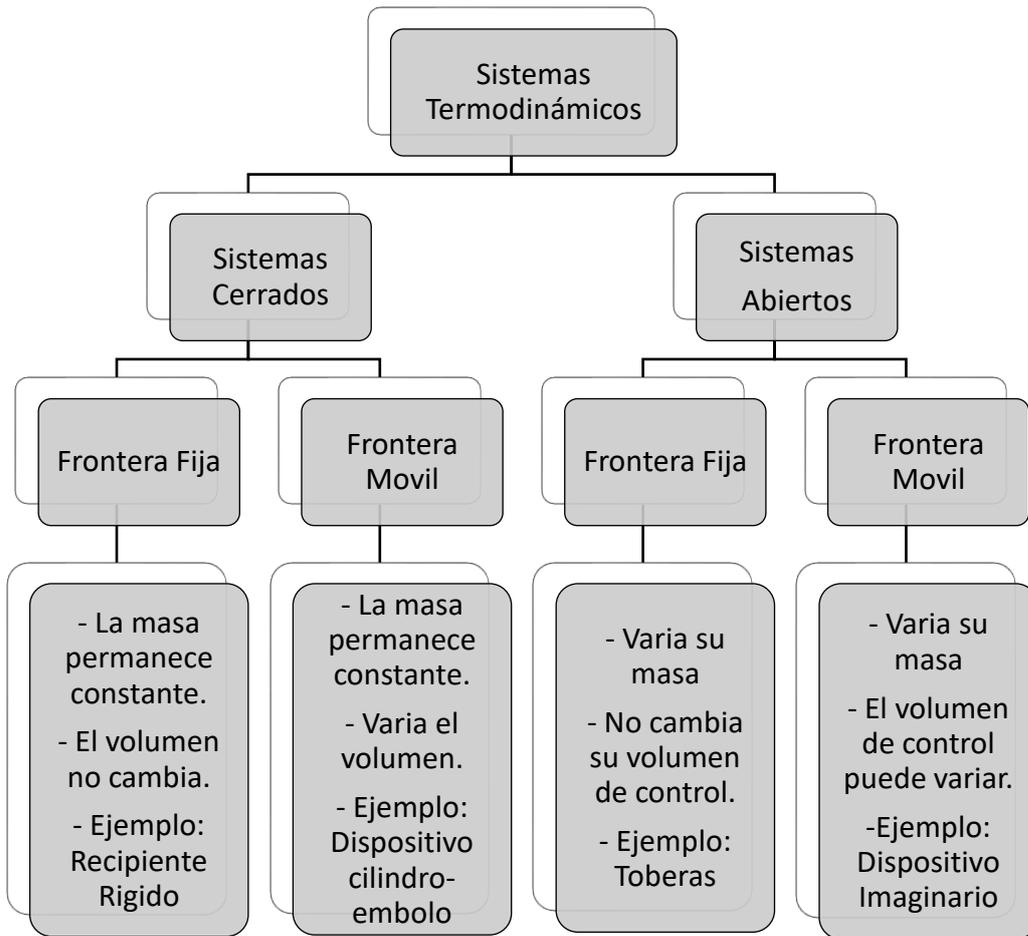


Gráfico 2 Tipos de sistemas termodinámicos

Fuente: Autores

### 1.1.6 Estado Termodinámico

Todas las propiedades se pueden medir o calcular en el sistema, lo cual da un conjunto de propiedades que describe por completo la condición, o el estado, del sistema. En un estado específico, todas las propiedades de un sistema tienen valores fijos, e incluso si cambia el valor de una propiedad, el estado cambia a otro diferente.

La termodinámica trata con estados de equilibrio. En un estado de equilibrio no hay potenciales desbalanceados (o fuerzas impulsoras) dentro del sistema, y éste no experimenta cambios cuando es aislado de sus alrededores. Hay muchos tipos de

equilibrio, y un sistema no está en equilibrio termodinámico a menos que se satisfagan las condiciones de todos los tipos necesarios de equilibrio.

Un sistema está en equilibrio térmico si tiene la misma temperatura en todo él. Es decir, el sistema no implica diferencial de temperatura, que es la fuerza impulsora para el flujo de calor. El equilibrio mecánico se relaciona con la presión, y un sistema lo posee si con el tiempo no hay cambio de presión en alguno de sus puntos. Sin embargo, al interior del sistema la presión puede variar con la elevación como resultado de efectos gravitacionales.

Si en un sistema hay dos fases, se encuentra en la fase de equilibrio cuando la masa de cada fase alcanza un nivel de equilibrio y permanece allí. Un sistema está en equilibrio térmico si su composición química no cambia con el tiempo, es decir, si no ocurren reacciones químicas. Un sistema no estará en equilibrio a menos que se satisfagan los criterios de equilibrio necesarios.

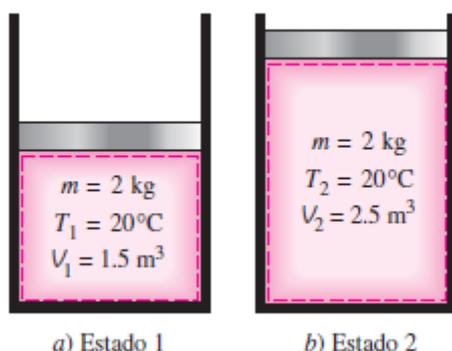


Figura 4 Sistema en dos estados diferentes

Fuente: (Cengel,2006, pág. 14)

### 1.1.7 Proceso Termodinámico

Cuando cualquiera de las propiedades de un sistema cambia, su estado cambia y se dice que el sistema ha sufrido un proceso. Un proceso es una transformación de un estado a otro. Sin embargo, si un sistema muestra los mismos valores de sus propiedades en dos instantes diferentes, estará con el mismo estado en dichos instantes. Queremos que un sistema esté en un estado estacionario sin ninguna de sus propiedades cambian con el tiempo.

El uso de diagramas de proceso herramienta muy útil en el análisis termodinámico de sistemas, pues el área bajo la curva de proceso puede asociarse con magnitudes físicas que representan las interacciones de calor y trabajo que sufre el sistema durante un cambio de estado.

El prefijo iso- se usa con frecuencia para designar un proceso en el que una propiedad particular permanece constante. Por ejemplo, un proceso isotérmico, es aquel durante el cual la temperatura  $T$  permanece constante; un proceso isobárico es en el que la presión  $P$  se mantiene constante, y un proceso isocórico (o isométrico) es aquel donde el volumen específico  $v$  permanece constante.

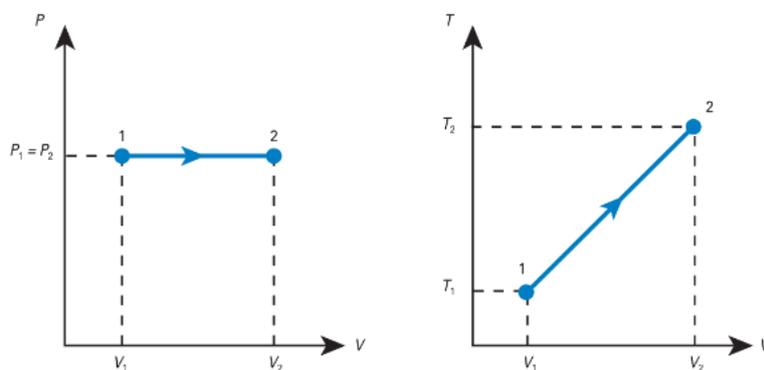


Figura 5 Ejemplo de diagrama de procesos

Fuente: (Bernal,2015, pág. 32)

### 1.1.8 Ciclo Termodinámico

Un aspecto importante para el análisis de sistemas es el proceso en el que un sistema pasa de un estado inicial a otro estado y así sucesivamente por una serie de procesos hasta que al final alcanza una condición de equilibrio en la cual se registran las propiedades del sistema.

Si al final de esta serie de procesos todas las propiedades del sistema son exactamente iguales a las del estado inicial, entonces el sistema habrá realizado un ciclo termodinámico. Durante un ciclo termodinámico el sistema podrá intercambiar energía, energía y masa, o solo masa con sus alrededores y al final tendrá como objetivo una interacción de energía en forma de trabajo y calor.

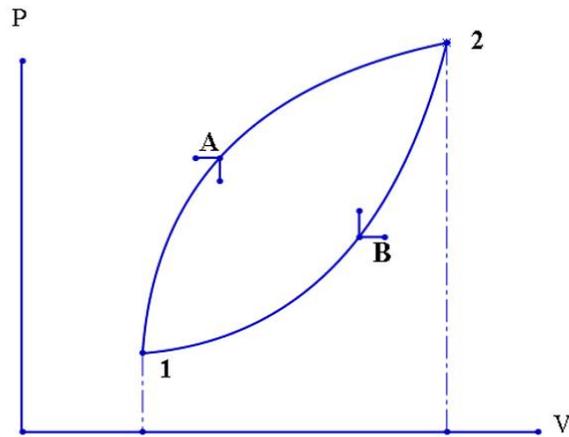


Gráfico 3 Ciclo termodinámico

Fuente: Autores

## 1.2 Propiedades termodinámicas

La parte fundamental en la termodinámica es el estudio de sistemas termodinámicos. Para ello es necesario definir las características que posee este sistema en un momento específico, cualquier característica cuantificable que permita o ayude a definir un sistema termodinámico es una propiedad de este.

Algunos ejemplos clásicos de propiedades termodinámicas son: la presión, la temperatura, la masa y el volumen, que son características medibles del sistema y que se denominan propiedades fundamentales.

Las propiedades de un sistema pueden clasificarse en extensivas e intensivas:

1. Las propiedades intensivas son las independientes de la extensión de masa del sistema, por ejemplo, la temperatura, la presión, la densidad y el volumen específico.
2. Las propiedades extensivas dependen de la extensión de la masa del sistema, ejemplo la masa, el peso y el volumen.

### 1.2.1 Volumen (V)

Es una propiedad intrínseca de la materia, se relaciona con las dimensiones en el espacio que tendrá un sistema termodinámico. Las unidades de volumen son el metro cúbico ( $m^3$ ) en el sistema internacional SI y los pies cúbicos ( $ft^3$ ) en el sistema inglés.

### 1.2.2 Volumen específico ( $v$ )

Esta propiedad es el recíproco de la densidad y, por tanto, es la relación entre el volumen y la masa de un sistema termodinámico sus unidades son el  $m^3/kg$  en el sistema internacional SI.

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{V}{m} = \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

### 1.2.3 Peso ( $W$ )

El peso de un sistema se relaciona con la fuerza gravitacional ejercida sobre dicho sistema, su magnitud se determina por la aceleración de la gravedad ( $g$ ). En el ámbito terrestre toma un valor en el sistema internacional SI de  $g = 9.81 m/s^2$  y en el ámbito inglés de  $g = 32,17 ft/s^2$ . El peso de un sistema tomará valores diferentes según el marco de referencia pues la fuerza gravitacional depende del lugar donde se haga la medición.

### 1.2.4 Peso específico ( $\gamma$ )

Se define como la relación entre el peso por unidad de volumen. Las unidades de peso específico en el sistema internacional son el Newton sobre metro cúbico  $N/m^3$ .

$$\gamma = \frac{W}{V} = \left[ \frac{N}{m^3} \right]$$

### 1.2.5 Masa ( $m$ )

Es una propiedad intrínseca de la materia y se relaciona con la cantidad de sustancia que contiene un sistema termodinámico. Las unidades de la masa son el kilogramo ( $kg$ ) en el sistema internacional SI y en libras ( $lb$ ) en el sistema inglés.

### 1.2.6 Densidad ( $\rho$ )

Se define como la relación entre la masa y la unidad de volumen de un sistema termodinámico. sus dimensiones en el sistema internacional son el  $kg/m^3$ .

$$\rho = \frac{m}{v} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

### 1.2.7 Temperatura (T)

La temperatura es una propiedad termodinámica que en general se asocia con una sensación de caliente o frío. La temperatura se asocia con el movimiento de las moléculas que conforman el sistema. A medida que la temperatura del sistema aumenta, la actividad molecular también se incrementa. una manera muy teórica de medirla es basándose en la Ley Cero de la Termodinámica. La ley cero de la termodinámica establece que, si dos cuerpos se encuentran en equilibrio térmico con un tercero, están en equilibrio térmico entre sí.

Se utiliza la escala de kelvin ( $^{\circ}K$ ) en el sistema internacional y el Rankine ( $^{\circ}R$ ) en el sistema inglés para medir la temperatura absoluta.

1. La escala en grados Celsius está relacionada con la escala absoluta en Kelvin por la siguiente relación:

$$T(^{\circ}K) = T(^{\circ}C) + 273,15$$

2. La equivalencia entre la escala absoluta de Rankine y la escala en grados Fahrenheit es:

$$T(^{\circ}R) = T(^{\circ}F) + 459,67$$

3. La relación entre la escala absoluta en el SI y su análoga en el sistema inglés está dada por la siguiente ecuación:

$$T(^{\circ}R) = 1,8 T(^{\circ}K)$$

4. La relación entre las escalas entre el SI y el sistema inglés es:

$$T(^{\circ}F) = 1,8 T(^{\circ}C) + 32$$

5. Es importante mencionar que cuando se trata con diferencias de temperaturas  $\Delta T$  los incrementos son los mismos que en las escalas absolutas que en sus respectivas escalas comunes, es decir:

$$\Delta T(^{\circ}K) = \Delta T(^{\circ}C)$$

$$\Delta T(^{\circ}R) = \Delta T(^{\circ}F)$$

### 1.2.8 Presión (*P*)

Se define como la fuerza normal que ejerce un fluido por unidad de área, se habla de presión cuando la sustancia es un gas o un líquido. Mientras que para los sólidos el mismo enunciado se denomina esfuerzo.

Las unidades correspondientes en el Sistema Internacional son el  $N/m^2$  o Pascal (Pa). Con frecuencia en el estudio de la termodinámica se encuentran múltiplos de la unidad de presión, como el kilo-pascal ( $1kPa = 1 * 10^3 Pa$ ) o el mega Pascal ( $1MPa = 1 * 10^6 Pa$ ).

## 1.3 Sistema de unidades

Cómo se están considerando las propiedades termodinámicas desde un punto de vista macroscópico, se manejan cantidades que pueden medirse o cuantificarse de manera directa o indirecta. lo anterior hace que las unidades sean relevantes en el estudio de la termodinámica.

### 1.3.1 Sistema Internacional (SI)

El Sistema Internacional de Unidades consta de siete unidades básicas, que expresan magnitudes físicas, a partir de las cuales se determinan otras. Las unidades básicas son: metro (longitud), segundo (tiempo), kilogramo (masa), amperio (intensidad de corriente eléctrica), kelvin (temperatura), candela (intensidad luminosa) y mol (cantidad de sustancia).

El sistema internacional de unidades SI considera como magnitudes primarias a la masa la longitud y el tiempo.

1. La unidad base para la longitud es el metro ( $m$ ), definido como la longitud del trayecto recorrido en el vacío por la luz.
2. La unidad base para el tiempo es el segundo ( $s$ ).
3. La unidad base para la masa es el kilogramo ( $kg$ ), el cual está definido por la masa que tiene el cilindro patrón.
4. En el sistema internacional, la unidad de fuerza llamada Newton ( $N$ ), es una unidad secundaria definida a partir de las unidades de masa longitud y tiempo.

$$F = m \cdot a$$

$$1N = (1kg) \left(1 \frac{m}{s^2}\right) = 1kg \cdot \frac{m}{s^2}$$

Las unidades pueden ir acompañadas por un prefijo que denota un múltiplo o un submúltiplo decimal de dicha unidad, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 2**

*Prefijos en el sistema internacional (S.I)*

Prefijos usados en el Sistema Internacional de Unidades					
Factor	Prefijo	Símbolo	Factor	Prefijo	símbolo
$10^{24}$	iota	Y	$10^{-1}$	deci	D
$10^{21}$	zeta	Z	$10^{-2}$	centi	C
$10^{18}$	exa	E	$10^{-3}$	mili	M
$10^{15}$	peta	P	$10^{-6}$	micro	$\mu$
$10^{12}$	tera	T	$10^{-9}$	nano	N
$10^9$	giga	G	$10^{-12}$	pico	P
$10^6$	mega	M	$10^{-15}$	femto	F
$10^3$	kilo	K	$10^{-18}$	atto	A
$10^2$	hecto	H	$10^{-21}$	zepto	Z
$10^1$	deca	Da	$10^{-24}$	yocto	Y

Fuente: Autores

### 1.3.2 Sistema Ingles

La unidad base para la longitud en el sistema inglés es el pie definido en términos del metro como:

$$1ft = 0,3048 m$$

Aunque el pie es la unidad base para la longitud, la pulgada (*in*), es otra unidad del sistema inglés ampliamente utilizada, y está definida en términos del pie como:

$$12in = 1ft$$

En el sistema inglés la unidad base para el tiempo es el segundo (*s*).

La unidad base para la masa es la libra masa (*lb*), definida en términos de kilogramo como:

$$1lb = 0,4536kg$$

El símbolo (*lbm*) también se usa para expresar libra masa.

En el sistema inglés la unidad de fuerza es la libra fuerza (*lbf*), que se define como la fuerza con la cual una libra masa estándar es atraída a la Tierra bajo condiciones de aceleración estándar de gravedad ( $9,81 \text{ m/s}^2$  o  $32,174 \text{ ft/s}^2$ ). Por tanto, la libra fuerza se define como:

$$1 \text{ lbf} = 32,174 \text{ lbm} \cdot \text{ft/s}^2$$

#### 1.4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**LANA, F. BRAVO, E. Y DEL BARRIO, M.** “Termodinámica básica: ejercicios”. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya, 2015. p. Obtenido de: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/61437?page=14>

**CLAUDIA DEL CARMEN GUTIÉRREZ TORRES Y JIMÉNEZ BERNAL, J. A.** “Termodinámica”. México D.F: Grupo Editorial Patria, 2015. p. Obtenido de: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/39466?page=13>

**JIMÉNEZ BERNAL, J. A. Y CLAUDIA DEL CARMEN GUTIÉRREZ TORRES.** “Termodinámica”. México D.F: Grupo Editorial Patria, 2015. p. Obtenido de: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/39466?page=32>

**GUTIÉRREZ TORRES, C. Y BARBOSA SALDAÑA, J.** “Termodinámica para ingenieros”. México: Grupo Editorial Patria, 2016. p. Obtenido de: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/40432?page=24>

**ALVARADO GARCÍA, R.** “Principios de termodinámica”. México, D.F: Instituto Politécnico Nacional, 2010. p. Obtenido de: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/72185?page=23>

**MORALES GARCÍA, S. S. TAPIA DÁVILA, A. A. Y MALFAVÓN RAMOS, N. I.** “Principios de termodinámica”. Grupo Editorial Éxodo, 2013. p. Obtenido de: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/173462?page=15>

**CLAVELL, J. S.** “Termodinámica técnica”. Barcelona: Editorial Reverté, 1999. p. Obtenido de: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/174405?page=23>

**DR. ROGELIO PÉREZ D’GREGORIO** “Sistema Internacional de Unidades (SI)”, 2015, Caracas, Disponible en: [art07.pdf \(scielo.org\)](#)

# CAPÍTULO II



CONSERVACIÓN DE  
LA ENERGÍA

## CAPÍTULO 2

# CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA

El Principio de Conservación de la Energía o Ley de conservación de la energía, también conocido como el Primer principio de la termodinámica, establece que la cantidad total de energía en un sistema físico aislado (es decir, sin interacción alguna con otros sistemas) permanecerá siempre igual, excepto cuando se transforme en otros tipos de energía.

Esto se resume en el principio de que la energía en el universo no puede ni crearse ni destruirse, únicamente transformarse en otras formas de energía, como puede ser la energía eléctrica en energía calórica (así operan las resistencias) o en energía lumínica (así operan los bombillos).

De acuerdo con el Principio de Conservación de la Energía, al introducir en un sistema una cantidad de calor ( $Q$ ) determinada, ésta será siempre igual a la diferencia entre el aumento de la cantidad de energía interna ( $\Delta U$ ) más el trabajo ( $W$ ) efectuado por dicho sistema. De esa manera, tenemos la fórmula:  $Q = \Delta U + W$ , de donde se desprende que  $\Delta U = Q - W$ .

### 2.1 Formas de energía

La Energía puede manifestarse de diferentes maneras: en forma de movimiento (cinética), de posición (potencial), de calor, de electricidad, de radiaciones electromagnéticas, etc.

#### 2.1.1 Energía

Es todo aquello que puede originar o dar existencia a un trabajo. Es la capacidad que posee la materia para producir calor, trabajo en forma de movimiento, luz, crecimiento biológico, etc. Por materia se entiende cualquier cuerpo sólido, líquido y gaseoso existente

#### 2.1.2 Masa

La conservación de la masa es uno de los principios fundamentales de la naturaleza. Si mezclamos  $2 \text{ kg H}_2$  con  $16 \text{ kg O}_2$  solo podemos obtener solo  $18 \text{ kg H}_2\text{O}$  y nada más porque solo tenemos estas sumas estequiométricas entonces los pesos dependes de los pesos atómicos, y podemos llegar a establecer  $18 \text{ kg H}_2\text{O}_2$  en base gaseosa

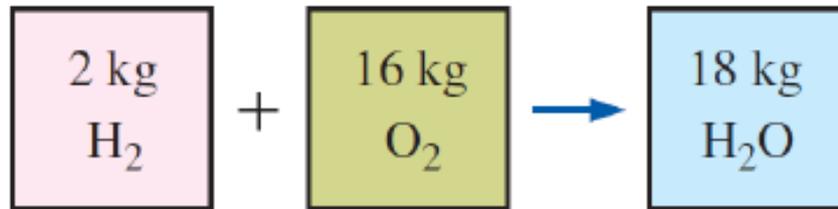


Gráfico 4 Conservación de la masa

Fuente: Autores

Al igual que la energía, la masa es una propiedad conservada que no es posible crear ni destruir durante un proceso. Sin embargo, la masa  $m$  y la energía  $E$  se pueden convertir entre sí según una fórmula bien conocida que propuso Albert Einstein (1879-1955).

$$E = m \cdot c^2$$

Donde  $c = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$  representa la velocidad de la luz en el vacío.

Todos los sistemas químicos y físicos exhiben interacciones de energía con sus alrededores, pero la cantidad de energía involucrada es equivalente a una cantidad extremadamente pequeña de masa en comparación con la masa total del sistema. Sin embargo, en reacciones nucleares, la masa equivalente a la cantidad de energía que interactúa es significativa. Por lo tanto, a menos de que se trate de reacciones nucleares, consideraremos que tanto la masa como la energía son cantidades conservativas.

### 2.1.3 Flujo masico

Es la cantidad de masa que pasa por una sección transversal por unidad de tiempo y se relaciona con el flujo volumétrico  $\dot{v}$ , el cual es el volumen de un fluido que fluye por una sección transversal por unidad de tiempo, mediante.

$$m = \rho v = \rho A_1 v_{\text{prom}}$$

El punto sobre un símbolo se usa para indicar la rapidez de cambio respecto al tiempo.

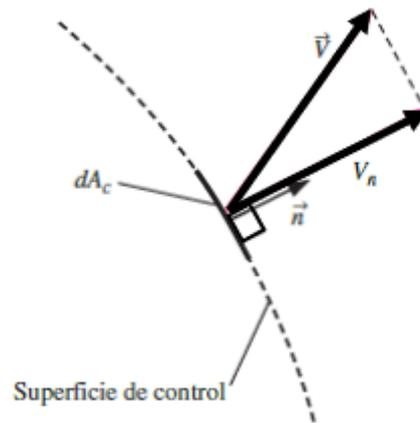


Gráfico 5 Rapidez de cambio respecto al tiempo

Fuente: Autores

### Forma Derivada

Posición  $r(t)$

Velocidad  $v(t) = \frac{dr}{dt}$

Aceleración  $a(t) = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2r}{dt^2}$

$$\delta m = \rho v_n dA_c$$

Donde  $\delta m$  es el diferencial de flujo másico,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $dA_c$  es un elemento de área diferencial en una sección transversal de una tubería, y  $V_n$  la velocidad normal a  $dA_c$

Por lo tanto:

$$m = \int_{dA_c} \delta m = \int_{dA_c} \rho v_n dA_c \quad (kg/s)$$

Aquí la velocidad nunca es uniforme a través de la sección transversal debido a la condición de no deslizamiento y por lo tanto se suele definir una velocidad promedio  $V_{prom}$  para expresar el flujo másico.

$$V_{prom} = \frac{1}{A_c} \int_{dA_c} v_n dA_c$$

$$\int \delta = \int \rho v_n dA_C$$

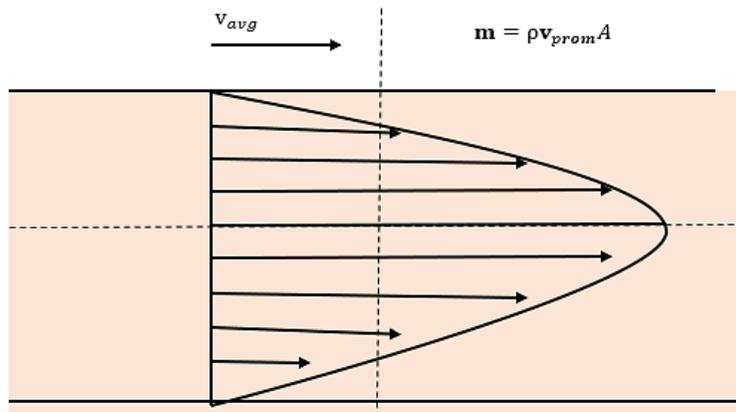


Gráfico 6 Flujo másico

Fuente: Autores

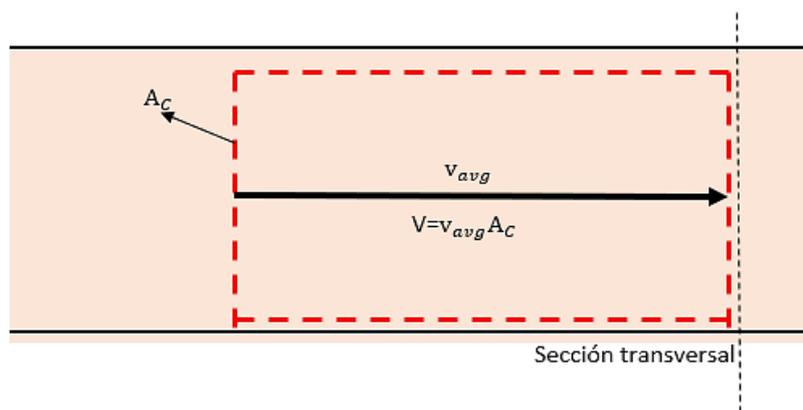


Gráfico 7 Sección de un flujo másico

Fuente: Autores

#### 2.1.4 Principio de conservación de la masa

El principio de conservación de la masa para un volumen de control se puede expresar como: la transferencia neta de masa hacia o desde el volumen de control durante un intervalo de tiempo  $t$  es igual al cambio neto (incremento o disminución) en la masa total dentro del volumen de control durante  $\Delta t$ . Es decir.

$$m_{entrada} - m_{salida} = \Delta m_{vc} \quad (kg)$$

Donde  $\Delta m_{VC} = m_{final} - m_{inicial}$  es el cambio en la masa del volumen de control durante el proceso. Por unidad de tiempo la expresión anterior quedaría como:



Figura 6 Análisis de masa y energía de volúmenes de control

Fuente: (Cengel,2014, pág. 222)

La masa total dentro del volumen de control en cualquier instante de tiempo  $t$  está determinada por:

$$m_{vc} = \int_{VC} \rho dv$$

Donde  $dV$  es el cambio diferencial del volumen de control.

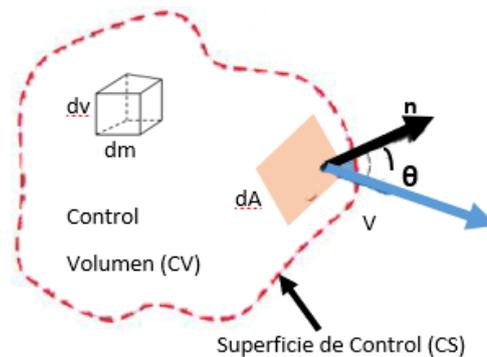


Gráfico 8 Conservación de la masa

Fuente: Autores

En tanto que, la componente normal de la velocidad  $Vn$  estaría dada por:

$$Vn = V \cos \theta = V \cdot n$$

Y el flujo másico diferencial  $\delta m$  podría reescribirse entonces como:

$$\delta m = \rho V n dA = \rho V \cdot n dA$$

Sí la expresión anterior se integra sobre la superficie de control anterior se tendrá el flujo másico neto  $m_{neto} = m_{sale} - m_{entra}$  que interactúa con el volumen de control.

$$m_{neto} = \int_{SC} \rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n})dA$$

Por lo tanto, el principio de conservación de masa podría escribirse como:

$$m_{entra} - m_{sale} = \Delta m_{VC} \rightarrow \Delta m_{VC} + m_{sale} - m_{entra} = 0$$

Si la integral de superficie se divide por partes se tendrá que:

$$\int_{SC} \rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n})dA = \sum_{Salida} \rho|v|A - \sum_{Entrada} \rho|v|A$$

Donde  $A$  representa el área de una entrada o salida, y los símbolos de sumatoria son usados para enfatizar que todas las entradas y salidas deben ser consideradas.

Ha de decirse que existe considerable flexibilidad en la selección de un volumen de control cuando se resuelve un problema. Sin embargo, suele ser conveniente seleccionar un volumen de control cuya superficie de control sea normal al flujo en todas las localizaciones en donde cruza el flujo. Ya que de esta manera el producto punto  $\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}$  es simplemente la magnitud de la velocidad.

1. Superficie de control en un ángulo al flujo

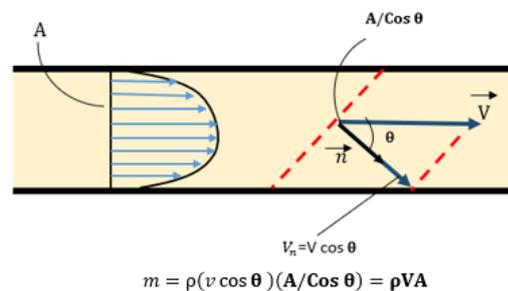


Gráfico 9 Superficie de control respecto al ángulo de flujo

Fuente: Autores

2. Superficie de control normal al flujo

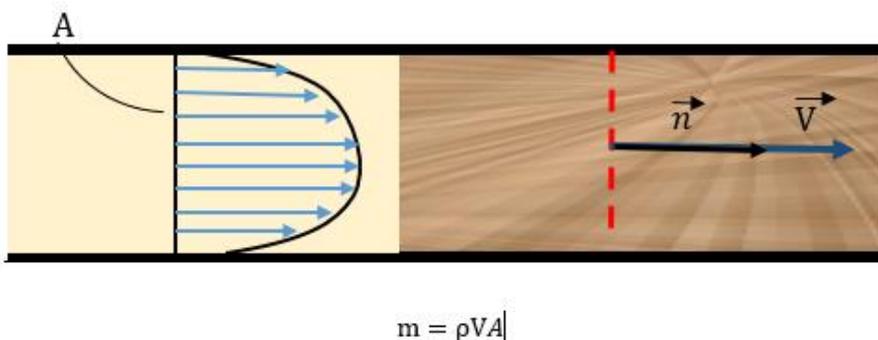


Gráfico 10 Superficie de control normal al flujo

Fuente: Autores

En el caso de que se trate de un sistema que se mueve o se deforma, en las expresiones anteriores se debe remplazar la velocidad absoluta por la velocidad relativa.

El principio de conservación de la masa requiere que la cantidad total de masa que entra a un volumen de control sea igual a la cantidad total de masa que sale del mismo. Por ejemplo, para una tobera de manguera de jardín que opera de forma estacionaria, la cantidad de agua que entra a ella por unidad de tiempo es igual a la cantidad de agua que sale por unidad de tiempo. Cuando se trata de procesos de flujo estacionario, el interés no se centra en la cantidad de masa que entra o sale de un dispositivo con el tiempo, pero sí se está interesado en la cantidad de masa que fluye por unidad de tiempo, es decir, el flujo másico  $m$ .

El principio de conservación de la masa para un sistema general de flujo estacionario con entradas y salidas múltiples se puede expresar en forma de tasa como se muestra en la figura.

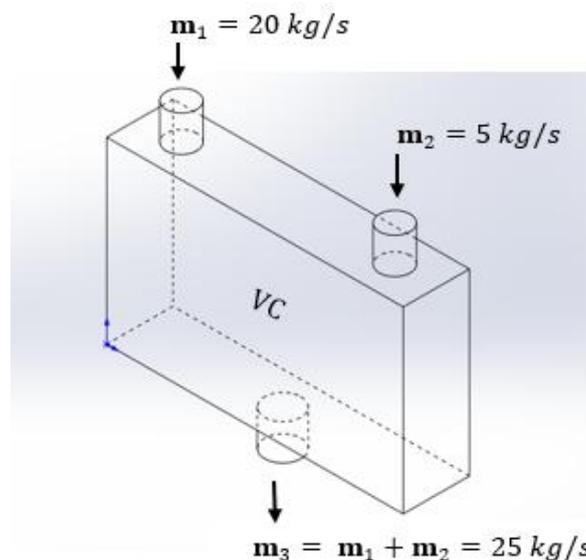


Gráfico 11 Principio de conservación de la masa

Fuente: Autores

Balance de masa para proceso de estado estable.

$$\int_{SC} \rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dA = 0$$

$$\sum_{Salida} \rho |v| A - \sum_{Entrada} \rho |v| A$$

$$\sum_{Entrada} m = \sum_{Salida} m$$

### 2.1.5 Flujo volumétrico

El volumen del fluido que pasa por una sección transversal por unidad de tiempo permite determinar el volumen de fluido que atraviesa una sección del conducto y ofrece una medida de la velocidad con la que se desplaza el fluido por el mismo.

$$v = \int_{A_c} v_n dA_c = V_{prom} A_c = VA_c \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

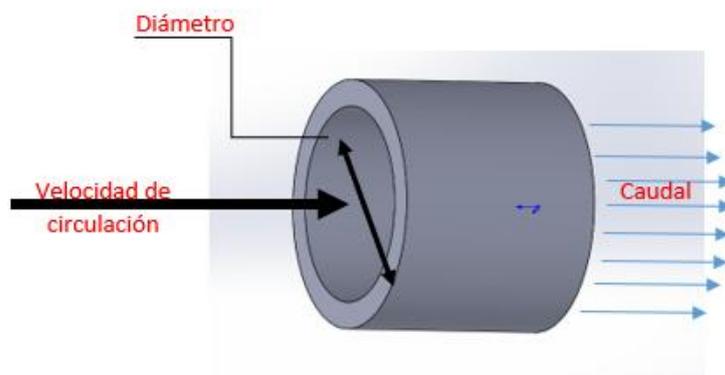


Gráfico 12 Flujo volumétrico

Fuente: Autores

### 2.1.6 Caso especial: flujo incompresible

En el caso de fluidos incompresibles, la densidad es contante y por lo tanto para un sistema de estado estable, del principio de conservación de masa se tendrá que:

$$\sum_{entrada} \dot{V} = \sum_{salida} \dot{V}$$

Ha de comentarse que esta es una forma simplificada del principio de conservación de masa para el caso en cuestión y no debe interpretarse como un principio de conservación de volumen.

$$\dot{m}_1 = 2kg/s$$

$$\dot{v}_2 = 8 \text{ m}^3/s$$

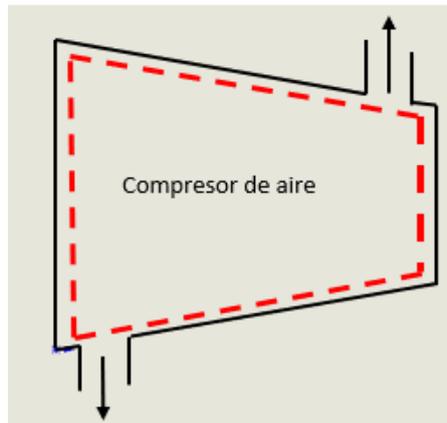


Gráfico 13 Compresor de aire

Fuente: Autores

$$\sum_{\text{entrada}} \dot{V} = \sum_{\text{salida}} \dot{V}$$

$$\dot{m}_1 = 2 \text{ kg/s}$$

$$\dot{v}_2 = 1.4 \text{ m}^3/\text{s}$$

### 2.1.7 Tipos de energía

La energía puede existir en varias formas: térmica, mecánica, cinética, potencial, eléctrica, magnética, química y nuclear, cuya suma conforma la energía total  $E$  de un sistema.

$$e = \frac{E}{m}$$

En el análisis termodinámico, con frecuencia es útil considerar dos grupos para las diversas formas de energía que conforman la energía total de un sistema: macroscópicas y microscópicas.

