

Termodinámica básica para ingenieros

Edwin Angel Jácome Domínguez
Marco Antonio Ordoñez Viñán
Diego Javier Punina Guerrero

ISBN: 978-9942-636-83-6



CIDE
EDITORIAL

Termodinámica básica para ingenieros



Termodinámica básica para ingenieros

Autores:

Edwin Ángel Jácome Domínguez

Marco Antonio Ordoñez Viñán

Diego Javier Punina Guerrero

© Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH)

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 Centro de Investigación y Desarrollo Ecuador (CIDE).

Copyright © 2024

Centro de Investigación y Desarrollo Ecuador

Tel.: + (593) 04 2037524

<http://www.cidecuador.org>

ISBN: 978-9942-636-86-6

<https://doi.org/10.33996/cide.ecuador.TB2636836>



Filiación:

Edwin Ángel Jácome Domínguez

Marco Antonio Ordoñez Viñán

Diego Javier Punina Guerrero

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH)

Dirección editorial: Lic. Pedro Misacc Naranjo, Msc.

Coordinación técnica: Lic. María J. Delgado

Diseño gráfico: Lic. Danissa Colmenares

Diagramación: Lic. Alba Gil

Fecha de publicación: julio, 2024



La presente obra fue evaluada por pares académicos experimentados en el área.

Catalogación en la Fuente

Termodinámica básica para ingenieros / Edwin Ángel Jácome Domínguez, Marco Antonio Ordoñez Viñán, Diego Javier Punina Guerrero. - Ecuador: Editorial CIDE, 2024.

235 p.: incluye tablas, figuras; 21 x 29,7 cm.

ISBN: 978-9942-636-86-6

1. Termodinámica 2. Ingeniería

Agradecimiento

ESTIMADAS AUTORIDADES Y MIEMBROS DE LA COMUNIDAD ACADÉMICA DE LA ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO (ESPOCH):

Nos dirigimos a ustedes con profundo agradecimiento por la invaluable oportunidad que nos han brindado para escribir el libro "Termodinámica básica para ingeniería". La ESPOCH, como institución de educación superior de gran prestigio, ha sido el escenario perfecto para desarrollar este proyecto que busca contribuir a la formación de los futuros ingenieros.

Desde el inicio de este proyecto, la ESPOCH nos ha brindado el apoyo y las herramientas necesarias para llevarlo a cabo de manera exitosa. Agradezco especialmente a las autoridades de la institución por su confianza y disposición a respaldar esta iniciativa.

Asimismo, queremos expresar mi reconocimiento a mis colegas docentes, quienes han colaborado conmigo en la revisión y enriquecimiento del contenido del libro. Su experiencia y conocimientos han sido fundamentales para garantizar la calidad y rigor académico de la obra.

De manera especial, queremos agradecer a los estudiantes de ingeniería, quienes han sido la principal fuente de inspiración para este trabajo. Su entusiasmo por aprender y su constante búsqueda de conocimiento me han motivado a crear un libro que les sirva como herramienta fundamental en su formación como profesionales.

"Termodinámica básica para ingeniería" no habría sido posible sin el apoyo incondicional de la ESPOCH y su comunidad académica. Agradezco profundamente la oportunidad que nos han dado para contribuir a la educación en ingeniería y espero que este libro sea un recurso valioso para las futuras generaciones de estudiantes.

Atentamente,
Autores

Dedicatoria

A nuestros queridos estudiantes:

Con profunda alegría y entusiasmo dedicamos este libro a ustedes, futuros ingenieros que se embarcan en la apasionante aventura de comprender los fundamentos de la termodinámica.

En estas páginas encontrarán una guía clara y concisa que les permitirá adentrarse en los principios y leyes que gobiernan el comportamiento energético de la materia. He volcado mi pasión por la enseñanza y mi amplia experiencia en el campo de la ingeniería para crear una obra que les sirva como herramienta invaluable en su formación académica y profesional.

Espero que este libro les inspire a explorar las maravillas del mundo que nos rodea a través de la lente de la termodinámica. Acompañénnos en este viaje de aprendizaje y descubran el poder de esta ciencia fundamental para el desarrollo tecnológico y el progreso de la humanidad.

Con nuestros mejores deseos,

Autores

Prólogo

LA PIEDRA ANGULAR DE LA INGENIERÍA: UN VIAJE A LA TERMODINÁMICA

En el corazón de la ingeniería yace una disciplina fundamental que impulsa el progreso tecnológico y moldea nuestro mundo: la termodinámica. Esta ciencia fascinante, a menudo considerada como la "física de la energía", nos revela los principios que gobiernan la transferencia y transformación de calor y trabajo, brindándonos las herramientas esenciales para comprender y diseñar sistemas que impulsan nuestra civilización.

Este libro está dirigido a estudiantes de ingeniería que se embarcan en un viaje para dominar los principios de la termodinámica. A lo largo de estas páginas, exploraremos los conceptos básicos que sustentan esta disciplina, desde las leyes de la termodinámica hasta las propiedades de los fluidos y los procesos termodinámicos. No solo adquiriremos una sólida base teórica, sino que también aprenderemos a aplicar estos principios a problemas reales de ingeniería.

La termodinámica no es solo un conjunto de ecuaciones y conceptos abstractos; es una herramienta poderosa que nos permite comprender

el funcionamiento del mundo que nos rodea. Al dominar los principios termodinámicos, los ingenieros pueden diseñar sistemas más eficientes, sostenibles y respetuosos con el medio ambiente. Desde centrales eléctricas hasta vehículos, desde sistemas de climatización hasta procesos industriales, la termodinámica está presente en prácticamente todos los aspectos de la ingeniería moderna.

Este libro no solo te brindará una base sólida en los principios termodinámicos, sino que también te preparará para aplicar estos conocimientos en tu futura carrera como ingeniero. Aprenderás a resolver problemas de manera sistemática, a pensar críticamente y a comunicar tus ideas de manera efectiva. Estas habilidades esenciales te permitirán abordar los desafíos de ingeniería del mundo real con confianza y creatividad.

A medida que te adentres en el mundo de la termodinámica, descubrirás la belleza y la elegancia de esta ciencia fundamental. Te maravillarás con la capacidad de la termodinámica para explicar el comportamiento de la materia y la energía a nivel molecular, y comprenderás cómo estos principios se traducen en tecnologías que impactan nuestras vidas diarias.

Emprende este viaje con entusiasmo y curiosidad, y prepárate para descubrir el poder transformador de la termodinámica, la piedra angular de la ingeniería.

Presentación

La termodinámica: Una ciencia fundamental para la ingeniería

La termodinámica es una rama fundamental de la ciencia que estudia las relaciones entre el calor, la energía y el trabajo. Es una disciplina esencial para comprender el funcionamiento de motores, centrales eléctricas, sistemas de refrigeración y calefacción, y muchos otros dispositivos tecnológicos.

"Termodinámica básica para ingeniería" es un libro diseñado para introducir a los estudiantes de ingeniería en los conceptos básicos de la termodinámica de una manera clara, concisa y accesible. El libro presenta los principios termodinámicos fundamentales de manera rigurosa, pero a la vez utilizando un lenguaje sencillo y ejemplos prácticos que facilitan la comprensión.

¿A quién está dirigido este libro?

Este libro está dirigido principalmente a estudiantes de ingeniería de pregrado, especialmente aquellos que cursan carreras como ingeniería mecánica, ingeniería industrial, ingeniería química, ingeniería eléctrica y otras áreas relacionadas. Sin embargo, también puede ser útil para

profesionales de la ingeniería que deseen refrescar sus conocimientos de termodinámica o aprender sobre nuevos avances en el campo.

¿Qué encontrará en este libro?

El libro "Termodinámica básica para ingeniería" cubre una amplia gama de temas esenciales en termodinámica, incluyendo:

Capítulo I: conceptos y propiedades termodinámicas.: Se introducen los conceptos fundamentales de la termodinámica, como sistemas, propiedades, procesos, energía, trabajo y calor.

Capítulo II: gas ideal: Se analiza la ley de conservación de la energía, aplicándola a sistemas cerrados y abiertos.

Capítulo III: sistema de dos fases: Se presentan las propiedades termodinámicas de gases ideales, líquidos y vapores, y se introducen conceptos como la ecuación de estado y los diagramas termodinámicos.

Capítulo IV: procesos termodinámicos: Se exploran diversas aplicaciones de la termodinámica en el campo de la ingeniería, con l aplicación a procesos termodinámicos en gases ideales y reales.

Características del libro:

Lenguaje claro y conciso: El libro está escrito en un lenguaje claro y conciso, evitando tecnicismos excesivos que dificulten la comprensión.

Ejemplos prácticos: Se incluyen numerosos ejemplos prácticos y problemas resueltos para ilustrar los conceptos termodinámicos y facilitar su aplicación a situaciones reales.

Diagramas y figuras: El libro está ilustrado con abundantes diagramas y figuras que ayudan a visualizar los conceptos y procesos termodinámicos.

Recursos adicionales: Al final de cada capítulo se incluyen referencias bibliográficas y recursos adicionales para que los estudiantes puedan profundizar en los temas de interés.

"Termodinámica básica para ingeniería" es una herramienta invaluable para los estudiantes de ingeniería que buscan comprender los fundamentos de la termodinámica y sus aplicaciones en el campo de la ingeniería. El libro ofrece una introducción sólida a esta disciplina esencial, proporcionando a los estudiantes las bases necesarias para avanzar en sus estudios y futuras carreras profesionales.

Introducción

La termodinámica, rama fundamental de la física, se erige como un pilar esencial para comprender los fenómenos energéticos y las transformaciones en sistemas físicos. Este libro se adentra en los principios fundamentales de la termodinámica, desplegando un enfoque estructurado y detallado para guiar al lector a través de los conceptos esenciales y propiedades termodinámicas que subyacen en la naturaleza misma de la energía y la materia.

Capítulo 1: conceptos y propiedades termodinámicas.

En este primer capítulo, exploraremos los cimientos conceptuales que sustentan la teoría termodinámica. Desde definiciones fundamentales como temperatura y presión, hasta conceptos más abstractos como entalpía y energía interna, este capítulo sienta las bases necesarias para abordar de manera integral los fenómenos termodinámicos.

Capítulo 2: gas ideal.

El segundo capítulo nos sumerge en el estudio del gas ideal, un modelo simplificado pero crucial para comprender el comportamiento de gases en diversas condiciones. Exploraremos las leyes que rigen el comportamiento de este gas, y como sus

propiedades se relacionan con los principios termodinámicos generales.

Capítulo 3: sistema de dos fases.

El tercer capítulo se adentra en el fascinante mundo de los sistemas de dos fases, donde coexisten estados líquidos y gaseosos. Abordaremos los conceptos de equilibrio entre fases, diagramas de fases y las transformaciones fundamentales que caracterizan a estos sistemas, proporcionando un marco conceptual sólido para entender las transiciones de fase.

Capítulo 4: procesos termodinámicos.

En el cuarto capítulo, nos sumergiremos en el análisis de los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas. Desde la expansión adiabática hasta la compresión isoterma, este capítulo explora las distintas formas en que la energía se intercambia y transforma durante las diversas etapas de un proceso, revelando las leyes que gobiernan estas transformaciones.

Este libro pretende ser una herramienta valiosa tanto para estudiantes, como para profesionales que buscan comprender y aplicar los principios termodinámicos en diversos campos de la ciencia y la ingeniería. A través de una presentación clara y estructurada, invitamos al lector a embarcarse en un viaje que revelará las leyes fundamentales que rigen la energía y las transformaciones en el universo físico.

Contenido

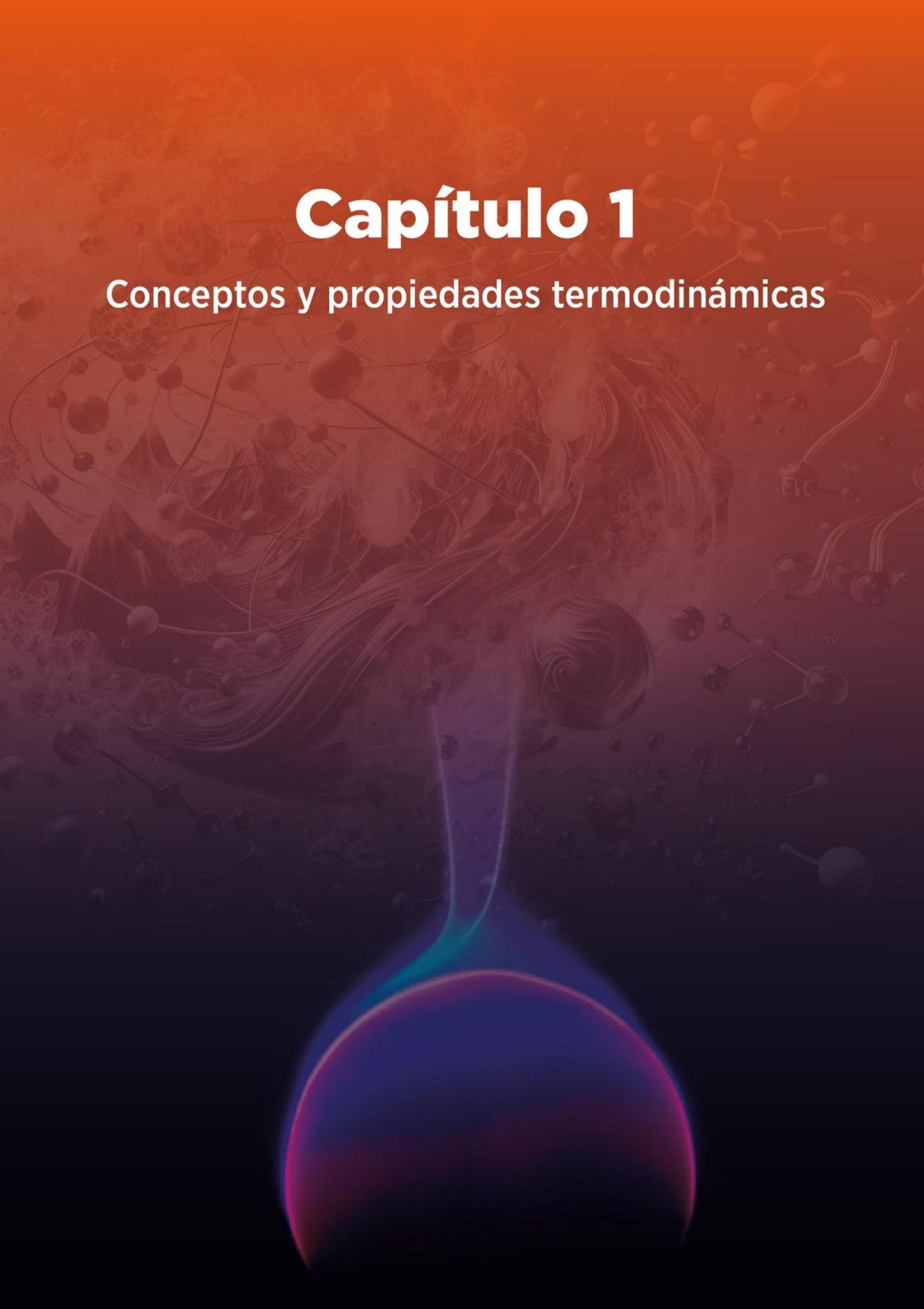
Agradecimiento	5
Dedicatoria	7
Prólogo	8
Presentación	10
Introducción	13
Capítulo 1. Conceptos y propiedades termodinámicas	19
1.1 Importancia de la termodinámica en ingeniería	19
1.2 Origen de la palabra termodinámica	21
1.3 Conceptos de termodinámica clásica.....	22
1.4 Conceptos de termodinámica estadística.....	22
1.5 Sistemas termodinámicos	22
1.6 Propiedades termodinámicas	24
1.6.1 Intensivas	24
1.6.2 Extensivas o totales	24
1.7 Estado termodinámico.....	25
1.8 Estados en equilibrio	25
1.9 Sistema de unidades	28
1.9.1 Densidad	28
1.9.2 Densidad relativa	29
1.9.3 Volumen específico	29
1.9.4 Peso específico	30
1.9.5 Presión	30
1.9.6 Temperatura	38
1.9.7 Proceso termodinámico	39
1.9.8 Diagrama termodinámico	40
1.9.9 Ciclos termodinámicos	41

1.9. 10. Flujo másico	42
1.9.11 Flujo volumétrico	43
1.10 Primera ley de la termodinámica.....	43
1.11 Segunda ley de la termodinámica	44
1.12 Conversación y transformación de la energía	44
1.12.1 Energía potencial (P)	46
1.12.2 Energía cinética (K)	47
1.13 Trabajo	50
1.13.1 Trabajo no fluente en un sistema cerrado o trabajo de frontera	50
1.13.2 Trabajo en un sistema fluente o trabajo de fluido	52
1.13.3 Trabajo de flecha o trabajo de eje (trabajo de paletas)	53
1.13.4 Trabajo eléctrico	54
1.13.5 Trabajo elástico	55
1.14 Energía interna (U)	60
1.15 Calor (Q)	61
1.16 Formas de transferencia de calor	61
1.17 Conducción	61
1.18 Convección	62
1.19 Radiación	63
1.20 Entalpía (H)	64
1.21 Relaciones de energía	67
1.22 Reversibilidad	67
1.23 Capacidad calórica	68
1.24 Capacidad calórica a presión constante	69
1.25 Capacidad calórica a volumen constante	69
Capítulo 2. Gas ideal	72
2.1 Leyes de los gases ideales	72
2.1.1 Ley de Boyle-Mariotte $T=Cte$	73
2.1.2 Ley de Charles y Gay-Lussac $P=Cte$	74
2.1.3 Ley de Charles y Gay-Lussac $V=Cte$	75
2.1.4 Ley general de los gases ideales	76

2.1.5 Ley de Joule	78
2.2 Ejemplos # 1	79
2.3 Ejemplos # 2	83
2.4 Ejemplos # 3	91
2.5 Entropía	103
Capítulo 3. Sistema de dos fases	116
3.1 Calor sensible	117
3.2 Calor latente	117
3.3 Vapor húmedo	118
3.4 Calidad o título de vapor (X)	124
3.5 Humedad (Y)	125
Capítulo 4. Procesos termodinámicos	165
4.1 Procesos termodinámicos gases ideales	165
4.2 Proceso isobárico “presión constante”	166
4.3 Proceso isométrico “volumen constante”	171
4.4 Proceso isotérmico “temperatura constante”	175
4.5 Proceso isoentrópico “entropía constante”	178
4.6 Proceso politrópico	183
4.7 Procesos termodinámicos gases reales	190
4.8 Proceso isométrico “volumen constante”	192
4.9 Proceso isobárico “presión constante”	192
4.10 Proceso isotérmico “temperatura constante”	195
4.11 Proceso politrópico	200
4.12 Proceso adiabático	202
 Bibliografía	 234

Capítulo 1

Conceptos y propiedades termodinámicas





Capítulo

1

Conceptos y propiedades termodinámicas

El presente capítulo se adentra en el apasionante universo de la termodinámica, una ciencia fundamental que explora las relaciones entre el calor, el trabajo y otras formas de energía. A lo largo de este viaje, nos embarcaremos en un recorrido por conceptos y principios esenciales que sustentan esta área de estudio, sentando las bases para comprender su amplia gama de aplicaciones en ingeniería y otras disciplinas.

1.1 Importancia de la termodinámica en ingeniería

La importancia de la termodinámica se puede ver en aplicaciones como:

Sistemas de aire comprimido

Se le define como una determinada masa de aire que se encuentra a una presión superior a la atmósfera, también se debe tener en cuenta que el aire tiene la misma composición de los gases pero, ocupa menos espacio

y junta sus moléculas. En sistemas de aire comprimido la termodinámica se aplica al cálculo de las propiedades del aire al aumentar su presión.

Sistemas de refrigeración

Es un proceso de extracción de calor que se basa en disminuir y mantener la temperatura de procesos, espacios o incluso materiales con respecto a la temperatura del ambiente. En los sistemas de refrigeración la termodinámica se aplica para calcular las propiedades del refrigerante durante el ciclo de refrigeración.

Motores de automóvil

Cualquier tipo de automóvil obtiene una energía mecánica directamente de la energía química, producida por un combustible que arde dentro de una cámara de combustión.

Estufa eléctrica o de gas

La corriente eléctrica se le define como una velocidad a la que fluye la carga. En cambio en la estufa de gas, el gas es un sistema de agregación de la materia que no tiene forma ni volumen propio, pero existe una temperatura a la que ejerce el objeto por realizar.

Calentadores de agua

Se encargan de elevar la temperatura del depósito hasta la clásica resistencia eléctrica.

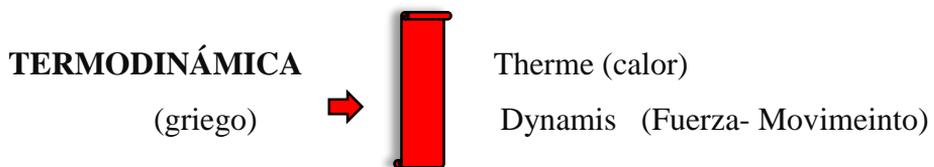
Centrales eléctricas

En algunos casos consumen carbón, fuelóleo o gas natural, se emplean para hacer una transformación del agua en vapor. Y después con éste vapor se produce electricidad.

Rayos láser: baja y alta potencia y muchos más

El termino láser es un acrónimo que hace referencia a la amplificación de luz por emisión estimulada de radiación.

1.2 Origen de la palabra termodinámica



Concepto de termodinámica: Es una ciencia parte de la física que estudia la transformación (movimiento) de la energía térmica (calor) (Çengel, 2019).

1.3 Conceptos de termodinámica clásica

Establece una oposición irreducible entre vida y materia. Estudia las transformaciones de la energía desde un punto de vista macroscópico (Moran & Shapiro, 2018).

Enfoque macroscópico

1.4 Conceptos de termodinámica estadística

Supone que la materia está formada por un elevado número de componentes microscópicos que individualmente obedecen a la mecánica cuántica, pero como colectivo obedecen las leyes estadísticas (Moran & Shapiro, 2018).

Enfoque microscópico

Sustancia de trabajo

Sustancia o fluido que sea capaz de absorber o ceder energía y estos pueden ser comprensibles (gases) e incomprensibles (líquidos).

1.5 Sistemas termodinámicos

Un sistema termodinámico se define como la parte del universo objeto de estudio, puede estar separado (denominado alrededores del sistema) por paredes reales o imaginarias.

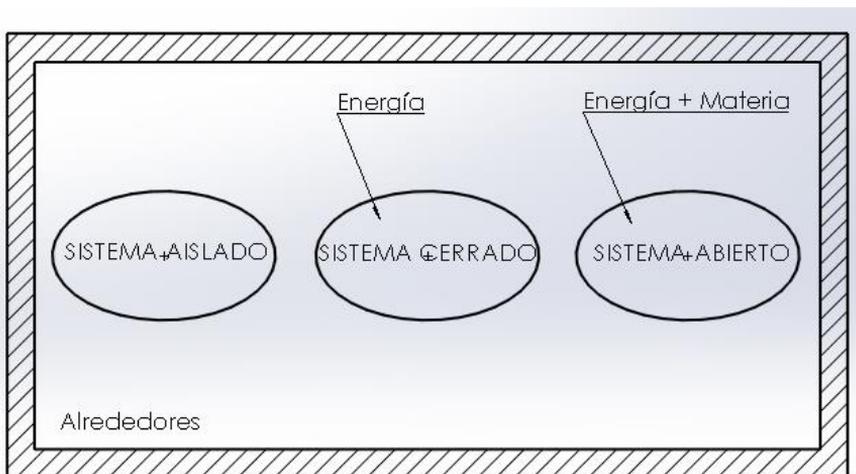
Las paredes que separan un sistema de sus alrededores pueden ser aislantes (llamadas paredes adiabáticas) o permitir el flujo de calor (diatérmicas). Un sistema termodinámico puede ser una célula, una persona, la mezcla de gasolina, la atmósfera terrestre, entre otros.

Clasificación de los sistemas termodinámicos

- 1.- SISTEMA ABIERTO Puede intercambiar energía y materia con su entorno.
- 2.- SISTEMA CERRADO No existe un intercambio de materia, pero sí de energía.
- 3.- SISTEMA AISLADO No existe intercambio de materia ni de energía con el exterior.