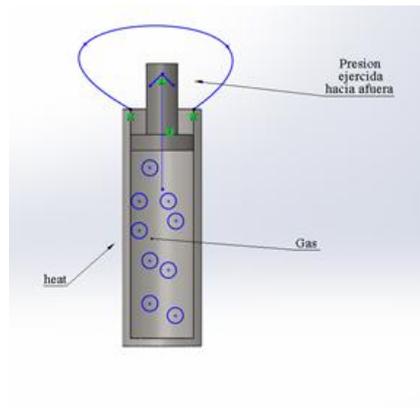


Gráfico 14 Dispositivo cilindro-embolo presión hacia afuera

Fuente: Autores

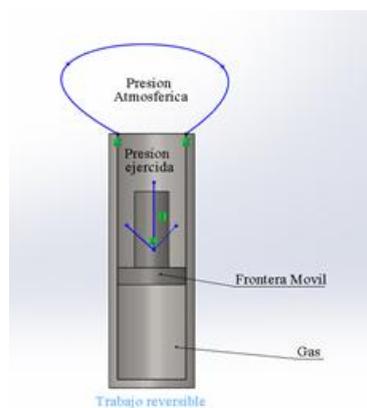


Gráfico 15 Dispositivo cilindro-embolo presión hacia adentro

Fuente: Autores

### 2.1.8 Energía Mecánica

La mecánica es la ciencia que estudia el movimiento de los cuerpos bajo la acción de las fuerzas participantes. En física, los estudios teóricos sobre los comportamientos mecánicos de los objetos como, por ejemplo, en la mecánica clásica, la mecánica relativista y la mecánica cuántica es importante para entender la dinámica del mundo que nos rodea.

La energía mecánica se puede definir como: la forma de energía que se puede convertir completamente en trabajo mecánico de modo directo mediante un dispositivo mecánico como una turbina ideal.

Maquina termica → ciclo en sentido horario →  $w > 0$

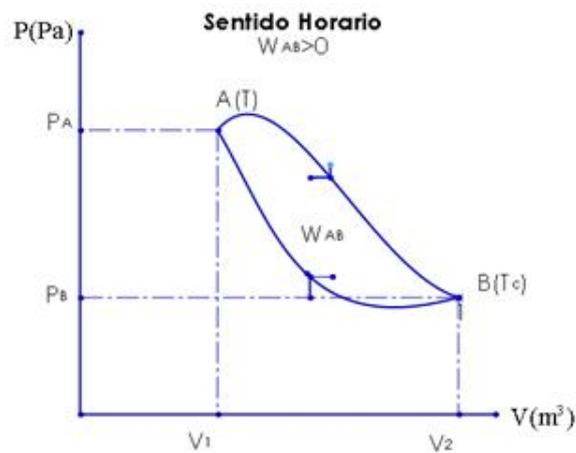


Gráfico 16 Ciclo en sentido horario

Fuente: Autores

Refrigerador → ciclo en sentido antihorario →  $w < 0$

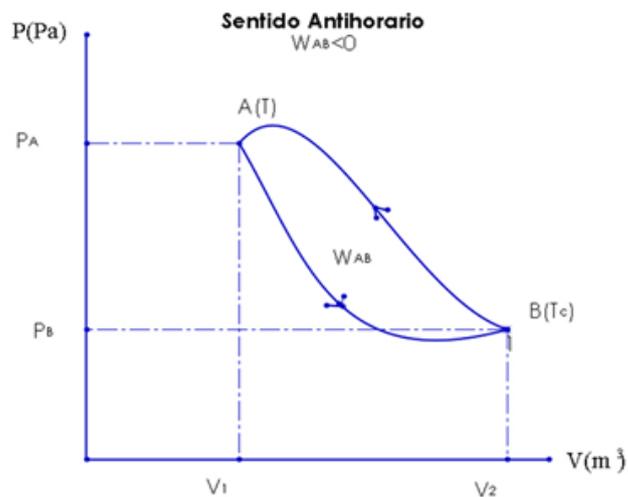


Gráfico 17 Ciclo en sentido antihorario

Fuente: Autores

## 2.2 Primera ley de la termodinámica

“La energía no se crea ni se destruye, solo se transforma”, cada cantidad de energía por pequeña que sea debe justificarse durante el proceso termodinámico. La primera ley de la termodinámica aplica el principio de conservación de energía a sistemas donde transfiere calor y hacer un trabajo, son los métodos de intercambio de energía dentro y

fuera del sistema. La primera ley de la termodinámica establece que el cambio en la energía interna de un sistema,  $\Delta U$  es igual al calor neto que se le transfiere,  $Q$ , más el trabajo neto que se hace sobre él,  $W$ .

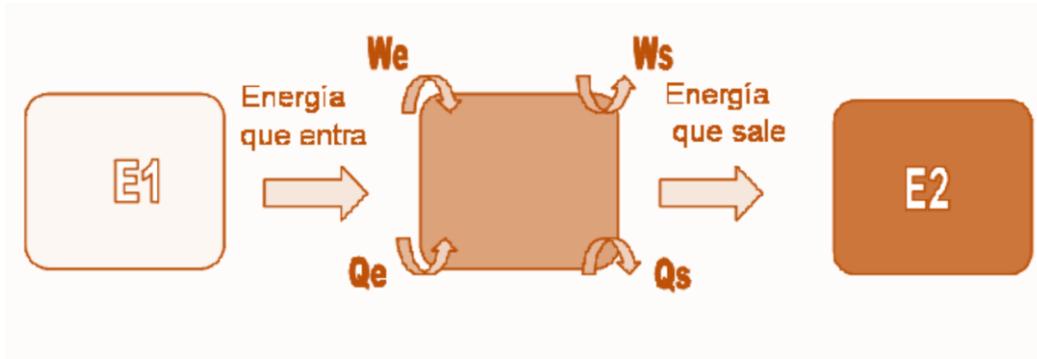


Figura 7 Primera ley de la termodinámica

Fuente: (Barbosa,2016, pag.77)

### 2.2.1 Principio de conservación de la energía

A partir de observaciones experimentales, la primera ley de la termodinámica establece que la energía no se puede crear ni destruir durante un proceso; sólo puede cambiar de forma. Por lo tanto, cada cantidad de energía por pequeña que sea debe justificarse durante un proceso.

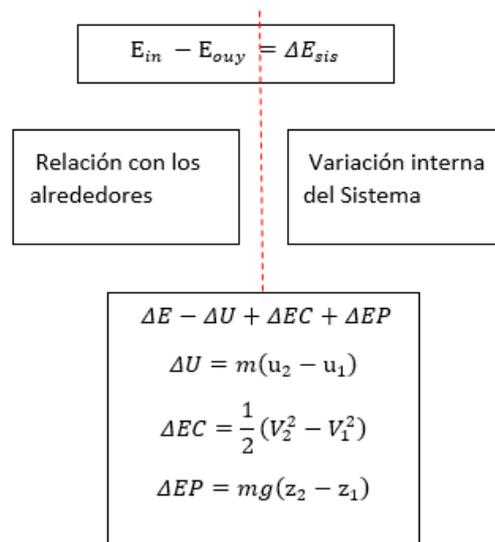


Gráfico 18 Principio de la conservación de la energía

Fuente: Autores

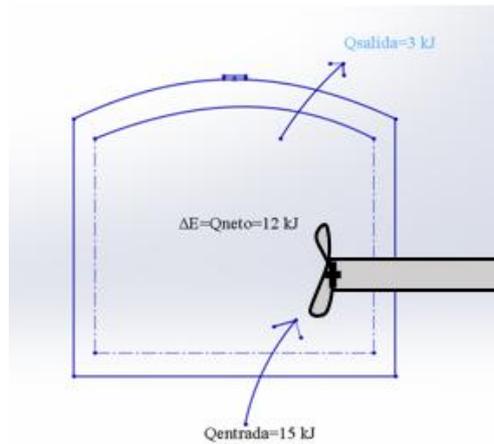


Gráfico 19 Conservación de la energía

Fuente: Autores

### Explicación

La fuerza impulsora para el flujo de fluido es la diferencia de presión, y una bomba opera elevando la presión de un fluido al convertir el trabajo de flecha mecánico en energía de flujo. Una bomba de gasolina consume  $5.2 \text{ kW}$  de potencia eléctrica cuando trabaja, si la diferencia de presión entre la salida y la entrada de la bomba es de  $5 \text{ kPa}$  y los cambios de velocidad y elevación son insignificantes, determine el caudal máximo posible de gasolina.

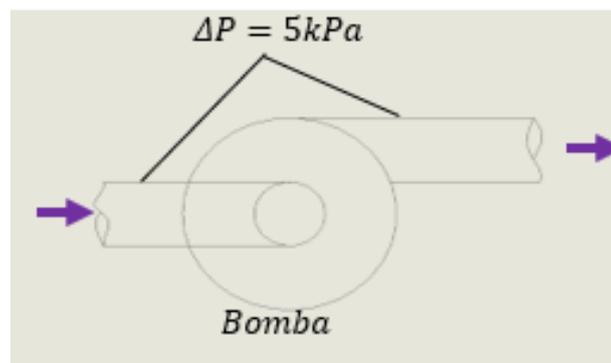


Gráfico 20 Ejemplo de la conservación de la energía

Fuente: Autores

### 2.2.2 Eficiencia energética

Eficiencia es uno de los términos más usados en termodinámica, e indica qué tan bien se realiza un proceso de conversión o transferencia de energía.

$$\eta = \frac{\text{salida deseada}}{\text{entrada requerida}}$$

Ejemplo.

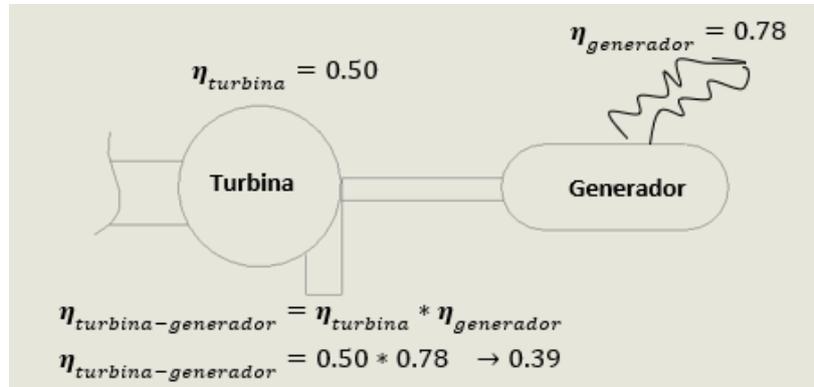


Gráfico 21 Ejemplificación de la eficiencia energética

Fuente: Autores

$$\eta_{motor} = \frac{\text{salida de potencia meanica}}{\text{entrada de potencia electrica}} = \frac{\dot{W}_{flecha,salida}}{\dot{W}_{flecha,entrada}}$$

$$\eta_{generador} = \frac{\text{salida de potencia electrica}}{\text{entrada de potencia mecanica}} = \frac{\dot{W}_{flecha,salida}}{\dot{W}_{flecha,entrada}}$$

Para producir electricidad, en la base de un gran lago se instalará una turbina hidráulica-generador donde la profundidad del agua es de 50 m. El agua se suministrará a una tasa de 5 000 kg/s. Si la potencia eléctrica generada es de 1 862 kW y la eficiencia del generador de 95 % , determine:

1. La eficiencia global de la turbina-generador
2. La eficiencia mecánica de la turbina
3. La potencia de flecha que la turbina suministra al generador.

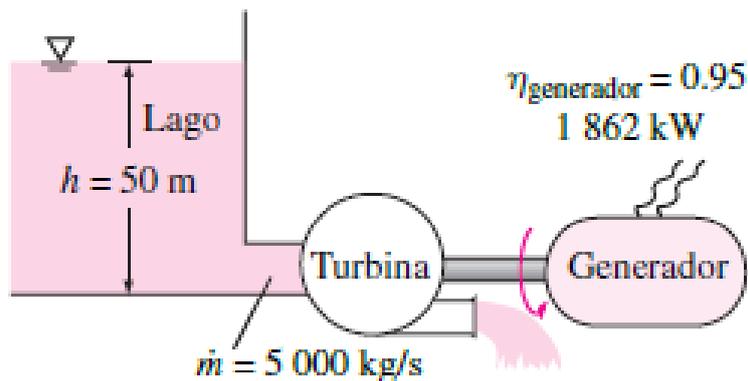


Figura 8 Desempeño de una turbina hidráulica-generador

Fuente: (Cengel,2006, pag.84)

### 2.2.3 Energía Eólica

La energía eólica es la energía que se obtiene del viento. Se trata de un tipo de energía cinética producida por el efecto de las corrientes de aire. Esta energía la podemos convertir en electricidad a través de un generador eléctrico. Es una energía renovable, limpia, que no contamina y que ayuda a reemplazar la energía producida a través de los combustibles fósiles.

Un sitio evaluado para construir una granja eólica tiene vientos permanentes a una velocidad de  $8.5 \text{ m/s}$ . Determine la energía eólica:

1. Por unidad de masa.
2. Para una masa de  $10 \text{ kg}$ .
3. Para un flujo de  $1\,154 \text{ kg/s}$  de aire.

#### Solución:

Un turbogenerador hidráulico va a generar electricidad a partir de agua de un lago. Deben determinarse la eficiencia total, la eficiencia de la turbina y la potencia en la flecha.

**Hipótesis 1:** El nivel de agua en el lago permanece constante 2.

La energía mecánica del agua a la salida de la turbina es despreciable.

**Propiedades.** La densidad del agua puede tomar como  $\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$ .

**Análisis.**

- a) Por conveniencia, se toma el fondo del lago como el nivel de referencia. Entonces, la energía cinética y la potencial del agua son cero y el cambio en su energía mecánica por unidad de masa.

$$E_{mecanica, entrada} - E_{mecanica, salida} = \frac{P}{\rho} - 0 - gh = \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) (50m) \left(\frac{\frac{1KJ}{Kg}}{\frac{1000m^2}{s^2}}\right)$$

$$E_{mecanica, entrada} - E_{mecanica, salida} = \frac{0.491KJ}{Kg}$$

Por lo tanto, la razón a la cual la energía mecánica es suministrada a la turbina por el fluido y la eficiencia total queda:

$$\Delta E_{mecanica, fluido} - m(E_{mecanica, entrada} - E_{mecanica, salida}) = \left(\frac{5000kg}{s}\right) \left(\frac{0.491KJ}{Kg}\right)$$

$$n_{turbo\ generador} = n_{turbina, generador} = \frac{\dot{W}_{electrico, salida}}{\Delta E_{mecanica, fluido}}$$

$$\frac{\dot{W}_{electrico, salida}}{\Delta E_{mecanica, fluido}} = \frac{1862kw}{2455kw} = 0.76$$

- b) si se conoce la eficiencia total y la del generador la eficiencia mecánica de la turbina se determina a partir de:

$$n_{turbo\ generador} = n_{turbina, generador} \rightarrow n_{turbina} = \frac{n_{turbo\ generador}}{n_{generador}} = \frac{0.76}{0.95} = 0.80$$

- c) la salida de potencia en la flecha se termina con base en la definición de eficiencia mecánica.

$$W_{flecha, salida} = n_{turbina} |\Delta E_{mecanica, fluido}| = (0.8) * (2455kw)$$

$$= 1964 Kw$$

**NOTA:** El lago alimenta 2455 kW de energía mecánica a la turbina, la cual convierte 1964 kW de ella en trabajo en la flecha que impulsa el generador, el cual genera 1862 kW de potencia eléctrica, se tiene pérdidas irreversibles a través de cada componente.

### 2.3 Transferencia de calor

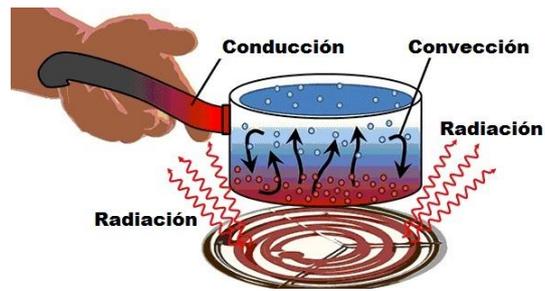


Figura 9 Principios físicos de la termodinámica

Fuente: (Ejemplos.com,2019)

Calor: es la forma de energía que se transfiere en dos sistemas (o entre un sistema y sus alrededores) debido a una diferencia de temperatura. El calor es energía en transmisión y se reconoce solo cuando cruza la frontera de un sistema

La transferencia de calor es el proceso de propagación del calor en distintos medios. La parte de la física que estudia estos procesos se llama a su vez transferencia de calor o transmisión de calor o transferencia térmica. La transferencia de calor se produce siempre que existe un gradiente térmico o cuando dos sistemas con diferentes temperaturas se ponen en contacto. El proceso persiste hasta alcanzar el equilibrio térmico la energía puede cruzar la frontera de un sistema cerrado en dos formas distintas: calor y trabajo.

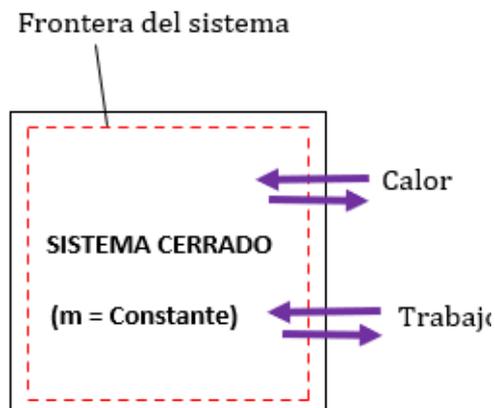


Gráfico 22 Sistema termodinámico

Fuente: Autores

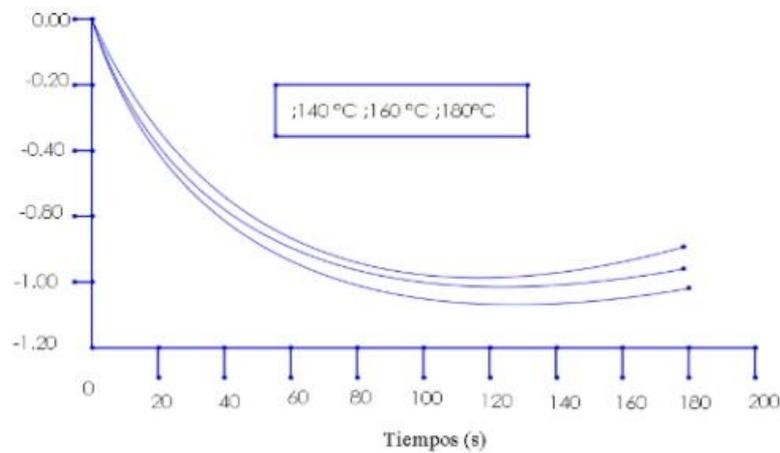


Gráfico 23 Dirección de la transferencia de energía

Fuente: Autores

$$q = \frac{Q}{m} \left[ \frac{KJ}{kg} \right]$$

### 2.3.1 Conducción

El calor por conducción se produce cuando dos objetos a diferentes temperaturas entran en contacto. El calor fluirá a través del objeto de mayor temperatura hacia el de menor buscando alcanzar el equilibrio térmico (ambos objetos a la misma temperatura).

### 2.3.2 Convección

La transmisión de calor por convección tiene lugar en líquidos y gases. Ésta se produce cuando las partes más calientes de un fluido ascienden hacia las zonas más frías, generando de esta manera una circulación continua del fluido (corriente convectiva) y transmitiendo así el calor hacia las zonas frías.

### 2.3.3 Radiación

La transferencia de calor por radiación no necesita el contacto de la fuente de calor con el objeto de que se desea calentar. A diferencia de la conducción y convección, no precisa de materia para calentar.

## **PRINCIPIOS DE TERMODINÁMICA: CONCEPTOS Y APLICACIONES**

El calor es emitido por un cuerpo debido a su temperatura. Para este caso podemos tomar como ejemplo el sol. El calor que nos llega del sol viaja por el espacio vacío y calienta la superficie de la Tierra.

## 2.4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**BARBOSA SALDAÑA, J. Y GUTIÉRREZ TORRES, C.** “Termodinámica para ingenieros”. México: Grupo Editorial Patria, 2016. p. Obtenido de: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/40432?page=77>

**CRIADO-SANCHO, M. CASAS-VÁZQUEZ, J. Y JOU, D.** “Termodinámica química”. UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2019. p. Obtenido de: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/175801?page=59>

**HELIOESFERA,** “Radiación Solar”, 2021, Málaga, Disponible en: <https://www.helioesfera.com/la-radiacion-solar/#>

**FACTORENERGIA,** “Eficiencia energética Energía eólica. Qué es, cómo funciona, ventajas y desventajas”, 2018, Barcelona, Disponible en: <https://n9.cl/vkwi>

**ENCICLOPEDIA DE EJEMPLOS,** "Conducción, Convección y Radiación", (2019), Obtenido de: <https://n9.cl/tlve8>

**ESTEFANIA COLUCCIO LESKOW,** Concepto, “Transferencia de calor”, 2021, Editorial Etecé, Argentina, Buenos Aires, 2021, Obtenido de: <https://concepto.de/transferencia-de-calor/>

“Análisis de masa y energía de volúmenes de control” Disponible en: <https://n9.cl/v18c>

# CAPÍTULO III



RELACIONES DE  
ENERGÍA

## CAPÍTULO 3

# RELACIONES DE ENERGÍA

### 3.1 Sustancia Pura

Las sustancias puras pueden existir en más de una etapa, aunque cada fase debe albergar la misma composición química. El líquido es una sustancia pura. Las diversas combinaciones de sus tres etapas tienen la misma composición química. El aire, en su fase gaseosa, es una sustancia pura, sin embargo, el aire líquido tiene diferente composición química. El aire no es una sustancia pura si existe en más de una fase. Además, aquí exclusivamente se considera una sustancia simple compresible (en otras palabras, una sustancia que está esencialmente libre de efectos de tensión magnética, eléctrica o superficial).

Una sustancia pura puede existir en tres fases diferentes: sólida, líquida y gaseosa

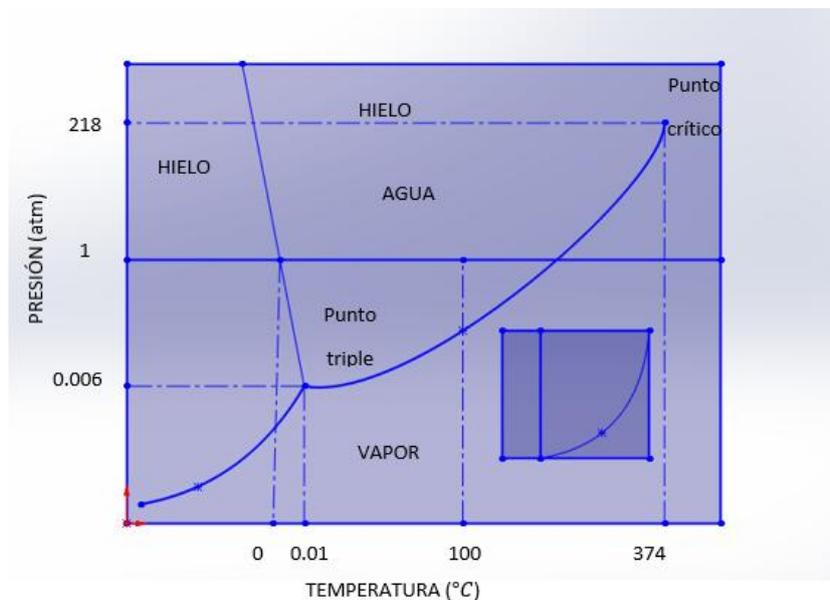


Gráfico 24 Diagrama de fases

Fuente: Autores

#### 3.1.1 Procesos de cambio de fase

Decimos que se produce un cambio de fase cuando una sustancia pasa de una etapa a otra que puede coexistir con la primera. En general, una sustancia pura puede existir en una cualquiera de tres fases, o en una unión de ellas: la fase sólida, la fase líquida y la

fase gaseosa o de vapor. La fusión es el cambio de fase de sólido a líquido. El cambio en sentido contrario se llama solidificación (o congelación en el caso del agua). El cambio de fase de líquido a gas se denomina vaporización y se dice que la sustancia líquida se vaporiza (o se evapora, en el caso del agua). El cambio de vapor (o fase gaseosa) a líquido se conoce como condensación y durante el proceso se dice que el vapor se condensa. No todas las sustancias pasan por estas tres fases; algunas normalmente van directo de la fase sólida a la gaseosa (o viceversa), un cambio denominado sublimación. Además, muchas sustancias que ordinariamente pasan por las tres fases durante el calentamiento de la fase sólida pueden sublimarse en ciertas circunstancias. Por ejemplo, un trozo de hielo expuesto a la atmósfera a temperaturas inferiores a  $0^{\circ}\text{C}$  se sublimará y, si transcurre el tiempo suficiente, pasará enteramente a la atmósfera como vapor de agua.

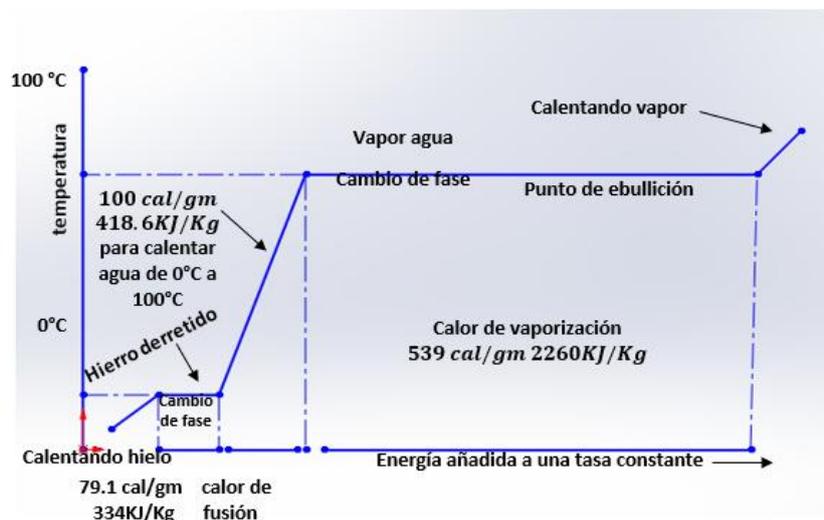


Gráfico 25 Diagrama del proceso de cambio de fase

Fuente: Autores

### 3.1.2 Diagrama de fase

Los diagramas de fase son la representación gráfica de las propiedades termodinámicas de un sistema, esto es de suma importancia para tener la información pertinente de los materiales con los que se trabaja.

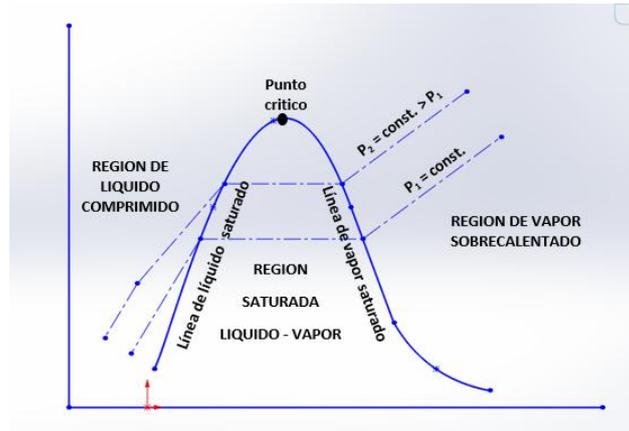


Gráfico 26 Diagrama T-v de una sustancia pura

Fuente: Autores

### 3.1.3 Interpolación

La interpolación se usa para hallar aproximadamente valores desconocidos a partir de una compilación de datos conocidos y ponderados. Este método nos permitirá hallar un valor intermedio entre dos puntos, aunque parezca sencillo este método será de gran ayuda a la hora de obtener datos desconocidos de las tablas termodinámicas.

Formula:

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} * (x - x_1)$$

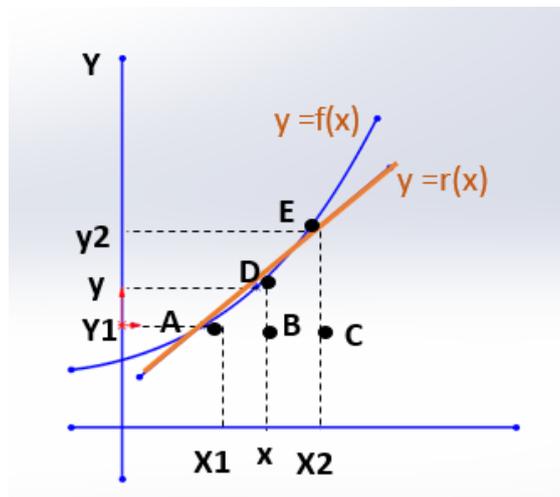


Gráfico 27 Diagrama de interpolación

Fuente: Autores

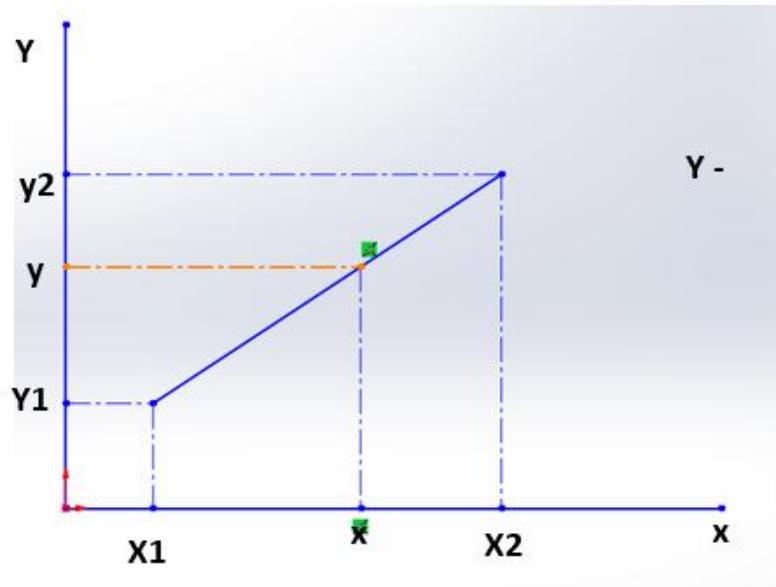


Gráfico 28 Recta de interpolación

Fuente: Autores

Encontrar la energía interna (u) a 905° C

Desarrollo:

T(°C)	u(kJ/kg)
900	3733,3
905	3744,28
1000	3952,9

$$Y = Y1 + \frac{(Y2 - Y1)}{(X2 - X1)} * (X - X1)$$

$$Y = 3733,3 + \frac{(3952,9 - 3733,3)}{(1000 - 900)} * (905 - 900)$$

**Y = 3744,28 (kJ/kg)**

T (°C)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)
375	0,001641	1677,0	1742,0	3,8290
400	0,001911	1854,9	1931,4	4,1145
425	0,002538	2097,5	2199,0	4,5044
450	0,003692	2364,2	2511,8	4,9448
500	0,005623	2681,6	2906,5	5,4744
550	0,006985	2875,0	3154,4	5,7857
600	0,008089	3026,8	3350,4	6,0170
650	0,009053	3159,5	3521,6	6,2078
700	0,009950	3262,0	3679,1	6,3740
800	0,011521	3511,8	3972,6	6,6612
900	0,012980	3733,3	4252,5	6,9106
1000	0,014360	3952,9	4527,3	7,1355
1100	0,015642	4167,4	4793,1	7,3365
1200	0,016846	4380,1	5057,7	7,5224
1300	0,018229	4594,3	5323,5	7,6969

Gráfica

Gráfico 29 Ejemplo de interpolación

Fuente: Autores

### 3.1.4 Presión y temperatura

La altura a la que estamos es algo determinante para cosas tan sencillas como la cocción de alimentos, la cocción de alimentos a nivel del mar será más rápida debido a una mayor presión atmosférica.

### 3.1.5 Líquido Comprimido

Se refiere a un estado en el cual el líquido de ninguna manera está a punto de evaporarse y el agua en este estado estará simplemente en estado líquido, para que se de este estado se debe de tener una temperatura muy baja.

Para un sistema cilindro embolo, con agua en su interior en fase liquida y con unos valores de presión y temperatura de: Presión: 1 atm y temperatura: 20 °C

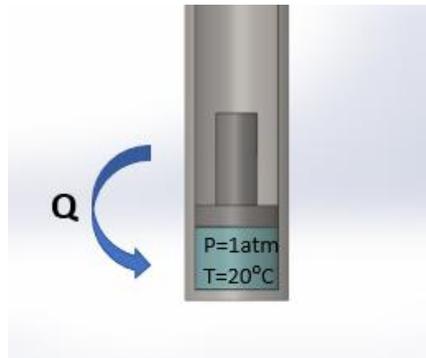


Gráfico 30 Dispositivo cilindro-embolo de líquido comprimido

Fuente: Autores

### 3.1.6 Mezcla Saturada

Es la mezcla en la que pueden coexistir la fase líquida y la fase gaseosa, estos estados están en medio de los estados líquido saturado y vapor saturado.

Para un sistema cilindro embolo, con agua en su interior en proceso de ebullición con un aumento de volumen y disminución de agua que se está convirtiendo en vapor:

Presión: 1 atm y temperatura: 100 °C

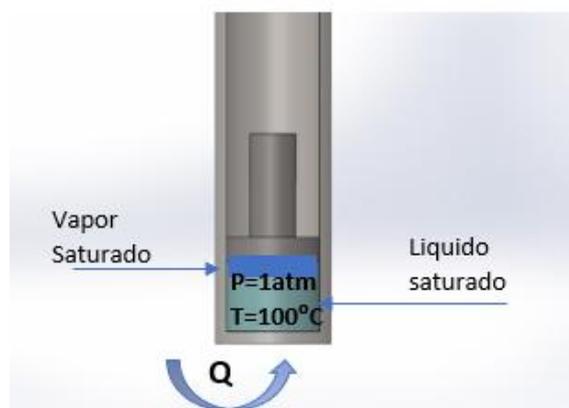


Gráfico 31 Cilindro-embolo con mezcla saturada

Fuente: Autores

### 3.1.7 Vapor Sobrecalentado

Este estado se da cuando se da cierta temperatura a un líquido hasta que llega al estado de vapor saturado y la temperatura sigue subiendo, si ocurren estas condiciones el líquido llegará al estado de vapor sobrecalentado.

Para un sistema cilindro embolo, con agua en ebullición cesando, con un incremento de la temperatura del vapor e igualmente aumento de valores de presión: Presión: 1 atm y temperatura: 300 °C

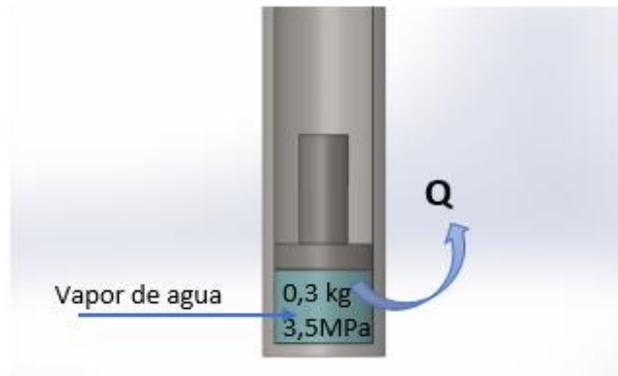


Gráfico 32 Vapor sobrecalentado

Fuente: Autores

### 3.1.8 Líquido Saturado

Este estado se da cuando el líquido comprimido recibe la suficiente temperatura para estar a punto de evaporarse.