Figura 1

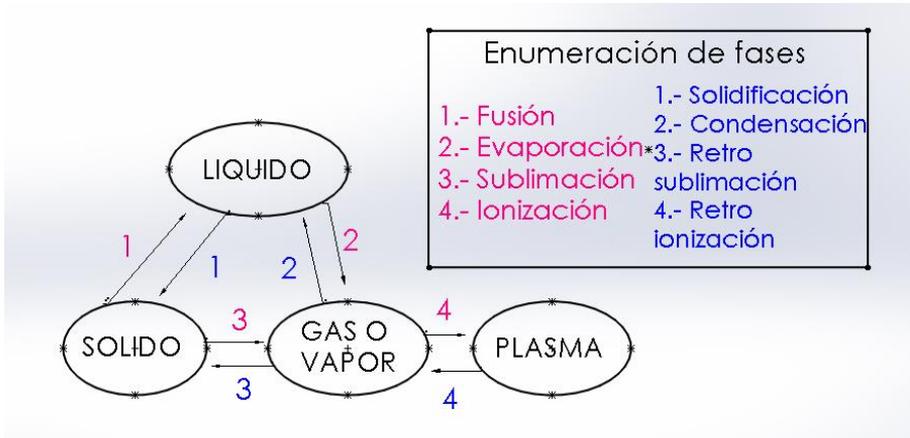
Sistemas termodinámicos



1.6 Propiedades termodinámicas

Figura 2

Fases de la materia



1.6.1 Intensivas (independientes de la masa)

- | | |
|-------------------------------|----------|
| 1. Presión | P |
| 2. Temperatura | T |
| 3. Volumen específico | v |
| 4. Energía interna específica | u |
| 5. Entalpía específica | h |
| 6. Entropía específica | s |

$$\text{Intensiva} = \frac{\text{Extensiva}}{\text{masa}}$$

1.6.2 Extensivas o Totales (dependen de la masa)

- | | |
|--------------------------|----------|
| 1. Volumen total | V |
| 2. Energía interna total | U |

- | | |
|-------------------|----------|
| 3. Entalpía total | H |
| 4. Entropía total | S |

1.7 Estado termodinámico

El estado termodinámico es el punto de equilibrio de una fase que se define por dos propiedades, intensivas e independientes. Se puede definir un estado termodinámico con solo dos de las seis propiedades intensivas:

- Presión
- Temperatura
- Volumen específico
- Energía interna específica
- Entropía específica

Nota: Si se proporcionan propiedades extensivas para poder trabajar, se tienen que cambiar a propiedades intensivas.

Si se tiene dos de estas propiedades se puede definir a un estado termodinámico.

1.8 Estados en equilibrio

Para que un estado este en equilibrio deberá cumplir tres equilibrios:

- Térmico.
- Mecánico.
- Químico.

Estado térmico

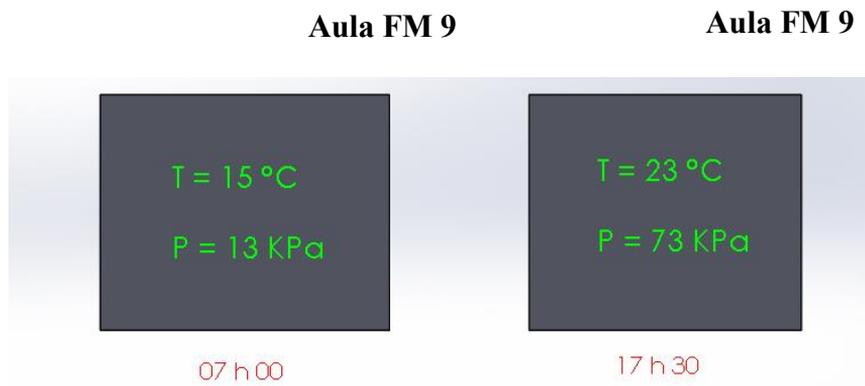
Existe un equilibrio térmico cuando la temperatura es homogénea dentro de todo mi sistema.

Ejemplo *////*

Se tiene dos cursos, pero se analizará sus propiedades y se verá si cumple con esta homogeneidad (Cengel & Ghajar, 2007).

Figura 3

Ejemplo real de un estado termodinámico inicial



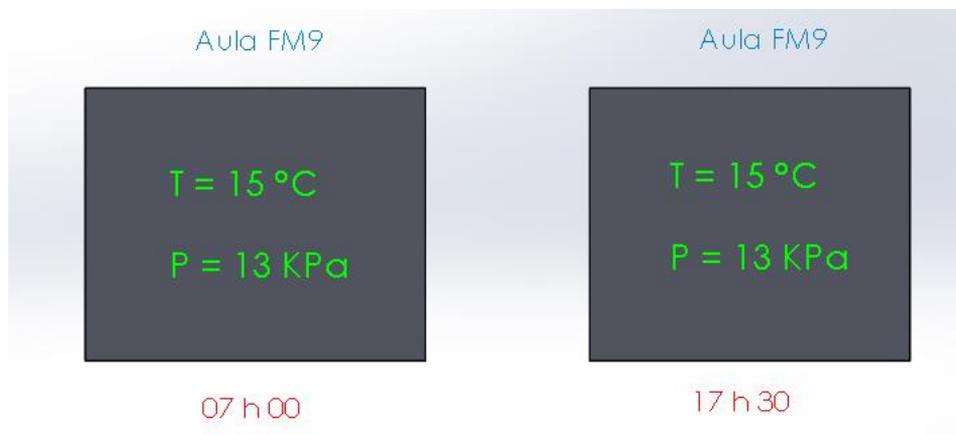
En el aula FM 9 se tiene una temperatura de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ esta temperatura debe ser igual en todo el sistema para estar en un equilibrio térmico. Si se analiza la misma aula, pero a las 17H30 se nota que su temperatura subió a $23\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo tanto, se puede determinar que ambas son diferentes porque sus propiedades cambiaron.

Equilibrio mecánico

Este equilibrio tiene que ver con la presión, es decir, todo el sistema debe tener la misma presión para poder estar en equilibrio. Tomando en cuenta el ejemplo anterior se analizará y verificará si cumple con este equilibrio o no.

Figura 4

Ejemplo real de un estado termodinámico final



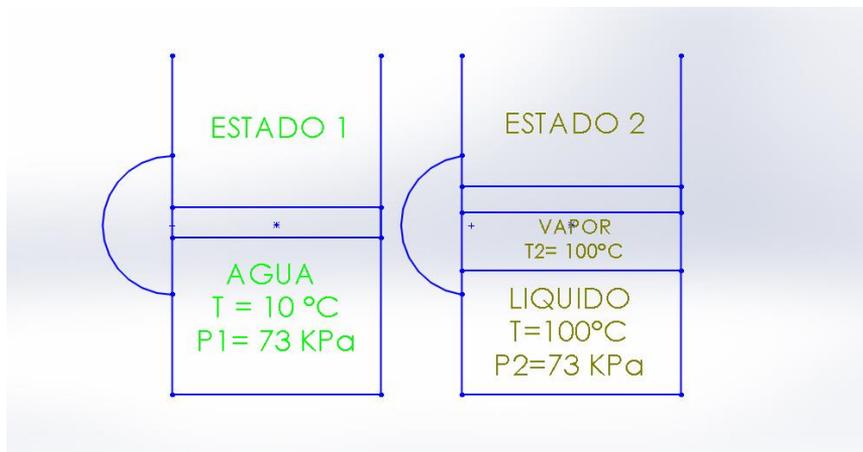
Se puede llegar a visualizar que, a pesar de que su temperatura cambio con el pasar del tiempo, la presión se mantiene en equilibrio, es decir, existe un equilibrio mecánico en este sistema.

Equilibrio químico

Se encuentra en un equilibrio químico cuando tiene la misma composición química. Para desarrollarlo de mejor manera se utilizará un ejemplo de una taza de café.

Figura 5

Ejemplo de un estado termodinámico en un cilindro - émbolo



Se observa los ejemplos y a pesar de que se calienta la tasa de café de 10 °C a 100°C la composición se mantiene homogénea con la diferencia que en el estado 2 se tiene dos estados de agua, en vapor y en líquido, pero su composición se mantiene.

1.9 Sistema de unidades

1.9.1 Densidad

Es la razón que existe entre la masa que está ocupando un volumen total o es la masa por unidad de volumen.

Símbolo: ρ

Fórmula: $\rho = \frac{m}{v}$

Unidades en el sistema internacional e inglés:

SI = $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$

Inglés = $\frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3}$

1.9.2 Densidad relativa

Gravedad específica o densidad relativa se define como el cociente de la densidad de una sustancia entre la densidad de alguna sustancia estándar a una temperatura especificada.

Símbolo: Dr o Sg (adimensional)

Fórmula: $\rho = \frac{\rho}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}$

1.9.3 Volumen específico

Es la relación que existe entre el volumen total que ocupa una masa o es el volumen por unidad de masa.

Símbolo: v

Fórmula: $v = \frac{v}{m}$

Nota: Volumen específico es la inversa de la densidad.

Unidades en el sistema internacional e inglés:

$$\text{SI} = \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\text{Inglés} = \frac{\text{ft}^3}{\text{lb}}$$

1.9.4 Peso específico

Se define como la relación existente entre el peso del cuerpo y el volumen total que ocupa.

Símbolo: γ

Fórmula: $\gamma = \frac{W}{V}$

Unidades en el sistema internacional e inglés:

$$\text{SI} = \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Ingles} = \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^3}$$

1.9.5 Presión

Es la fuerza que ejerce un cuerpo por unidad de área.

Símbolo: P

Fórmula: $P = \frac{F}{A}$

Unidades en el sistema internacional e inglés:

$$\text{SI} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Inglés} = \frac{\text{lb}_f}{\text{ft}^2} \text{ (psf)}$$

$$\text{Inglés} = \frac{\text{lb}_f}{\text{in}^2} \text{ (psi)}$$

Existe solo un tipo de presión llamada presión absoluta, pero esta presión no puede ser medida, para ello se utilizará diferentes instrumentos de medida que cada uno de ellos me darán un tipo de presión.

- Presión atmosférica.
- Presión manométrica.
- Presión vacuo-métrica.

Presión absoluta

Presión real en una determinada posición se mide al respecto del cero absoluto.

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{manométrica}} + P_{\text{barométrica}}$$

Presión atmosférica

Se define como la fuerza que ejerce el peso de una columna de aire que está encima de nuestras cabezas.

Para poder medir la presión atmosférica utilizamos un instrumento de medición llamado barómetro:

$$P_{\text{atm}} = \rho g h$$

Presión manométrica

Instrumento de medida que indica la diferencia entre la presión absoluta y la presión atm local.

$$P_{\text{manométrica}} = P_{\text{absoluta}} - P_{\text{atmosférica}}$$

Presión vacuo-métrica

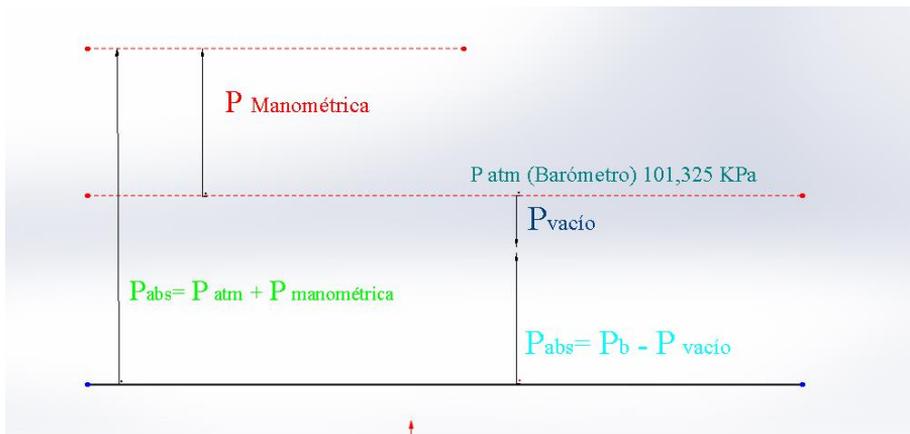
Instrumento de medida que indica la diferencia entre las presiones atmosférica y absoluta.

$$P_{\text{vacío}} = P_{\text{atm}} - P_{\text{absoluta}}$$

Analizaremos un ejemplo de como actua la presión estando en diferentes puntos:

Figura 6

Esquema de la presión manométrica, vacuo-métrica y barométrica



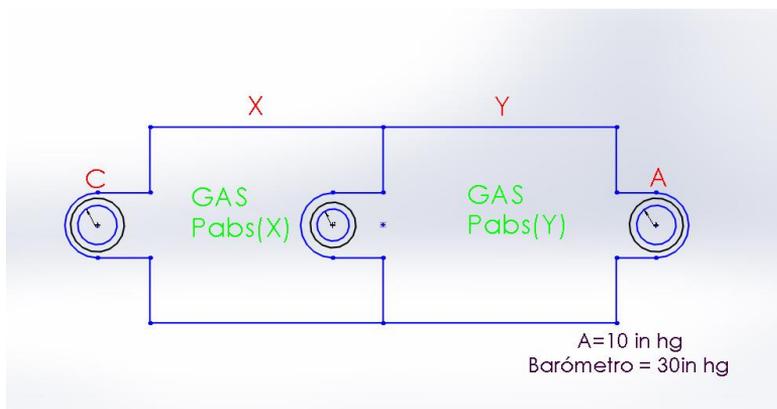
Ejercicios sobre presión (Faires et al., 1991).

Ejercicio 1

¿Cuánto marca el manómetro C en la Figura 7?