Para un sistema cilindro embolo, con agua en su interior, calentado hasta una temperatura 100 sin una disminución de la cantidad de agua: Presión: 1 atm y temperatura: 100 °C

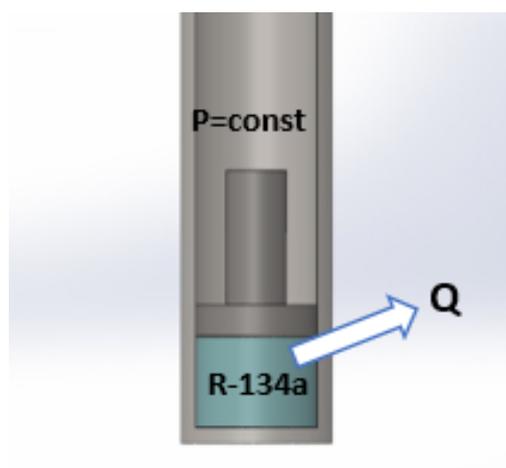


Gráfico 33 Líquido saturado

Fuente: Autores

### 3.1.9 Vapor Saturado

El estado de vapor saturado se da cuando el vapor está a punto de condensarse. Para un sistema cilindro embolo, con agua en su interior en ebullición con aumento constante de volumen y disminución total del agua transformándose completamente en vapor: Presión: 1 atm y temperatura: 100 °C.

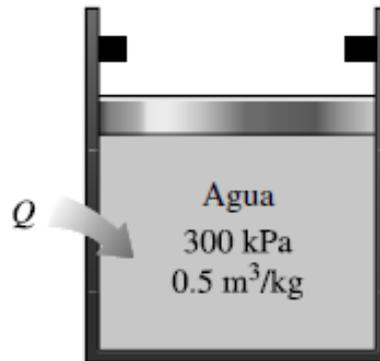


Figura 10 Vapor saturado

Fuente: (Cengel,2006, pag.163)

### 3.2 Diagrama de Propiedades

Los diagramas de propiedades son tres, el primero es el diagrama de temperatura vs Volumen específico (T-v), el segundo es el diagrama de Presión vs Volumen específico (P-v) y el tercero que es el diagrama de Presión vs Temperatura (P-T).

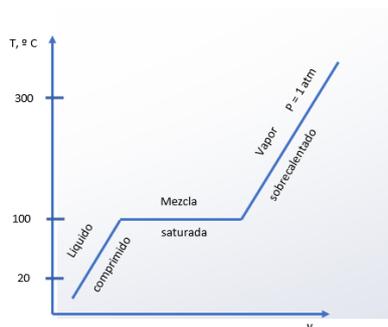


Gráfico 34 Diagrama T-v para el proceso de calentamiento de agua a presión constante

Fuente: Autores

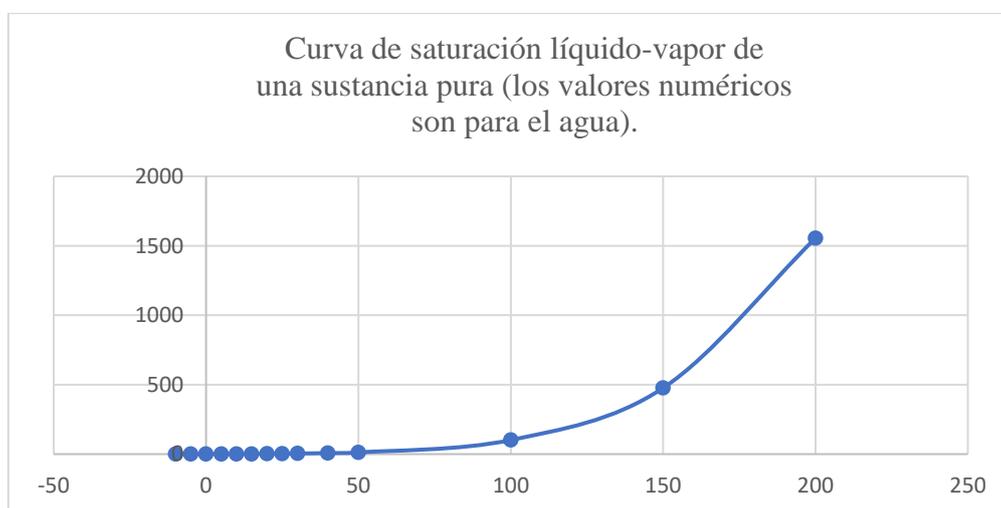
La temperatura a la cual comienza a hervir el agua depende de la presión; en consecuencia, si la presión es constante, sucede lo mismo con la temperatura de ebullición.

**Tabla 3**

*Presión de saturación del agua*

Presión de saturación (ebullición) del agua a distintas temperaturas	
Temperatura, $T, ^\circ C$	Presión de saturación, $P_{sat}, kPa$
-10	0,26
-5	0,4
0	0,61
5	0,87
10	1,23
15	1,71
20	2,34
25	3,17
30	4,25
40	7,39
50	12,35
100	101,4
150	476,2
200	1555
250	3976
300	8588

Fuente: Autores



**Gráfico 35** Curva de saturación de una sustancia pura

Fuente: Autores

### **Temperatura – volumen específico**

En el siguiente diagrama se puede apreciar tres regiones, la región de líquido comprimido, la región saturada líquido-vapor y la región de vapor sobrecalentado.

También encontramos una línea que recorre todo el gráfico que es la línea P constante que empieza la región de líquido comprimido y acaba en la región de vapor sobrecalentado.

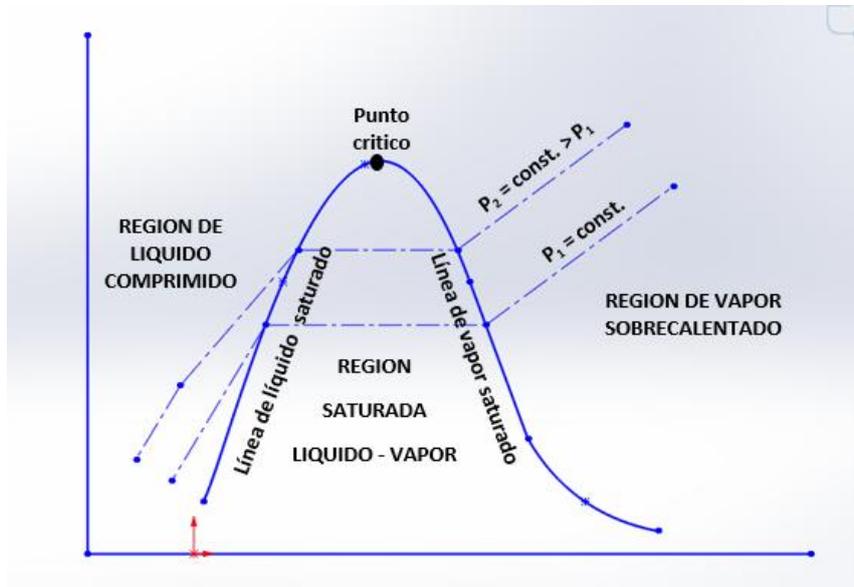


Gráfico 36 Ilustración del diagrama Temperatura-volumen específico

Fuente: Autores

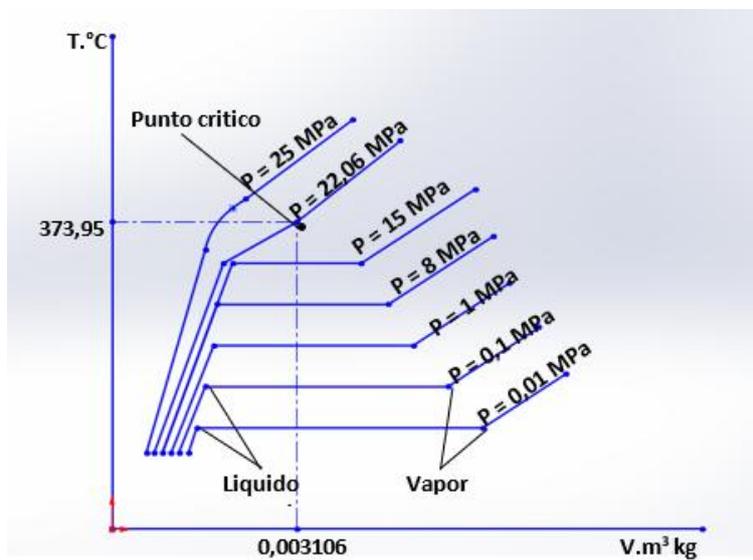


Gráfico 37 Diagrama T-v de procesos de cambio de fase a

Fuente: Autores

### Presión – volumen específico

El diagrama tiene una gran línea que recorre el gráfico que es la línea de temperatura constante que desciende de izquierda a derecha.

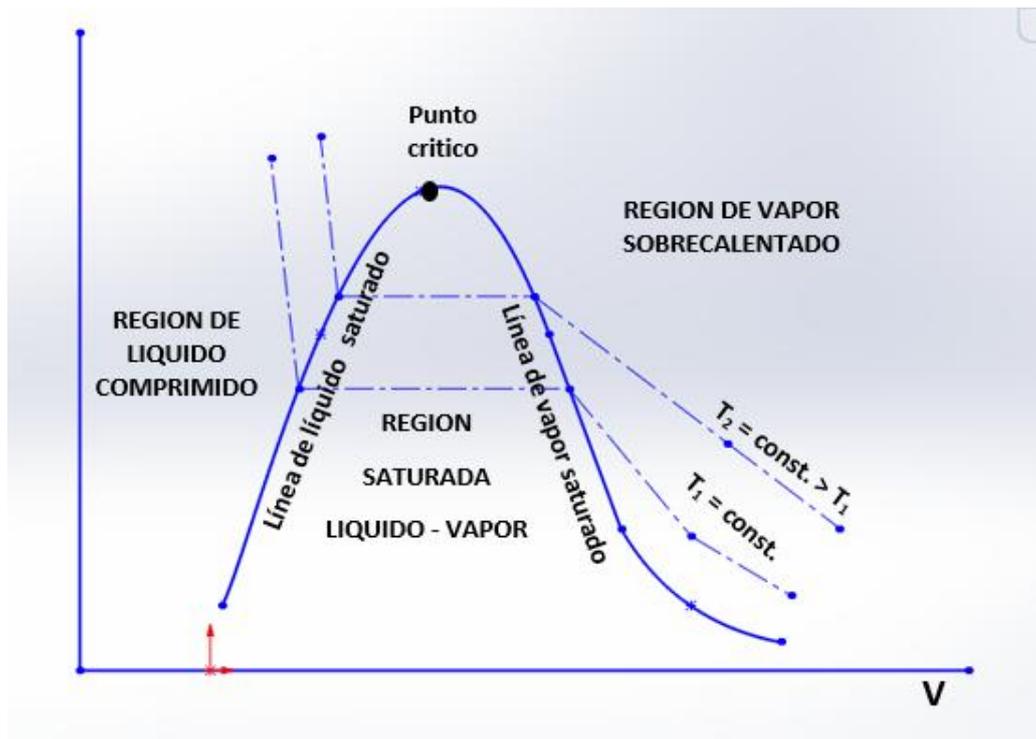


Gráfico 38 Diagrama P-v de una sustancia pura

Fuente: Autores

### Presión – Temperatura

Este diagrama se lo conoce también con diagrama de fase ya que en el mismo se puede identificar ya que está separado por tres líneas. La línea que tiene el nombre de sublimación es la que está separando la fase sólida de la fase de vapor, la línea de vaporización separa la fase vapor de la línea de fusión separa la fase sólida de la fase líquida.

Las tres líneas mencionadas coinciden en un punto que es el punto triple, que es el punto en el que pueden estar las tres fases termodinámicas en este estado se puede tener vapor, líquido y hielo al mismo tiempo.

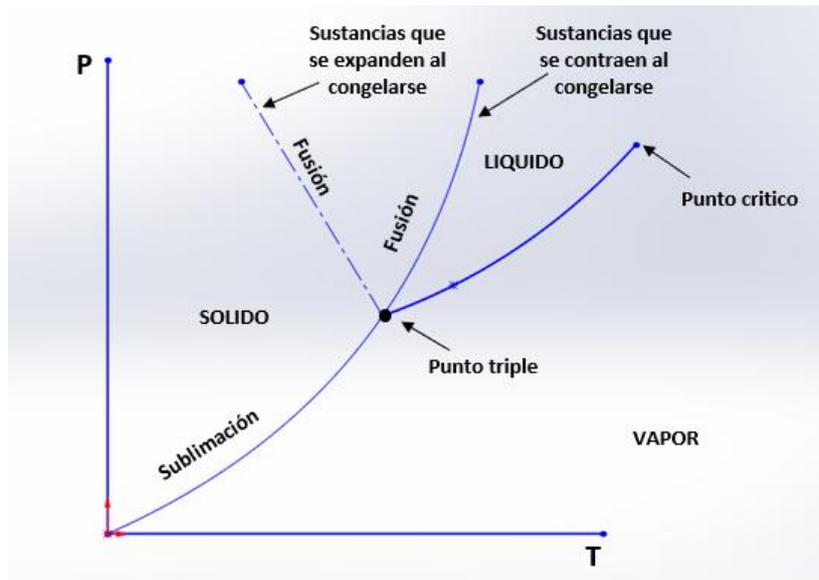


Gráfico 39 Diagrama T-v de sustancias puras

Fuente: Autores

### 3.3 Tablas Termodinámicas

#### 3.3.1 Tabla A4

Esta tabla se utiliza si la sustancia que estamos trabajando se encuentra entre el punto de líquido saturado y el punto de vapor saturado.

Esta tabla está dividida en seis propiedades termodinámicas que son la temperatura, la presión de saturación, el volumen específico, la energía interna, la entalpía y la entropía. Tenemos que tener en cuenta que en los ejercicios en el que se da como dato la temperatura y debemos de calcular alguna propiedad recurriríamos a esta tabla.

TABLA A-4

Agua saturada. Tabla de temperaturas

Temp., T °C	Pres. sat., P <sub>sat</sub> kPa	Volumen específico, m <sup>3</sup> /kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
		Líqu. sat., v <sub>f</sub>	Vapor sat., v <sub>g</sub>	Líqu. sat., u <sub>f</sub>	Evap., u <sub>fg</sub>	Vapor sat., u <sub>g</sub>	Líqu. sat., h <sub>f</sub>	Evap., h <sub>fg</sub>	Vapor sat., h <sub>g</sub>	Líqu. sat., s <sub>f</sub>	Evap., s <sub>fg</sub>	Vapor sat., s <sub>g</sub>
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661

Figura 11 Tabla A4. Agua saturada. Tabla de temperaturas

Fuente: (Cengel,2014, pag.914)

El subíndice f se emplea para denotar propiedades de un líquido saturado y el subíndice g para expresar las propiedades de vapor saturado.

*vf: Volumen específico del líquido saturado*

*vg: Volumen específico del vapor saturado*

### 3.3.2 **Tabla A5**

Esta tabla se utiliza si la sustancia que estamos trabajando se encuentra entre el punto de líquido saturado y el punto de vapor saturado.

Esta tabla está dividida en seis propiedades termodinámicas que son la presión, la temperatura de saturación, el volumen específico, la energía interna, la entalpía y la entropía. Tenemos que tener en cuenta que en los ejercicios en el que se da como dato la presión y debemos de calcular alguna propiedad recurriríamos a esta tabla.

TABLA A-5												
Agua saturada. Tabla de presiones												
Pres., P kPa	Temp. sat., T <sub>sat</sub> °C	Volumen específico, m <sup>3</sup> /kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
		Liq. sat., v <sub>f</sub>	Vapor sat., v <sub>g</sub>	Liq. sat., u <sub>f</sub>	Evap., u <sub>fg</sub>	Vapor sat., u <sub>g</sub>	Liq. sat., h <sub>f</sub>	Evap., h <sub>fg</sub>	Vapor sat., h <sub>g</sub>	Liq. sat., s <sub>f</sub>	Evap., s <sub>fg</sub>	Vapor sat., s <sub>g</sub>
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.9	2407.9	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765

Figura 12 Tabla A5. Agua saturada. Tabla de presiones

Fuente: (Cengel,2014, pag.916)

Durante un proceso de evaporación, una sustancia existe como una parte líquida y otra de vapor, es decir, es una mezcla de líquido y vapor saturados.

Calidad:

$$x = \frac{m_{vapor}}{m_{total}}$$

$$x = \frac{V_{prom} - v_f}{V_{fg}}$$

### 3.3.3 **Tabla A6**

Esta tabla se utiliza si la sustancia que estamos trabajando se encuentra en la región de vapor sobrecalentado. Esta tabla está dividida en apartados, en el primer apartado encontraremos seis propiedades termodinámicas que son la temperatura, el volumen específico, la energía interna, la entalpía y la entropía, en el segundo apartado encontraremos la Presión.

**TABLA A-6**

Vapor de agua sobrecalentado

<i>T</i> °C	<i>v</i> m <sup>3</sup> /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m <sup>3</sup> /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m <sup>3</sup> /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K
<i>P</i> = 0.01 MPa (45.81°C)*				<i>P</i> = 0.05 MPa (81.32°C)				<i>P</i> = 0.10 MPa (99.61°C)				
Sat. <sup>1</sup>	14.670	2437.2	2583.9	8.1488	3.2403	2483.2	2645.2	7.5931	1.6941	2505.6	2675.0	7.3589
50	14.867	2443.3	2592.0	8.1741								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4489	3.4187	2511.5	2682.4	7.6953	1.6959	2506.2	2675.8	7.3611
150	19.513	2587.9	2783.0	8.6893	3.8897	2585.7	2780.2	7.9413	1.9367	2582.9	2776.6	7.6148
200	21.826	2661.4	2879.6	8.9049	4.3562	2660.0	2877.8	8.1592	2.1724	2658.2	2875.5	7.8356
250	24.136	2736.1	2977.5	9.1015	4.8206	2735.1	2976.2	8.3568	2.4062	2733.9	2974.5	8.0346
300	26.446	2812.3	3076.7	9.2827	5.2841	2811.6	3075.8	8.5387	2.6389	2810.7	3074.5	8.2172

*Figura 13 Tabla A6. Vapor de agua sobrecalentado*

Fuente: (Cengel,2014, pag.918)

Esta región está ubicada exactamente a la derecha del vapor saturado y a temperaturas superiores a temperatura definida en el punto crítico, aquí tenemos que la sustancia está en la fase de vapor sobrecalentado.

**3.3.4 Tabla A7**

Esta tabla se utiliza si la sustancia que estamos trabajando se encuentra entre el punto de líquido comprimido.

Esta tabla está dividida en apartados, en el primer apartado encontraremos seis propiedades termodinámicas que son la temperatura, el volumen específico, la energía interna, la entalpía y la entropía, en el segundo apartado encontraremos la Presión.

**TABLA A-7**

Agua líquida comprimida

<i>T</i> °C	<i>v</i> m <sup>3</sup> /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m <sup>3</sup> /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m <sup>3</sup> /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K
<i>P</i> = 5 MPa (263.94 °C)				<i>P</i> = 10 MPa (311.00 °C)				<i>P</i> = 15 MPa (342.16 °C)				
Sat.	0.0012862	1148.1	1154.5	2.9207	0.0014522	1393.3	1407.9	3.3603	0.0016572	1585.5	1610.3	3.6848
0	0.0009977	0.04	5.03	0.0001	0.0009952	0.12	10.07	0.0003	0.0009928	0.18	15.07	0.0004
20	0.0009996	83.61	88.61	0.2954	0.0009973	83.31	93.28	0.2943	0.0009951	83.01	97.93	0.2932
40	0.0010057	166.92	171.95	0.5705	0.0010035	166.33	176.37	0.5685	0.0010013	165.75	180.77	0.5666
60	0.0010149	250.29	255.36	0.8287	0.0010127	249.43	259.55	0.8260	0.0010105	248.58	263.74	0.8234
80	0.0010267	333.82	338.96	1.0723	0.0010244	332.69	342.94	1.0691	0.0010221	331.59	346.92	1.0659

*Figura 14 Tabla A7. Agua líquida comprimida*

Fuente: (Cengel,2014, pag.922)

### 3.4 Gases Ideales

Los gases ideales son unas sustancias hipotéticas que se constituyen en una herramienta clave para el análisis de distintos procesos y ciclos termodinámicos. Se emplea incluso el modelo de los gases ideales en la realización de los balances de masa y energía involucrados en las operaciones físicas y en los procesos industriales que tienen lugar en las fábricas. Para los gases ideales se tiene la siguiente ecuación.

$$Pv = RT$$

Donde:

1. P: es la presión absoluta del gas
2. V: es el volumen ocupado por una masa fija de gas
3. R: es la constante universal de los gases ideales
4. T: es la temperatura absoluta del gas.

La ecuación de estado de los gases ideales viene de una variante de la misma conocida como la ley combinada de los gases ideales.

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$$

Esta fórmula estudia el comportamiento de una masa fija de un gas que pasa desde unas condiciones termodinámicas iniciales  $P_1$ ,  $V_1$ ,  $T_1$  hasta otras condiciones termodinámicas finales  $P_2$ ,  $V_2$ ,  $T_2$ .

### 3.5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**CENGEL, Y. A., BOLES, M. A., CAMPOS OLGUÍN, V., & COLLI SERRANO, M. T. "** TERMODINÁMICA", 2014. Disponible en:

<https://www.elsolucionario.org/termodinamica-yunus-a-cengel-michael-a-boles-8va-edicion/>

**CENGEL, Y. A., BOLES, M. A., CAMPOS OLGUÍN, V., & COLLI SERRANO, M. T.** (2006). "Termodinámica", Disponible en:

[https://www.academia.edu/36872934/Vdocuments\\_mx\\_termodinamica\\_5ta\\_edicion\\_yunus\\_a\\_cengel\\_michael\\_a\\_boles](https://www.academia.edu/36872934/Vdocuments_mx_termodinamica_5ta_edicion_yunus_a_cengel_michael_a_boles)

**ROSSIGNOLI BURBANO DE LARA, P. E., & IZQUIERDO PAREDES, D. S.** (2012). "Diseño y construcción de un banco termodinámico para el análisis de cambio de fases de los fluidos", 2012, Quito – Ecuador. Disponible en:

<https://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/748/1/T-UIDE-0683.pdf>

**JORGUE GRANADILLO MAT.** "Termodinámica Tablas. Se conoce la temperatura y alguna de las propiedades: v, u, h, s". LaMejorAsesoríaEducativa, 2020. Disponible en:

<https://www.youtube.com/watch?v=NW9ywlolrW8>

**LUIS GUILLERMO RÍOS A., YAMAL MUSTAFA IZA.** "GASES IDEALES: DIAGRAMAS TERMODINÁMICOS". Scientia et technica, 1(35). (2007), Colombia, Disponible en:

<https://www.redalyc.org/pdf/849/84903578.pdf>

**JOSÉ MARÍA GARCÍA PÉREZ,** "Cambio de fase", EthicalAds, 2017, Obtenido de:

[https://termodinamica.readthedocs.io/en/latest/equilibrio\\_cambio\\_fase.html](https://termodinamica.readthedocs.io/en/latest/equilibrio_cambio_fase.html)

# CAPÍTULO IV



GASES IDEALES

# CAPÍTULO 4

## GASES IDEALES

### 4.1 Trabajo de frontera

#### 4.1.1 Definición:

El trabajo de frontera si nosotros nos basamos en la física el trabajo lo denominamos con la letra ( $W$ ) work es una expresión física que considera dos unidades fundamentales multiplicadas entre sí, teniendo por un lado la fuerza ( $F$ ) y por otro lado la distancia ( $D$ ) entonces de física por ejemplo esta distancia era considerada desde vectores como el vector posición o por ejemplo la diferencia de posición o la variación de distancia que se tiene.

$$W = F \times d$$
$$(\vec{r}, \Delta r, \Delta x)$$

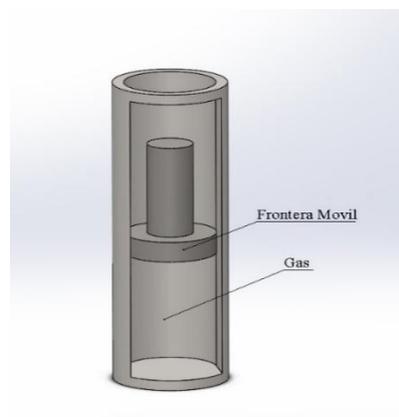
La idea general de trabajo desde un punto de vista de la física es que nosotros podamos desplazar una masa una cierta cantidad de distancia.

El trabajo de frontera en este caso particular en una forma de trabajo mecánico muy común en la práctica y es aquella que está relacionada con la expansión y la compresión de un gas, entonces aquí viene otra consideración importante de forma obligatoria y necesaria que se pueda realizar este análisis sólo sobre dispositivos cilindro-émbolos por ello se denomina trabajo de frontera porque se tiene en realidad una frontera móvil una frontera que se desplaza y que puede generar trabajo este concepto o esta condición no podría ser aplicada sobre dispositivos en los cuales la frontera puede ser fija es decir en recipientes rígidos porque en los recipientes rígidos las fronteras son fijas no puede haber un desplazamiento por lo tanto no se puede considerar un trabajo de frontera puro y duro.

Durante este proceso en particular para la frontera la cara interna del émbolo es decir se mueve en vaivén. El vaivén es un proceso en el cual sube expandiendo el fluido o gas y también retorna comprimiendo nuevamente el gas o el fluido, entonces a este proceso se conoce con un movimiento de vaivén, por lo tanto, el trabajo de expansión

y de compresión pueden llamarse trabajo de frontera móvil o también o de forma simple trabajo de frontera.

Si nosotros observamos un dispositivo cilindro embolo desde la vista superior tenemos un cilindro, dentro del cilindro tendremos un pistón, entonces si nosotros aplicamos calor a este dispositivo lo que nosotros vamos a tener es un aumento de su temperatura y por ello se tiene una relación implícita entre la temperatura y la densidad ya que tras el aumento de temperatura a consecuencia tendremos que la densidad va a disminuir lo que implica que el volumen específico va a aumentar y por ende va a aumentar el volumen efectuando un movimiento en el pistón.



*Gráfico 40 Dispositivo cilindro-embolo con frontera móvil*

Fuente: Autores

Si nosotros aumentamos calor este dispositivo lo que yo hago es aumentar la temperatura porque este calor obviamente será sensible no se aplicaría por calores latentes porque el cambio de fase no implica un cambio sustancial en el volumen, aunque sí se puede dar, pero más evidentes es cuando se aplica calor sensible.

Calor sensible implica que va a haber un aumento de la temperatura y por ende la relación que se tiene con respecto a la densidad es que la densidad empieza a disminuir entonces cómo sabemos que el recíproco de la densidad es el volumen específico implicaría que el volumen específico aumento y si sabemos que el volumen específico es equivalente al volumen sobre la masa considerando que es un sistema cerrado en el cual la masa permanece constante, la única opción para que el volumen específico aumente es que el volumen aumente.

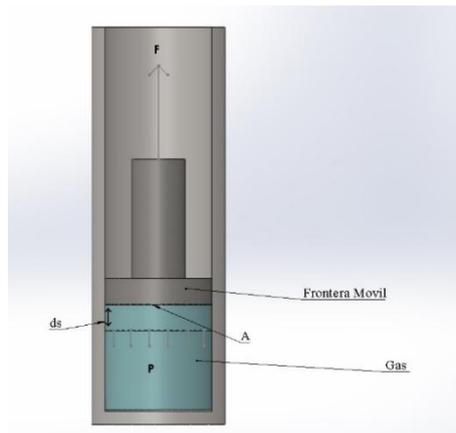


Gráfico 41 El trabajo realizado por una frontera móvil se llama trabajo de frontera

Fuente: Autores

Desde otro punto de vista podemos entender que si aumentamos la temperatura en el dispositivo lo que nosotros hacemos es que las partículas traten de ocupar mayor espacio es decir que traten de aumentar el volumen, la cinética de las partículas aumenta el movimiento o la velocidad relativa de una partícula con respecto a otra es mucho más grande por lo tanto obliga a que este pistón se desplazó, porque nosotros estamos tratando de que ocupar más espacio entonces sí sabemos que la densidad es igual a masa sobre volumen si este factor de la expresión matemática de la fracción aumenta en definitiva esta fracción nos va a dar como resultado una disminución.

#### 4.1.2 Expresión matemática

La expresión matemática se denota básicamente del desplazamiento de un pistón ,si el aumento del volumen implica una disminución de la densidad y por ende un aumento en el volumen específico, entonces si nosotros desplazamos un cierto intervalo llamémoslo así, vamos a hablar desde el punto de vista infinitesimal es decir para hacer las ecuaciones diferenciales que puedan contener esta expresión matemática nosotros decimos que nos hemos desplazado un pequeño intervalo una distancia bastante corta, un diferencial de desplazamiento de distancia conocemos que el área va a permanecer constante no va a cambiar por lo tanto mantiene sellado hermético este sistema y por lo tanto la presión que nosotros apliquemos sobre este dispositivo van a tratar de obligar a que se mueva el pistón entonces en este caso particular nuestro trabajo de frontera o  $W_b$  significa volver y por eso el trabajo es si es esfuerzo multiplicado por distancias en este caso será la fuerza (F) ejercida sobre el pistón multiplicada por el diferencial del desplazamiento.

$$\partial W_b = F \partial s$$

## PRINCIPIOS DE TERMODINÁMICA: CONCEPTOS Y APLICACIONES

Por lo tanto esta sería nuestra expresión general para poder calcular el trabajo de frontera para cualquier situación podríamos incluso aplicar este trabajo de frontera para sistemas cerrados de frontera fija y nos daríamos cuenta que no existe desplazamiento y por lo tanto el trabajo de frontera sería igual a cero, pero por ejemplo cómo calcular la fuerza que nosotros aplicamos sobre este dispositivo ;en principio sabemos que las propiedades termodinámicas que la presión es básicamente una propiedad termodinámica que relaciona de forma directa la fuerza que nosotros aplicamos sobre un objeto ,sobre un fluido dividido para una sección transversal .Por lo tanto esta fuerza implícita o relacionada directamente con la presión es decir que si aumenta la presión aumenta la fuerza y disminuyo la fuerza disminuye la presión está fuerza sería equivalente a la presión que nosotros ejerzamos multiplicado por la sección transversal, finalmente obtenemos nuestra expresión matemática a razón de presión y volumen.

$$\delta W_b = Fds = PAds = PdV$$

$$W_b = \int PdV$$

Este valor de aquí se remplazan por presión por área en función de la fuerza tendríamos presión multiplicada por el área y por el diferencial del desplazamiento y finalmente lo que nosotros hacemos es asociar estos 2 términos ,ya que si nosotros multiplicamos el área del pistón es decir que área de este objeto de este dispositivo por el desplazamiento tendríamos básicamente un diferencial de volumen, por lo tanto éste sería básicamente el resultado de haber aplicado las diferentes propiedades termodinámicas sobre este dispositivo y en definitiva para poder responder para poder sacar el trabajo de frontera de un dispositivo será equivalente a la integral desde mi estado termodinámico uno hasta el estado termodinámico 2 de la presión ejercida por el fluido sobre el dispositivo por el diferencial del volumen es decir por el cambio del volumen que se tenga, entonces esta sería la expresión matemática que gobierna el trabajo de frontera.

$$\delta W_b = Fds = PAds = PdV$$

$$W_b = \int_1^2 PdV$$

Entonces como podemos observar vemos que el trabajo de frontera que es básicamente un sumatorio o la integral que es básicamente la suma sí del área que se encuentra debajo de una curva.

### 4.1.2.1 Ejemplo Aplicativo

Si tenemos una función con valores de  $x = 5$  y  $y = 3$  entonces esta coordenada de aquí es igual a 5 y 3 pues por lo tanto mi pendiente será equivalente a  $m = 3/5$  por lo tanto la curva de la expresión matemática de esta curva será  $y = \frac{3}{5}x$

### Desarrollo argumentativo

Si yo quiero saber el área que se encuentra debajo del intervalo desde  $x = 0$  hasta  $x = 5$  lo que yo debería realizar es una integral de esta función para poder calcular esta área que se demuestra o que se proyecta sobre esta curva entonces lo que yo haría sería la integral igual allá debajo de esa curva sería la  $\int_0^5 \frac{3}{5}x dx$  realizamos esta integral y podemos calcular esta expresión matemática entonces en definitiva el trabajo de frontera es el área que se detalla debajo de la curva en un diagrama básicamente presión versus volumen.

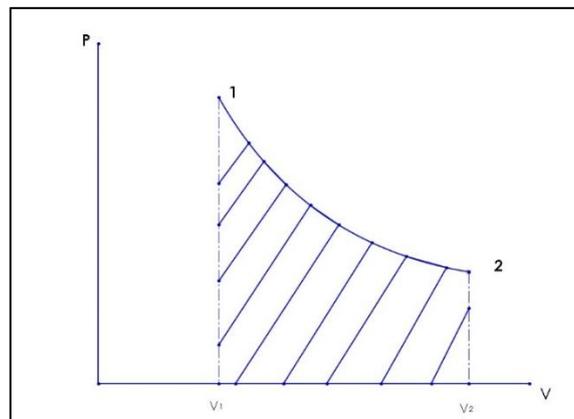


Gráfico 42 Diagrama presión-volumen

Fuente: Autores

Dependiendo de la forma o de la trayectoria del proceso que nosotros tengamos vamos a tener digamos así estado termodinámico 1, estado termodinámico 2, para este caso particular mi trabajo de frontera sería esta área simplemente la ecuación de la trayectoria del proceso en un diagrama  $P - V$ , por ejemplo, si analizamos tenemos diferentes funciones matemáticas

funciones lineales  $f(x)$ :

1. Funciones exponenciales  $f(e)$
2. Funciones logarítmicas  $f(\text{Log})$
3. Funciones hiperbólicas  $f(h)$

4. Funciones trigonométricas  $f(x)$

Cualquiera de estas funciones nos puede dar la trayectoria del proceso en el cual se esté cambiando las condiciones.

No obstante, desde un punto de vista termodinámico va a tener gran complejidad de análisis las funciones exponenciales, logarítmicas, hiperbólicas y más aún trigonométricas por ello es conveniente es tratar de asemejar funciones constantes.

La trayectoria de proceso iniciaría pasando de la condición de equilibrio uno a la condición de equilibrio dos, por ello la integral del trabajo de frontera implicaría calcular el área que ese encuentra debajo de la curva, de igual forma si nosotros podemos tener acceso a un diagrama de proceso podemos calcular que tan eficiente o que tan gran trabajo puede generar un dispositivo si a razón de ejemplo tenemos que si tenemos un dispositivo con mayor dimensión de área, nuestro trabajo generado será mucho mayor y viceversa.

Por otra Parte, el diferencial del área será equivalente presión por el diferencial de volumen

$dA = PdV$ , por lo que nosotros estamos analizando la trayectoria o el trabajo de frontera que podríamos generar cuando aplicamos calor sobre este dispositivo

**Ejercicio de aplicación**

Esta integral se puede evaluar sólo si se conoce la relación funcional entre P y V durante el proceso; es decir,  $P = f(V)$  debe estar disponible. Note que  $P = f(V)$  es simplemente la ecuación de la trayectoria del proceso en un diagrama  $P - V$ .

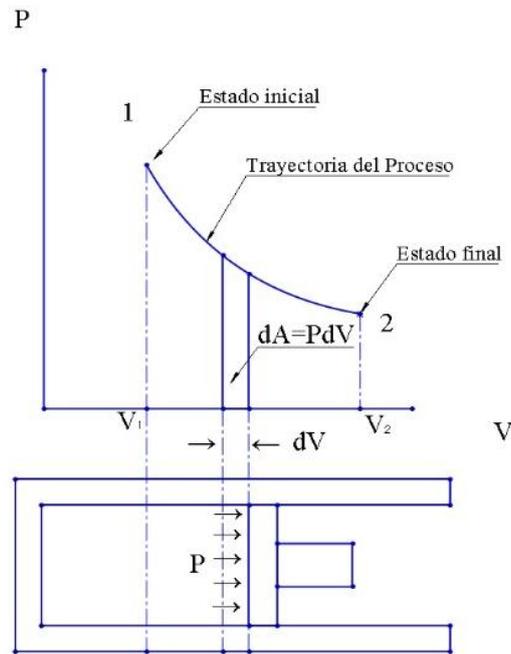


Gráfico 43 El área bajo la curva de proceso es un diagrama P-V del trabajo de frontera

Fuente: Autores

#### Datos

$$P = 8 - 4v$$

$$\begin{cases} v = 0 \rightarrow P = 8 \\ P = 0 \rightarrow V = 2 \end{cases}$$

$$V_1 = 2\text{m}^3$$

$$V_2 = 6\text{m}^3$$

$$Wb = ?$$

#### Resolución

$$Wb = \int Pdv$$

$$= \int (8 - 4v)dv$$

$$= \int 8dv - \int 4v dv$$

$$= 8v = \left. \frac{-4v^2}{2} \right|_2^6$$

$$= -32\text{kJ}$$

Un gas puede seguir varias trayectorias cuando se expande del estado 1 al 2 esto quiere decir que entonces cuando yo voy a suponer que digas cualquiera que sea suponer que en un dispositivo se encuentra almacenado argón con una presión inicial de 20 psi , de igual forma una temperatura inicial de 200 °F , entonces cuando decimos que se expande este fluido tendera a aumentar en volumen , va a disminuir en densidad y va a aumentar en volumen especifico , por lo tanto entendemos que el pistón genera desplazamiento es decir aumenta su volumen.

Este gas puede seguir varias trayectorias cuando se expande del estado 1 y llega a la condición de equilibrio en termodinámico en el estado 2, a consecuencia de esto se

reduce la presión en el estado dos a 15 psi por lo tanto de formas consecuente la temperatura tendería a bajar ya que estas unidades son directamente proporcionales.



Gráfico 44 Expansión de un gas por frontera móvil

Fuente: Autores

De igual forma para el cálculo de volumen específico utilizaremos la ley de gases ideales sabiendo que la presión multiplicada por el volumen será equivalente a la masa multiplicado por la constante del gas y por la temperatura, para el valor de la constante del gas utilizaremos del libro de termodinámica de Cengel la tabla 1ª en la cual establece los criterios y propiedades de varias sustancias o fluidos.

**Ejercicio de Aplicación**

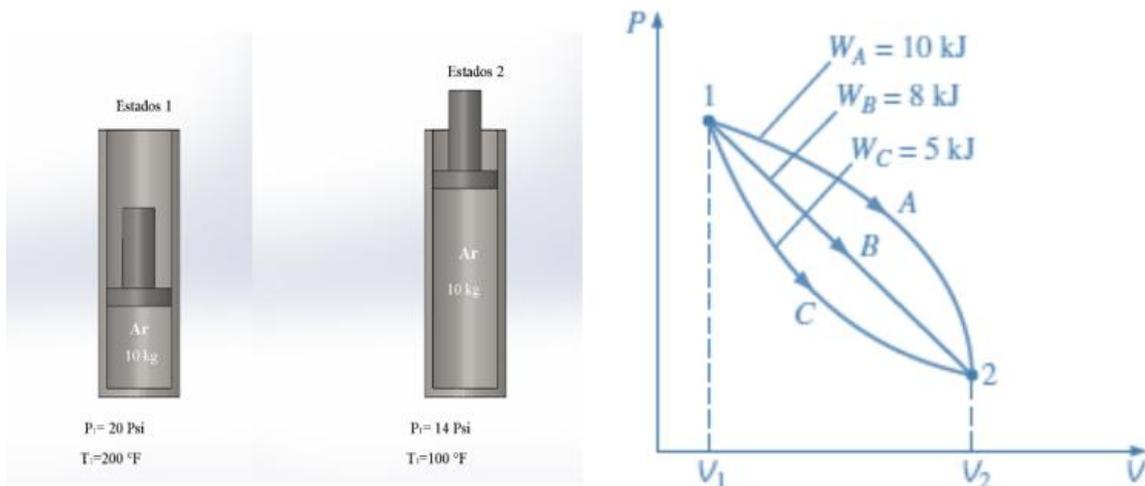


Gráfico 45 Esquema de expansión y diagrama P-V para el ejercicio

Fuente: Autores

**Datos**

**Estado 1**

**Estado 2**



$$\begin{aligned}
 P_1 &= 20 \text{psi} & P_2 &= 19 \text{psi} \\
 T_1 &= 200^\circ\text{F} & T_2 &= 100^\circ\text{F} \\
 V_1 &= 88,6 \text{ft}^3 & V_2 &= 107,44 \text{ft}^3
 \end{aligned}$$

### Desarrollo

$$\begin{aligned}
 PV &= mRT \\
 V &= \frac{mRT}{P} \\
 V_1 &= \frac{(10 \text{lbm})(0,2686) \frac{\text{psi ft}^3}{\text{lbm g}} (660 \text{k})}{20 \text{psi}} \\
 V_1 &= 88,6 \text{ft}^3 \\
 V_2 &= 107,44 \text{ft}^3
 \end{aligned}$$

## 4.2 Procesos

Un proceso termodinámico son los cambios de un sistema, desde unas condiciones iniciales hasta otras condiciones finales, debido a la desestabilización del sistema. Los procesos más simples los podemos realizar sobre sistemas aislados mono componentes en los que podemos variar alguna de sus ligaduras internas. Los cambios deben ser cuasi estáticos. Es decir, suficientemente lentos para ser considerados como una sucesión de estados de equilibrio. Los procesos termodinámicos pueden ser interpretados como el resultado de la interacción de un sistema con otro tras ser eliminada alguna ligadura entre ellos, de forma que finalmente los sistemas se encuentren en equilibrio (mecánico, térmico y/o material) entre sí.

### 4.2.1 Proceso isentrópico

Para analizar un proceso isométrico establece una condición de volumen constante es decir que el volumen inicial va a ser igual que al volumen final, esto sucede siempre y cuando trabajamos con un sistema cerrado, y de igual manera se establecería cuando tengas un dispositivo de frontera fija es decir cuando trabajemos con un recipiente rígido.

De igual para determinar el trabajo de frontera aplicando la expresión matemática  $W_b = \int P dv$  en este caso la presión va a tener variaciones, pero el volumen va a ser constante por lo tanto la derivada de una constante es igual a cero, esto se ve reflejado de forma

práctica que si a un recipiente rígido por más que le calentemos va a permanecer rígido no va a tener ninguna modificación en su frontera

#### 4.2.1.1 Ejercicio de aplicación

Un recipiente rígido contiene aire a  $500 \text{ kPa}$  y  $150^\circ\text{C}$ . Como resultado de la transferencia de calor hacia los alrededores, la temperatura y la presión dentro del recipiente descienden a  $65^\circ\text{C}$  y  $400 \text{ kPa}$ , respectivamente. Determine el trabajo de frontera hecho durante este proceso.

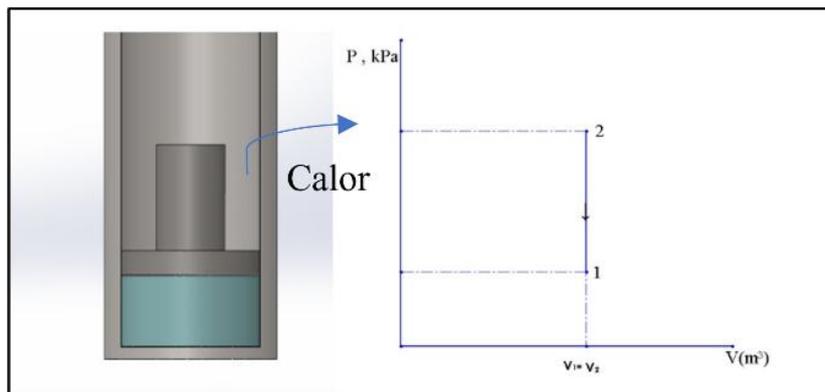


Gráfico 46 Esquema y diagrama P-V para el ejemplo

Fuente: Autores

#### Datos

##### Estado 1

$$P_1 = 500 \text{ kPa}$$

$$T_1 = 150^\circ\text{C}$$

$$R = 0.2870 \frac{\text{Kg}}{\text{Kg} \cdot \text{k}}$$

##### Estado 2

$$P_2 = 400 \text{ kPa}$$

$$T_2 = 65^\circ\text{C}$$

#### Desarrollo

$$V_1 = \frac{mRT_1}{P_1}$$

$$V_1 = \frac{10 \text{ Kg} (0.2870) (423)}{500}$$

$$V_1 = 2.42 \text{ m}^3$$

$$V_2 = \frac{mRT_2}{P_2}$$

$$V_2 = \frac{10 (0.2870) (338)}{400}$$

$$V_2 = 2.42 \text{ m}^3$$

### 4.2.2 Proceso isobárico

Para analizar un proceso isobárico se establece una condición de presión constante es decir que la presión en el estado termodinámico uno, así como la presión en el estado termodinámico dos serán iguales, esta condición se tiene muy a menudo cuando se trabaja con dispositivos cilindro-émbolos

Para calcular el trabajo de frontera debemos tener en cuenta que en un estado inicial el dispositivo tenía una cantidad de fluido con esa presión y temperatura, no obstante, al nosotros aplicar calor ( $Q$ ) en la superficie de este, el pistón va a tender a desplazarse y por ello volumen se incrementa, lo denota un desplazamiento de ese elemento por ende vamos a tener un trabajo de frontera.

#### 4.2.2.1 Ejercicio de aplicación

Un dispositivo sin fricción que consta de cilindro-émbolo contiene 10 *lbm* de vapor a 60 *psia* y 320 °*F*. Se transfiere calor al vapor hasta que la temperatura alcanza 400°*F*. Si el émbolo no está unido a una flecha y su masa es constante, determine el trabajo que realiza el vapor durante este proceso.

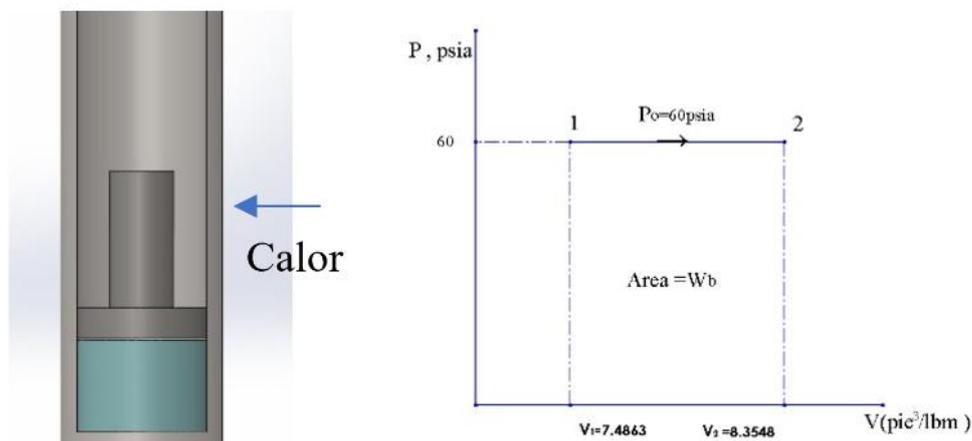


Gráfico 47 Esquema y diagrama P-V para el ejercicio

Fuente: Autores

#### Datos

**Estado 1**

$$T = 320^{\circ}\text{F}$$

$$P = 30\text{psi}$$

**Estado 2**

$$T = 400^{\circ}\text{F}$$

$$P = 30\text{psi}$$

**Desarrollo**

$$v = \frac{v_1}{m} \rightarrow V = v * m$$

$$W_b = \int P dv$$

$$W_b = P(v_1 - v_2) [kj] \frac{Blu}{lbn}$$

$$W_b = P \int dv$$

$$W_b = 60psi(83.548 - 74.810)ft^3 |_{5.41}^{181}$$

$$W_b = Pv |_{21}$$

$$W_b = 96.3blu$$

$$W_b = P(v_1 - v_2) [kj]$$

**4.2.3 Proceso isotérmico**

Para analizar un proceso isobárico se establece una condición de temperatura constante es decir si pasamos de un estado a otro estado la temperatura va a ser la misma, esta condición se establece en dispositivos cilindro-émbolos cuando pasa de un estado inicial con un volumen elevado y una presión bajas a un volumen más pequeño y presión elevada, en este caso estamos aplicando una fuerza para comprimir la sustancia.

Para el cálculo del trabajo de frontera  $W_b = \int P dv$  nosotros debemos saber cómo está cambiando la presión en función del volumen, por ende, tendemos que utilizar la ley de los gases ideales lo cual establece lo siguiente; la presión multiplicada por el volumen es equivalente a la masa por la constante del gas por la temperatura  $P(v) = mRT$  esta expresión se transforma en una recta o función que varía en función del volumen porque si en un dispositivo cerrado la masa permanece constante si no cambiamos de fluido la constante del gas permanece constante y amas de eso si la temperatura no cambia entonces los valores  $(m * R * T)$  serán contantes (C).

**4.2.3.1 Ejercicios de Aplicación**

Al inicio un dispositivo de cilindro-émbolo contiene  $0.4 m^3$  de aire a  $100 kPa$  y  $80^\circ C$ . Se comprime el aire a  $0.1 m^3$  de tal manera que la temperatura dentro del cilindro permanece constante. Determine el trabajo hecho durante este proceso.

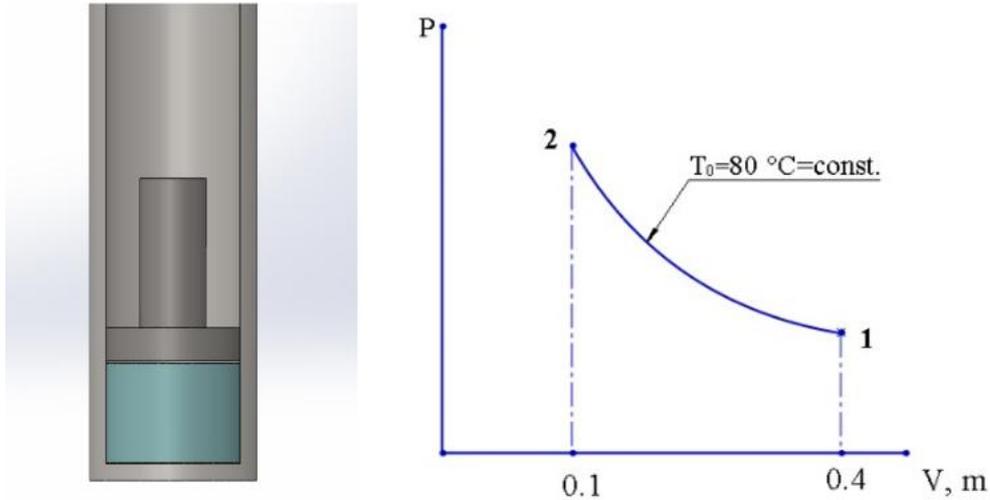


Gráfico 48 Esquema y diagrama P-V para el ejercicio

Fuente: Autores

**Datos****Aire**

$$V_1 = 0.4 \text{ m}^3$$

$$P_1 = 100 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 80 \text{ °C} = \text{const}$$

**Desarrollo**

$$P(v) = mRT = C$$

$$Wb = \int P \, dv$$

$$P = \frac{C}{v}$$

$$Wb = \int \frac{C}{v} \, dv$$

$$Wb = \frac{C}{V} \int \frac{dv}{v}$$

$$Wb = C[\ln(v_1) - \ln(4)]$$

$$Wb = C \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$

$$Wb = C \ln(v) \Big|_{v_2}^{v_1}$$

$$\begin{cases} Wb = mRT \ln \frac{v_2}{v_1} \\ Wb = P_1 V_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = 100(0.4) \ln \left(\frac{0.11}{0.14}\right) = -55.45 \\ Wb = P_2 V_2 \ln \frac{v_2}{v_1} \end{cases}$$

#### 4.2.4 Proceso politrópico

Un proceso politrópico es un proceso termodinámico que obedece a la relación:  $PV^n = C$ , donde  $p$  es la presión,  $V$  es el volumen,  $n$  es el índice politrópico y  $C$  es una constante. La ecuación del proceso politrópico puede describir múltiples procesos de expansión y compresión que incluyen la transferencia de calor. El exponente  $n$  se llama índice politrópico que depende del material y varía de 1.0 a 1.4. Este es un procedimiento de calor específico constante, en el que se fija la absorción de calor del gas que se tiene en cuenta debido al aumento unitario de temperatura.

Durante procesos reales de expansión y compresión de gases, la presión y el volumen suelen relacionarse mediante  $PV^n = C$ , ya que desde el punto de vistas de la ingeniería muchas condiciones no son tan favorables como se presentan desde el punto de vista teórico, en realidad es muy difícil que nosotros podamos tener procesos a:

1. Presión = constante en procesos isobáricos.
2. Volumen = constante en procesos isométricos.
3. Temperatura = constante en procesos isotérmicos.

##### 4.2.4.1 Ejercicio De aplicación

Determine de forma analítica el trabajo de frontera que se realiza en este proceso.

$$\begin{array}{l}
 PV = mRT \\
 PV^n = C \\
 P = f(v) \\
 P = \frac{c}{v^n} \\
 [P = CV^{-n}]
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \longrightarrow \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \longrightarrow
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 Wb = \int P \, dv \\
 = \int CV^{-n} \, dv \\
 = CV_2^{-n+1} - V_1^{-n+1} \\
 = C \frac{P_2 V_2^{-n+1} - P_1 V_1^{-n+1}}{1-n}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \longrightarrow \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \longrightarrow
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \int x^n \, dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} \\
 n = 1 \rightarrow T_0 = ctc \\
 \boxed{Wb = PV \ln \frac{v_2}{v_1}}
 \end{array}$$

#### 4.3 Balance de energía en sistemas cerrados

El principio que rige los balances de energía es la ley de conservación de la energía que establece que la energía no puede crearse ni destruirse (excepto en procesos nucleares). Esta ley es también llamada primer principio de la termodinámica. En la más general de sus formas, la primera ley dice que la velocidad a la cual la energía (cinética + potencial + interna) es ingresada a un sistema por un fluido, más la velocidad a la cual

ingresa energía en forma de calor, menos la velocidad a la cual la energía es transportada por el fluido fuera del sistema, menos la velocidad a la cual el sistema realiza trabajo sobre los alrededores es igual a la velocidad a la cual la energía se acumula en el sistema. Veamos su aplicación a un sistema cerrado.

Un sistema será abierto o cerrado según la masa pueda o no atravesar los límites de este durante el período de tiempo en que se plantea el balance de energía. Por definición, un proceso batch o por lotes es cerrado mientras que un semibatch o un proceso continuo son abiertos. El balance integral de un sistema cerrado debe ser planteado entre dos instantes de tiempo (¿por qué?). Como la energía no puede crearse ni destruirse, los términos de generación o consumo no tienen sentido, llegando a:

$$\textit{Acumulación} = \textit{entrada} - \textit{salida}$$

Cuando planteamos los balances de masa en un sistema cerrado los términos de entrada y salida de materia se cancelaban ya que no había cruce de masa en las fronteras del sistema. Sin embargo, en un sistema cerrado, la energía puede ser transferida en los límites del sistema como calor o trabajo, por lo tanto, los términos anteriores de entrada y salida no pueden eliminarse (sí se eliminan los términos de entrada/salida de energía transportada por el fluido dentro o fuera del sistema).

Energía final del sistema - Energía inicial del sistema = Energía neta transferida al sistema (entrada - salida).

$$\textit{Energía inicial del sistema} = U_i + E_{ci} + E_{Pi}$$

$$\textit{Energía final del sistema} = U_f + E_{cf} + E_{Pf}$$

$$\textit{Energía transferida} = Q + W$$

#### 4.3.1 Ecuación General

El balance de energía para cualquier sistema que experimenta alguna clase de proceso se expresó como:

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E$$

$$\begin{matrix} Q \\ W \end{matrix} = \begin{matrix} E_c \\ E_p \\ U \end{matrix}$$

4.31.1 Ejercicio de aplicación

Datos

Agua : 10 Kg  
 $Q = 30 \text{ kJ}$   
 $V = 110 \text{ V}$   
 $I = 5 \text{ A}$   
 $P_1 = 100 \text{ kPa}$   
 $T_1 = 150 \text{ }^\circ\text{C}$

$P_1 = 100 \text{ kPa}$   
 $T_1 = ?$

Estado 1                      Estado 2

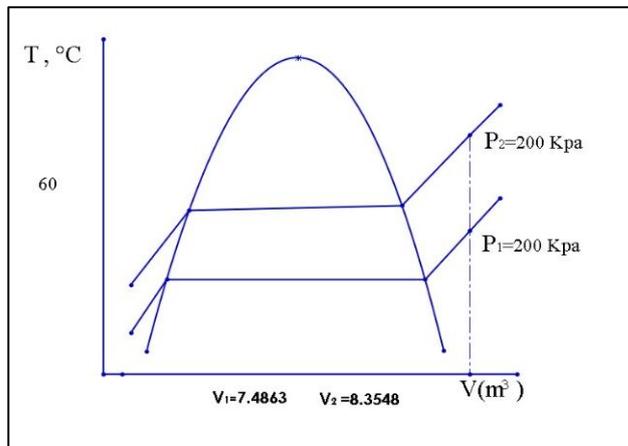


Gráfico 49 Diagrama T-V para el ejercicio

Fuente: Autores

Ecuación del balance de energía

$$Q_{in} + W_E = \Delta U = m(u_2 - u_1)$$

$$W_E = V * I = \frac{W_E}{\Delta t}$$

$$W_E = 165 \text{ kJ}$$

Desarrollo

$$P_1 = 100 \text{ kPa} \rightarrow T_{sat} = 99^\circ\text{C} \quad \text{L.Cengel TA5}$$

$$T_1 = 150 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow u_1 = 2582.9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \text{L.Cengel TA6}$$

$$Q_{in} + W_E = \Delta U = m(u_2 - u_1)$$

$$u_2 = \frac{Q_{in} + W_E}{m} + u_1$$

$$u_2 = \frac{30 + 165}{10} + 2582.9$$

$$u_2 = 2602,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$P_2 = 200 \text{ kPa} \rightarrow u = 2602,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$T_2 = 166.32 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{L.Cengel TA6}$$

#### 4.4 Calores específicos

El calor específico se define como la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia. En termodinámica, el interés se centra en dos clases de calores específicos: el primero es el calor específico a volumen constante  $c_v$  y el segundo es el calor específico a presión constante  $c_p$ .

Desde un punto de vista físico, el calor específico a volumen constante  $c_v$  se puede considerar como la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia cuando el volumen se mantiene constante.

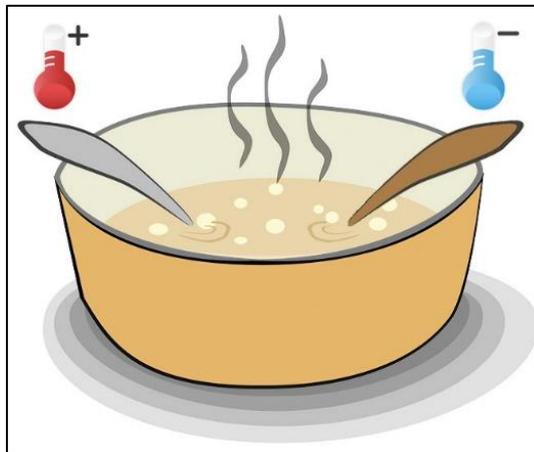


Figura 15 Calor específico

Fuente: (Fisimat,2021)

$$c_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$$

$$c_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$$

$$c_v = \frac{\partial u}{\partial T} \rightarrow \int \partial u = \int c_v \partial T$$

$$\Delta u = u_2 - u_1 = c_v \int \partial T$$

$$\Delta u = c_{v_{pro}} \Delta T$$

$c_v$  = calor específico a volumen constante

$c_p$  = calor específico a presión constante

$u$  = energía interna

$h = \text{entalpía}$

$\Delta T = \text{variación de temperatura}$

#### 4.5 Gases ideales

Para el caso de un gas ideal puede demostrarse que la energía interna depende exclusivamente de la temperatura, ya en un gas ideal se desprecia toda interacción entre las moléculas o átomos que lo constituyen, por lo que la energía interna es sólo energía cinética, que depende sólo de la temperatura. Este hecho se conoce como la ley de Joule. La variación de energía interna de un gas ideal (monoatómico o diatómico) entre dos estados A y B se calcula mediante la expresión:

$$\Delta U_{AB} = nC_v(T_B - T_A)$$

Donde  $n$  es el número de moles y  $C_v$  la capacidad calorífica molar a volumen constante. Las temperaturas deben ir expresadas en Kelvin. Para demostrar esta expresión imaginemos dos isotermas caracterizadas por sus temperaturas  $T_A$  y  $T_B$ .

##### 4.5.1 Energía interna-entalpía

En su experimento clásico, Joule sumergió en agua dos recipientes conectados mediante un tubo y una válvula, como se ilustra en la figura. Al principio, uno de los recipientes contenía aire a una presión alta y el otro estaba al vacío.

En su experimento clásico, Joule sumergió en agua dos recipientes conectados mediante un tubo y una válvula, como se ilustra en la figura. Al principio, uno de los recipientes contenía aire a una presión alta y el otro estaba al vacío.

$$U = f(t)$$

En su experimento clásico, Joule sumergió en agua dos recipientes conectados mediante un tubo y una válvula, como se ilustra en la figura. Al principio, uno de los recipientes contenía aire a una presión alta y el otro estaba al vacío.

#### 4.6 Tablas Termodinámicas

##### 4.6.1 Descripción

Las tablas termodinámicas son tablas donde se agrupan de forma ordenada, diferentes propiedades termodinámicas. Para cada región del diagrama termodinámico contamos con una tabla. Además, contamos con tablas en el sistema internacional y con el sistema inglés. El uso de las tablas es el mismo lo único que cambia es el sistema de unidades.

**Nombre de la tabla**

**Nombre de las propiedades termodinámicas**

TABLA A-4 Agua saturada. Tabla de temperaturas (conclusión)												
Temp., T °C	Pres. sat., P <sub>sat</sub> kPa	Volumen específico, m <sup>3</sup> /kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
		Liq. sat., v <sub>f</sub>	Vapor sat., v <sub>g</sub>	Liq. sat., u <sub>f</sub>	Evap., u <sub>fg</sub>	Vapor sat., u <sub>g</sub>	Liq. sat., h <sub>f</sub>	Evap., h <sub>fg</sub>	Vapor sat., h <sub>g</sub>	Liq. sat., s <sub>f</sub>	Evap., s <sub>fg</sub>	Vapor sat., s <sub>g</sub>
205	1724.3	0.001164	0.11508	872.86	1723.5	2596.4	874.87	1920.0	2794.8	2.3776	4.0154	6.3930
210	1907.7	0.001173	0.10429	895.38	1702.9	2598.3	897.61	1899.7	2797.3	2.4245	3.9318	6.3563
215	2105.9	0.001181	0.094680	918.02	1681.9	2599.9	920.50	1878.8	2799.3	2.4712	3.8489	6.3200
220	2319.6	0.001190	0.086094	940.79	1660.5	2601.3	943.55	1857.4	2801.0	2.5176	3.7664	6.2840
225	2549.7	0.001199	0.078405	963.70	1638.6	2602.3	966.76	1835.4	2802.2	2.5639	3.6844	6.2483

**Valor de las propiedades termodinámicas**

Figura 16 Descripción Tabla A4 agua saturada. Tabla de temperaturas

Fuente: (Cengel,2015, pag.914)

### Las de Manejo Común

#### Sistema Internacional de medidas (SI)

1. Tabla A-1 Masa Molar, contante del gas y propiedades del punto critico
2. Tabla A-2 Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes
3. Tabla A-4 Agua saturada. Tabla de temperaturas
4. Tabla A-5 Agua saturada. Tabla de presiones
5. Tabla A-6 Vapor de agua sobrecalentado
6. Tabla A-7 Agua líquida comprimida

#### Sistema Ingles

1. Tabla A-1E Masa Molar, contante del gas y propiedades del punto critico
2. Tabla A-2E Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes
3. Tabla A-4E Agua saturada. Tabla de temperaturas

4. Tabla A-5E Agua saturada. Tabla de presiones
5. Tabla A-6E Vapor de agua sobrecalentado
6. Tabla A-7E Agua líquida comprimida

#### 4.6.2 Tabla A1

Tabla A-1 Masa molar, constante del gas y propiedades del punto crítico

Esta tabla la tenemos dividida en dos secciones. En la primera sección encontramos el nombre de la sustancia, la fórmula de la sustancia, la masa molar ( $M$ ) y la constante del gas ( $R$ ). En la segunda sección tenemos las propiedades del punto crítico y encontramos la temperatura, la presión y el volumen. Todas estas propiedades son para diferentes sustancias.

Nombre de la tabla

TABLA A-1 Masa molar, constante de gas y propiedades del punto crítico				Propiedades del punto crítico		
Sustancia	Fórmula	Masa molar, $M$ kg/kmol	Constante de gas, $R$ kJ/kg · K*	Temperatura, K	Presión, MPa	Volumen, m <sup>3</sup> /kmol
Agua	H <sub>2</sub> O	18.015	0.4615	647.1	22.06	0.0560
Aire	—	28.97	0.2870	132.5	3.77	0.0883
Alcohol etílico	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	46.07	0.1805	516	6.38	0.1673
Alcohol metílico	CH <sub>3</sub> OH	32.042	0.2595	513.2	7.95	0.1180
Amoniaco	NH <sub>3</sub>	17.03	0.4882	405.5	11.28	0.0724
Argón	Ar	39.948	0.2081	151	4.86	0.0749
Benceno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78.115	0.1064	562	4.92	0.2603
Bromo	Br <sub>2</sub>	159.808	0.0520	584	10.34	0.1355
<i>n</i> -Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.124	0.1430	425.2	3.80	0.2547
Cloro	Cl <sub>2</sub>	70.906	0.1173	417	7.71	0.1242
Cloroformo	CHCl <sub>3</sub>	119.38	0.06964	536.6	5.47	0.2403
Cloruro metílico	CH <sub>3</sub> Cl	50.488	0.1647	416.3	6.68	0.1430
Criptón	Kr	83.80	0.09921	209.4	5.50	0.0924
Diclorodifluorometano (R-12)	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	120.91	0.06876	384.7	4.01	0.2179
Diclorofluorometano (R-21)	CHCl <sub>2</sub> F	102.92	0.08078	451.7	5.17	0.1973
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	44.01	0.1889	304.2	7.39	0.0943
Dióxido de sulfuro	SO <sub>2</sub>	64.063	0.1298	430.7	7.88	0.1217
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.070	0.2765	305.5	4.48	0.1480
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28.054	0.2964	282.4	5.12	0.1242
Helio	He	4.003	2.0769	5.3	0.23	0.0578
<i>n</i> -Hexano	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.179	0.09647	507.9	3.03	0.3677

Nombre de la sustancia  
 Fórmula de la sustancia  
 Masa molar  
 Constante del gas  
 Temperatura  
 Presión  
 Volumen

Primera sección                      Segunda sección

Figura 17 Tabla A1 masa molar, constante de gas y propiedades del punto crítico

Fuente: (Cengel,2014, pag.908)

#### 4.6.3 Tabla A-2E<sup>a</sup>

Tabla A-2a Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes a 300K o 80°F

En esta tabla tenemos el nombre del gas, la fórmula del gas, la constante del gas (R), el calor específico a presión constante (Cp), el calor específico a volumen constante (Cv) y la relación de calores específicos (k). Todas las propiedades de los calores específicos Cp y Cv están dados a una temperatura promedio de 300K en el sistema internacional y 80°F en el sistema inglés.

Nombre de la tabla

TABLA A-2					
Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes					
a) A 300 K					
Gas	Fórmula	Constante de gas, R kJ/kg · K	C <sub>p</sub> kJ/kg · K	C <sub>v</sub> kJ/kg · K	k
Aire	—	0.2870	1.005	0.718	1.400
Argón	Ar	0.2081	0.5203	0.3122	1.667
Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.1433	1.7164	1.5734	1.091
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	0.1889	0.846	0.657	1.289
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.2765	1.7662	1.4897	1.186
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.2964	1.5482	1.2518	1.237
Helio	He	2.0769	5.1926	3.1156	1.667
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	4.1240	14.307	10.183	1.405
Metano	CH <sub>4</sub>	0.5182	2.2537	1.7354	1.299
Monóxido de carbono	CO	0.2968	1.040	0.744	1.400
Neón	Ne	0.4119	1.0299	0.6179	1.667
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0.2968	1.039	0.743	1.400
Octano	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	0.0729	1.7113	1.6385	1.044
Oxígeno	O <sub>2</sub>	0.2598	0.918	0.658	1.395
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.1885	1.6794	1.4909	1.126
Vapor	H <sub>2</sub> O	0.4615	1.8723	1.4108	1.327

Nombre del gas   
 Fórmula del gas   
 Constante del gas   
 Calor específico a presión constante   
 Calor específico a volumen constante   
 Relación de calores específicos

Figura 18 Tabla A2 a 300 °K

Fuente: (Cengel,2014, pag.909)

El calor específico a presión constante (Cp) se usa cuando en el proceso se mantiene constante la presión, por ejemplo, cuando estamos resolviendo un ejercicio y la presión del estado 1 es igual a la presión del estado 2. El calor específico a volumen constante (Cv) se usa cuando en el proceso se mantiene constante el volumen, por ejemplo, en un tanque rígido o cuando tenemos un cilindro émbolo con topes que impiden que el volumen cambie.

La relación de calores específicos es el cociente que existe entre los calores específicos a presión constante y a volumen constante:

$$k = \frac{C_p}{C_v}$$

Por último, recuerda que esta tabla solo la puedes utilizar cuando la temperatura promedio entre los dos estados involucrados es igual a 300°K o 80°F:

$$T_{prom} = \frac{T1 + T2}{2}$$

4.6.4 Tabla A-2E-b

Tabla A-2E-b. Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes a diversas temperaturas. Esta tabla la tenemos dividida en seis gases distintos. En cada división encontramos la temperatura, el calor específico a presión constante (Cp), el calor específico a volumen constante (Cv) y la relación de calores específicos (k). La diferencia con la tabla A-2:

1. Es que en la tabla A-2
2. Tenemos distintas temperaturas a la que podemos buscar el Cp y el Cv.

TABLA A-2									
Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes (continuación)									
b) A diversas temperaturas									
Temperatura K	Aire			Dióxido de carbono, CO <sub>2</sub>			Monóxido de carbono, CO		
	C <sub>p</sub> kJ/kg · K	C <sub>v</sub> kJ/kg · K	k	C <sub>p</sub> kJ/kg · K	C <sub>v</sub> kJ/kg · K	k	C <sub>p</sub> kJ/kg · K	C <sub>v</sub> kJ/kg · K	k
250	1.003	0.716	1.401	0.791	0.602	1.314	1.039	0.743	1.400
300	1.005	0.718	1.400	0.846	0.657	1.288	1.040	0.744	1.399
350	1.008	0.721	1.398	0.895	0.706	1.268	1.043	0.746	1.398
400	1.013	0.726	1.395	0.939	0.750	1.252	1.047	0.751	1.395
450	1.020	0.733	1.391	0.978	0.790	1.239	1.054	0.757	1.392
500	1.029	0.742	1.387	1.014	0.825	1.229	1.063	0.767	1.387
550	1.040	0.753	1.381	1.046	0.857	1.220	1.075	0.778	1.382
600	1.051	0.764	1.376	1.075	0.886	1.213	1.087	0.790	1.376
650	1.063	0.776	1.370	1.102	0.913	1.207	1.100	0.803	1.370
700	1.075	0.788	1.364	1.126	0.937	1.202	1.113	0.816	1.364
750	1.087	0.800	1.359	1.148	0.959	1.197	1.126	0.829	1.358
800	1.099	0.812	1.354	1.169	0.980	1.193	1.139	0.842	1.353
900	1.121	0.834	1.344	1.204	1.015	1.186	1.163	0.866	1.343
1000	1.142	0.855	1.336	1.234	1.045	1.181	1.185	0.888	1.335
Temperatura K	Hidrógeno, H <sub>2</sub>			Nitrógeno, N <sub>2</sub>			Oxígeno, O <sub>2</sub>		
	C <sub>p</sub> kJ/kg · K	C <sub>v</sub> kJ/kg · K	k	C <sub>p</sub> kJ/kg · K	C <sub>v</sub> kJ/kg · K	k	C <sub>p</sub> kJ/kg · K	C <sub>v</sub> kJ/kg · K	k
250	14.051	9.927	1.416	1.039	0.742	1.400	0.913	0.653	1.398
300	14.307	10.183	1.405	1.039	0.743	1.400	0.918	0.658	1.395
350	14.427	10.302	1.400	1.041	0.744	1.399	0.928	0.668	1.389
400	14.476	10.352	1.398	1.044	0.747	1.397	0.941	0.681	1.382
450	14.501	10.377	1.398	1.049	0.752	1.395	0.956	0.696	1.373
500	14.513	10.389	1.397	1.056	0.759	1.391	0.972	0.712	1.365
550	14.530	10.405	1.396	1.065	0.768	1.387	0.988	0.728	1.358
600	14.546	10.422	1.396	1.075	0.778	1.382	1.003	0.743	1.350
650	14.571	10.447	1.395	1.086	0.789	1.376	1.017	0.758	1.343
700	14.604	10.480	1.394	1.098	0.801	1.371	1.031	0.771	1.337
750	14.645	10.521	1.392	1.110	0.813	1.365	1.043	0.783	1.332
800	14.695	10.570	1.390	1.121	0.825	1.360	1.054	0.794	1.327
900	14.822	10.698	1.385	1.145	0.849	1.349	1.074	0.814	1.319
1000	14.983	10.859	1.380	1.167	0.870	1.341	1.090	0.830	1.313

Figura 19 Tabla A-2E a diversas alturas

Fuente: (Cengel,2006, pag.935)

4.6.5 Tabla A-2E-c

Tabla A-2E- c) calores específicos de gas ideal de varios gases comunes como una función de la temperatura. En esta tabla encontramos la fórmula para encontrar el calor específico molar a presión constante ( $C_p$  molar), el nombre del gas, la fórmula del gas, las constantes adimensionales a, b, c y d para reemplazar en la fórmula de  $C_p$  molar, el rango de temperatura (K) y el porcentaje de error.