Figura 7

Figura de ejercicio 1- Presiones



Fórmulas:

$$P_{manométrica} = P_{abs} - P_{atm}$$

$$P_{vacío} = P_{atm} - P_{abs}$$

Nota:

Psig = manométrica

Psia o psi = absoluta

Conversión:

$$P = 10 \text{ inhg} * \frac{2,54 \text{ cmhg}}{1 \text{ inhg}} * \frac{14,7 \text{ psi}}{76 \text{ cmhg}} = 4,913 \text{ psi}$$

$$P_{atm} = 30 \text{ inhg} = 14,74 \text{ psi}$$

Procedimiento:

A VACUÓMETRO

$$P_{\text{vacío}} = P_{\text{atm}} - P_{\text{abs Y}}$$

$$4,913 \text{ psi} = 14,74 \text{ psi} - P_{\text{abs Y}}$$

$$9,827 \text{ psi} = P_{\text{abs Y}}$$

B MANOMÉTRICA

$$P_{\text{manométrica B}} = P_{\text{abs y}} - P_{\text{abs X}}$$

$$5 \text{ psig} = 9,827 \text{ psia} - P_{\text{abs X}}$$

$$P_{\text{abs W}} = 4,827 \text{ psia}$$

C Manométrica o Vacuo métrica

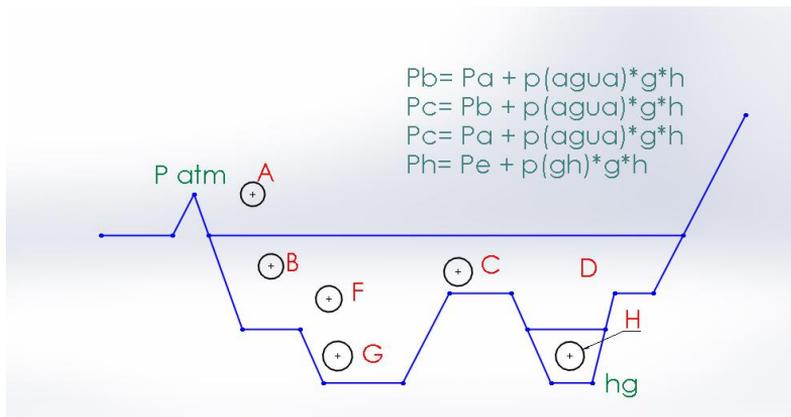
$$P_{\text{manométrica C}} = P_{\text{abs X}} - P_{\text{atm}}$$

$$P_{\text{manométrica C}} = 4,827 \text{ psia} - 14,74 \text{ psi}$$

$$P_{\text{manométrica C}} = -9,913 \text{ psig}$$

Figura 8

Figura ejemplo de presiones hidrostáticas



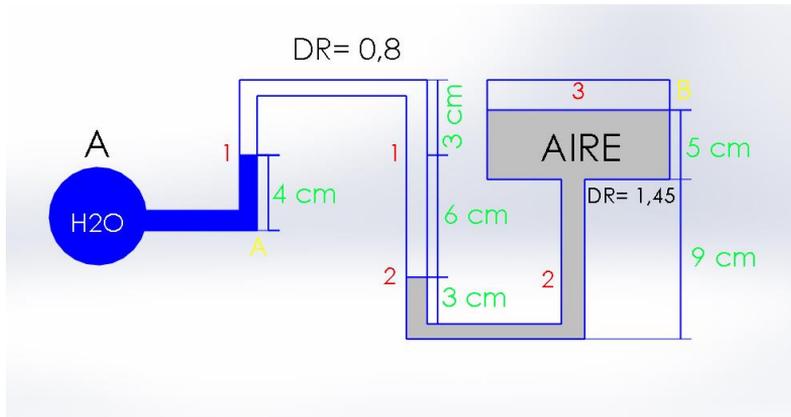
Ejercicio 2

¿Cuál es la presión del P_B , si sabemos que el punto $P_A = 25 \text{ psia}$?

(Sistema inglés)

Figura 9

Figura de ejercicio 2- Presiones



Datos:

$$P_A = 25 \text{ psia}$$

$$P_B \text{ aire} = ?$$

$$h_1 = 4 \text{ cm} \quad \frac{1 \text{ in}}{2.54 \text{ cm}} = 1,574 \text{ in}$$

$$h_2 = 6 \text{ cm} \quad \frac{1 \text{ in}}{2.54 \text{ cm}} = 2,362 \text{ in}$$

$$h_3 = 11 \text{ cm} \quad \frac{1 \text{ in}}{2.54 \text{ cm}} = 4,330 \text{ in}$$

Requerimientos:

$$\gamma = 62,48 \frac{\text{lb}_f}{\text{ft}^3}$$

$$\gamma_{H_2O} = 0,03611 \frac{\text{lb}_f}{\text{ft}^3}$$

Procedimiento:

• Punto 1

$$P_A = P_1 + \int_{H_2O} * g * h_1$$

$$(\int_{H_2O} * g) = \gamma_{H_2O}$$

$$P_1 = P_A - \gamma_{H_2O} * h_1$$

$$P_1 = 25 \text{ psia} - \left(0,03611 \frac{\text{lb}_f}{\text{in}^3} \right) * (1,574 \text{ in})$$

$$P_1 = 25,94 \text{ psia}$$

- **Punto 2**

$$P_2 = P_1 + \rho * g * h_2 \quad (\gamma = \rho * g) \quad \text{ó} \quad (\gamma = DR * \gamma_{H_2O})$$

$$P_2 = P_1 + \gamma * h_2$$

$$P_2 = P_1 + DR * \gamma_{H_2O} * h_2$$

$$P_2 = 24,94 \text{ psia} + (0,8) * \left(0,03611 \frac{\text{lb}_f}{\text{in}^3} \right) * (2,362 \text{ in})$$

$$P_2 = 25,00 \text{ psia}$$

- **Punto 3**

$$P_2 = P_3 + \rho * g * h_3 \quad (\gamma = \rho * g) \quad \text{ó} \quad (\gamma = DR * \gamma_{H_2O})$$

$$P_2 = P_3 + \gamma * h_3$$

$$P_2 = P_3 + DR * \gamma_{H_2O} * h_3$$

$$P_3 = P_2 - DR * \gamma_{H_2O} * h_3$$

$$P_3 = 25,00 \text{ psia} - (1,45) * \left(0,03611 \frac{\text{lb}_f}{\text{in}^3} \right) * (4,330 \text{ in})$$

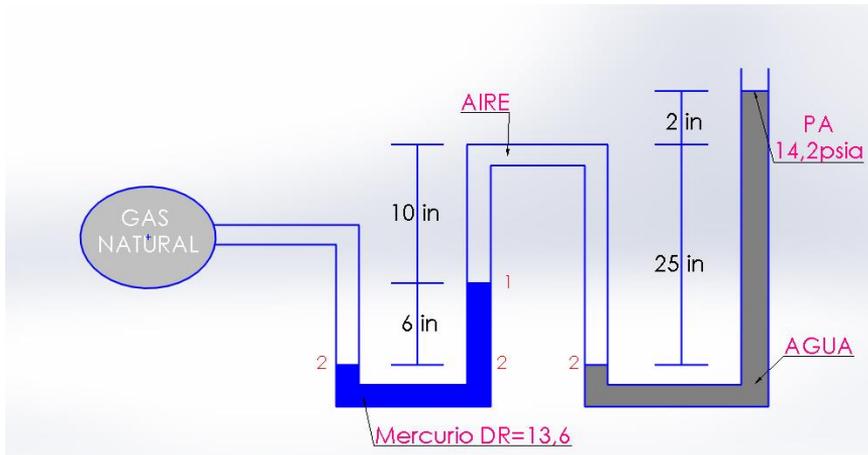
$$P_3 = 24,77 \text{ psia} \quad (P_B \text{ aire})$$

Ejercicio 3

El manómetro mostrado mide la presión en un conducto de gas natural. El manómetro tiene una de sus ramas abiertas a la atmósfera donde la presión atmosférica local es de 14.2 psia. Determine la presión absoluta en el conducto:

Figura 10

Figura de ejercicio 3- Presiones



Datos:

$$P_A = 14,2 \text{ psia}$$

$$P_2 = ?$$

$$h_1 = 27 \text{ in}$$

$$h_2 = 6 \text{ in}$$

Requerimientos:

$$\gamma = 62,48 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$$

$$\gamma_{H_2O} = 0,03611 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$$

Procedimiento:

• Punto 1

$$P_1 = P_A + \cancel{\gamma_{H_2O}} * g * h_1$$

$$(\cancel{\gamma_{H_2O}} * g) = \gamma_{H_2O}$$

$$P_1 = P_A + \gamma_{H_2O} * h_1$$

$$P_1 = 14,2 \text{ psia} + \left(0,03611 \frac{\text{lb}}{\text{in}^3} \right) (27 \text{ in})$$

$$P_1 = 15,17 \text{ psia}$$

• **Punto 2**

$$P_2 = P_1 + \rho * g * h_2 \quad (\gamma = \rho * g) \quad \text{ó} \quad (\gamma = DR \ \gamma_{H_2O})$$

$$P_2 = P_1 + \gamma * h_2$$

$$P_2 = P_1 + DR * \gamma_{H_2O} * h_2$$

$$P_2 = 15,17 \text{ psia} + (13,6) * \left(0,03611 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^3} \right) (6 \text{ in})$$

$$P_2 = 18,12 \text{ psia}$$

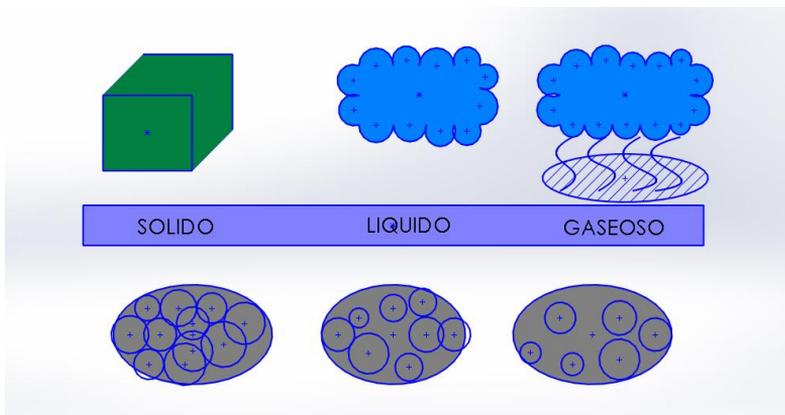
1.9.6 Temperatura

Es el estado térmico de una sustancia que se considera para transmitir calor y puede ser expresada en diversas escalas.

- ❖ Grados Centígrados.
- ❖ Grados Fahrenheit.
- ❖ Grados Kelvin.
- ❖ Grados Ranking.

Figura 11

Estructura atómica en las fases de la materia



Escalas de temperatura

$$\frac{^{\circ}\text{C} - 0}{100} = \frac{^{\circ}\text{F} - 32}{180} = \frac{K - 273}{100} = \frac{^{\circ}\text{R} - 492}{180}$$

Ejemplos

$$20^{\circ}\text{C} \rightarrow ^{\circ}\text{R}$$

$$77^{\circ}\text{F} \rightarrow K$$

$$\frac{^{\circ}\text{C} - 0}{100} = \frac{^{\circ}\text{R} - 492}{180}$$

$$\frac{^{\circ}\text{F} - 32}{180} = \frac{K - 273}{100}$$

$$\frac{20}{100} = \frac{^{\circ}\text{R} - 492}{180}$$

$$\frac{77 - 32}{180} = \frac{K - 273}{100}$$

$$^{\circ}\text{R} = \frac{180(20)}{100} + 492$$

$$K = \frac{77 - 32}{180} + 273 (100)$$

$$^{\circ}\text{R} = 528^{\circ}\text{R}$$

$$K = 298,15 K$$

1.9.7 Proceso termodinámico

Es todo proceso que experimenta un sistema termodinámico de un estado en equilibrio a otro.

- ❖ Isobárico → Presión constante.
- ❖ Isométrico → Volumen específico constante.
- ❖ Isotérmico → Temperatura constante.
- ❖ Isoentrópico → Entropía constante.

1.9.8 Diagrama termodinámico

Es un eje ortogonal ordenado compuesto por dos unidades intensivas.

Figura 12

Proceso termodinámico en Figura P - v

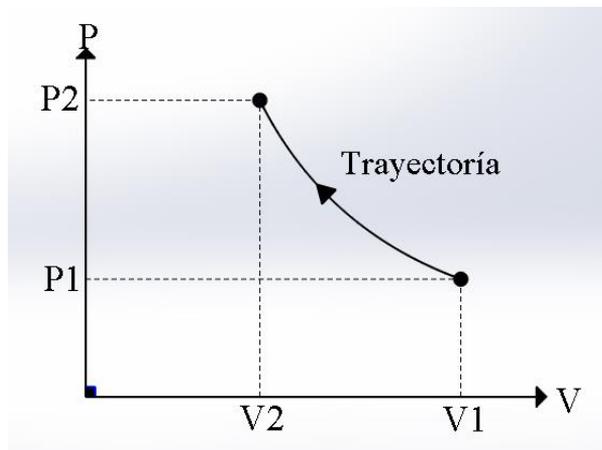


Figura 13

Proceso termodinámico en Figura T - s

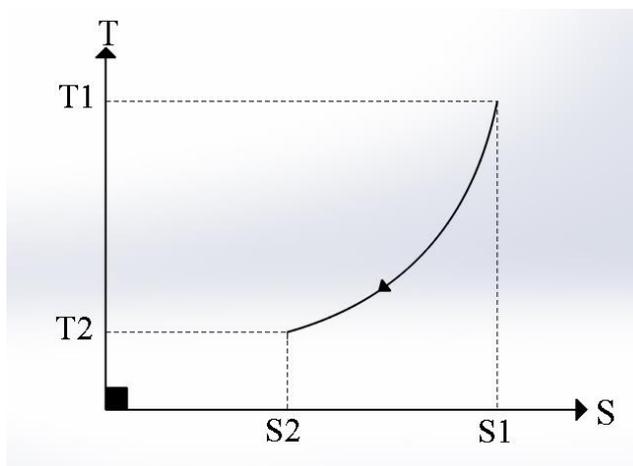
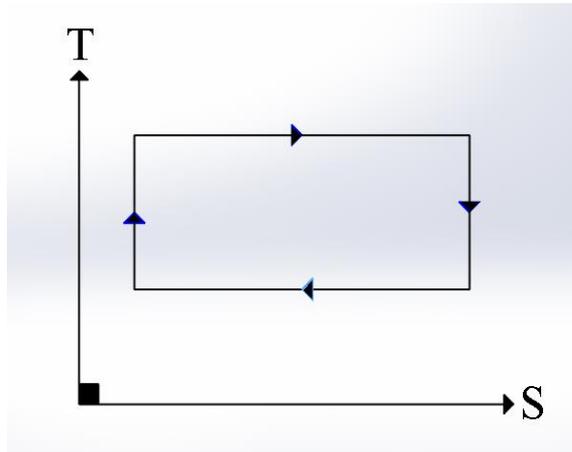


Figura 14

Ciclo termodinámico en Figura T - s



1.9.9 Ciclos termodinámicos

Conjunto ordenado de procesos termodinámicos que parte de un origen y pasan por diferentes estados hasta llegar al punto de partida. Los procesos son idénticos.

Figura 15

Ciclo termodinámico reversible de 2 estados en el Figura T - s

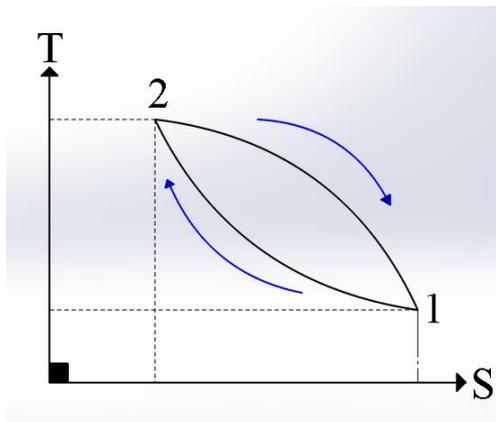


Figura 16

Ciclo termodinámico reversible de 3 estados en el Figura h - s

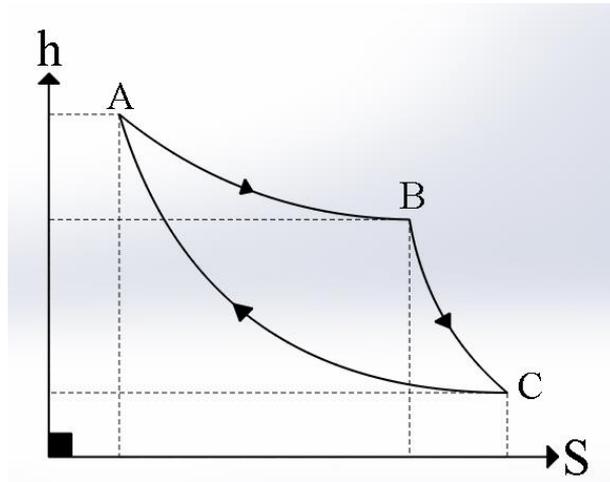
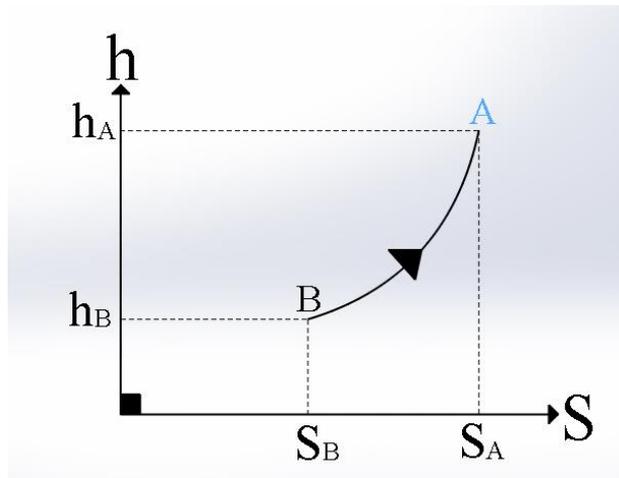


Figura 17

Proceso termodinámico en Figura h - s



1.9.10 Flujo másico

Es la relación que existe entre la primera derivada de la masa respecto al tiempo.

$$\dot{m} = \frac{m}{t}$$

$m \rightarrow$ masa
 $t \rightarrow$ tiempo

Unidades

Sistema internacional

$$\dot{m} = \left[\frac{kg}{s} \right]$$

Sistema inglés

$$\dot{m} = \left[\frac{lb_m}{s} \right]$$

1.9.11 Flujo volumétrico

El flujo volumétrico mide el espacio que ocupan las moléculas, además, debido al cambio de temperatura o la presión puede variar.

$$\dot{V} = \frac{V}{t}$$

$V \rightarrow$ volumen
 $t \rightarrow$ tiempo

Unidades

Sistema internacional

$$\dot{V} = \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

Sistema inglés

$$\dot{V} = \left[\frac{ft^3}{s} \right]$$

1.10 Primera ley de la termodinámica

Principio de conservación de la energía. (La energía no se crea ni se destruye solo se transforma).

El calor y el trabajo son mecanismos por lo que los sistemas intercambian energía entre sí.

Ejemplo: Cuando la energía eléctrica se transforma en energía térmica en un calefactor.

“El contenido energético de un cuerpo o sistema es igual a la diferencia entre la entrada y salida “ (Müller, 2002).

$$E_{\text{Entrada}} - E_{\text{Salida}} = \Delta E$$

1.11 Segunda ley de la termodinámica

Describe los cambios a la entropía (o desorden) en un sistema. La ley surge de observaciones del aumento en el desorden y la conclusión de que los procesos tienen una dirección.

Ejemplo: Las hojas de un árbol se mueven de un estado de orden a un estado de desorden. (Müller, 2002)

1.12 Conversión y transformación de la energía

Existe una relación muy estrecha entre masa y energía, se puede decir que no existe energía si no hay masa que pueda generarla.

- ❖ **K** → Energía cinética.
- ❖ **P** → Energía potencial.

- ❖ U → Energía interna.
- ❖ W → Trabajo del sistema.
- ❖ Q → Calor del sistema.

Unidades

Sistema internacional

[kJ] → kilojulios

Sistema inglés

[Btu]

[lb_m ft]

Conversiones

$$1 \text{ Btu} = 778.169 \text{ lb}_f \text{ ft}$$

$$1 \text{ Btu} = 1.055 \text{ kJ}$$

$$1 \text{ k cal} = 4.184 \text{ kJ}$$

$$1 \text{ k cal} = 426.9 \text{ kg}_f \text{ m}$$

Ejemplos de transformaciones

- ❖ Calcular la energía total dados los siguientes datos:

$$E_K = 20 \text{ Btu}$$

$$E_P = 15 \text{ kJ} \rightarrow \left| \frac{1 \text{ Btu}}{1,055 \text{ kJ}} \right| = \mathbf{14.22 \text{ Btu}}$$

$$E_u = 10 \text{ k cal} \rightarrow \left| \frac{4,184 \text{ kJ}}{1 \text{ k cal}} \right| \left| \frac{1 \text{ Btu}}{1,055 \text{ kJ}} \right| = \mathbf{39,66 \text{ Btu}}$$

$$w = 2800 \text{ lb}_f \text{ ft} \rightarrow \left| \frac{1 \text{ Btu}}{778,169 \text{ lb}_f \text{ ft}} \right| = \mathbf{3,598 \text{ Btu}}$$

$$Q = 500 \text{ kg}_f \text{ m} \rightarrow \left| \frac{1 \text{ k cal}}{426,9 \text{ kg}_f \text{ m}} \right| \left| \frac{4,184 \text{ kJ}}{1 \text{ k cal}} \right| \left| \frac{1 \text{ Btu}}{1,055 \text{ kJ}} \right|$$

$$= 4,644 \text{ Btu}$$

Energía total

$$E_T = E_K + E_P + E_u + w + Q$$

$$E_T = 20 \text{ Btu} + 14,22 \text{ Btu} + 39,66 \text{ Btu} + 3,598 \text{ Btu} + 4,644 \text{ Btu}$$

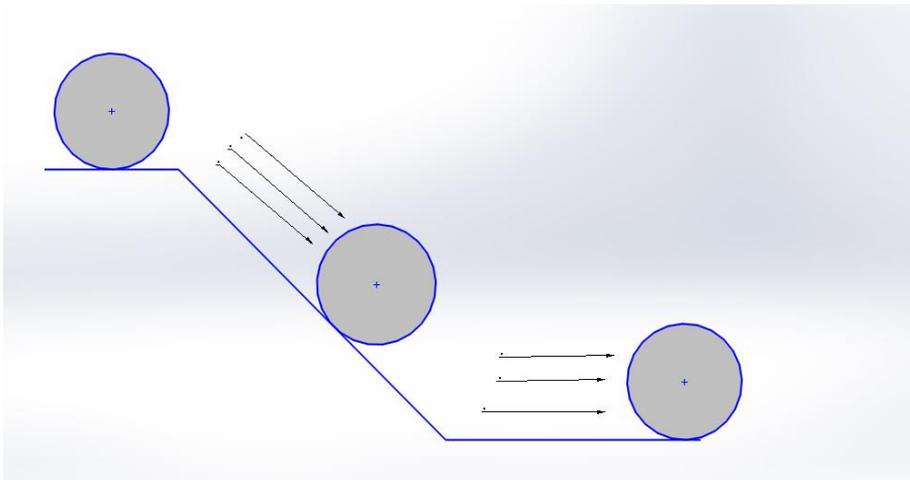
$$E_T = 82,122 \text{ Btu}$$

1.12.1 Energía potencial (P)

Esta se presenta cuando existe una altura.

Figura 18

Figura energía potencial



Intensiva

$$\Delta e_p = g (Z_{final} - Z_{inicial})$$

Extensiva

$$\Delta E_p = m g (Z_{final} - Z_{inicial})$$

Sistema internacional

$$\frac{kJ}{kg}$$

$$kJ$$

Sistema inglés

$$\frac{lb_f ft}{lb_m}$$

$$lb_f ft$$

Sistema internacional

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

Sistema inglés

$$g = 32.17 \text{ ft/s}^2$$

1.12.2 Energía cinética (K)**Intensivas**

$$\Delta e_k = \frac{1}{2} [(\overline{V}_F)^2 - (\overline{V}_O)^2]$$

Extensivas

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} m [(\overline{V}_F)^2 - (\overline{V}_O)^2]$$