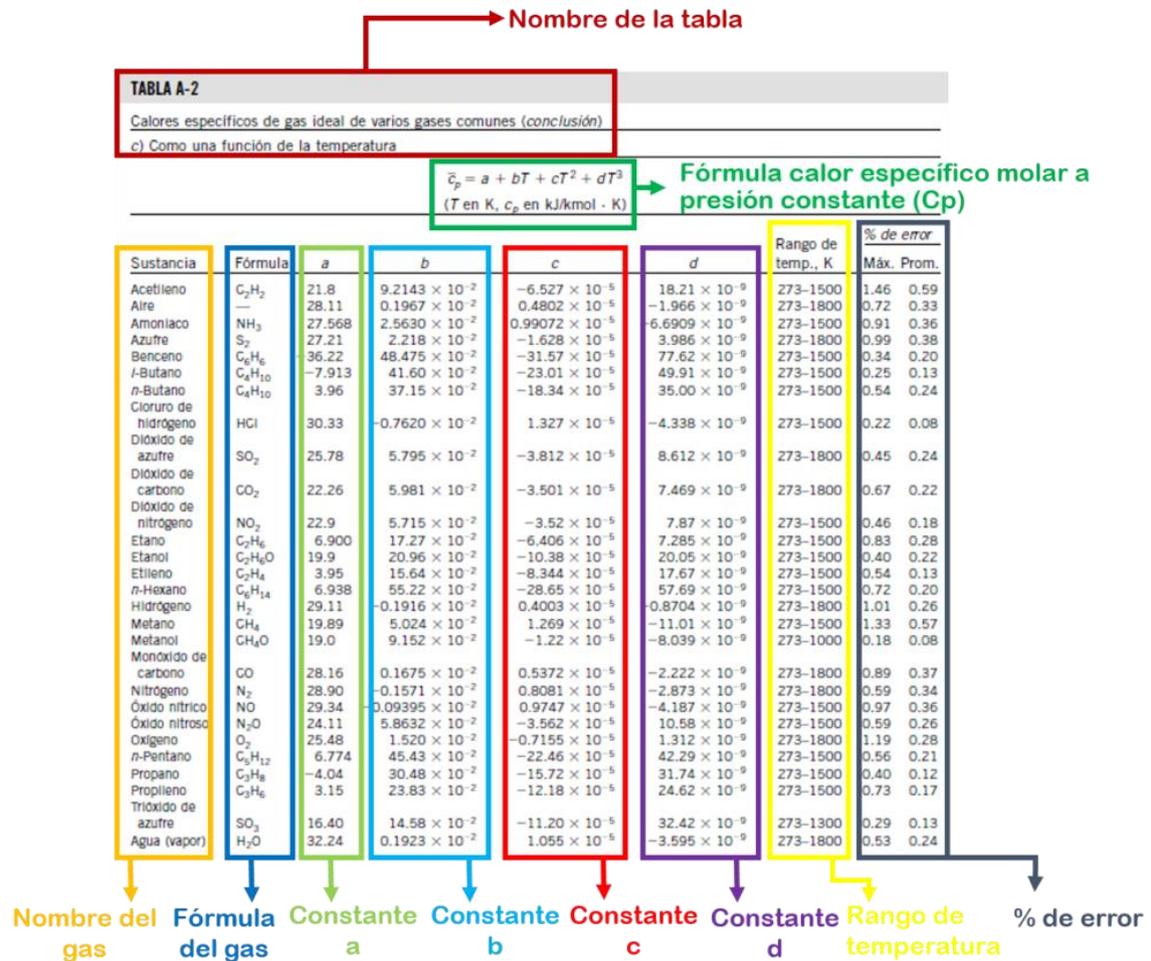


Figura 20 Tabla A-2E como una función de la temperatura

Fuente: (Cengel,2014, pag.937)

Debes tener en cuenta que para utilizar la fórmula de  $C_p$  molar debes trabajar con la temperatura en escala absoluta es decir en Kelvin en el sistema internacional y en Rankine en el sistema inglés.

$$C_p \text{ o } C_{p\text{molar}} = a + bT + cT^2 + dT^3$$

Temperatura en Kelvin

Temperatura en Rankine

$$K = ^\circ C + 273$$

$$R = ^\circ F + 460$$

#### 4.7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**CENGEL, Y. A., BOLES, M. A., CAMPOS OLGUÍN, V., & COLLI SERRANO, M. T. "**  
TERMODINÁMICA", 2014. Disponible en:  
<https://www.elsolucionario.org/termodinamica-yunus-a-cengel-michael-a-boles-8va-edicion/>

**CENGEL, Y. A., BOLES, M. A., CAMPOS OLGUÍN, V., & COLLI SERRANO, M. T.**  
(2006). "Termodinámica", Disponible en:  
[https://www.academia.edu/36872934/Vdocuments\\_mx\\_termodinamica\\_5ta\\_edicion\\_yunus\\_a\\_cengel\\_michael\\_a\\_boles](https://www.academia.edu/36872934/Vdocuments_mx_termodinamica_5ta_edicion_yunus_a_cengel_michael_a_boles)

**JIMÉNEZ BERNAL, J. A. Y CLAUDIA DEL CARMEN GUTIÉRREZ TORRES.**  
"Termodinámica". México D.F: Grupo Editorial Patria, 2015. p. Disponible en:  
<https://elibro.net/es/ereader/epoch/39466?page=46>

**NIETO CARLIER, R. GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, C. Y LÓPEZ PANIAGUA, I.**  
"Termodinámica". Madrid: Dextra Editorial, 2014. p. Disponible en:  
<https://elibro.net/es/ereader/epoch/43934?page=34>

**JIMÉNEZ BERNAL, J. A. Y CLAUDIA DEL CARMEN GUTIÉRREZ TORRES.**  
"Termodinámica". México D.F: Grupo Editorial Patria, 2015. p. Disponible en:  
<https://elibro.net/es/ereader/epoch/39466?page=137>

**BARBOSA SALDAÑA, J. Y GUTIÉRREZ TORRES, C.** "Termodinámica para ingenieros." México: Grupo Editorial Patria, 2016. p. Disponible en:  
<https://elibro.net/es/ereader/epoch/40432?page=53>

**BOBINADO, LAURA MORENO,** "Guía para usar las tablas de propiedades termodinámicas". España, (2020, 19 junio), Disponible en:  
<https://www.bobinando.com/uso-de-tablas-de-propiedades-termodinamicas/>

**MALFAVÓN RAMOS, N. I. TAPIA DÁVILA, A. A.; MORALES GARCÍA, S. S**  
"Principios de termodinámica" Grupo Editorial Éxodo, 2013, Disponible en:  
<https://elibro.net/es/ereader/epoch/173462?page=74>.

# CAPÍTULO V



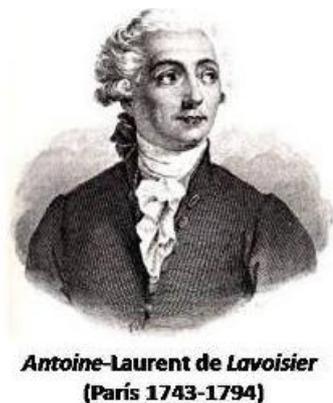
PROCESOS, CON APLICACIONES  
A GASES IDEALES

# CAPÍTULO 5

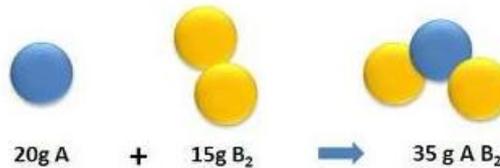
## PROCESOS, CON APLICACIÓN A GASES IDEALES

### 5.1 Conservación de la masa

Aplicar la primera ley de la termodinámica como enunciado del principio de conservación de la energía para volúmenes de control. Resolver problemas de balance de energía para dispositivos comunes de flujo estable como toberas, compresores, turbinas, válvulas de estrangulamiento, mezcladores, calentadores e intercambiadores de calor. La Ley de Conservación de la Materia, la cual data del descubrimiento de Antoine Lavoisier en 1789 es aquella que establece que la materia no se crea ni se destruye en una reacción química. En otras palabras, la masa de cualquier elemento al comienzo de una reacción será igual a la masa de ese elemento al final de la reacción.



### Ley de la conservación de la materia



***“La materia no se crea ni se destruye”***

*Figura 21 Imagen de Lavoisier y conservación de la materia*

Fuente: (Steemit, emiliomoron,2019)

Al igual que la energía, la masa es una propiedad conservada que no es posible crear ni destruir durante un proceso. Sin embargo, la masa  $m$  y la energía  $E$  se pueden convertir entre sí según una fórmula bien conocida que propuso Albert Einstein (1879-1955):

$$E = mc^2$$

#### 5.1.1 Definición

La conservación de la masa es uno de los principios fundamentales de la naturaleza. Todos estamos familiarizados con este principio y no es difícil entender. Como dice el refrán, “¡no se puede tenerlo todo!” Una persona no tiene que ser un científico para averiguar que un aderezo de vinagre y aceite se obtiene al mezclar 100 gramos de aceite con 25 gramos de vinagre. Incluso el balanceo de ecuaciones químicas se hace con base en el principio de conservación de la masa. Cuando 16 kg de oxígeno reaccionan con 2 kg de hidrógeno, se forman 18 kg de agua. En un proceso de electrólisis, el agua se separa en 2 kg de hidrógeno y 16 kg de oxígeno.

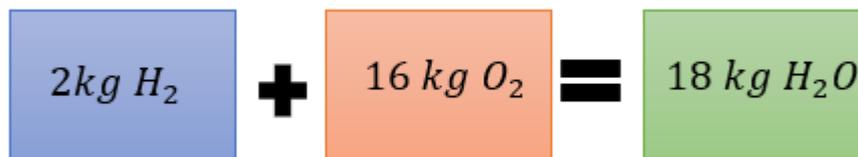


Gráfico 50 Conservación de la masa durante una reacción química

Fuente: Autores

### 5.1.2 Flujo másico

Es la cantidad de masa que pasa a través de una sección transversal, por unidad de tiempo. El punto sobre un símbolo se usa para indicar la rapidez de cambio respecto al tiempo. Un fluido entra o sale comúnmente de un volumen de control a través de tuberías o ductos. El flujo másico diferencial del fluido que pasa por un pequeño elemento de área  $dAc$  en una sección transversal de flujo es proporcional a  $dAc$ , la densidad del fluido y el componente de la velocidad de flujo normal a  $dAc$ , que se denota como  $V_n$ , y se expresa como:

$$\delta m = \rho V_n \cdot dAc$$

Observe que tanto  $\delta$  como  $d$  se usan para indicar cantidades diferenciales, pero  $\delta$  se emplea por lo regular para cantidades (como calor, trabajo y transferencia de masa) que son funciones de la trayectoria y tienen diferenciales inexactas, mientras que  $d$  se utiliza para cantidades (por ejemplo, propiedades) que son funciones puntuales y tienen diferenciales exactas.

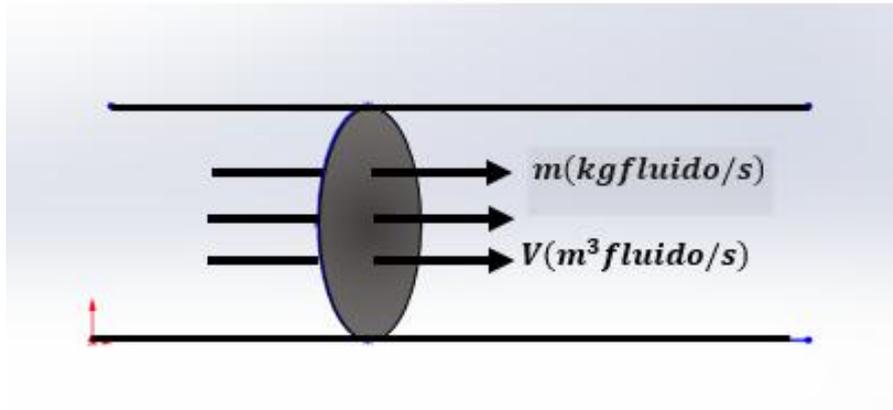


Gráfico 51 Representación de un flujo masico

Fuente: Autores

### 5.1.2.1 Ejerció de aplicaci3n

El estado de entrada de refrigerante R 134a una tobera adiabática es 80 *psia* y 100 *ft/s* a la salida, el fluido es vapor saturado a 60 *psia* y tiene una velocidad de 535 *ft/s* Determine El flujo másico en *lb/s*, si el área de salida es 0016 *ft²*.

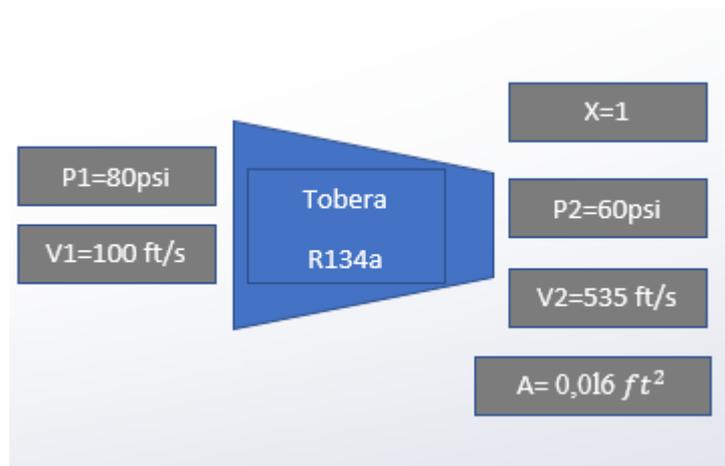


Gráfico 52 Representaci3n gráfica del ejercicio

Fuente: Autores

Desarrollo

$$\dot{m} = \rho * V2 * A = (V2 * A2)/VE$$

Volumen especifico del refrigerante R134a a 60 *psi*

$$VE = 0.79361 \frac{ft^3}{lbm}$$

$$\dot{m} = \frac{(535 \frac{ft}{s}) * (0.016 ft^2)}{0.79361 \frac{ft^3}{lbm}}$$

$$\dot{m} = 10.78 \frac{lbm}{s}$$

$$\dot{m}=10.78 \frac{\text{lbm}}{\text{s}}$$

### 5.1.3 Flujo volumétrico

Es la cantidad de volumen que pasa a través de una sección transversal, por unidad de tiempo. El monje italiano Benedetto Castelli (1577-1644) publicó en 1628 una primera forma de la ecuación. Observe que la mayor parte de los libros de mecánica de fluidos usa  $Q$  en lugar de  $V$  para el flujo volumétrico. Aquí se emplea  $V$  para evitar confusión con la transferencia de calor.

#### 5.1.3.1 Ejercicio

El estado de entrada de refrigerante  $R\ 134a$  a una tobera adiabática es  $80\ \text{psia}$  y  $100\ \text{ft/s}$  a la salida, el fluido es vapor saturado a  $60\ \text{psia}$  y tiene una velocidad de  $535\ \text{ft/s}$ . Determine:

- El flujo volumétrico en  $\text{ft}^3/\text{s}$  si el área de salida es  $0.026\ \text{ft}^2$ .

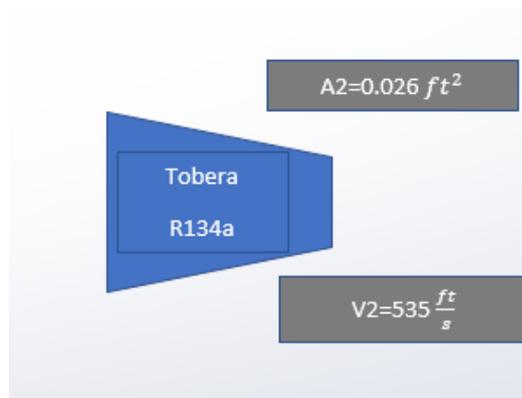


Gráfico 53 Representación gráfica del ejercicio

Fuente: Autores

Desarrollo

$$\dot{V} = (0.026) * (535)$$

$$\dot{V} = 13.91 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}$$

Expresar el balance de masas para un sistema cerrado

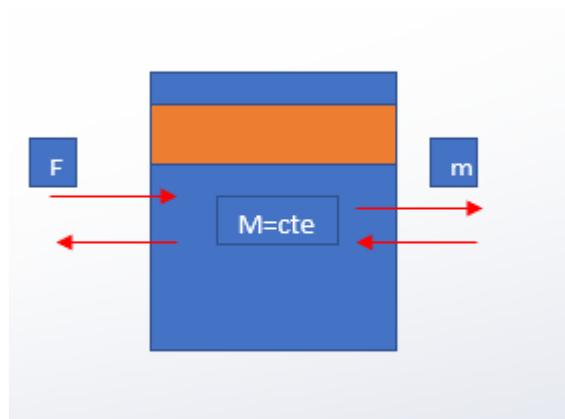


Gráfico 54 Balance de masas para un sistema cerrado

Fuente: Autores

Desarrollo

$$m_{in} - m_{out} = \Delta m_{sist}$$

$$m_{in} - m_{out} = m_2 - m_1$$

$$m_2 - m_1 = 0$$

$$m_2 = m_1 = m = cte$$

## 5.2 Balance de energía en sistemas abiertos

Para que la masa ingrese al sistema es necesario efectuar un trabajo para empujar esta masa en el sistema y el sistema debe realizar un trabajo sobre los alrededores para que la masa pueda salir del sistema.

### 5.2.1 Sistemas Abiertos

Un sistema se define como una cantidad de materia o una región en el espacio elegido para análisis. La masa o región fuera del sistema se conoce como alrededores. La superficie real o imaginaria que separa al sistema de sus alrededores se llama frontera. La frontera de un sistema puede ser fija o móvil. Note que la frontera es la superficie de contacto que comparten sistema y alrededores. En términos matemáticos, la frontera tiene espesor cero y, por lo tanto, no puede contener ninguna masa ni ocupar un volumen en el espacio.

Un sistema abierto, o a volumen de control, como suele llamarse, es una región elegida apropiadamente en el espacio. Generalmente encierra un dispositivo que tiene que ver con flujo másico, como un compresor, turbina o tobera. El flujo por estos dispositivos se

estudia mejor si se selecciona la región dentro del dispositivo como el volumen de control.

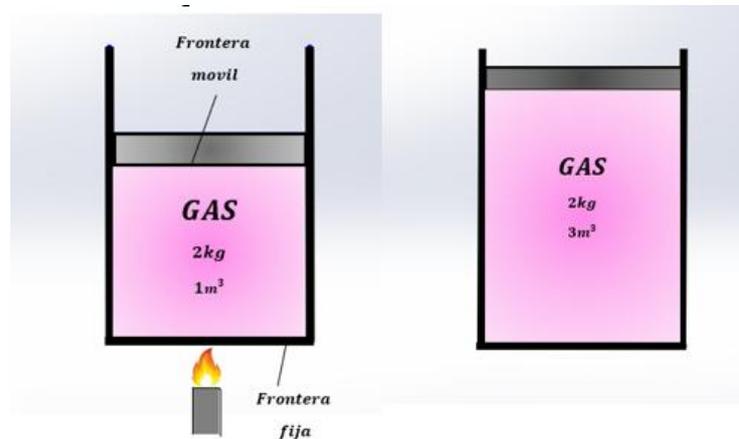


Gráfico 55 Un sistema cerrado con una frontera móvil

Fuente: Autores

### 5.2.2 Trabajo de Flujo

A diferencia de los sistemas cerrados, en los volúmenes de control hay flujo másico a través de sus fronteras, y se requiere trabajo para introducirla o sacarla del volumen de control. Este trabajo se conoce como trabajo de flujo o energía de flujo, y se requiere para mantener un flujo continuo a través de un volumen de control.

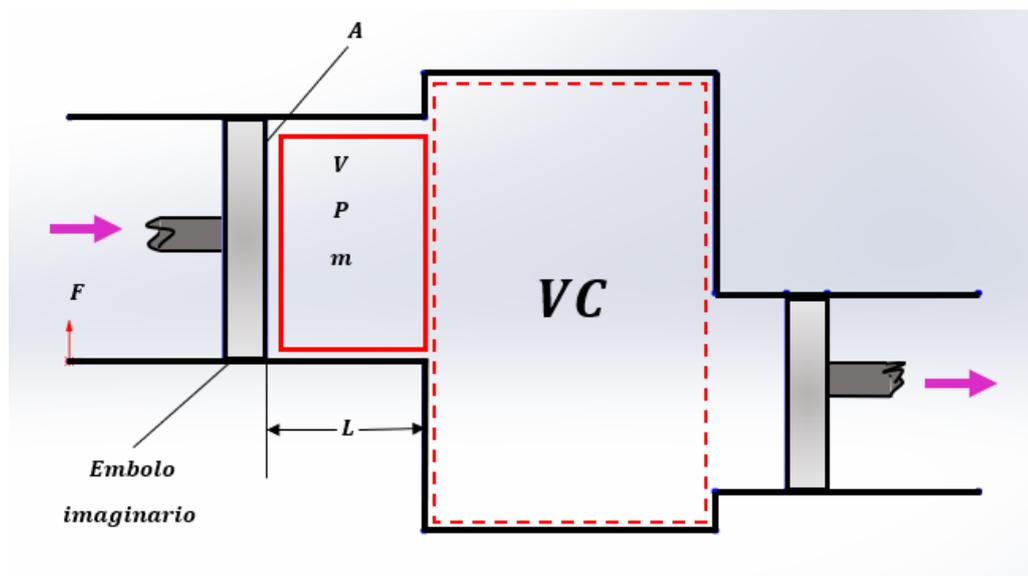


Gráfico 56 Esquema para trabajo de flujo

Fuente: Autores

### 5.2.3 Energía total en movimiento

El fluido que entra o sale de un volumen de control posee una forma adicional de energía, la energía de flujo  $Pv$ . Entonces la energía total de un fluido en movimiento por unidad de masa (denotada por  $\theta$ ).

### 5.3 Ejercicios de aplicación

Se llena con agua un recipiente para agua cilíndrico de  $3 \text{ ft}$  de diámetro y  $4 \text{ ft}$  de alto y cuya parte superior está abierta a la atmósfera. Luego se quita el tapón de descarga de la parte inferior del recipiente y sale un chorro de agua cuyo diámetro es de  $0.5 \text{ in}$  como se muestra en la figura. La velocidad promedio del chorro se determina mediante  $V = \sqrt{2gh}$ , donde  $h$  es la altura del agua dentro del recipiente medida desde el centro del agujero (una variable) y  $g$  es la aceleración debido a la gravedad. Determine cuánto tarda en bajar el nivel de agua hasta  $2 \text{ ft}$  desde el fondo.

Datos:

Grafica

#### Estado 1 (cilindro Agua)

$$D(\text{recipiente}) = 3 \text{ ft}$$

$$h_0 = 4 \text{ ft}$$

#### Estado 2 (retira tapón)

$$D(\text{chorro}) = 0.5 \text{ in}$$

$$T = ? \rightarrow h_2 = 2 \text{ ft} \uparrow$$

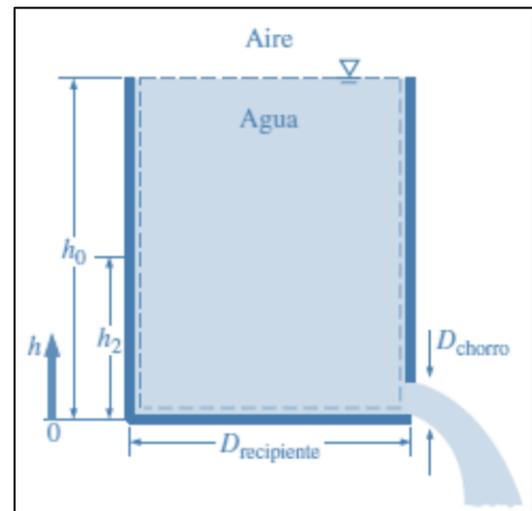


Gráfico 57 Imagen del ejercicio de aplicación

#### Criterios Iniciales

- El agua es una sustancia incompresible.
- La distancia entre el fondo del tanque y el centro del agujero es despreciable en comparación con la altura total del agua.
- La aceleración gravitacional es de  $32.2 \text{ ft/s}^2$ .
- Se toma el volumen ocupado por el agua como el volumen de control.
- En este caso, decrece el tamaño de este volumen, conforme el nivel del agua desciende y por lo tanto éste es un volumen de control variable.

**Resolución**

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{sistema}$$

$$m_{in} - m_{out} = \Delta m_{(volumen\ control)}$$

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = \frac{d m_{vc}}{dt}$$

$$\dot{m}_{in} = 0$$

$$\dot{m}_{out} = (\rho VA)_{out}$$

$$\dot{m}_{out} = \rho * \sqrt{2gh} * \left(\frac{\pi D^2}{4}\right)_{chorro}$$

$$m_{vc} = \rho V$$

$$m_{vc} = (\rho * A * h)_{cilindro}$$

$$m_{vc} = \left(\rho * \frac{\pi D^2}{4} * h\right)_{cilindro}$$

**Condiciones del Tiempo**

$$t = 0 \rightarrow h_1 = h_1$$

$$t \rightarrow h_1 = h_1$$

**Desarrollo**

$$\int_0^t dt = -\frac{D_{cilindro}^2}{D_{chorro}^2} \int \frac{dh}{\sqrt{2gh}}$$

$$t = -\left(\frac{D_{cilindro}}{D_{chorro}}\right)^2 \frac{1}{\sqrt{2g}} \int_{h_0}^{h_2} \frac{dh}{\sqrt{h}}$$

$$t = \left(\frac{D_{cilindro}}{D_{chorro}}\right)^2 \frac{\sqrt{h_0} - \sqrt{h_2}}{\frac{\sqrt{2g}}{2}}$$

$$t = \left(\frac{3 * 12\ in}{0.5\ in}\right)^2 \frac{\sqrt{4\ ft} - \sqrt{2\ ft}}{\frac{\sqrt{2(32.2\ ft/s^2)}}{2}}$$

$$t = 757\ s \rightarrow 12.6\ min$$

**Consideraciones de Flujo estable**

La energía en el volumen de control permanece constante. La masa en el volumen de control permanece constante. El volumen dentro del volumen de control permanece constante. Un gran número de dispositivos de ingeniería como turbinas, compresores y toberas funcionan durante largos periodos bajo las mismas condiciones una vez completado el periodo de inicio transitorio y establecida la operación estable; y se clasifican como dispositivos de flujo estable.

$$E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} = sE_{\text{sistema}}/dt \rightarrow 0(\text{estable})$$

Tasa de transferencia de energía neta por calor, trabajo y masa
---

Tasa de cambio de energías interna cinética, potencial
--

$$q - w = h_2 - h_1$$

- $Q$  = tasa de transferencia de calor entre el volumen de control y sus alrededores.
- $W$  = potencia. Para dispositivos de flujo estable, el volumen de control es constante; por lo tanto, no hay trabajo de frontera. El trabajo requerido para meter y sacar masa del volumen de control se toma en cuenta usando las entalpías para la energía de corrientes de fluido en lugar de energías internas. Cuando el volumen de control está perdiendo calor (como en el caso del calentador de agua).

#### 5.4 Dispositivos de Ingeniería

Muchos dispositivos de ingeniería operan en esencia bajo las mismas condiciones durante periodos largos. Por ejemplo, los componentes de una termoeléctrica (turbinas, compresores, intercambiadores de calor y bombas) operan sin parar durante meses antes de detener el sistema para mantenimiento, por lo tanto, pueden ser analizados de manera conveniente como dispositivos de flujo estable.

Procederemos a describir algunos dispositivos comunes de flujo estable y se analizan algunos aspectos termodinámicos del flujo que pasa por ellos. Los principios de conservación de la masa y de conservación de la energía para estos dispositivos.

##### 5.4.1 Toberas

Las toberas y los difusores se utilizan generalmente en motores de propulsión a chorro, cohetes, vehículos espaciales e incluso en mangueras de jardín. Una tobera es un dispositivo que incrementa la velocidad de un fluido a expensas de la presión. La tasa de transferencia de calor entre el fluido que fluye por una tobera o un difusor y los alrededores es comúnmente muy pequeña ( $Q = 0$ ) ya que el fluido tiene velocidades altas y por lo tanto no se mantiene suficiente tiempo en el dispositivo como que ocurra alguna transferencia de calor importante.

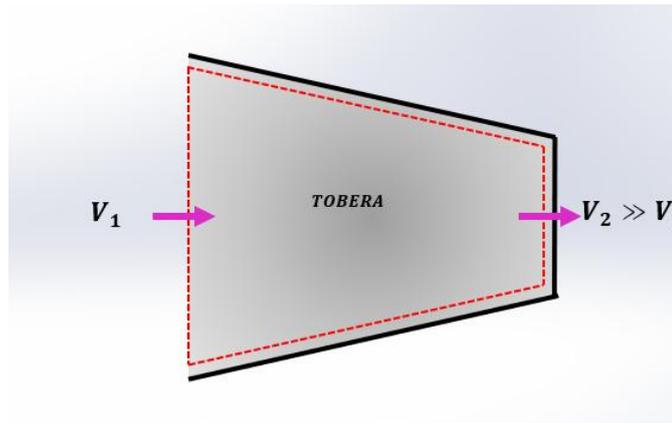


Gráfico 58 Representación de una tobera

Fuente: Autores

#### 5.4.1.1 Ejercicio de aplicación

A una tobera cuya área de entrada es  $2\text{ft}^2$  entra en forma estacionaria vapor de agua a  $250\text{psia}$  y  $700^\circ\text{F}$ . El flujo masico de vapor por la tobera, es  $10\text{ lbmasa/s}$ . El vapor sale de la tobera a  $200\text{ psia}$  con una  $v = 900\text{ ft/s}$ . Las pérdidas de calor desde la tobera por unidad de masa del vapor se estiman en  $1.2\text{ btu/lbmasa}$ . Determine:

- $V_{\text{entrada}}$ ,
- Temperatura de salida del vapor

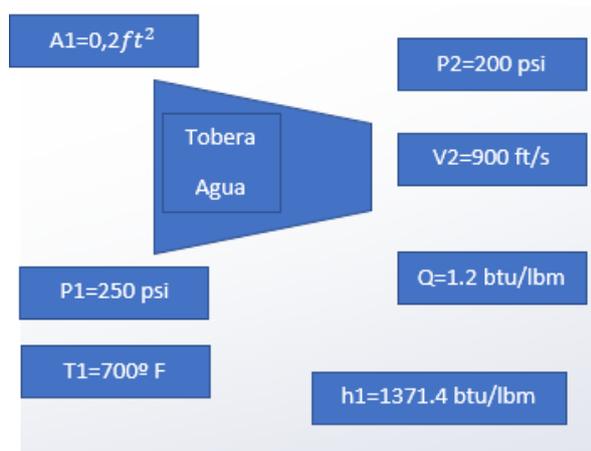


Gráfico 59 Ilustración ejercicio de aplicación

Fuente: Autores

Desarrollo

$V1 = ??$

$T2 = ??$

$$\dot{m}_1 = \rho V1 A1 \Rightarrow V1 = \frac{\dot{m}_1}{\rho A1} = \frac{(10 \frac{lbm}{s}) * (2.6883) \frac{ft}{lbm}}{0.2 ft^2} = 134,415 \frac{ft}{s}$$

$$V1 = 134,415 \frac{ft}{s}$$

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \frac{\delta VC}{\delta T}$$

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$\dot{W}_{in} + \dot{Q}_{in} + \sum \theta \dot{m}_{in} = \dot{W}_{out} + \dot{Q}_{out} + \sum \theta \dot{m}_{out}$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_{cte}$$

$$\dot{m}_1 \left( h1 + \frac{v1^2}{2} \right) = \dot{m}_2 q + \dot{m}_2 \left( h2 + \frac{v2^2}{2} \right)$$

$$h1 + \frac{v1^2}{2} = q + h2 + \frac{v2^2}{2}$$

$$h2 = h1 - \Delta ec - q$$

$$\Delta ec = ec2 - ec1 = \frac{v2^2}{2} - \frac{v1^2}{2} = \frac{v2^2 - v1^2}{2}$$

$$-\Delta ec = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} = \frac{(134.4)^2 + (900)^2}{2} \frac{ft^2}{s^2} * \left( \frac{1 \frac{btu}{lbm}}{25037 \frac{ft^2}{s}} \right)$$

$$-\Delta ec = -15,81 \frac{btu}{lbm}$$

$$h_2 = 1371.4 - 15,81 - 1.2$$

$$h_2 = 1354,58 \text{ btu/lbm}$$

$$P = 200 \text{ psi}$$

Interpolando tenemos que

$$T_2 = 661.9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

## 5.4.2 Difusores

Un difusor es un dispositivo que incrementa la presión de un fluido al desacelerarlo. Las toberas y los difusores normalmente están relacionados con velocidades muy altas, entonces cuando un fluido pasa por alguno de estos dispositivos experimenta grandes cambios en su velocidad.