Sistemas internacional

$$\frac{kJ}{kg}$$

$$kJ$$

Sistema inglés

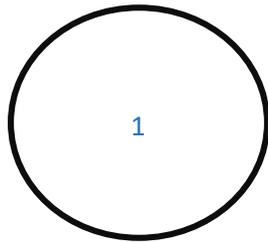
$$\frac{lb_f ft}{lb_m}$$

$$lb_f ft$$

Ejemplo

$$\vec{V}_1 = 40000 \text{ in/s} \rightarrow 3333,33 \text{ ft/s}$$

$$Z_1 = 300 \text{ in} \rightarrow 25 \text{ ft}$$



$$m = 30 \text{ lb} \rightarrow 0.9325 \text{ slug}$$

Extensiva

$$\Delta E_T = \Delta E_P + \Delta E_K$$

Energía potencial

$$\Delta E_p = m g (Z_{final} - Z_{inicial})$$

$$= (0,9325 \text{ slug})(32,17 \text{ ft/s}^2)(-16,67 \text{ ft})$$

$$\Delta E_p = -499,98 \text{ lb}_f \text{ ft}$$

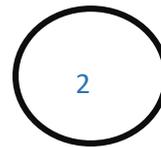
$$\Delta E_p = -0,6425 \text{ Btu}$$

$$\vec{V}_2 = 50000 \text{ in/s}$$

$$\rightarrow 4166,67 \text{ ft/s}$$

$$Z_2 = 100 \text{ in}$$

$$\rightarrow 8,333 \text{ ft}$$



Intensiva

$$\Delta e_T = \Delta e_P + \Delta e_K$$

$$\Delta e_p$$

$$= g (Z_{final} - Z_{inicial})$$

$$= 32,17 \text{ ft/s}^2 (8,333 \text{ ft}$$

$$- 25 \text{ ft})$$

$$\Delta e_p = -536,18 \text{ ft}^2/\text{s}^2$$

$$\rightarrow \text{lb}_f \text{ ft} / \text{slug}$$

$$\Delta e_p$$

$$= -0,02142 \text{ Btu/lb}_m$$

Energía cinética

$$\begin{aligned} \Delta E_k &= \frac{1}{2} m \left[(\overline{V}_F)^2 - (\overline{V}_O)^2 \right] & \Delta e_k &= \frac{1}{2} \left[(\overline{V}_F)^2 - (\overline{V}_O)^2 \right] \\ \Delta E_k &= \frac{1}{2} (0,9325 \text{ slug}) & & \\ & \left[(4166,67 \text{ ft/s}^2)^2 - (3333,33 \text{ ft/s}^2)^2 \right] & & = \frac{1}{2} \left[(4166,67 \text{ ft/s}^2)^2 - (3333,33 \text{ ft/s}^2)^2 \right] \\ \Delta E_k &= 2914085 \frac{\text{lb}_f}{\text{ft}} \rightarrow 3744,79 \text{ Btu} & \Delta e_k &= 315025 \frac{\text{ft}^2}{\text{s}^2} \\ & & & \rightarrow \frac{\text{lb}_f \text{ ft}}{\text{slug}} \\ & & \Delta e_k &= 124,83 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}_m} \end{aligned}$$

Extensiva

$$\begin{aligned} \Delta E_T &= \Delta E_P + \Delta E_K \\ \Delta E_T &= 3744,79 \text{ Btu} \\ &+ (-0,6425 \text{ Btu}) \\ \Delta E_T &= 3374,14225 \text{ Btu} \end{aligned}$$

Intensiva

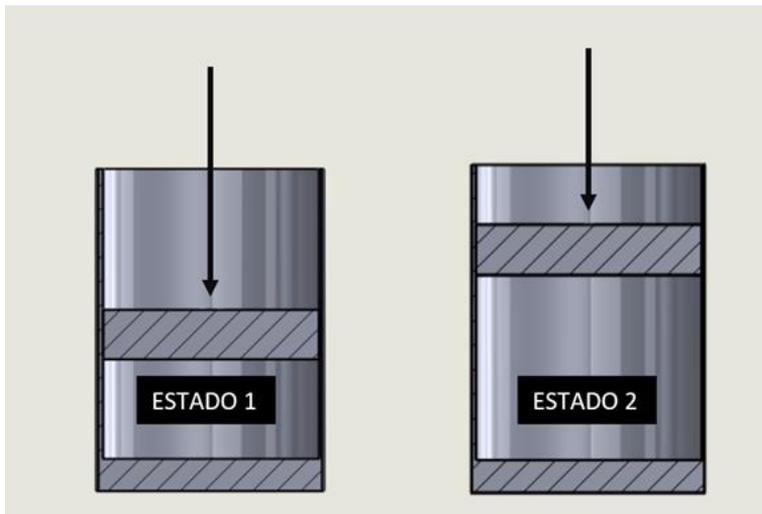
$$\begin{aligned} \Delta e_T &= \Delta e_P + \Delta e_K \\ \Delta e_T &= 3744,79 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}_m} \\ &+ (-0,02142 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}_m}) \\ \Delta e_T &= 3374,14225 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}_m} \end{aligned}$$

1.13 Trabajo

1.13.1. Trabajo no fluente en un sistema cerrado o trabajo de frontera.

Figura 19

Figura Trabajo no fluente en un sistema cerrado o trabajo de frontera



Estado 1

GAS
$P_1; T_1; v_1$
$h_1; s_1; V_1$

Estado 2

GAS
$P_2; T_2; v_2$
$h_2; s_2; V_2$

$$W_{nf} = \int_1^2 F dx \rightarrow W_{nf} \int_1^2 P A dx$$

$$W_{nf} \int_1^2 P dV$$

Ejemplo 



$$V_1 = 0,3 P^2 + 5P$$

$$V_2 = 0,3 P^2 + 5P$$

$$V_1 = 0,3(25)^2 + 5(25)$$

$$V_2 = 0,3(50)^2 + 5(50)$$

$$V_1 = 312,6 \text{ in}^3$$

$$V_2 = 1000 \text{ in}^3$$

$$V = 0,3 P^2 + 5P$$

$$dV = (0,6 P + 5) dP$$

$$W_{nf} = \int_1^2 P dV$$

$$W_{nf} = \int_1^2 P(0,6P + 5)dP$$

$$W_{nf} = \int_1^2 (0,6P^2 + 5P)dP$$

$$W_{nf} = \frac{0,6P^3}{3} + \frac{5P^2}{2}$$

$$W_{nf} = \left(\frac{0,6(50)^3}{3} + \frac{5(50)^2}{2} \right) - \left(\frac{0,6(25)^3}{3} + \frac{5(25)^2}{2} \right)$$

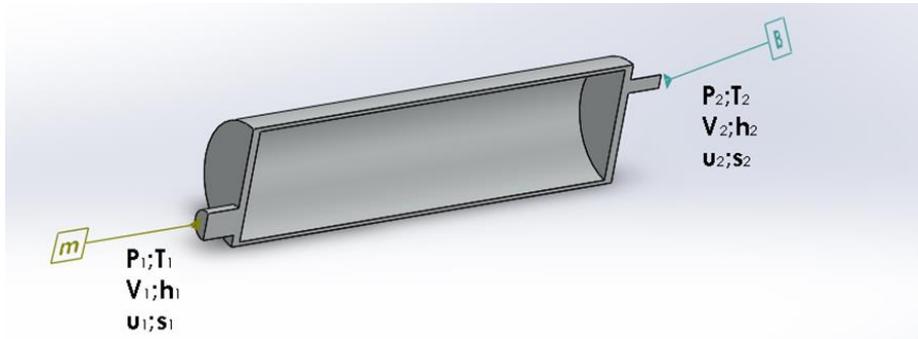
$$W_{nf} = (31250 - 4687,5) \text{ lb}_f \text{ in}$$

$$W_{nf} = 26562,5 \text{ lb}_f \text{ in} = 2,8445 \text{ Btu}$$

1.13.2 Trabajo en un sistema fluente o trabajo de fluido

Figura 20

Figura Trabajo en un sistema fluente o trabajo de fluido



$$P_1; T_1$$

$$V_1; h_1$$

$$u_1; s_1$$

$$P_2; T_2$$

$$V_2; h_2$$

$$u_2; s_2$$

1. Flujo estable. (masa que entra, masa que sale)
2. Estado estable/uniforme/estacionario.

Intensiva

$$\Delta w_f = P_F v_F - P_o v_o$$

Extensiva

$$\Delta W_F = P_F V_F - P_o V_o$$

Sistema internacional

$$kJ/kg$$

$$kW$$

Sistema inglés

$$lb_f ft/lb_m ; Btu/lb_m$$

$$lb_f ft/s ; Btu/s$$

1.13.3 Trabajo de flecha o trabajo de eje (trabajo de paletas)

Este se puede trabajar en sistemas cerrados o abiertos.

Figura 21

Figura de un corte de un cilindro - émbolo

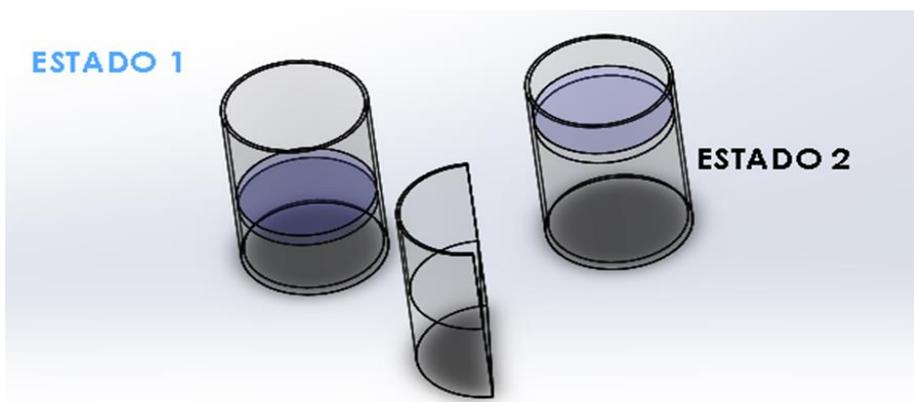
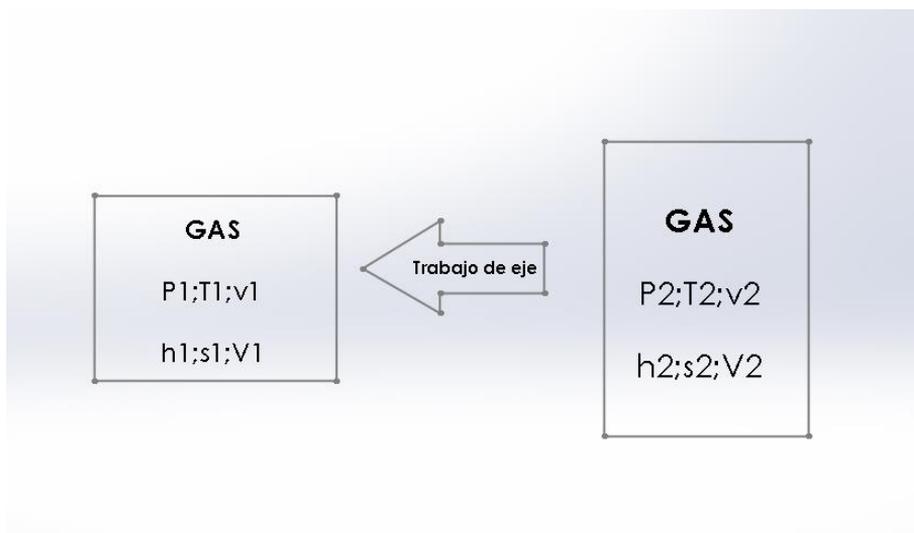


Figura 22

Figura de un sistema cerrado con trabajo de eje



Datos:

$$hp = 3 hp \rightarrow 1650 \text{ lb}_f \text{ ft}/s$$

$$t = 30 \text{ min} \rightarrow 1800 \text{ s}$$

$$W_p = W_{motor} t$$

$$W_p = 1650 \frac{\text{lb}_f \text{ ft}}{\text{s}} (1800 \text{ s})$$

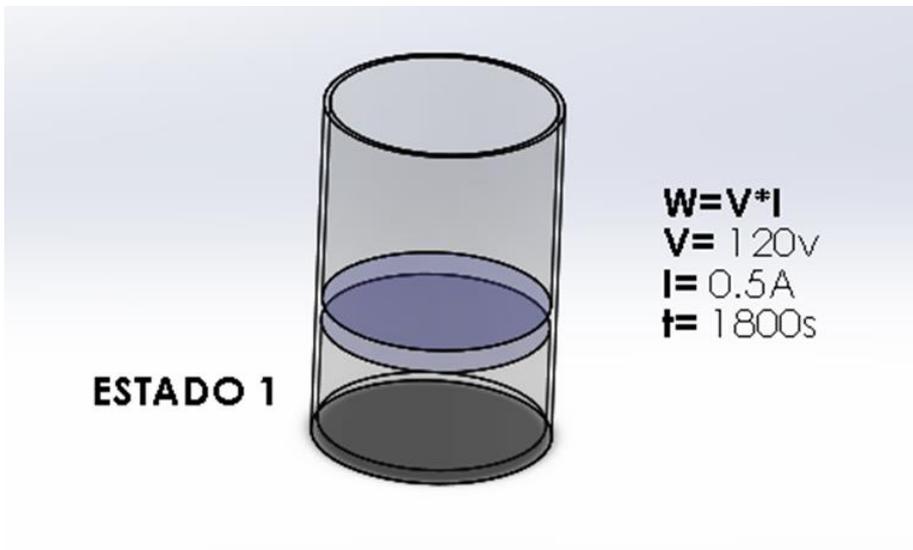
$$W_p = 2970000 \text{ lb}_f \text{ ft}$$

1.13.4 Trabajo eléctrico

En esta se presenta una resistencia.