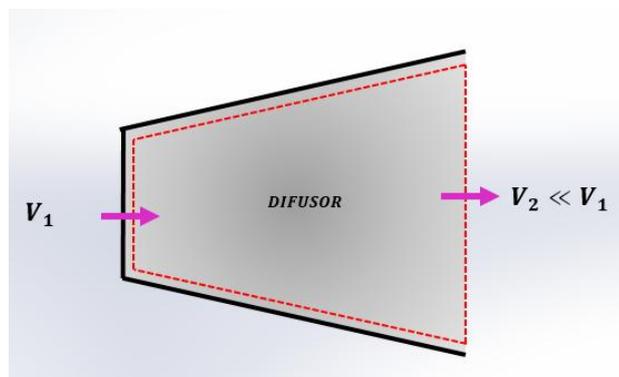


Gráfico 60 Representación de un difusor

Fuente: Autores

### 5.4.2.1 Ejercicio de Aplicación

En el difusor de un motor de propulsión entra de forma estacionaria aire a  $10^\circ \text{C}$  y  $80 \text{ KPa}$  con una velocidad de  $200 \text{ m/s}$ , el área de entrada al difusor es  $0.4 \text{ m}^2$ . El aire sale del difusor con una velocidad que es muy pequeña comparado con la velocidad de entrada. Determine:

- a) El flujo másico del aire
- b) La temperatura del aire que sale del difusor

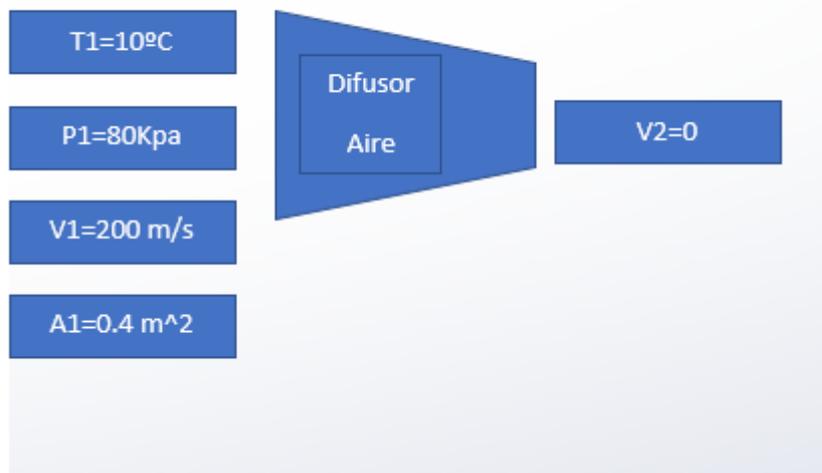


Gráfico 61 Ilustración del ejercicio de aplicación

Fuente: Autores

Desarrollo

$$m_A = ??$$

$$T_2 = ??$$

$$Pv = Rt$$

$$v = \frac{0.2870 \left( \frac{kJ}{kg \cdot K} \right) (283K)}{80kpa}$$

$$v = 1.015 \frac{m^3}{kg}$$

$$\dot{m}_1 = \rho VA = \frac{VA}{v} = \dot{m}_2$$

$$\dot{m}_1 = \frac{\left( \frac{200 \frac{m}{s}}{s} \right) * (0.4 m^2)}{2.015 \frac{m^3}{kg}} = 78.79 kg/s$$

$$\Delta ec = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2}$$

$$\Delta ec = -20 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$(h + ec_1)\dot{m}_1 = (h_2 + ec_2)\dot{m}_2$$

$$h_2 = h_1 - \Delta ec$$

$$h_2 = 283,136 + 20 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_2 = 303,166 \frac{kJ}{kg} \Rightarrow T_2 = 302.93K = 29.93^\circ C$$

### 5.4.3 Turbinas

En las centrales eléctricas de vapor, gas o en hidroeléctricas, el dispositivo que impulsa al generador eléctrico es la turbina. A medida que el fluido pasa por ésta se hace trabajo contra las aspas (alabes), las cuales están unidas a la flecha, la cual a su vez gira y la turbina produce trabajo.

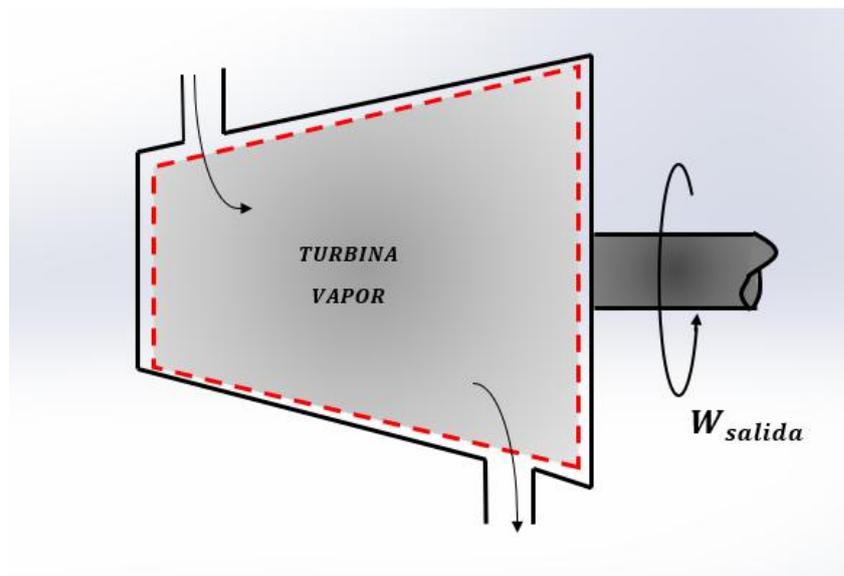


Gráfico 62 Representación de una turbina

Fuente: Autores

#### 5.4.3.1 Ejercicio de aplicación

La salida de potencia de una turbina de vapor adiabática es 5 MW, mientras que las condiciones de entrada y salida del vapor son como se indica en la figura.

- a) Compare las magnitudes de  $Ah$ ,  $Aec$  y  $Aep$ .

- b) Determine el trabajo hecho por unidad de masa del vapor que fluye por la turbina.
- c) Calcule el flujo másico del vapor.

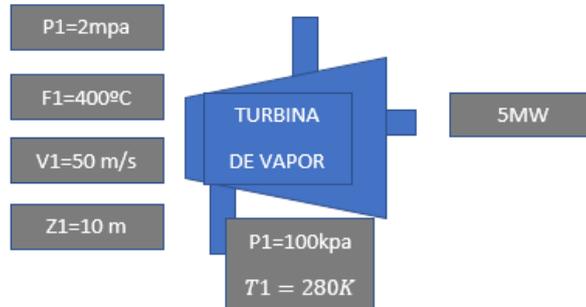


Gráfico 63 Ilustración ejercicio de aplicación

Fuente: Autores

Desarrollo

$$V_2 = 180 \text{ m/s}$$

$$P_2 = 15 \text{ kpa}$$

$$X = 90\%$$

$$Z_2 = 6 \text{ m}$$

$$h_1 = 3248.4 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = h_f + xh_{fg}$$

$$h_2 = 225.94 + (0.9) * (2372.3)$$

$$h_2 = 2564.4 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = -683.99 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\Delta ec = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} = 14.95 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\Delta ep = gz_2 - gz_1 = -0.0392 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$(h_1 + ec_1 + ep_1) \dot{m}_1 = (h_2 + ec_2 + ep_2) \dot{m}_2 + \dot{W}_{out}$$

$$-\Delta h - \Delta ec - \Delta ep = w$$

$$W = 669,079 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{out} = \frac{\dot{w}}{\Delta t} = w\dot{m}$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{w}_{out}}{w}$$

$$\dot{m} = \frac{V_1 \cdot A_1}{v}$$

$$\dot{m} = \frac{V_1 \cdot A_1}{v}$$

$$\dot{m} = \frac{500 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{669.074 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}$$

$$\dot{m} = 7.47 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

#### 5.4.4 Compresores

Al igual que las bombas y los ventiladores, los compresores son dispositivos que se utilizan para incrementar la presión de un fluido. A estos dispositivos el trabajo se suministra desde una fuente externa a través de un eje giratorio, por lo tanto, los compresores requieren entrada de trabajo. Aun cuando estos tres dispositivos funcionan de manera similar, difieren en las tareas que llevan a cabo. Un ventilador se usa sobre todo para movilizar un gas y sólo incrementa la presión de éste ligeramente, mientras que un compresor es capaz de comprimir el gas a presiones muy altas. Las bombas funcionan de manera muy parecida a los compresores excepto que manejan líquidos en lugar de gases.

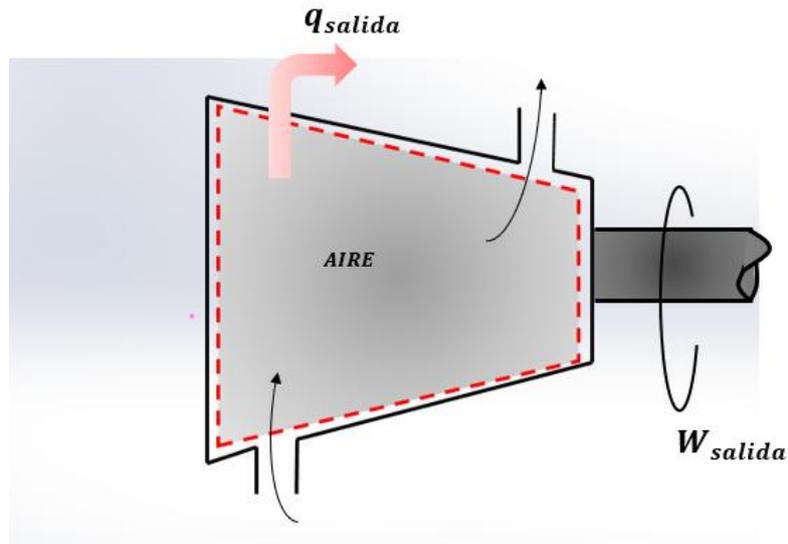


Gráfico 64 Representación compresor de aire

Fuente: Autores

#### 5.4.4.1 Ejercicio de aplicación

Aire a 100 kPa y 280 K se comprime en régimen permanente hasta 600 kPa y 400 K. El flujo másico del aire es 0.02 kg/s y ocurre una pérdida de calor de 16 kJ/kg durante el proceso. Si se supone que los cambios de energía cinética y potencial son insignificantes, determine la entrada de potencia necesaria al compresor.

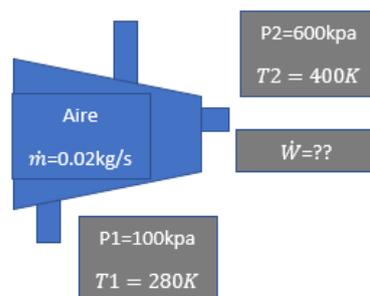


Gráfico 65 Ilustración ejercicio de aplicación

Fuente: Autores

Desarrollo

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$\dot{W}_{in} + \sum \dot{m}_1 h_1 = \dot{Q}_{punto} + \sum \dot{m}_2 h_2$$

$$\dot{W}_{in} = \dot{q} \dot{m} + (\Delta h) \dot{m}$$

$$W_{in} = q\dot{m} + C_p(\Delta T) \dot{m}$$

$$W_{in} = \dot{m}(q + C_p(T_2 - T_1))$$

$$W_{in} = 0.02 \frac{kg}{s} \left( 16 \frac{kJ}{kg} + 1.005 \frac{kJ}{kg \cdot K} (400 - 280)K \right)$$

$$W_{in} = 0.02 \frac{kg}{s} \left( 16 \frac{kJ}{kg} + 1.005 \frac{kJ}{kg \cdot K} (400 - 280)K \right)$$

$$W_{in} = 2.73 \frac{kJ}{s}$$

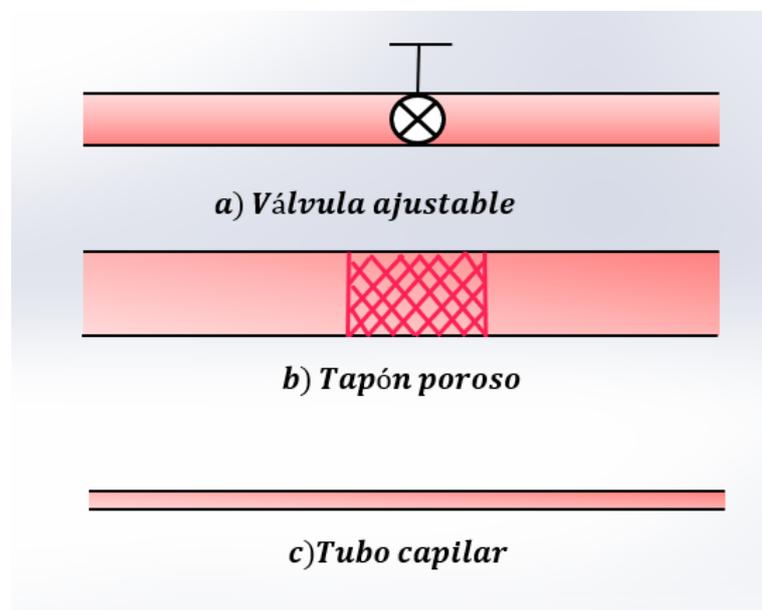
$$W_{in} = 2.73 \text{kw}$$

### **Solución.**

Para que el compresor funcione con las condiciones establecidas se debe de proporcionar una potencia de 2.73Kw

#### **5.4.5 Válvulas de estrangulamiento**

Las válvulas de estrangulamiento son cualquier clase de dispositivo que restringe el flujo, lo cual causa una caída de presión importante en el fluido. Algunos ejemplos comunes son válvulas ajustables ordinarias, tubos capilares y tapones porosos.



*Gráfico 66 Las válvulas de estrangulamiento causan grandes caídas de presión en el fluido*

Fuente: Autores

A diferencia de las turbinas, producen una caída de presión sin implicar trabajo. La caída de presión en el fluido suele ir acompañada de una gran disminución de temperatura, por esa razón los dispositivos de estrangulamiento son de uso común en aplicaciones de refrigeración y acondicionamiento de aire. La magnitud de la caída de temperatura durante un proceso de estrangulamiento se rige por una propiedad llamada coeficiente de Joule-Thomson.

Las válvulas de estrangulamiento son por lo regular dispositivos pequeños, y se puede suponer que el flujo por ellos es adiabático ( $q \cong 0$ ) puesto que no hay suficiente tiempo ni área suficientemente grande para que ocurra alguna transferencia de calor efectiva. También, no se realiza trabajo ( $w = 0$ ), y el cambio en la energía potencial, si tiene lugar, es muy pequeño ( $\Delta ep \cong 0$ ). Aun cuando la velocidad de salida sea con frecuencia considerablemente mayor que la velocidad de entrada, en muchos casos el incremento de energía cinética es insignificante ( $\Delta ec \cong 0$ ). Entonces la ecuación de conservación de la energía para este dispositivo de flujo estable con una sola corriente se reduce a:

$$h_2 \cong h_1 \left( \frac{kJ}{kg} \right)$$

Es decir, los valores de entalpía en la entrada y la salida de una válvula de estrangulamiento son los mismos. Por esta razón, una válvula de estrangulamiento se denomina a veces dispositivo isoentálpico.

#### 5.4.5.1 Ejercicio de aplicación

Una mezcla de líquido y vapor de agua saturados, llamada vapor húmedo, fluye en una línea de suministro de vapor de agua a 2 000 kPa y se estrangula hasta 100 kPa y 120 °C. ¿Cuál es la calidad de vapor de agua en la línea de suministro?

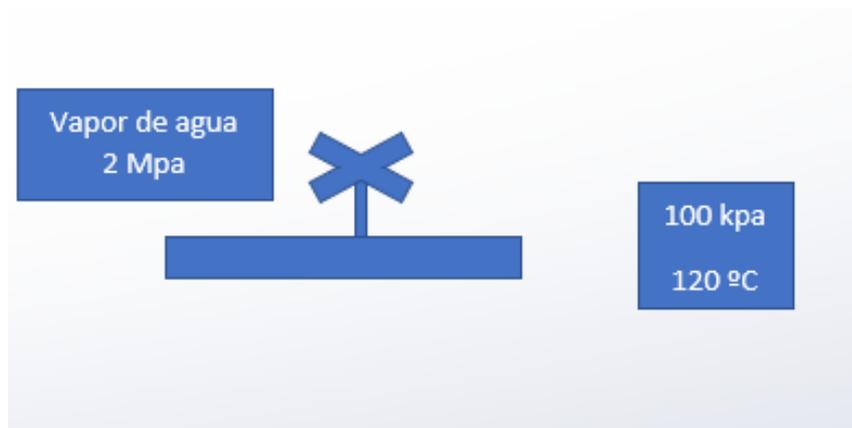


Gráfico 67 Ilustración del ejercicio de aplicación

Fuente: Autores

**Desarrollo**

Determinamos la entalpía:

$$h_1 = 2675.8 \quad T_1 = 100$$

$$h_2 = 2776.6 \quad T_2 = 150$$

$$h_3 = ? \quad T_3 = 120$$

$$h_3 = p_1 + \frac{h_2 - h_1}{t_2 - t_1} * T_3 - t_1 = h_3$$

*Vapor sobrecalentado*

$$P = 100 \text{ kpa} \quad T = 99,6$$

$$T = 120^\circ\text{C} \quad P = 0.1 \text{ Mpa}$$

$$200 \text{ Kpa} \quad T = 213,8^\circ\text{C} \quad h_{fg} = 1889.8$$

$$h_f = 908.45 \quad h_1 = h_2$$

$$h = h_f + fgx$$

$$x = \left( \frac{h - h_f}{h_{fg}} \right) = \left( \frac{2776.12 - 908.45}{1889.8} \right) = 0.96$$

**5.4.6 Intercambiadores de calor**

Como su nombre indica, los intercambiadores de calor son dispositivos donde dos corrientes de fluido en movimiento intercambian calor sin mezclados. Los intercambiadores de calor se usan ampliamente en varias industrias y su diseño es variado. La forma más simple de un intercambiador de calor es un intercambiador de calor de tubo doble (conocido también como de tubo y coraza) y que se compone de dos tubos concéntricos de diámetros distintos.

Un fluido corre por el tubo interno mientras otro lo hace en el espacio anular entre ambos tubos. El calor se transfiere del fluido caliente al frío a través de la pared que los separa. Algunas veces el tubo interno tiene un par de vueltas dentro de la coraza para aumentar el área de transferencia de calor y, por consiguiente, la tasa de transferencia de calor. Las cámaras de mezclados analizadas antes se clasifican a veces como intercambiadores de calor de contacto directo. El principio de conservación de la masa

para un intercambiador de calor que opera de forma estable requiere que la suma de los flujos másicos de entrada sea igual a la suma de los flujos másicos que salen. Este principio se puede expresar también como sigue: en operación estable, el flujo másico de cada corriente de fluido que fluye por un intercambiador de calor permanece constante.

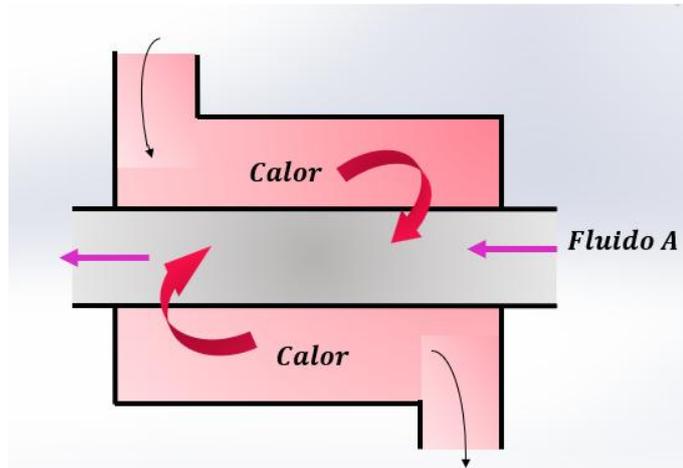


Gráfico 68 Un intercambiador de calor es tan simple como dos tuberías concéntricas.

Fuente: Autores

#### 5.4.6.1 Ejercicio de aplicación

Se va a condensar vapor de agua a  $85\text{ }^{\circ}\text{F}$  en la coraza de un intercambiador de calor. El agua de enfriamiento entra a los tubos a  $60\text{ }^{\circ}\text{F}$  con un flujo de  $138\text{ lbm/s}$  y sale a  $73\text{ }^{\circ}\text{F}$ . Suponiendo que el intercambiador de calor esté bien aislado, determine la tasa de transferencia de calor y la tasa de condensación del vapor de agua.

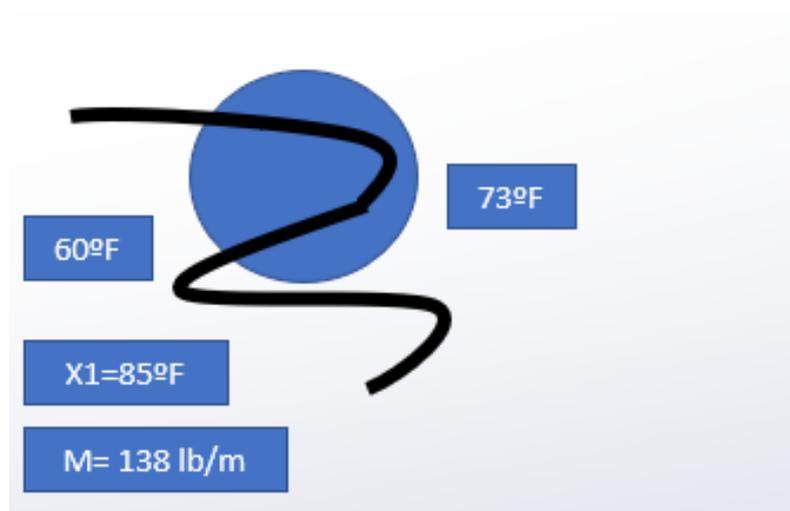


Gráfico 69 Ilustración del ejercicio de aplicación

Fuente: Autores

Desarrollo

$$w = 0$$

$$ec = 0$$

$$ep = 0$$

Sistema de agua fría

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$q_1 + (h_1) \dot{m} = (h_2) \dot{m}$$

$$q_1 = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

$$q = \dot{m}(c_p)(\Delta t)$$

$$q = 138 \frac{\text{lbm}}{\text{s}} \left( 1 \frac{\text{btu}}{\text{lbm}} \right) (73 - 60)$$

$$\dot{Q} = 1794 \frac{\text{BTU}}{\text{s}}$$

#### 5.4.7 Cámaras de mezclado

En las aplicaciones de ingeniería, mezclar dos corrientes de fluido no es raro. La sección donde el proceso de mezclado tiene lugar se conoce como cámara de mezclado, la cual no tiene que ser exactamente una "cámara". Una tubería ordinaria en forma de "T" o en "Y" de una regadera, por ejemplo, sirve como cámara de mezclado para las corrientes de agua fría y caliente. El principio de conservación de la masa para una cámara de mezclado requiere que la suma de los flujos másicos entrantes sea igual al flujo másico de la mezcla saliente.

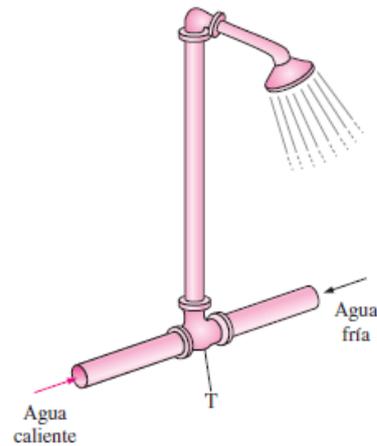


Figura 22 La tubería en forma de T sirve como cámara de mezclado de agua caliente y fría.

Fuente: (Cengel,2006, pag.240)

Las cámaras de mezclado por lo regular están bien aisladas ( $q \cong 0$ ) y normalmente no se relacionan con ningún trabajo ( $w = 0$ ). Asimismo, las energías cinética y potencial de las corrientes de fluido son comúnmente insignificantes ( $ec \cong 0, ep \cong 0$ ). Entonces lo que queda en la ecuación de la energía son las energías totales de las corrientes entrantes y la mezcla que sale. El principio de conservación de la energía requiere que estas dos sean iguales entre sí; por lo tanto, para este caso la ecuación de conservación de la energía es análoga a la de la conservación de la masa.

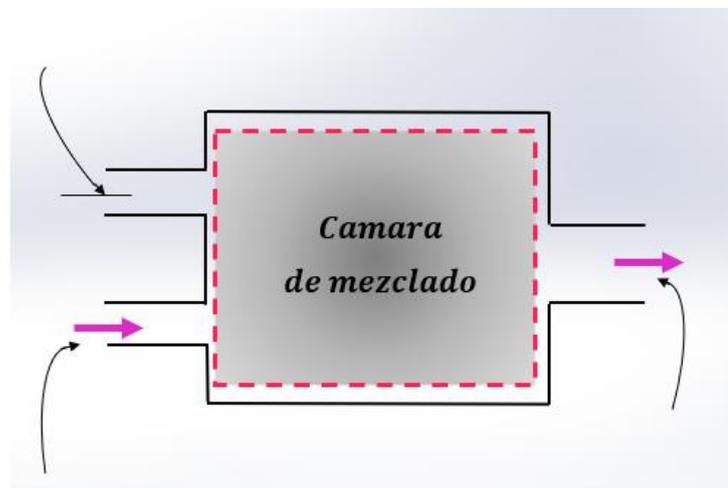


Gráfico 70 Representación cámara de mezclado

Fuente: Autores

#### 5.4.8 Tuberías

La transportación de líquidos o gases en tuberías y ductos es de gran importancia en muchas aplicaciones de ingeniería. El flujo por una tubería o ducto comúnmente satisface las condiciones de flujo estable, de manera que se puede analizar como un proceso de flujo estable. Por supuesto, esto excluye los periodos transitorios de arranque y paro. La selección del volumen de control puede coincidir con la superficie interior de la porción de la tubería o ducto que se desea analizar. En condiciones normales de operación, la cantidad de calor que gana o pierde el fluido puede ser muy significativa, en particular si la longitud de la tubería o ducto es grande.

En algunas ocasiones es deseable la transferencia de calor y es el único propósito que tiene el flujo. Algunos ejemplos de esto son el agua que fluye por las tuberías del horno de una planta de energía, el refrigerante que lo hace por un congelador y el flujo en los intercambiadores de calor. Otras veces la transferencia de calor es poco deseable y las tuberías o ductos se aíslan para evitar cualquier pérdida o ganancia de calor, en particular cuando la diferencia de temperatura entre el fluido que corre y los alrededores es grande. La transferencia de calor en este caso es insignificante.

Las velocidades de flujo en ductos y tuberías son relativamente bajas, por lo que los cambios de energía cinética normalmente son insignificantes. Esto es cierto particularmente cuando el diámetro de la tubería o el ducto es constante y es posible ignorar los efectos de calentamiento. Sin embargo, los cambios de energía cinética pueden ser importantes para el flujo de gas en ductos con áreas de sección transversal variable, sobre todo cuando son significativos los efectos de compresibilidad. El término de energía potencial también puede cobrar relevancia cuando el fluido experimenta un cambio de elevación considerable a medida que fluye por una tubería o ducto.

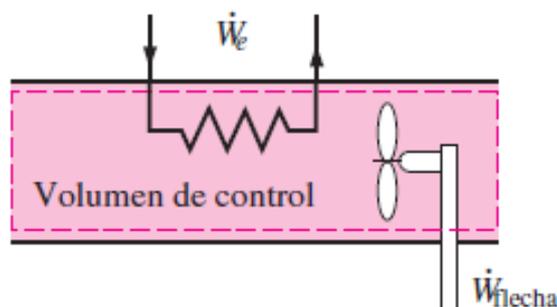


Figura 23 El flujo por una tubería podría implicar más de una forma de trabajo

Fuente: (Cengel,2006, pag.244)

## 5.5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**CENGEL, Y. A., BOLES, M. A., CAMPOS OLGUÍN, V., & COLLI SERRANO, M. T. "** TERMODINÁMICA", 2014. Disponible en:  
<https://www.elsolucionario.org/termodinamica-yunus-a-cengel-michael-a-boles-8va-edicion/>

**CENGEL, Y. A., BOLES, M. A., CAMPOS OLGUÍN, V., & COLLI SERRANO, M. T.** (2006). "Termodinámica", Disponible en:  
[https://www.academia.edu/36872934/Vdocuments\\_mx\\_termodinamica\\_5ta\\_edicion\\_yunus\\_a\\_cengel\\_michael\\_a\\_boles](https://www.academia.edu/36872934/Vdocuments_mx_termodinamica_5ta_edicion_yunus_a_cengel_michael_a_boles)

**MORALES GARCÍA, S. S. TAPIA DÁVILA, A. A. Y MALFAVÓN RAMOS, N. I.** "Principios de termodinámica". Grupo Editorial Éxodo, 2013. p. Obtenido de:  
<https://elibro.net/es/ereader/epoch/173462?page=15>

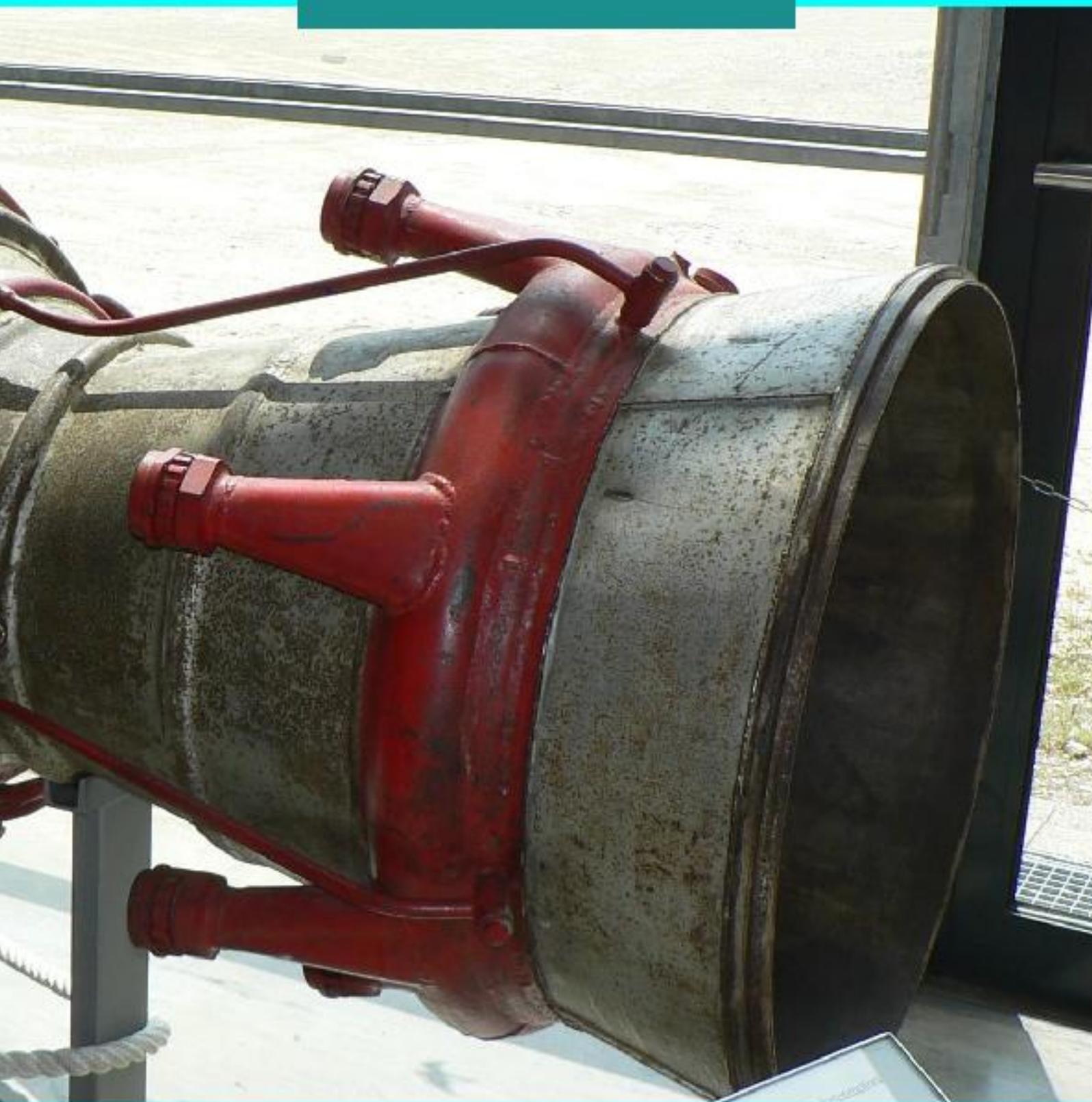
**EMILIOMORON STEEMIT**, "Ley de la conservación de la masa", 2019, Obtenido de:  
<https://steemit.com/spanish/@emiliomoron/leydelaconservacindelamasa-x2dasnwc2g>

**JIMÉNEZ BERNAL, J. A.; CLAUDIA DEL CARMEN GUTIÉRREZ TORRES.** "Termodinámica", editorial. México D.F: Grupo Editorial Patria, 2015. 217 p. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/39466?page=64>.

**BARBOSA SALDAÑA, J. ; GUTIÉRREZ TORRES, C;** "Termodinámica para ingenieros", editorial. México: Grupo Editorial Patria, 2016. 433 p. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/40432?page=84>.

**ALVARADO GARCÍA, R.** "Principios de termodinámica". Editorial, México, D.F: Instituto Politécnico Nacional, 2010. 218 p. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/72185?page=180>.

# CAPÍTULO VI



SISTEMA DE DOS FASES

## CAPITULO 6

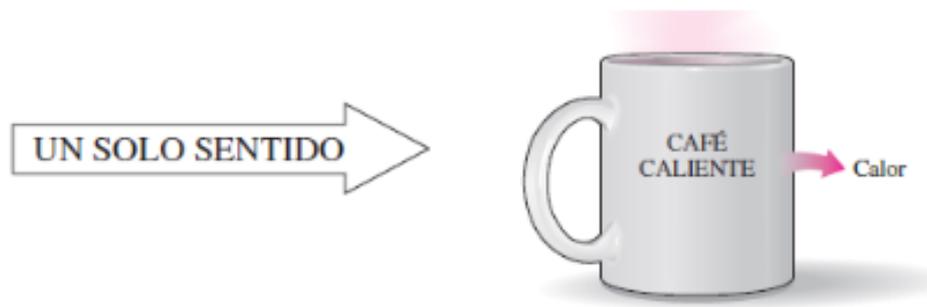
### SISTEMA DE DOS FASES

#### 6.1 *Segunda ley de la termodinámica*

La experiencia nos muestra que algunos procesos naturales siguen cierta direccionalidad para que se lleven a cabo. Por ejemplo, no esperamos que una cascada fluya hacia arriba de manera espontánea o que una taza de café aumente de manera natural su temperatura en lugar de disminuirla. Es importante caracterizar la "dirección" que sigue un proceso natural, existe una direccionalidad básica en la naturaleza.

La segunda ley de la termodinámica se usa para determinar los límites teóricos en el desempeño de sistemas de ingeniería de uso ordinario, como máquinas térmicas y refrigeradores, así como predecir el grado de terminación de las reacciones químicas. La segunda ley está también estrechamente asociada con el concepto de perfección. De hecho, la segunda ley define la perfección para los procesos termodinámicos. Se puede usar para cuantificar el nivel de perfección de un proceso y señalar la dirección para eliminar eficazmente las imperfecciones.

Una experiencia común es que una taza de café caliente dejada en una habitación que está más fría termine por enfriarse. Este proceso satisface la primera ley de la termodinámica porque la cantidad de energía que pierde el café es igual a la cantidad que gana el aire circundante. Considere ahora el proceso inverso: café caliente que se vuelve incluso más caliente en una habitación más fría como resultado de la transferencia de calor desde el aire. La segunda ley de la termodinámica no se limita a identificar la dirección de los procesos, también afirma que la energía tiene calidad, así como cantidad.



*Figura 24 El café caliente no se pondrá más caliente en una habitación más fría.*

Fuente: (Cengel,2006, pag.280)

### **6.1.1 Maquinas térmicas**

Las máquinas térmicas difieren bastante entre sí, pero es posible caracterizarlas a todas de la siguiente manera.

1. Reciben calor de una fuente a temperatura alta (energía solar, horno de petróleo, reactor nuclear, etcétera).
2. Convierten parte de este calor en trabajo (por lo general en la forma de una flecha rotatoria).
3. Rechazan el calor de desecho hacia un sumidero de calor de baja temperatura (la atmósfera, los ríos, etcétera).
4. Operan en un ciclo.

El término máquina térmica se usa con frecuencia en un sentido más amplio que incluye dispositivos que producen trabajo que no operan en un ciclo termodinámico. Las máquinas relacionadas con la combustión interna, como las turbinas de gas y los motores de automóviles, entran en esta categoría. Estos dispositivos operan en un ciclo mecánico, pero no en un ciclo termodinámico, porque el fluido de trabajo (los gases de combustión) no experimenta un ciclo completo. En lugar de ser enfriados a la temperatura inicial, los gases de escape se purgan y se reemplazan por una mezcla fresca de aire y combustible al final de ciclo.

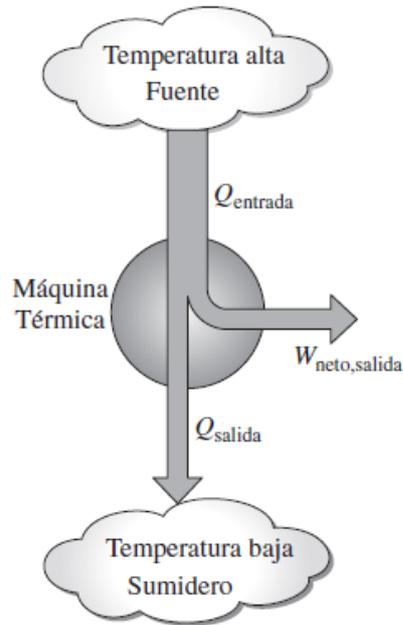


Figura 25 El calor que recibe una máquina térmica se convierte en trabajo

Fuente: (Cengel,2006, pag.282)

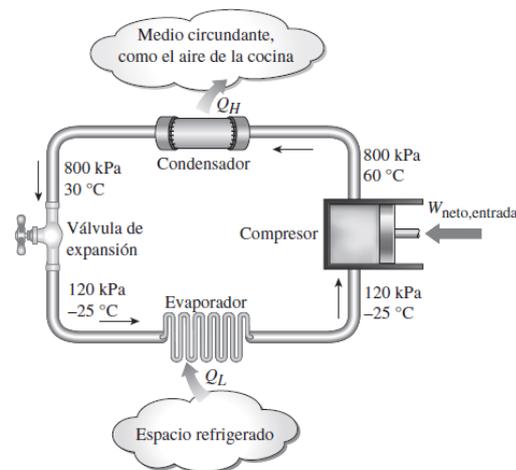
- $Q_{entrada}$  = cantidad de calor suministrada al vapor en una caldera desde una fuente de temperatura alta (horno)
- $Q_{salida}$  = cantidad de calor rechazada del vapor en el condensador hacia un sumidero de temperatura baja (atmósfera, río, etcétera)
- $W_{salida}$  = cantidad de trabajo que entrega el vapor cuando se expande en una turbina
- $W_{entrada}$  = cantidad de trabajo requerida para comprimir agua a la presión de la caldera

### 6.1.2 Refrigeradores

La transferencia de calor de un medio que se encuentra a baja temperatura hacia otro de temperatura alta requiere dispositivos especiales llamados refrigeradores. El ciclo de refrigeración que se utiliza con más frecuencia es el ciclo de refrigeración de compresión de vapor, en el que intervienen cuatro componentes principales: un compresor, un condensador, una válvula de expansión y un evaporador.

Los refrigeradores, como las bombas de calor, son dispositivos cíclicos. El fluido de trabajo utilizado en el ciclo de refrigeración se denomina refrigerante. El ciclo de refrigeración que se utiliza con mayor frecuencia es el ciclo de refrigeración por

compresión por vapor, en el que intervienen cuatro componentes principales: un compresor, un condensador, una válvula de expansión y un evaporador.



*Figura 26 Componentes de un sistema de refrigeración y sus condiciones de operación*

Fuente: (Cengel,2006, pag.288)

El refrigerante entra al compresor como vapor y se comprime hasta la presión del condensador, posteriormente sale del compresor a una temperatura relativamente alta y se enfría y condensa a medida que fluye por los serpentines del condensador rechazando calor al medio circundante. Después entra al tubo capilar donde su presión y temperatura caen de forma drástica debido al efecto de estrangulamiento. Luego, el refrigerante a temperatura baja entra al evaporador, donde se evapora absorbiendo calor del espacio refrigerado. El ciclo se completa cuando el refrigerante sale del evaporador y vuelve a entrar al compresor.

### 6.1.3 Bombas de calor

Otro dispositivo que transfiere calor desde un medio de baja temperatura a otro de alta es la bomba de calor. El objetivo de una bomba de calor, sin embargo, es mantener un espacio calentado a una temperatura alta. Esto se logra absorbiendo calor desde una fuente que se encuentra a temperatura baja, por ejemplo, agua de pozo o aire frío exterior en invierno, y suministrando este calor a un medio de temperatura alta como una casa.

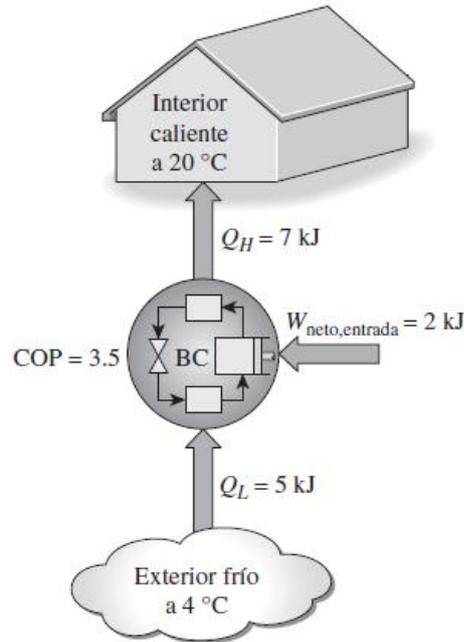


Figura 27 Una bomba extrae energía fría del exterior y lleva al interior caliente

Fuente: (Cengel,2006, pag.289)

La medida de desempeño de una bomba de calor también se expresa en términos del coeficiente de desempeño  $\text{COP}_{\text{HP}}$ , definido como:

$$\text{COP}_{\text{HP}} = \frac{\text{salida deseada}}{\text{entrada requerida}} = \frac{Q_H}{W_{\text{neto}}}$$

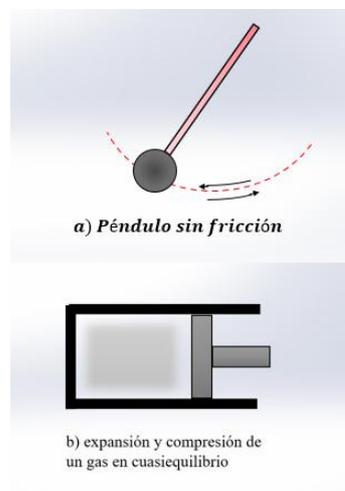
El desempeño de acondicionadores de aire y bombas de calor se expresa con frecuencia en términos del índice de eficiencia de la energía (EER, por sus siglas en inglés) o el índice estacional de eficiencia energética (SEER, por sus siglas en inglés), determinada por las siguientes normas de prueba. La SEER es la relación de la cantidad total del calor disipado por un acondicionador de aire o por una bomba térmica durante una estación normal de enfriamiento (en Btu) con respecto a la cantidad total de electricidad consumida (en watt-horas, Wh), y es una medida del desempeño estacional del equipo de enfriamiento.

## 6.2 Procesos

La segunda ley de la termodinámica establece que ninguna máquina térmica puede tener una eficiencia de 100 por ciento. Entonces cabe preguntar, ¿cuál es la eficiencia más alta que pudiera tener una máquina térmica? Antes de contestarla es necesario definir primero un proceso idealizado, llamado proceso reversible.

Se clasifican como procesos irreversibles. Una vez que se enfría una taza de café, no se calentará al recuperar de los alrededores el calor que perdió. Si eso fuera posible, tanto los alrededores como el sistema (café) volverían a su condición original, y esto sería un proceso reversible.

Un proceso reversible se define como un proceso que se puede invertir sin dejar ningún rastro en los alrededores. Es decir, tanto el sistema como los alrededores vuelven a sus estados iniciales una vez finalizado el proceso inverso. Esto es posible sólo si el intercambio de calor y trabajo netos entre el sistema y los alrededores es cero para el proceso combinado (original e inverso). Los procesos que no son reversibles se denominan procesos irreversibles.



*Figura 28 Dos procesos reversibles comunes.*

Fuente: (Cengel,2006, pag.296)

### **6.2.1 Procesos Reversibles**

En termodinámica, un proceso reversible se define como un proceso que se puede revertir induciendo cambios infinitesimales en alguna propiedad del sistema, y al hacerlo no deja ningún cambio ni en el sistema ni en el entorno. Durante el proceso reversible, la entropía del sistema no aumenta y el sistema está en equilibrio termodinámico con su entorno.

En realidad, no hay procesos verdaderamente reversibles. Todos los procesos termodinámicos reales son de alguna manera irreversibles. No se hacen infinitamente lento. Por lo tanto, los motores térmicos deben tener eficiencias más bajas que los límites en su eficiencia debido a la irreversibilidad inherente del ciclo del motor térmico que usan. Sin embargo, para fines de análisis, se utilizan procesos reversibles para simplificar el análisis y determinar las eficiencias térmicas máximas.

Por ejemplo, el ciclo de Carnot se considera un ciclo que consiste en procesos reversibles:

1. Expansión isotérmica reversible del gas.
2. Expansión isentrópica (adiabática reversible) del gas
3. Compresión isotérmica reversible del gas.
4. Compresión isentrópica (adiabática reversible) del gas

### **6.2.2 Procesos Irreversibles**

En termodinámica, un proceso irreversible se define como un proceso que no se puede revertir, proceso, que no puede devolver tanto el sistema como el entorno a sus condiciones originales. Durante el proceso irreversible aumenta la entropía del sistema. Hay muchos factores que hacen que un proceso sea irreversible como los siguientes:

1. Presencia de fricción y pérdidas de calor. En sistemas termodinámicos reales o en procesos de calor real, no podemos excluir la presencia de fricción mecánica o pérdidas de calor.
2. Diferencia de temperatura finita. Los procesos no se realizan infinitamente lento. Por ejemplo, podría haber turbulencia en el gas. Por lo tanto, los motores térmicos deben tener eficiencias más bajas que los límites en su eficiencia debido a la irreversibilidad inherente del ciclo del motor térmico que utilizan.
3. Mezcla de dos sustancias diferentes.
4. Según la segunda ley de la termodinámica.
5. La entropía de cualquier sistema aislado nunca disminuye. En un proceso termodinámico natural, aumenta la suma de las entropías de los sistemas termodinámicos que interactúan.

Esta ley indica la irreversibilidad de los procesos naturales. Los procesos reversibles son una ficción teórica útil y conveniente, pero no ocurren en la naturaleza. De esta ley se deduce que es imposible construir un dispositivo que funcione en un ciclo y cuyo único efecto sea la transferencia de calor de un cuerpo más frío a un cuerpo más caliente. De ello se deduce que las máquinas de movimiento perpetuo del segundo tipo son imposibles.

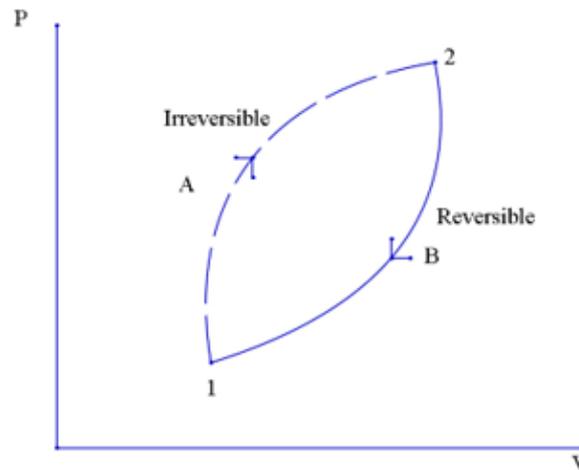


Gráfico 71 Representación de los procesos

Fuente: Autores

### 6.2.3 Irreversibilidades

Los factores que causan que un proceso sea irreversible se llaman irreversibilidades, las cuales son la fricción, la expansión libre, el mezclado de dos fluidos, la transferencia de calor a través de una diferencia de temperatura finita, la resistencia eléctrica, la deformación inelástica de sólidos y las reacciones químicas. La presencia de cualquiera de estos efectos hace que un proceso sea irreversible. Un proceso reversible no incluye ninguno de ellos.

Algunas de las irreversibilidades encontradas con mayor frecuencia se analizan brevemente a continuación. La fricción es una forma familiar de irreversibilidad relacionada con cuerpos en movimiento. Cuando dos cuerpos en contacto son forzados a moverse uno respecto al otro en la interfase de ambos se desarrolla una fuerza de fricción que se opone al movimiento, por lo que se requiere algo de trabajo para vencer esta fuerza de fricción. La energía suministrada como trabajo se convierte finalmente en calor durante el proceso y se transfiere hacia los cuerpos en contacto, como lo evidencia un aumento de temperatura en la interfaz.

Cuando se invierte la dirección del movimiento, los cuerpos se restablecen a su posición original, pero la interfaz no se enfría y el calor no se convierte de nuevo en trabajo. En cambio, algo más del trabajo se convierte en calor mientras se vencen las fuerzas de fricción que también se oponen al movimiento inverso.

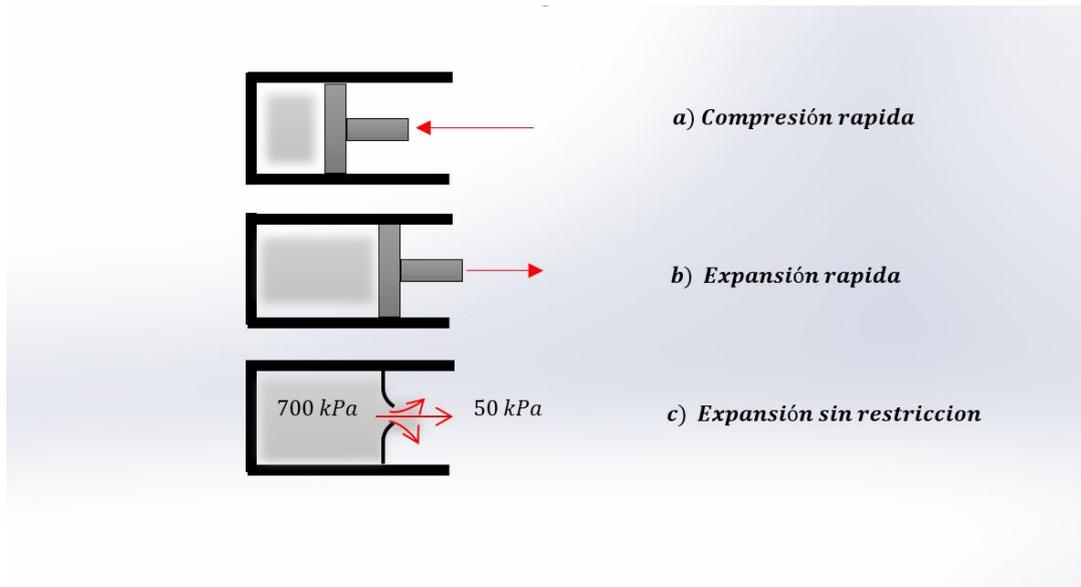


Gráfico 72 Procesos de compresión y expansión irreversibles

Fuente: Autores

### 6.3 Ejercicios de aplicación

Procederemos a explicar varias aplicaciones de los procesos termodinámicos detallados anteriormente mediante ejemplos que se pueden encontrar en la vida cotidiana y que nos ayudan a mejorar nuestra comodidad.

#### 6.3.1 Sistemas de Refrigeración

Cuando se diseña un sistema de refrigeración, existen varios refrigerantes que pueden elegirse, como clorofluorocarbonos (CFCs), amoníaco, hidrocarburos (propano, etano, etileno, etc.), dióxido de carbono, aire (en el acondicionamiento de aire de aviones) e incluso agua (en aplicaciones arriba del punto de congelación). Una adecuada elección del refrigerante depende de la situación específica. De éstos, los refrigerantes tales como  $R - 11$ ,  $R - 12$ ,  $R - 22$ ,  $R - 134a$  y  $R - 502$  abarcan 90% del mercado.

#### Sistemas innovadores de refrigeración por compresión de vapor.

El ciclo simple de refrigeración por compresión de vapor estudiado antes es el más utilizado y el más adecuado para la mayor parte de las aplicaciones de refrigeración. Los sistemas de refrigeración por compresión de vapor ordinarios son simples, económicos, confiables y prácticamente libres de mantenimiento.

Sin embargo, en grandes aplicaciones industriales, la eficiencia no la simplicidad es lo que más importa. También en algunas aplicaciones, el ciclo simple de refrigeración por compresión de vapor es inadecuado y necesita modificarse. Ahora analizaremos algunas de esas modificaciones y refinamientos.

### **Sistemas de refrigeración en cascada**

Algunas aplicaciones industriales requieren temperaturas moderadamente bajas, y el intervalo de temperatura que involucran es demasiado grande para que un ciclo simple de refrigeración por compresión de vapor resulte práctico. Un gran intervalo de temperatura significa también un gran nivel de presión en el ciclo y un pobre desempeño en un compresor recíprocante. Una manera de enfrentar esas situaciones consiste en efectuar el proceso de refrigeración por etapas, es decir, tener dos o más ciclos de refrigeración que operan en serie. Tales procesos se denominan ciclos de refrigeración en cascada.

Un ciclo de refrigeración en cascada de dos etapas. Los dos ciclos se conectan por medio de un intercambiador de calor en medio, el cual sirve como el evaporador para el ciclo superior (ciclo A) y como el condensador en el ciclo inferior (ciclo B). Suponiendo que el intercambiador de calor está bien aislado y que las energías cinética y potencial son despreciables, la transferencia de calor del fluido en el ciclo inferior debe ser igual a la transferencia de calor del fluido en el ciclo superior.

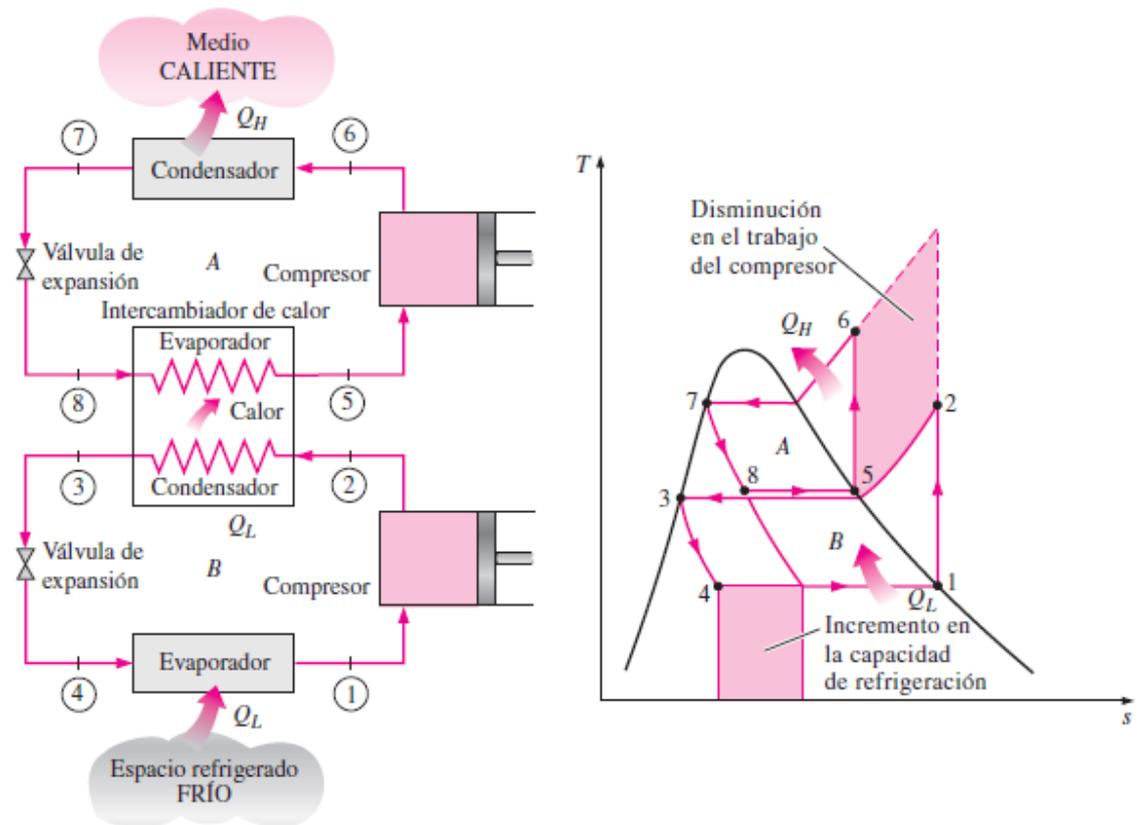


Figura 29 Sistema de refrigeración en cascada de dos etapas y el mismo

Fuente: (Cengel,2006, pag.621)

#### 6.4 Entropía

La entropía es una propiedad útil y una valiosa herramienta en el análisis de la segunda ley en los dispositivos de ingeniería, pero esto no significa que sabemos y entendemos bien la entropía. La entropía puede verse como una medida de desorden molecular, o aleatoriedad molecular. Cuando un sistema se vuelve más desordenado, las posiciones de las moléculas son menos predecibles y la entropía aumenta, de ahí que no sorprenda que la entropía de una sustancia sea más baja en la fase sólida y más alta en la gaseosa.

La segunda ley de la termodinámica conduce frecuentemente a expresiones que involucran desigualdades. Por ejemplo, una máquina térmica irreversible (es decir, real), es menos eficaz que otra reversible que opera entre los mismos dos depósitos de energía térmica. Igualmente, un refrigerador irreversible o una bomba de calor tienen un coeficiente de funcionamiento (COP) más que otro reversible que funciona entre los mismos límites de temperatura. Otra desigualdad importante que tiene mayores consecuencias en la termodinámica es la desigualdad de Clausius, establecida por

primera vez por el físico alemán R. J. E. Clausius (1822-1888), uno de los fundadores de la termodinámica. Este concepto se expresa como:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

Es decir, la integral cíclica de  $\delta Q/T$  siempre es menor o igual a cero. Esta desigualdad es válida durante todos los ciclos, tanto reversibles como irreversibles.

El símbolo  $\oint$  (símbolo de integral con un círculo en medio) se usa para indicar que la integración será realizada durante el ciclo entero. Cualquier transferencia de calor hacia o desde un sistema consiste en cantidades diferenciales de transferencia de calor. Entonces la integral cíclica de  $\delta Q/T$  puede considerarse como la suma de todas estas cantidades diferenciales de transferencia de calor dividida por la temperatura en la frontera.

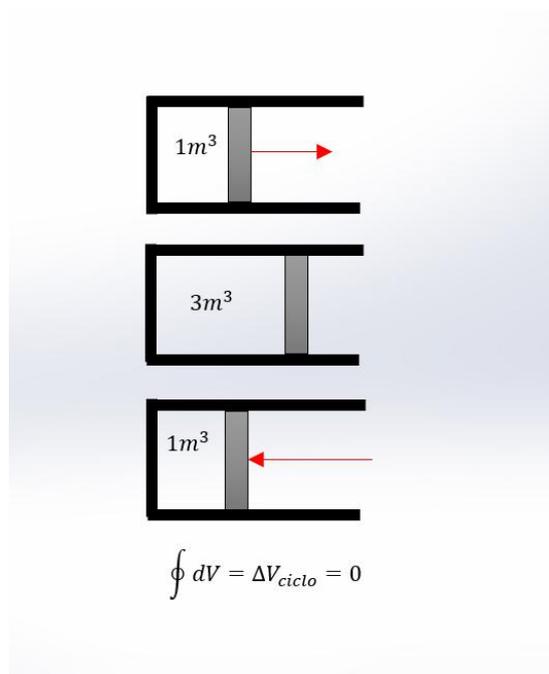


Gráfico 73 El cambio neto en el volumen durante un ciclo siempre es cero

Fuente: Autores

#### 6.4.1 Diagrama de Propiedades

Los diagramas de propiedad proporcionan gran ayuda visual en el análisis termodinámico de los procesos. En los capítulos anteriores hemos usado extensivamente diagramas  $P - v$  y  $T - v$  junto con la primera ley de la termodinámica.

Para el análisis de la segunda ley es muy útil trazar los procesos en diagramas en los que una de las coordenadas es la entropía. Los dos diagramas normalmente usados en este tipo de análisis son los diagramas de temperatura-entropía y entalpía-entropía. La transferencia total de calor durante un proceso internamente reversible es determinada por la siguiente integración:

$$Q_{int rev} = \int_1^2 T dS \quad (kJ)$$

Que corresponde al área bajo la curva del proceso en un diagrama T-S. Por consiguiente, se concluye que el área bajo la curva del proceso en un diagrama  $T - S$  representa la transferencia de calor durante un proceso internamente reversible.

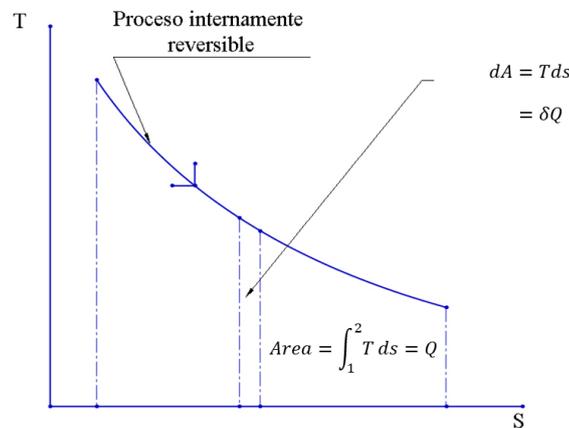


Gráfico 74 En un diagrama T-S, el área bajo la curva representa la transferencia de calor.

Fuente: Autores

#### 6.4.2 Relación $T ds$

La cantidad  $(\delta Q/T)_{int rev}$  corresponde a un cambio diferencial en la propiedad entropía. Entonces, el cambio de entropía para un proceso puede evaluarse integrando  $\delta Q/T$  a lo largo de alguna trayectoria imaginaria internamente reversible entre los estados extremos reales. Para los procesos isotérmicos internamente reversibles, esta integración es directa, pero cuando la temperatura varía durante el proceso, se necesita una relación entre  $\delta Q$  y  $T$  para llevar a cabo esta integración. Encontrar tales relaciones es el objetivo de esta sección. La forma diferencial de la ecuación de conservación de la energía para un sistema estacionario cerrado (una masa fija) que contiene una sustancia compresible simple, puede expresarse para un proceso internamente reversible como:

$$\delta Q_{int rev} - W_{int rev, salida} = dU$$

Pero:

$$\delta Q_{int rev} = T dS$$

$$\delta W_{int rev, salida} = P dV$$

Por lo tanto:

$$T dS = dU + P dV \quad (k)$$

Esta ecuación es conocida como la primera ecuación  $T ds$ , o de Gibbs. Observe que el único tipo de interacción de trabajo que un sistema compresible simple puede involucrar cuando es sometido a un proceso internamente reversible es el trabajo de frontera.

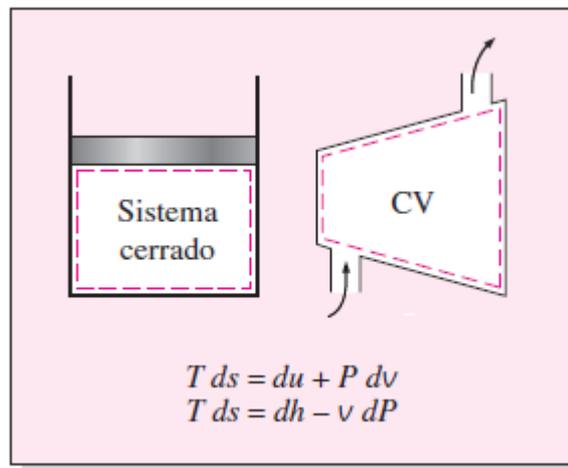


Figura 30  $T ds$  es válida en procesos reversibles, irreversibles, sistemas cerrados y abiertos

Fuente: (Cengel, 2006, pag. 350)

## 6.5 Cambio de la entropía de líquidos a sólidos

Recuerde que líquidos y sólidos pueden aproximarse como sustancias incompresibles dado que sus volúmenes específicos permanecen casi constantes durante un proceso. Por lo tanto,  $dv \cong 0$  para líquidos y sólidos, y para este caso la ecuación se reduce a:

$$ds = \frac{du}{T} = \frac{c dT}{T}$$

Ya que  $c_p = c_v = c$  y  $du = c dT$  para sustancias incompresibles. Entonces el cambio de entropía durante un proceso es determinado por integración como:

$$\text{Líquidos, sólidos: } S_2 - S_1 = \int_1^2 c(T) \frac{dT}{T} \cong c_{prom} \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (\text{kJ}/\text{Kg} \cdot \text{K})$$

Donde  $c_{prom}$  es el calor específico promedio de la sustancia a lo largo de un intervalo de temperatura dado. Observe que el cambio de entropía de una sustancia verdaderamente incompresible sólo depende de la temperatura y es independiente de la presión.

Una relación para procesos isentrópicos de líquidos y sólidos se obtiene igualando la relación del cambio de entropía a cero, lo que da:

$$\text{Isentropico: } S_2 - S_1 = c_{prom} \ln \frac{T_2}{T_1} = 0 \rightarrow T_2 = T_1$$

Es decir, la temperatura de una sustancia verdaderamente incompresible permanece constante durante un proceso isentrópico. Por consiguiente, el proceso isentrópico de una sustancia incompresible es también isotérmico. Este comportamiento se acerca mucho a líquidos y sólidos.

### 6.5.1 Gases Ideales

Una fórmula para el cambio de entropía de un gas ideal se obtiene con la siguiente ecuación, empleando las relaciones de propiedad para los gases ideales. Sustituyendo  $du = c_v dT$  y  $P = RT/v$  en la ecuación, el cambio diferencial de entropía de un gas ideal se vuelve:

$$ds = c_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v}$$

El cambio de entropía para un proceso se obtiene integrando esta relación entre los estados extremos:

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 c_v(T) \frac{dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

Una segunda relación para el cambio de entropía de un gas ideal se obtiene de manera similar a la anterior, sustituyendo  $dh = c_p dT$  y  $v = RT/P$  en la ecuación e integrando. El resultado es:

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 c_p(T) \frac{dT}{T} + R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

### 6.5.2 Calores específicos constantes (análisis aproximado)

Suponer los calores específicos constantes para los gases ideales es una forma común de aproximación que ya se ha usado antes en este libro en varias ocasiones. Esta forma normalmente simplifica el análisis, pero el precio que pagamos por emplearla es alguna pérdida de exactitud.

La magnitud de error introducida por esta suposición depende de la situación, por ejemplo: para los gases monoatómicos ideales como el helio, los calores específicos son independientes de la temperatura y por consiguiente suponer el calor constante específico no provoca error; mientras que para gases ideales cuyos calores específicos varían casi linealmente en el rango en que se hallan de las temperaturas de interés, el error posible se minimiza usando los valores de calores específicos evaluados a temperatura promedio. Los resultados normalmente obtenidos con este tipo de aproximación son lo suficientemente exactos si el rango de temperatura no es mayor que unos cientos de grados.

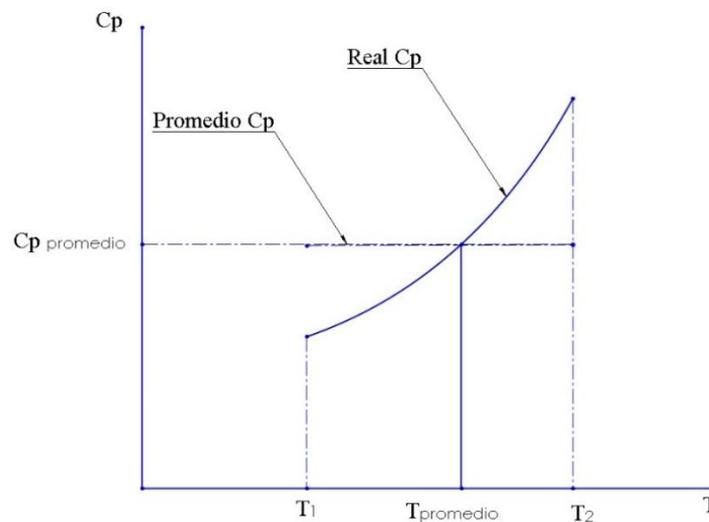


Gráfico 75 Bajo la suposición el calor específico es constante en algún valor promedio

Fuente: Autores

Las relaciones de cambio de entropía para los gases ideales bajo la suposición de calor específico constante se obtienen fácilmente al remplazar  $c_v(T)$  y  $c_p(T)$  en las ecuaciones por el  $c_{v,prom}$  y  $c_{p,prom}$  respectivamente, y al realizar las integraciones. Así, se obtiene:

$$s_2 - s_1 = c_{v,prom} \ln \frac{T_2}{T_1} + R * \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (kJ/kg * K)$$

y

$$s_2 - s_1 = c_{p,prom} \ln \frac{T_2}{T_1} + R * \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (kJ/kg * K)$$

### 6.5.3 Calores específicos variables (análisis exacto)

Durante un proceso, cuando el cambio de temperatura es grande y los calores específicos del gas ideal no varían linealmente dentro del rango de temperatura, la suposición de calores específicos constantes puede llevar a errores considerables al calcular el cambio de entropía. En estos casos, la variación de los calores específicos a causa de la temperatura debe considerarse adecuadamente y utilizar las relaciones exactas para estos calores como una función de temperatura. El cambio de entropía durante un proceso se determina entonces al sustituir las relaciones  $c_v(T)$  y  $c_p(T)$  en la ecuación anterior y después llevar a cabo las integraciones.

En lugar de resolver estas laboriosas integrales cada vez que tenemos un nuevo proceso, es conveniente realizarlas una vez y tabular los resultados. Para esto, se elige el cero absoluto como la temperatura de referencia y se define una función  $s^\circ$  como:

$$s^\circ = \int_0^T c_p(T) \frac{dT}{T}$$

Obviamente,  $s^\circ$  es una función sólo de la temperatura y su valor es cero en la temperatura absoluta cero. Los valores de  $s^\circ$  están calculados para varias temperaturas y se encuentran tabulados en el apéndice como una función de temperatura para el aire.

$$\int_1^2 C_p(T) \frac{dT}{T} = s_2^\circ - s_1^\circ$$

donde  $s_2^\circ$  es el valor de  $s^\circ$  en  $T_2$  y  $s_1^\circ$  es el valor en  $T_1$ . Así:

$$s_2 - s_1 = s_2^\circ - s_1^\circ - R * \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (kJ/kg * K)$$

Lo que también puede expresarse por unidad de mol.

$$\bar{s}_2 - \bar{s}_1 = \bar{s}_2^\circ - \bar{s}_1^\circ - R_u * \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (kJ/mol * K)$$

A diferencia de la energía interna y la entalpía, la entropía de un gas ideal varía con el volumen específico, la presión, o la temperatura. Por lo tanto, la entropía no puede tabularse exclusivamente como una función de temperatura. Los valores de  $s^\circ$  en las tablas explican la dependencia que la temperatura tiene de entropía.

#### 6.5.4 Procesos isentrópicos en gases ideales

Es posible obtener varias relaciones para los procesos isentrópicos de gases ideales al igualar a cero las relaciones del cambio de entropía desarrolladas previamente. Nuevamente, esto se hace primero para el caso de los calores específicos constantes y después para el de los específicos variables.

##### 6.5.4.1 Calores específicos constantes (análisis aproximado)

Cuando la suposición del calor específico constante es válida, las relaciones isentrópicas para los gases ideales se obtienen al igualar a cero las ecuaciones anteriores:

$$\ln \frac{T_2}{T_1} = -\frac{R}{c_v} \ln \frac{v_2}{v_1}$$

la cual puede reestructurarse como:

$$\ln \frac{T_2}{T_1} = \ln \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{R/c_v}$$

O

$$\left( \frac{T_2}{T_1} \right)_{s=const} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \quad \text{gas ideal}$$

como  $R = cp - cv$ ,  $k = \frac{cp}{cv}$ , por lo tanto  $\frac{R}{cv} = k - 1$ .

La ecuación mostrada es la primera relación isentrópica para los gases ideales bajo la suposición del calor específico constante. La segunda relación isentrópica se obtiene de forma similar a partir de la ecuación lo cual da como resultado:

$$\left( \frac{T_2}{T_1} \right)_{s=const} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} \quad \text{gas ideal}$$

La tercera relación isentrópica se obtiene al sustituir la ecuación simplificamos:

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{s=const} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k \text{ gas ideal}$$

También es posible expresar en forma compacta de la ecuación:

$$Tv^{k-1} = constante$$

$$TP^{(1-k)/k} = constante$$

$$Pv^k = constante$$

Generalmente la relación de calores específicos  $k$  varía con la temperatura, por lo que debe usarse un valor promedio  $k$  para el rango de temperaturas dado.