Figura 23

Figura de un sistema cerrado con trabajo de eléctrico



Gas 20 min 120 V
0.5 A

$$\dot{W} = V I$$
$$V = 120 V$$
$$I = 0,5 A$$
$$t = 20 \text{ min} \rightarrow 1800 s,$$

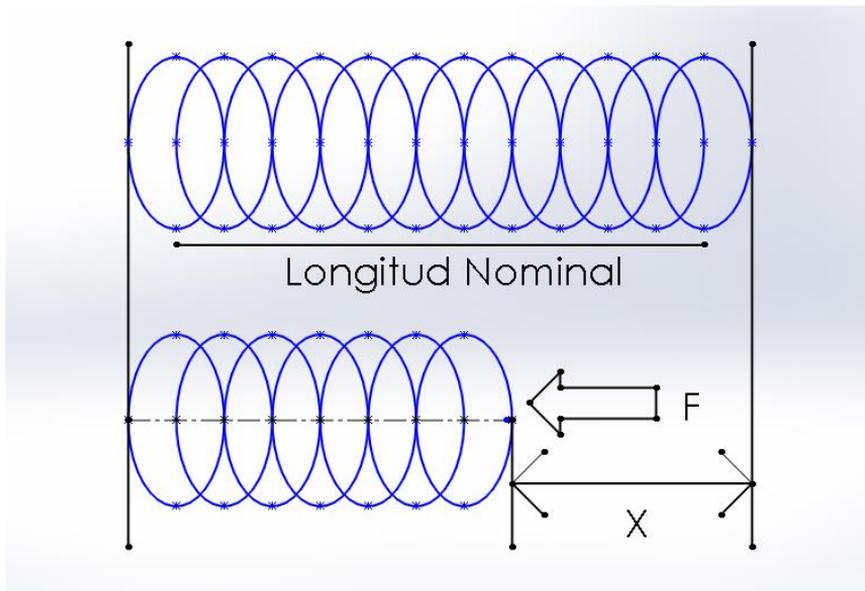
$$\dot{W}_{\text{el\u00e9ctrico}} = V I$$
$$\dot{W}_E = (120 V)(0,5 A)$$
$$\dot{W}_E = 60 W$$

$$W_{\text{el\u00e9ctrico}} = \dot{W}_{\text{el\u00e9ctrico}} t$$
$$W_E = (60 J/s)(1800 s)$$
$$W_E = 108000 J \left| \frac{1 kJ}{1000 J} \right|$$
$$= 108 kJ$$

1.13.5 Trabajo el\u00e1stico

Figura 24

Trabajo el\u00e1stico



Ley de Hooke

$$F = k \Delta x$$

$$W_e = \frac{1}{2} k (\Delta x)$$

$k \rightarrow$ coeficiente de elasticidad

$\Delta x \rightarrow$ elongación..

Sistema internacional

$$k \rightarrow [N/m]$$

$$W_e \rightarrow kJ$$

Sistema inglés

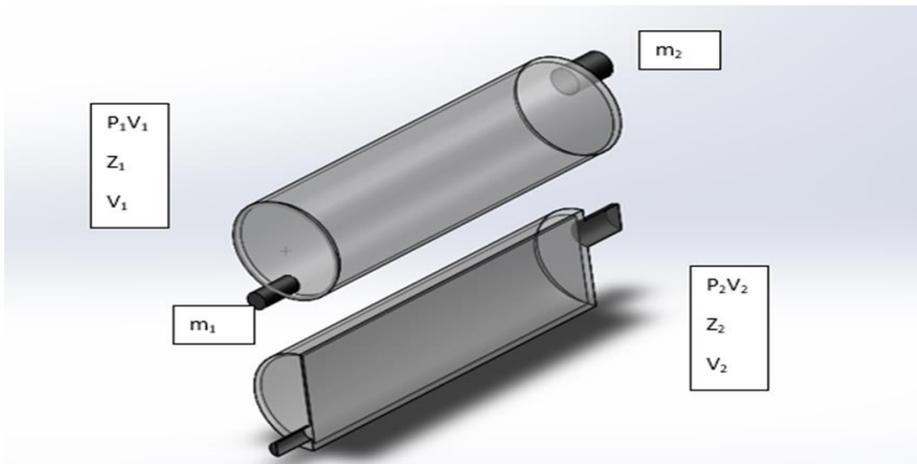
$$k \rightarrow [lb_f/ft]$$

$$W_e \rightarrow lb_f ft ; Btu$$

Ejemplo

Figura 25

Figura de ejercicio 1- Trabajo y energía



Datos:

$$\vec{V}_1 = 5000 \frac{\text{in}}{\text{s}} \left| \frac{1 \text{ ft}}{12 \text{ in}} \right| = 416,67 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

$$P_1 = 3 \text{ psf}$$

$$\dot{m} = 5 \frac{\text{lb}_m}{\text{s}} \left| \frac{0,03108 \text{ slug}}{1 \text{ lb}_m} \right| = 0,1554 \frac{\text{slug}}{\text{s}}$$

$$V = 500 \frac{\text{in}^3}{\text{lb}_m} \left| \frac{0,0186 \text{ ft}^3/\text{slug}}{1 \frac{\text{in}^3}{\text{lb}_m}} \right| = 9,308 \frac{\text{ft}^3}{\text{slug}}$$

$$P_2 = 3 \text{ psf}$$

$$\vec{V}_2 = 10000 \frac{\text{in}}{\text{s}} \left| \frac{1 \text{ ft}}{12 \text{ in}} \right| = 833,33 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

$$V = 700 \frac{\text{in}^3}{\text{lb}_m} \left| \frac{0,0186 \text{ ft}^3/\text{slug}}{1 \frac{\text{in}^3}{\text{lb}_m}} \right| = 13,03 \frac{\text{ft}^3}{\text{slug}}$$

Energía cinética (extensiva)

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} \dot{m} [(\vec{V}_f)^2 - (\vec{V}_0)^2]$$

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} 0,1554 \frac{\text{slug}}{\text{s}} \left[\left(833,33 \frac{\text{ft}}{\text{s}} \right)^2 - \left(416,67 \frac{\text{ft}}{\text{s}} \right)^2 \right]$$

$$\Delta E_k = 40468,10 \frac{\text{slug}}{\text{s}} \rightarrow \frac{\text{ft}}{\text{s}^2} \text{ ft} = 40468,10 \frac{\text{lb}_f \text{ ft}}{\text{s}} \left| \frac{1 \text{ hp}}{550 \frac{\text{lb}_f \text{ ft}}{\text{s}}} \right|$$
$$= 73,57 \text{ hp}$$

$$\Delta E_k = 73,57 \text{ hp}$$

Energía cinética (intensiva)

$$\Delta e_k = \frac{1}{2} [(\vec{V}_f)^2 - (\vec{V}_0)^2]$$

$$\Delta e_k = \frac{1}{2} \left[\left(833,33 \frac{ft}{s} \right)^2 - \left(416,67 \frac{ft}{s} \right)^2 \right]$$

$$\Delta e_k = 260412,5 \frac{ft^2}{s^2} \rightarrow 260412,5 \frac{lb_f ft}{slug} \rightarrow 8094,84 \frac{lb_f ft}{lb_m}$$

$$\Delta e_k = 8094,84 \frac{lb_f ft}{lb_m}$$

Energía potencial (extensiva)

$$\Delta E_p = \dot{m} g \Delta z$$

$$\Delta E_p = 5 \frac{lb_f}{s} (30 ft)$$

$$\Delta E_p = 150 \frac{lb_f ft}{s} \left| \frac{1 hp}{550 \frac{lb_f ft}{s}} \right| = 0,272 hp$$

$$\Delta E_p = 0,272 hp$$

Energía potencial (intensiva)

$$\Delta e_p = \frac{\Delta E_p}{\dot{m}}$$

$$\Delta e_p = \frac{150 \frac{lb_f ft}{s}}{5 \frac{lb_m}{s}}$$

$$\Delta e_p = 30 \frac{lb_f ft}{lb_m}$$

Trabajo de flujo (extensivo)

$$\Delta W_{fluente} = P_f \dot{V}_f - P_o \dot{V}_o$$

$$\dot{V}_1 = V \dot{m} = 9,308 \frac{ft^3}{slug} \left(0,1554 \frac{slug}{s} \right) = 1,446 \frac{ft^3}{s}$$

$$\dot{V}_2 = V \dot{m} = 13,03 \frac{ft^3}{slug} \left(0,1554 \frac{slug}{s} \right) = 2,024 \frac{ft^3}{s}$$

$$\Delta W_{fluente} = \left(3 \frac{lb_f}{ft^2} \right) \left(2,024 \frac{ft^3}{s} \right) - \left(3 \frac{lb_f}{ft^2} \right) \left(1,446 \frac{ft^3}{s} \right)$$

$$\Delta W_{fluente} = 1,734 \frac{lb_f ft}{s} \left| \frac{1 hp}{550 \frac{lb_f ft}{s}} \right| = 3,1527 \times 10^{-3} hp$$

Trabajo de flujo (intensivo)

$$\Delta w_{fluente} = P_f V_f - P_o V_o$$

$$\begin{aligned} \Delta w_{fluente} &= \left(3 \frac{lb_f}{ft^2} \right) \left(13,03 \frac{ft^3}{slug} \right) - \left(3 \frac{lb_f}{ft^2} \right) \left(9,308 \frac{ft^3}{slug} \right) \\ &= 11,166 \frac{lb_f ft}{slug} \end{aligned}$$

$$\Delta w_{fluente} = 11,166 \frac{lb_f ft}{slug} \left| \frac{1 slug}{32,17 lb_m} \right| = 0,347 \frac{lb_f ft}{lb_m}$$

$$\text{Trabajo} \rightarrow \Delta W = m \Delta w$$

$$\Delta W = 5 \frac{lb_m}{s} \left(0,3470 \frac{lb_f ft}{lb_m} \right)$$

$$\Delta W = 1,735 \frac{lb_f ft}{s}$$

1.14. Energía interna (U)

Es la suma de todas las energías microscópicas de la sustancia debido al movimiento e interacción de los átomos (Tipler & Mosca, 2000).

Intensiva

Extensiva

Sistema internacional

$$kJ/kg$$

$$kJ$$

Sistema inglés

$$Btu/lb_m ; lb_f ft / lb_m$$

$$Btu ; lb_f ft$$

ESTADOS DEL AGUA

Figura 26

Estructura atómica del agua en las fases de la materia



1.15 Calor (Q)

Es un flujo de energía que se debe a la interacción entre dos cuerpos a diferentes temperaturas. (No es lo mismo que temperatura).

La transferencia de calor siempre se va a realizar desde el cuerpo que tiene mayor temperatura hacia el que tiene menor temperatura.

❖ Sistema adiabático:

Este representa que el calor es aproximadamente cero, esto con la aplicación de un aislante

1.16 Formas de transferencia de calor

1.17 Conducción

Es un tipo de transferencia térmica que permite que el calor se transmita de un objeto de mayor temperatura a uno de menor temperatura (Cengel & Ghajar, 2007).

$$\dot{Q}_c = -k A \frac{\Delta_T}{\Delta_x}$$

Ley de Fourier

$-k \rightarrow$ conductividad térmica

$A \rightarrow$ Área de transferencia

Δ_T

\rightarrow Diferencial de temperatura

$\Delta_x \rightarrow$ Espesor del material

Unidades

Sistema internacional

$$\dot{Q} = [kW]$$

$$k = \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$$

Sistema inglés

$$\dot{Q} = \left[\frac{Btu}{s} \right]; \dot{Q} = \frac{lb_f \cdot ft}{s}$$

$$k = \left[\frac{Btu}{hr \cdot ft \cdot ^\circ F} \right]$$

1.18 Convección

Conducción + movimiento = convección

$$\dot{Q}_{\text{Convección}} = h A (T_s - T_\infty) \quad \text{Ley de Newton}$$

h → coeficiente convectivo

A → Área de transferencia

T_s

→ temperatura de la superficie

T_∞ → temperatura del fluido

Unidades

Sistema internacional

$$h = \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$$

Sistema inglés

$$h = \left[\frac{Btu}{hr \cdot ft^2 \cdot ^\circ F} \right]$$

1.19 Radiación

Energía emitida por la materia a través de ondas electromagnéticas.

$$\dot{Q}_R = \sigma A (T_1^2 - T_2^2)$$

σ

→ *coeficiente Stefan Boltzmann*

A → *Área de transferencia*

T_1 → *temperatura del emisor*

T_2 → *temperatura del receptor*

Unidades

Sistema internacional

Sistema inglés

$$\sigma = 5,669 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

$$\sigma = 0,1714 \times 10^{-8} \left[\frac{Btu}{hr \cdot ft^2 \cdot R^4} \right]$$

Ejemplo

La superficie interna y externa de un muro de ladrillo de 5 m por 6 m con 10 cm de espesor y conductividad térmica $0,69 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$ se mantiene a las temperaturas de 20 y 5 grados centígrados respectivamente. Calcule la tasa de transferencia de calor a través de la pared en W:

Datos:

$$k = 0,69 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$A = (6m)(5m) = 30m^2$$

$$\Delta T = T_F - T_O = 293 \text{ K} - 273 \text{ K} = 15 \text{ K}$$

$$\Delta x = 0,3 \text{ m}$$

Resolución:

$$\dot{Q}_C = -k A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$$\dot{Q}_C = -(0,69 \text{ W/m}^\circ\text{C})(30 \text{ m}^2) \frac{(15^\circ\text{C})}{0,3 \text{ m}}$$

$$\dot{Q}_C = -1035 \text{ W}$$

1.20 Entalpía (H)

Es la energía que tiene una masa en movimiento, es decir, la que tiene al entrar y salir de un sistema. Esta es igual a la energía interna más el trabajo de flujo (Moring Faires, 2004).