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)_{s=const} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1}$$

Esta ecuación es válida para: un gas ideal, procesos isentrópicos y calor específico constante.

#### 6.5.4.2 Calores específicos variables (análisis exacto)

Cuando la suposición de calor específico constante no es adecuada, las relaciones isentrópicas desarrolladas previamente dan resultados que no son suficientemente exactos. En casos así es necesario usar una relación isentrópica obtenida de la ecuación anterior, que toma en cuenta la variación de calores específicos a causa de la temperatura. Al igualar la ecuación a cero se obtiene:

$$0 = s_2^0 - s_1^0 - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

O

$$s_2^0 = s_1^0 + R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

Donde  $s_2^0$  es el valor de  $s^0$  final del proceso isentrópico.

#### 6.5.4.3 Presión relativa y volumen específico relativo

La ecuación proporciona una manera exacta de evaluar cambios de propiedad en gases ideales durante los procesos isentrópicos, ya que toma en cuenta la variación de calores específicos debido a la temperatura. Sin embargo, involucra iteraciones tediosas cuando la razón de volumen se da en lugar de la presión. Ésta es una molestia real en los

estudios de optimización porque normalmente requiere numerosos cálculos repetitivos. Para remediar esta deficiencia, se definen dos nuevas cantidades adimensionales asociadas con los procesos isentrópicos. La primera definición se basa en la ecuación, la cual puede reestructurarse como:

$$\frac{P_2}{P_1} = \exp \frac{s_2^\circ - s_1^\circ}{R}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\exp(s_2^\circ/R)}{\exp(s_1^\circ/R)}$$

La cantidad  $\exp(s^\circ/R)$  se define como la presión relativa  $P_r$ , definición con la que la última relación se vuelve:

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{s=const} = \frac{P_{r2}}{P_{r1}}$$

Observe que la presión relativa  $P_r$  es una cantidad adimensional la cual es una función sólo de la temperatura porque  $s^\circ$  depende de una temperatura única.

## 6.6 Ciclos de Potencia

La mayor parte de los dispositivos que producen potencia operan en ciclos, y el estudio de los ciclos de potencia es una parte interesante e importante de la termodinámica. Los ciclos que se llevan a cabo en los dispositivos reales son difíciles de analizar debido a la presencia de efectos complicados, como la fricción y la falta de tiempo suficiente para establecer las condiciones de equilibrio durante el ciclo. Para que sea factible el estudio analítico de un ciclo es necesario mantener estas complejidades en un nivel manejable y utilizar algunas idealizaciones. Cuando al ciclo real se le eliminan todas las irreversibilidades y complejidades internas, se consigue finalmente un ciclo que se parece en gran medida al real pero que está formado en su totalidad de procesos internamente reversibles. Tal ciclo es llamado un ciclo ideal.

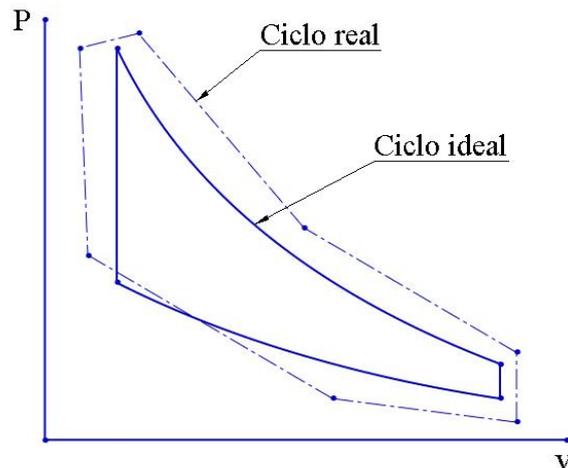


Gráfico 76 Se puede usar la idealización para el análisis de procesos complejos

Fuente: Autores

Las máquinas térmicas se diseñan con el propósito de convertir energía térmica en trabajo y su desempeño se expresa en términos de la eficiencia térmica  $\eta_{ter}$ , que es la relación entre el trabajo neto producido por la máquina y la entrada de calor total:

$$\eta_{ter} = \frac{W_{neto}}{Q_{entrada}} \text{ o } \eta_{ter} = \frac{w_{neto}}{q_{entrada}}$$

Recuerde que las máquinas térmicas operadas en un ciclo totalmente reversible, como el ciclo de Carnot, tienen la eficiencia térmica más alta de todas las máquinas térmicas que operan entre los mismos niveles de temperatura. Es decir, nadie puede desarrollar un ciclo más eficiente que el ciclo de Carnot.

### 6.6.1 Ciclo Rankine

En 1859, un ingeniero escocés, William John Macquorn Rankine, avanzó en el estudio de los motores térmicos al publicar el Manual del motor de vapor y otros motores principales. Rankine desarrolló una teoría completa de la máquina de vapor y, de hecho, de todas las máquinas de calor. Junto con Rudolf Clausius y William Thomson (Lord Kelvin), contribuyó a la termodinámica, centrándose particularmente en la primera de las tres leyes termodinámicas.

El ciclo de Rankine lleva su nombre y describe el rendimiento de los sistemas de turbinas de vapor, aunque el principio teórico también se aplica a motores alternativos

como las locomotoras de vapor. En general, el ciclo Rankine es un ciclo termodinámico idealizado de un motor térmico de presión constante que convierte parte del calor en trabajo mecánico. En este ciclo, el calor se suministra externamente a un circuito cerrado, que generalmente usa agua (en fase líquida y de vapor) como fluido de trabajo. En contraste con el ciclo de Brayton, el fluido de trabajo en el ciclo de Rankine experimenta el cambio de fase de una fase líquida a una de vapor y viceversa.

El ciclo de Rankine es un ciclo termodinámico compuesto por dos transformaciones isoentrópicas y dos isobaras. Su propósito es transformar el calor en trabajo utilizando un intercambiador de calor. Es la base del diseño de máquinas de vapor de cualquier tipo. En un proceso isentrópico la entropía del sistema permanece constante mientras que en un proceso isobárico lo que se mantiene constante es la presión.

Considere una central eléctrica de vapor que opera en un ciclo Rankine ideal simple y que tiene una salida neta de potencia de 45 MW. El vapor entra a la turbina a 7 MPa y 500°C, y se enfría en el condensador a una presión de 10 kPa mediante el agua de enfriamiento proveniente de un lago y que circula por los tubos del condensador a una tasa de 2 000 kg/s. Muestre el ciclo en un diagrama  $T - s$  respecto de las líneas de saturación y determine:

- la eficiencia térmica del ciclo,
- el flujo másico del vapor
- el aumento de temperatura del agua de enfriamiento.

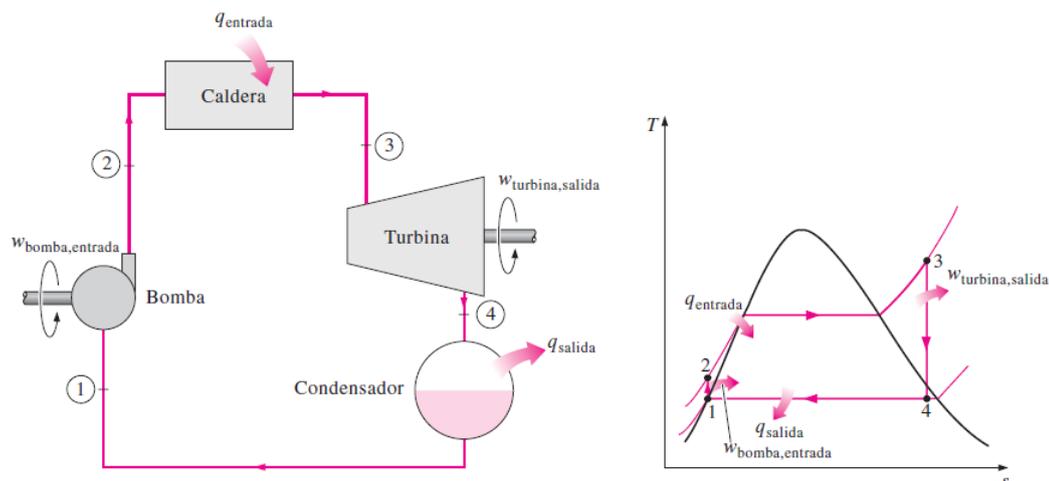


Figura 31 El ciclo Rankine ideal simple

Fuente: (Cengel,2006, pag.553)

El agua entra a la bomba en el estado 1 como líquido saturado y se condensa isoentrópicamente hasta la presión de operación de la caldera. La temperatura del agua aumenta un poco durante este proceso de compresión isentrópica debido a una ligera disminución en el volumen específico del agua. La distancia vertical entre los estados 1 y 2 en el diagrama  $T - s$  se exagera de manera considerable para mayor claridad.

El agua entra a la caldera como líquido comprimido en el estado 2 y sale como vapor sobrecalentado en el estado 3. La caldera es básicamente un gran intercambiador de calor donde el calor que se origina en los gases de combustión, reactores nucleares u otras fuentes, se transfiere al agua esencialmente a presión constante. La caldera, con la sección (sobrecalentado) donde el vapor se sobrecalienta, recibe el nombre de generador de vapor.

El vapor sobrecalentado en el estado 3 entra a la turbina donde se expande isoentrópicamente y produce trabajo al hacer girar el eje conectado a un generador eléctrico. La presión y la temperatura del vapor disminuyen durante este proceso hasta los valores en el estado 4, donde el vapor entra al condensador. En este estado el vapor es por lo general una mezcla saturada de líquido y vapor con una alta calidad. El vapor se condensa a presión constante en el condensador, el cual es básicamente un gran intercambiador de calor que rechaza a éste hacia un medio de enfriamiento como un lago, un río o la atmósfera. El vapor sale del condensador como líquido saturado y entra a la bomba, completando el ciclo. En áreas donde el agua es muy valiosa, las centrales eléctricas son enfriadas con aire en lugar de agua. Este método de enfriamiento, que también se emplea en motores de automóvil, es conocido como enfriamiento seco. Varias centrales eléctricas en el mundo, incluidas algunas en Estados Unidos, utilizan enfriamiento seco para conservar el agua.

#### **6.6.1.1 *Análisis de energía del ciclo Rankine ideal***

Los cuatro componentes asociados con el ciclo Rankine (la bomba, la caldera, la turbina y el condensador) son dispositivos de flujo estable, por lo tanto, los cuatro procesos que conforman el ciclo Rankine pueden ser analizados como procesos de flujo estable. Por lo general, los cambios en la energía cinética y potencial del vapor son pequeños en relación con los términos de trabajo y de transferencia de calor, de manera que son insignificantes. Entonces, la ecuación de energía de flujo estable por unidad de masa de vapor se reduce a:

$$(q_{entrada} - q_{salida}) + (w_{entrada} - w_{salida}) = h_e - h_i \quad (kJ/kg)$$

La caldera y el condensador no incluyen ningún trabajo y se supone que la bomba y la turbina son isentrópicas, entonces la relación de conservación de la energía para cada dispositivo puede expresarse como:

$$\text{Bomba } (q = 0) \quad w_{bomba,entrada} = h_e - h_1 \quad (kJ/kg)$$

La caldera y el condensador no incluyen ningún trabajo y se supone que la bomba y la turbina son isentrópicas, entonces la relación de conservación de la energía para cada dispositivo puede expresarse como:

$$W_{bomba,entrada} = v(P_2 - P_1)$$

donde

$$h_1 = h_f @ P_1 \quad y \quad v \cong v_1 = v_f @ P_1$$

Caldera ( $w = 0$ )

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

Turbina  $q = 0$

$$W_{turbina,salida} = h_3 - h_4$$

Condensador ( $w = 0$ )

$$q_{salida} = h_4 - h_1$$

La eficiencia térmica del ciclo Rankine se determina a partir de

$$\eta_{ter} = \frac{W_{neto}}{q_{entrada}} = 1 - \frac{q_{salida}}{q_{entrada}}$$

donde

$$W_{neto} = q_{entrada} - q_{salida} = W_{turbina,salida} - W_{bomba,entrada}$$

La eficiencia de conversión de las centrales eléctricas estadounidenses se expresa a menudo en términos de la tasa térmica, que es la cantidad en *Btu* de calor suministrada para generar 1 *kWh* de electricidad. Cuanto menor es la tasa térmica, más grande será la eficiencia. Si se considera que 1 *kWh* = 3 412 *Btu*, y sin tomar en cuenta las pérdidas asociadas con la conversión de potencia en el eje a potencia eléctrica, la relación entre la tasa y la eficiencia térmicas puede expresarse como:

$$\eta_{ter} = \frac{3412 \text{ (Btu/kWh)}}{\text{Tasa termica } \left( \frac{\text{Btu}}{\text{kWh}} \right)}$$

### 6.6.2 Ciclo Otto

El ciclo de Otto es el ciclo ideal para las máquinas recprocantes de encendido por chispa. Recibe ese nombre en honor a Nikolaus A. Otto, quien, en 1876, en Alemania, construyó una exitosa máquina de cuatro tiempos utilizando el ciclo propuesto por el francés Beau de Rochas en 1862. En la mayoría de las máquinas de encendido por chispa el émbolo ejecuta cuatro tiempos completos (dos ciclos mecánicos) dentro del cilindro, y el cigüeñal completa dos revoluciones por cada ciclo termodinámico. Estas máquinas son llamadas máquinas de combustión interna de cuatro tiempos. Un diagrama esquemático de cada tiempo, así como el diagrama  $P - v$  para una máquina real de encendido por chispa de cuatro tiempos se presenta en la figura.

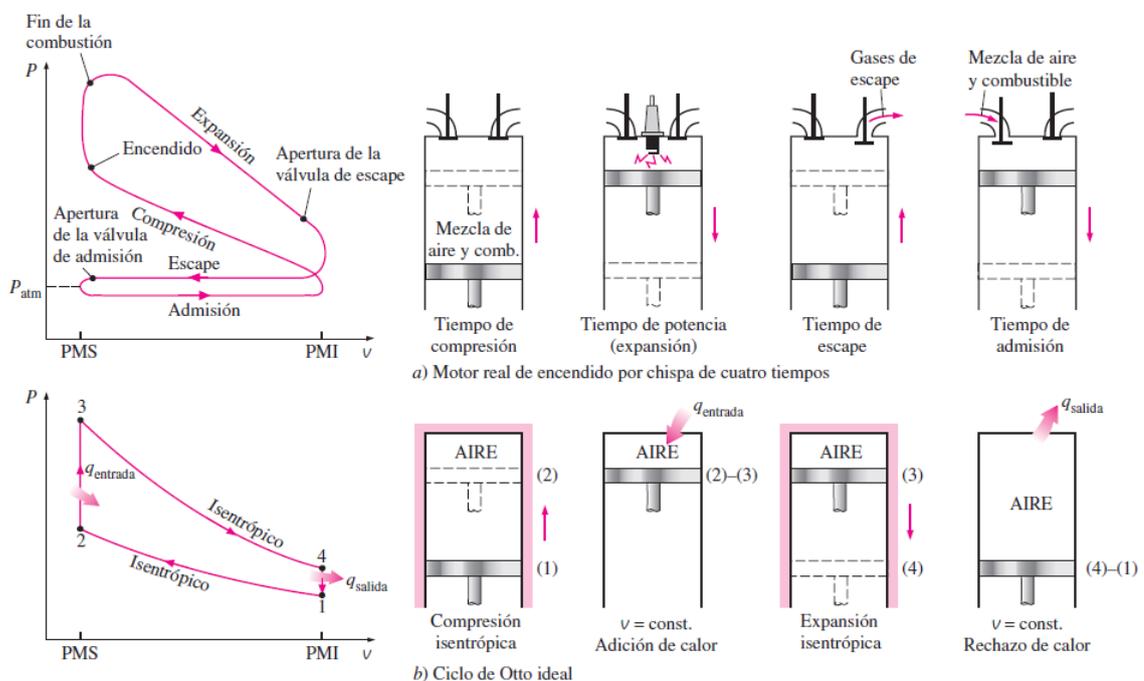


Figura 32 Ciclos real e ideal en motores de encendido por chispa y sus diagramas  $P-v$

Fuente: (Cengel,2006, pag.494)

Inicialmente, tanto la válvula de admisión como la de escape están cerradas y el émbolo se encuentra en su posición más baja (PMI). Durante la carrera de compresión, el émbolo se mueve hacia arriba y comprime la mezcla de aire y combustible. Un poco antes de que el émbolo alcance su posición más alta (PMS), la bujía produce una chispa y la mezcla se enciende, con lo cual aumenta la presión y la temperatura del sistema. Los gases de alta presión impulsan al émbolo hacia abajo, el cual a su vez obliga a rotar al cigüeñal, lo que produce una salida de trabajo útil durante la carrera de expansión o carrera de potencia.

Al final de esta carrera, el émbolo se encuentra en su posición más baja (la terminación del primer ciclo mecánico) y el cilindro se llena con los productos de la combustión. Después el émbolo se mueve hacia arriba una vez más y evacua los gases de escape por la válvula de escape (carrera de escape), para descender por segunda vez extrayendo una mezcla fresca de aire y combustible a través de la válvula de admisión (carrera de admisión). Observe que la presión en el cilindro está un poco arriba del valor atmosférico durante la carrera de escape y un poco abajo durante la carrera de admisión.

El análisis termodinámico de los ciclos reales de cuatro y dos tiempos antes descritos no es una tarea simple. Sin embargo, el análisis puede simplificarse de manera significativa si se utilizan las suposiciones de aire estándar, ya que el ciclo que resulta y que es parecido a las condiciones de operación reales es el ciclo de Otto ideal, el cual se compone de cuatro procesos reversibles internamente:

- **1-2** Compresión isentrópica
- **2-3** Adición de calor a volumen constante
- **3-4** Expansión isentrópica
- **4-1** Rechazo de calor a volumen constante

La ejecución del ciclo de Otto en un dispositivo de émbolo y cilindro junto a un diagrama  $P - v$  se ilustra en la figura. El diagrama  $T - s$  del ciclo de Otto se presenta en la figura.

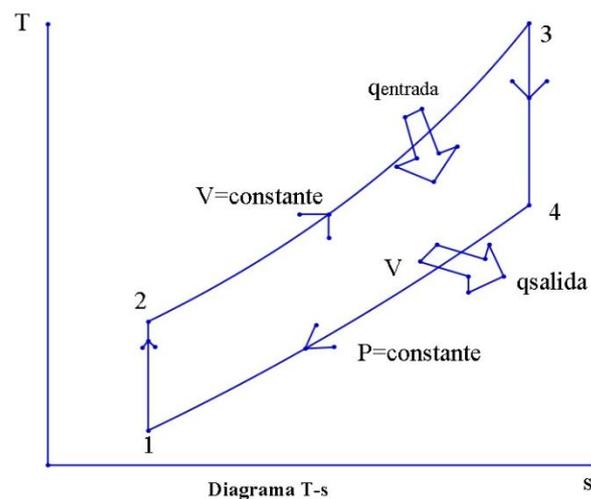


Gráfico 77 Diagrama  $T-s$  para el ciclo Otto

Fuente: Autores

El ciclo de Otto se ejecuta en un sistema cerrado, y sin tomar en cuenta los cambios en las energías cinética y potencial, el balance de energía para cualquiera de los procesos se expresa, por unidad de masa, como:

$$(q_{entrada} - q_{salida}) + (w_{entrada} - w_{salida}) = \Delta u \text{ (kJ/kg)}$$

No hay trabajo involucrado durante los dos procesos de transferencia de calor porque ambos toman lugar a volumen constante. Por lo tanto, la transferencia de calor hacia y desde el fluido de trabajo puede expresarse como:

$$q_{entrada} = u_3 - u_2 = C_V(T_3 - T_2)$$

y

$$q_{salida} = u_4 - u_1 = C_V(T_4 - T_1)$$

Entonces, la eficiencia térmica del ciclo de Otto ideal supuesto para el aire estándar frío es:

$$\eta_{ter,Otto} = \frac{W_{neto}}{q_{entrada}} = 1 - \frac{q_{salida}}{q_{entrada}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)}$$

Los procesos 1 – 2 y 3 – 4 son isentrópicos, y  $V_2 = V_3$  y  $V_4 = V_1$ . Por lo tanto,

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{k-1} = \left(\frac{T_3}{T_4}\right)^{k-1} = \frac{T_4}{T_3}$$

Sustituyendo estas ecuaciones en la relación de la eficiencia térmica y simplificado, se obtiene:

$$\eta_{ter,Otto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

donde

$$r = \frac{V_{máx}}{V_{min}} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

Que es la relación de compresión, y  $k$  es la relación de calores específicos  $C_p/C_V$ .

### 6.6.2.1. Ciclo Otto en motores de cuatro tiempos

El ciclo Otto en motores de cuatro tiempos está conformado por seis procesos, de los cuales dos de ellos no participan como tal en el ciclo termodinámico del fluido que opera. Sin embargo, son esenciales para renovar la carga del mismo. Estos procesos

corresponden a la admisión y al vaciado a presión constante de la cámara de combustión.

1. **Admisión:** La válvula de entrada o admisión está abierta y la de escape se encuentra cerrada. La fase de admisión se desarrolla desde el momento en que el pistón se ubica en la parte superior (Punto Muerto Superior – PMS) hasta que baja al punto inferior (Punto Muerto Inferior – PMI). A medida que el pistón va descendiendo, se produce un efecto de succión que hace entrar la mezcla en la cámara de combustión.
2. **Compresión:** Al momento que el pistón se ubica en el PMI, la válvula de admisión cierra y la de escape también se mantiene cerrada. En esta fase el pistón asciende y la cámara de combustión disminuye claramente su volumen, comprimiendo la mezcla. La relación que hay entre el volumen máximo existente antes de que el pistón baje al PMI y el volumen mínimo que tiene cuando el pistón está en el PMS se conoce como relación de compresión del motor.
3. **Explosión:** Cuando la mezcla se encuentra totalmente comprimida y las válvulas están cerradas, una chispa se produce en la bujía y hace que la mezcla arda. Esta explosión generada por la combustión es lo que empuja al pistón hacia la parte de abajo. Esta es la fase efectiva de todo el ciclo y es la que define la potencia de un motor.
4. **Escape:** Al volver el pistón al PMI, la válvula de escape se abre para que el pistón ascienda y libera fuera del cilindro los gases que resultan de la explosión. Esto permite que haya nuevamente aire limpio para comenzar el ciclo en la fase de admisión.

#### **6.6.2.2. Ciclo Otto de dos tiempos**

En el caso de los motores que trabajan a dos tiempos, el cambio de los gases es dirigido por el pistón y no por las válvulas. El pistón a medida que se mueve varía las condiciones de compresión en el cárter y el cilindro para completar el ciclo.

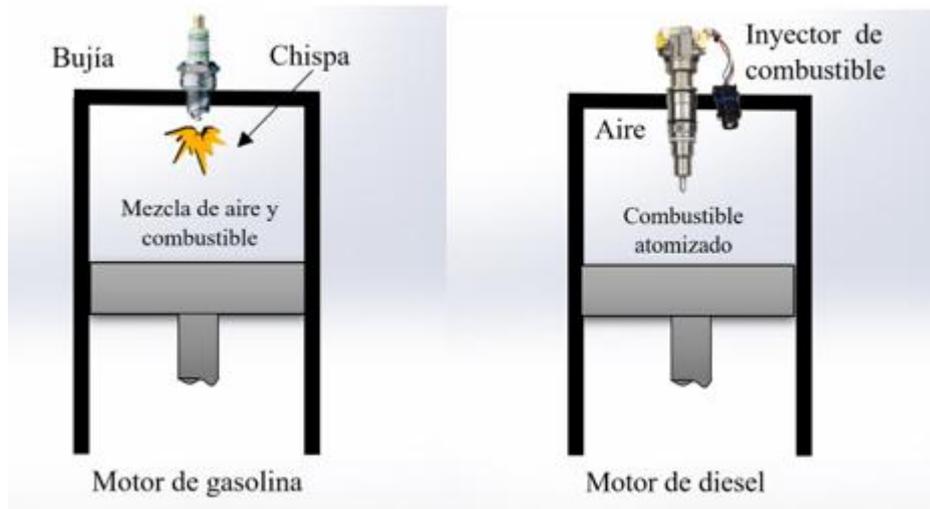
1. **Compresión y Aspiración:** Un pistón ascendente comprime la mezcla de aire/combustible y aceite que está en el cilindro. De forma simultánea se crea

vacío en el cárter y al finalizar la carrera del pistón queda libre una lumbrera de aspiración que llenará el cárter con la mezcla carburante.

2. **Explosión y Escape de gases:** Por medio de una chispa ocasionada por la bujía se prende la mezcla comprimida y se crea una explosión que empuja el pistón con fuerza hacia abajo. Dentro del cárter, la mezcla carburante se pre comprime por acción del pistón descendente. En un momento específico, el pistón libera la lumbrera o el canal de escape en el cilindro y deja salir los gases resultantes del cilindro, después de la lumbrera de carga (la que conecta cárter con cilindro). De esta manera, la mezcla pre comprimida pasa a llenar el cilindro y libera los restos de gases, quedando todo listo para un ciclo nuevo. Este tipo de motor se usa principalmente en motores con poca cilindrada, porque es más económico y fácil de construir.

### **6.6.3 Ciclo Diesel**

El ciclo Diesel es el ciclo ideal para las máquinas reciprocantes ECOM. El motor ECOM, por primera vez propuesto por Rudolph Diesel en la década de 1890, es muy similar al motor ECH estudiado en la última sección; la diferencia principal está en el método de inicio de la combustión. En los motores de encendido por chispa (conocidos también como motores de gasolina), la mezcla de aire y combustible se comprime hasta una temperatura inferior a la temperatura de autoencendido del combustible y el proceso de combustión se inicia al encender una bujía. En los motores ECOM (también conocidos como motores diésel) el aire se comprime hasta una temperatura que es superior a la temperatura de autoencendido del combustible, y la combustión inicia al contacto, cuando el combustible se inyecta dentro de este aire caliente. Por lo tanto, en los motores diésel la bujía y el carburador son sustituidos por un inyector de combustible.



*Gráfico 78 Los motores diésel la bujía se reemplaza por un inyector que comprime el aire.*

Fuente: Autores

En los motores de gasolina, una mezcla de aire y combustible se comprime durante la carrera de compresión, mientras que las relaciones de compresión están limitadas por el comienzo del autoencendido o el golpeteo del motor. En los diésels, solamente el aire se comprime durante la carrera de compresión, eliminando la posibilidad de autoencendido. Por lo tanto, los motores diésel pueden ser diseñados para operar a relaciones de compresión mucho más altas, generalmente entre 12 y 24. No tener el problema del autoencendido conlleva otro beneficio: muchos de los exigentes requerimientos impuestos a la gasolina pueden ser eliminados, de manera que los combustibles menos refinados (y por lo tanto menos costosos) pueden utilizarse en los motores diésel.

El proceso de inyección de combustible en los motores diésel empieza cuando el émbolo se aproxima al PMS y continúa durante la primera parte de la carrera de potencia. Por lo tanto, en estos motores el proceso de combustión sucede durante un periodo más largo.

Debido a esta mayor duración, el proceso de combustión en el ciclo Diesel ideal se obtiene como un proceso de adición de calor a presión constante. De hecho, éste es el único proceso donde los ciclos de Otto y Diesel difieren. Los tres procesos restantes son los mismos para ambos ciclos ideales.

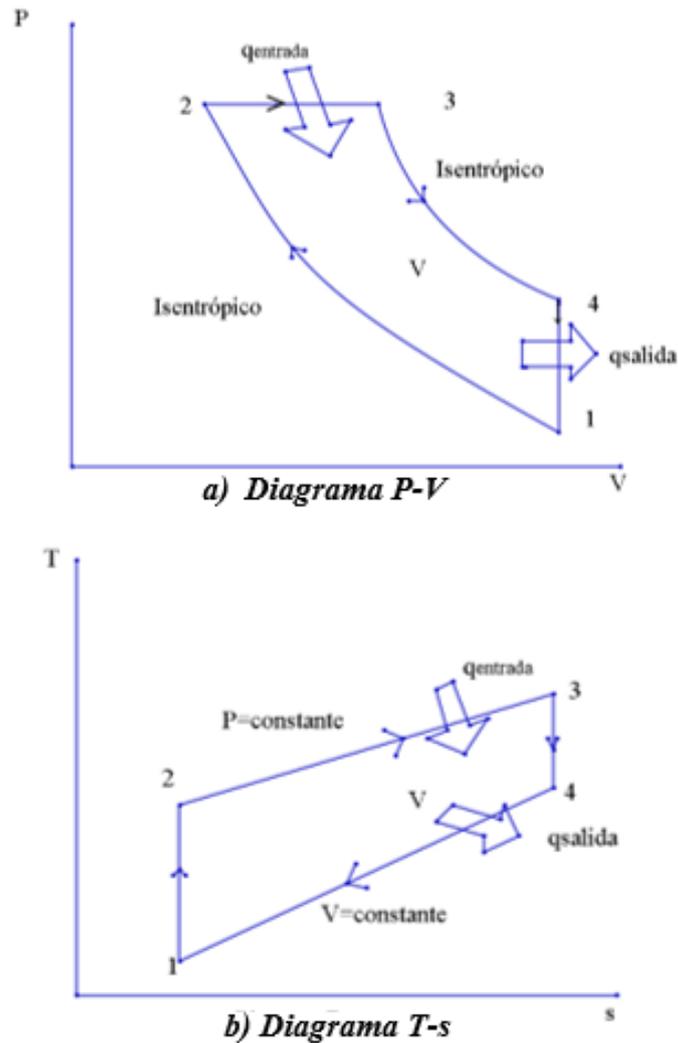


Gráfico 79 Diagramas T-s y P-v para el ciclo Diesel ideal.

Fuente: Autores

Es decir, el proceso 1-2 es una compresión isentrópica, el 2-3 adición de calor a presión constante, el 3-4 una expansión isentrópica y el 4-1 un rechazo de calor a volumen constante. La similitud entre los dos ciclos es también evidente en los diagramas  $P - v$  y  $T - s$  del ciclo Diesel.

Si se observa que el ciclo Diesel se ejecuta en un dispositivo de émbolo y cilindro, que forma un sistema cerrado, la cantidad de calor añadida al fluido de trabajo a presión constante y rechazada por éste a volumen constante puede expresarse como:

$$q_{entrada} - W_{b,salida} = v_3 - v_2 \rightarrow q_{salida} = P_2(V_3 - V_2) + (v_3 - v_2)$$

$$h_3 - h_2 = C_p(T_3 - T_2)$$

y

$$-q_{salida} = u_1 - u_4 \rightarrow q_{salida} = u_4 - u_1 = C_v(T_4 - T_1)$$

## 6.7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**CENGEL, Y. A., BOLES, M. A., CAMPOS OLGUÍN, V., & COLLI SERRANO, M. T. "**

TERMODINÁMICA", 2014. Disponible en:

<https://www.elsolucionario.org/termodinamica-yunus-a-cengel-michael-a-boles-8va-edicion/>

**CLAUDIA DEL CARMEN GUTIÉRREZ TORRES Y JIMÉNEZ BERNAL, J. A.**

"Termodinámica". México D.F: Grupo Editorial Patria, 2015. p. Obtenido de:

<https://elibro.net/es/ereader/epoch/39466?page=13>

**JIMÉNEZ BERNAL, J. A. Y CLAUDIA DEL CARMEN GUTIÉRREZ TORRES.**

"Termodinámica". México D.F: Grupo Editorial Patria, 2015. p. Obtenido de:

<https://elibro.net/es/ereader/epoch/39466?page=32>

**NICK CONOR**, Thermal Engineering, (25 de agosto de 2019), ¿"Que es el proceso

reversible? Definición, España, 2019, Disponible en: [https://www.thermal-](https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-proceso-reversible-definicion/)

[engineering.org/es/que-es-el-proceso-reversible-definicion/](https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-proceso-reversible-definicion/)

**GARCÍA, D.** "Termodinámica irreversibilidad", Slideshare.net. recuperado el 3 de

febrero de 2022, de: [https://es.slideshare.net/gotovillamizar/termodinamica-](https://es.slideshare.net/gotovillamizar/termodinamica-irreversibilidad)

[irreversibilidad](https://es.slideshare.net/gotovillamizar/termodinamica-irreversibilidad)

**BARBOSA SALDAÑA, J.; GUTIÉRREZ TORRES, C.** "Termodinámica para

ingenieros". ed. México: Grupo Editorial Patria, 2016. 433 p. Disponible en:

<https://elibro.net/es/ereader/epoch/40432?page=172>.

**NIETO CARLIER, R. GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, C.; LÓPEZ PANIAGUA, I.**

"Termodinámica". ed. Madrid: Dextra Editorial, 2014. 403 p. Disponible en:

<https://elibro.net/es/ereader/epoch/43934?page=316>.

**JIMÉNEZ BERNAL, J. A.; CLAUDIA DEL CARMEN GUTIÉRREZ TORRES.**

"Termodinámica". ed. México D.F: Grupo Editorial Patria, 2015. 217 p. Disponible en:

<https://elibro.net/es/ereader/epoch/39466?page=173>.

**NICK CONNOR**, “¿Qué es el ciclo de Rankine? Ciclo de la turbina de vapor: definición”, 2020, España, Disponible en: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-ciclo-de-rankine-ciclo-de-la-turbina-de-vapor-definicion/>

**ORIO PLANAS**, Energía Solar, “Ciclo Rankine: funcionamiento del ciclo que convierte calor en trabajo”, 2019, Disponible en: <https://solar-energia.net/termodinamica/ciclos-termodinamicos/ciclo-rankine>

**MENNA**, Como Funciona, “Ciclo Otto (combustión), Tipos, Fases y cómo funciona”, 2021, Disponible en: <https://como-funciona.co/el-ciclo-otto/>

# Reseña de los autores

## ***Ing. Cristian David Redroban Dillon Mgs***

---



Oriundo de la ciudad de Riobamba, Provincia de Chimborazo, nacido el 03 de noviembre de 1987, con estudios de pregrado en Ingeniería Automotriz (ESPOCH), y Magister en Seguridad Industrial Mención Prevención de Riesgo (UNACH). Gratamente docente en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Automotriz, con amplia experiencia en docencia académica impartiendo cátedras como Sostenibilidad Ambiental, Álgebra Lineal, Integración Curricular, Taller Automotriz, forma parte del Grupo de Investigación de Mantenimiento (GIMAN) de la ESPOCH.

## ***Ing. Verónica Janeth Argüello Pazmiño Mgs***

---



Ingeniera en Sistemas Informáticos. Magíster en Tecnologías de la Información, Mención Seguridad de Redes y Comunicaciones. Magister en Matemática Mención, Modelación y Docencia. Docente en la Universidad Estatal de Bolívar

***“Un sueño no se hace realidad por arte de magia; necesita sudor, determinación y trabajo duro”***

## ***Ing. Alex Fernando Barrionuevo Remache Mgs***

---



Ingeniero Automotriz por la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Magíster en Seguridad Industrial y Salud Ocupacional, mención Prevención de Riesgos por la Universidad Nacional de Chimborazo, Docente investigador en la Universidad Estatal de Bolívar

***“El liderazgo no se trata de títulos, se trata de inspirar”***

## ***Ing. Edison Fernando Calderón Freire Mgs***

---



Ingeniero mecánico, graduado en la escuela Politécnica Nacional en el año 2012, master en ingeniería, procesado y Caracterización de Materiales en la universidad Politécnica de Valencia en el año 2016. Experiencia docente en educación superior, realizadas en el Instituto Tecnológico Superior Central Técnico, de la ciudad de Quito, impartiendo cátedras de Matemática, Informática, Soldadura de producción y Mecánica de taller. En la escuela Superior Politécnica de Chimborazo, las cátedras de Termodinámica, Ingeniería de Materiales, Ensayos no destructivos entre otras. Varias publicaciones de alto impacto.

# PRINCIPIOS DE TERMODINÁMICA

## Conceptos y aplicaciones

**Edición:** 2024

**ISBN:** 978-9942-805-25-6

Reservados todos los derechos. No se permite la reproducción total o parcial de esta obra, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio (electrónico, mecánico, fotocopia, grabación u otros) sin autorización previa y por escrito de los titulares de copyright. La infracción de dichos derechos puede constituir un delito contra la propiedad intelectual.



ISBN: 978-9942-805-25-6