Entalpía = energía interna + trabajo de flujo

$$H = U + PV$$

Intensiva

$$h = u + Pv$$

Extensiva

$$H = U + PV$$

Unidades

$$\text{Sistema Internacional} \rightarrow \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\begin{aligned} \text{Sistema Internacional} &\rightarrow \text{kJ} \\ \text{Sistema Inglés} & \end{aligned}$$

$$\rightarrow \text{Btu}; \text{lb}_f \cdot \text{ft}$$

$$\text{Sistema Inglés} \rightarrow \frac{\text{Btu}}{\text{lb}_m}; \frac{\text{lb}_f \cdot \text{ft}}{\text{lb}_m}$$

Tabla de ecuaciones para conservación de la energía

Intensiva	Extensiva	Flujo
Energía potencial		
$\Delta e_p = g \Delta z$	$\Delta E_p = m g \Delta z$	$\Delta \dot{E}_p = \dot{m} g \Delta z$
Energía cinética		
Δe_k $= \frac{1}{2} [(\overline{V}_F)^2 - (\overline{V}_O)^2]$	ΔE_k $= \frac{1}{2} m [(\overline{V}_F)^2 - (\overline{V}_O)^2]$	$\Delta \dot{E}_k$ $= \frac{1}{2} \dot{m} [(\overline{V}_F)^2 - (\overline{V}_O)^2]$
Energía interna		
u	U	\dot{U}
Entalpía		
$h = u + Pv$	$H = U + PV$	$\dot{H} = \dot{U} + P\dot{V}$
Trabajo no fluente		
$w = \int_0^F P v$	$W = \int_0^F P V$	$\dot{W} = \int_0^F P \dot{V}$
Trabajo fluente		
$\Delta W_f = P_F v_F - P_O v_O$	ΔW_F $= P_F V_F - P_O V_O$	$\dot{W}_F = P_F \dot{V}_F - P_O \dot{V}_O$
Trabajo de flecha		
W_{Flecha}	W_{Flecha}	\dot{W}_{Flecha}
Trabajo eléctrico		
$W_{Eléctrico}$	$W_{Eléctrico}$	$\dot{W} = V I$

Trabajo elástico

$$W_{Elástico}$$

$$W_{Elástico} = \frac{1}{2} k (\Delta x)^2$$

$$\dot{W}_{Elástico}$$

Conducción

$$q_{Conducción}$$

$$Q_{Conducción}$$

$$\dot{Q}_C = -k A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Convección

$$q_{Convección}$$

$$Q_{Convección}$$

$$\dot{Q}_{Cn} = h A (T_s - T_\infty)$$

Radiación

$$q_{Radiación}$$

$$Q_{Radiación}$$

$$\dot{Q}_R = \sigma A (T_1^2 - T_2^2)$$

Unidades en sistema internacional

$$\frac{kJ}{kg}$$

$$kJ$$

$$kW$$

Unidades en sistema inglés

$$\frac{Btu}{lb_m}; \frac{lb_f ft}{lb_m}$$

$$Btu; lb_f ft$$

$$\frac{Btu}{s}; \frac{lb_f ft}{s}; hp$$

Conversiones

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

$$E = e m; \dot{E} = \dot{E} m$$

$$\dot{E} = e \dot{m}; \dot{E} = \frac{E}{t}$$

Descomposición de unidades

$$N = kg \ m/s^2$$

$$lb_f = slug \ ft/s^2$$

$$m^2/s^2 = J/kg$$

Conversiones

$$1 Btu = 778,169 lb_f ft$$

$$1 Btu = 1,055 kJ$$

$$1 k cal = 4,184 kJ$$

$$ft^2/s^2 = lb_f ft / slug$$

$$1 k cal = 426,9 kg_f m$$

$$1 slug = 32,17 lb_m$$

1.21 Relaciones de energía

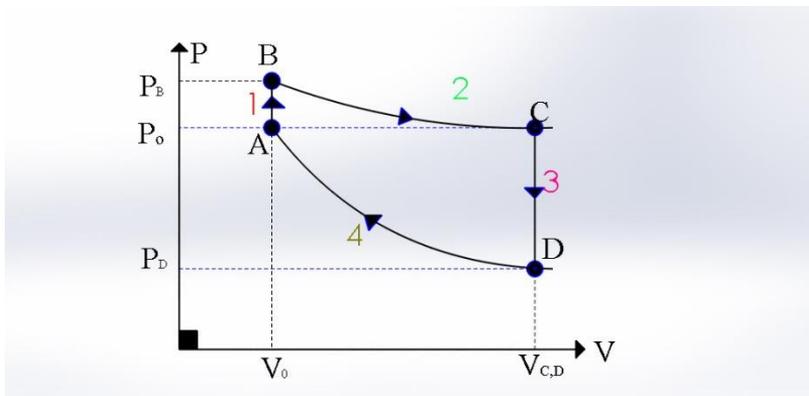
Calores específicos (C , C_p , C_v) Temperatura (T), Trabajo de sistema no fluentes (W_{nf}), Trabajo en sistemas abiertos (W_t), Entropía (S), Energía interna (U), Entalpía (H).

1.22 Reversibilidad

La reversibilidad es un concepto termodinámico que implica el retorno de una acción hasta su estado original, sin que haya pérdidas o ganancias de energía desde el sistema termodinámico hasta el medio ambiente o viceversa, es un proceso ideal (Pineda & Maíllo, 2009).

Figura 27

Ejemplo de ciclo reversible



1.23 Capacidad calórica

La capacidad de calor (energía) que se le puede suministrar a una sustancia para incrementar su temperatura en una unidad (Tipler & Mosca, 2000).

$$C = \frac{\partial Q}{\partial T} \qquad C = \text{Capacidad calórica}$$

Unidades

SI

$$C = \frac{kJ \text{ Kcal}}{K}$$

Inglés

$$C = \frac{lb\,f\,ft\,Btu}{^{\circ}R}$$

La capacidad calórica permite cuantificar cuanta energía (térmica) almacena o cede una sustancia.

Intensiva

$$c = \frac{\partial Q}{dT}$$

$$c = \frac{C}{m}$$

$$\frac{kJ}{kg\,K}$$

$$\frac{Kcal}{kg\,K}$$

$$\frac{kJ \text{ Kcal}}{K}$$

Extensiva

$$C = \frac{\partial Q}{dT}$$

$$\frac{lb\,f\,ft}{lbm\,^{\circ}R}, \frac{Btu}{Lbm\,^{\circ}R}$$

$$\frac{lb\,f\,ft}{^{\circ}R}, \frac{Btu}{^{\circ}R}$$

1.24 Capacidad calórica a presión constante

Es la cantidad de calor a presión constante que se suministra a una sustancia para incrementar su temperatura en una unidad.

$$C_p = \frac{\partial Q(P_{cte})}{dT} \qquad C_p = \frac{dH}{dT}$$

Capacidad calórica a presión constante

$$\partial Q = dU + PdV$$

$$\partial Q = dH - PdV$$

$$\partial Q = dH \qquad c_p = \frac{C_p}{m}$$

Calor específico a presión constante

$$C_p = c_p m$$

$$c_p m = \frac{dH}{dT}$$

Intensiva

$$dH = C_p dT$$

Extensiva

$$dH = m c dT \quad \text{2da ley de Joule}$$

1.25 Capacidad calórica a volumen constante

$$C_V = \frac{dQ}{dT}$$

Capacidad calórica a volumen constante

Es la capacidad de calor que se suministra a volumen constante a una sustancia para incrementar su temperatura en una unidad.

$$\partial Q(V_{cte}) = dV + PdV$$

$$\partial Q(V_{cte}) = dV$$

$$c_v = \frac{c_V}{m}$$

$$c_v m = c_V$$

$$c_v m = \frac{dV}{dT}$$

Intensiva

$$du = c_v dT$$

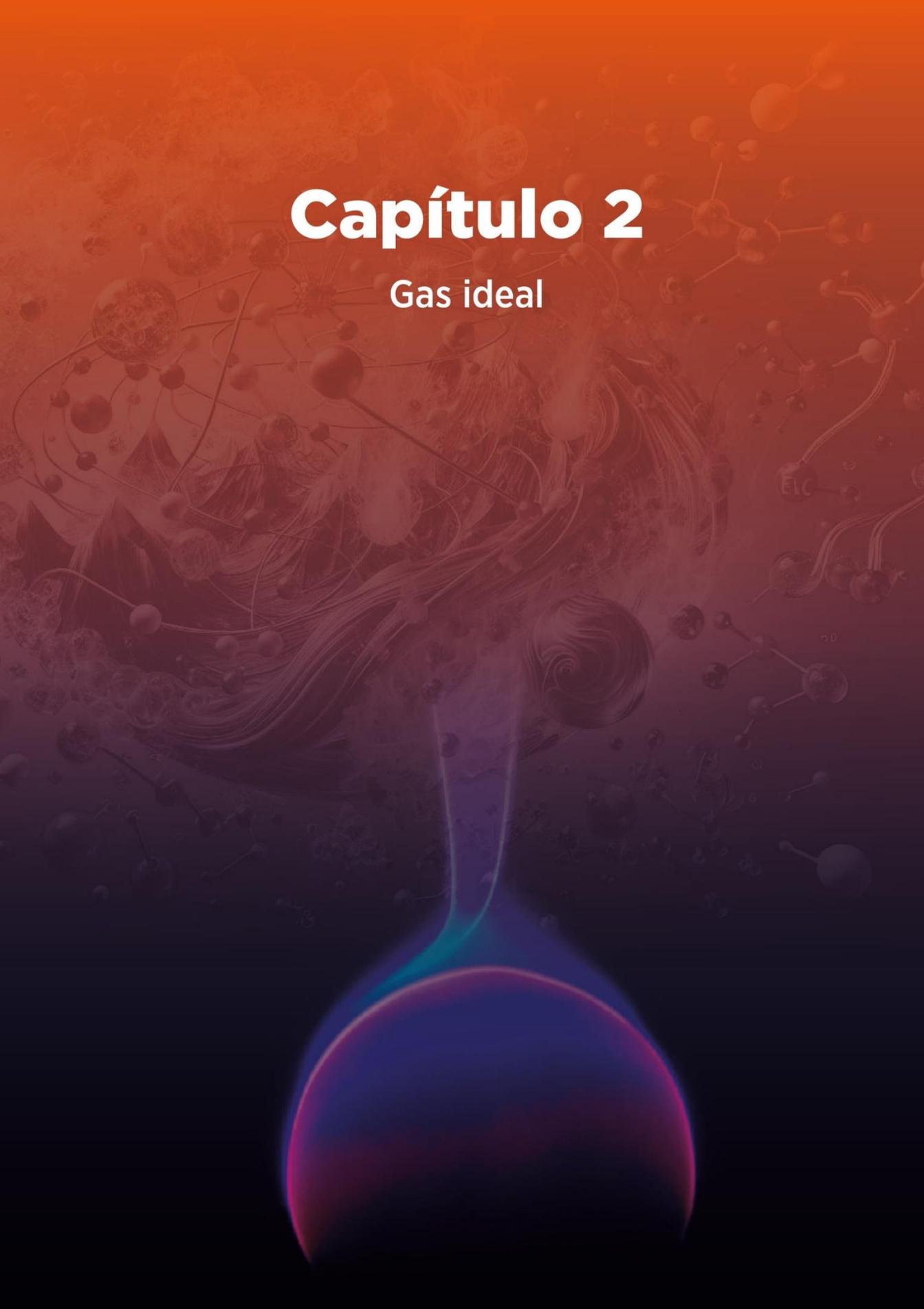
Extensiva

$$dU = m c_v \quad \text{1era ley de Joule}$$

Kcal= Es la capacidad de energía o calor que se suministra a un Kilo de agua para incrementar su temperatura un grado.

Capítulo 2

Gas ideal



Gas ideal

El Capítulo 2 de este libro nos embarca en un viaje fascinante por el universo de los gases ideales, una clase de gases que exhibe un comportamiento simplificado y predecible, lo que la convierte en una herramienta invaluable para comprender los principios básicos de la termodinámica.

Concepto de gas Ideal: Sustancia de trabajo que almacena y cede energía, que cumplen con las leyes de los gases ideales.

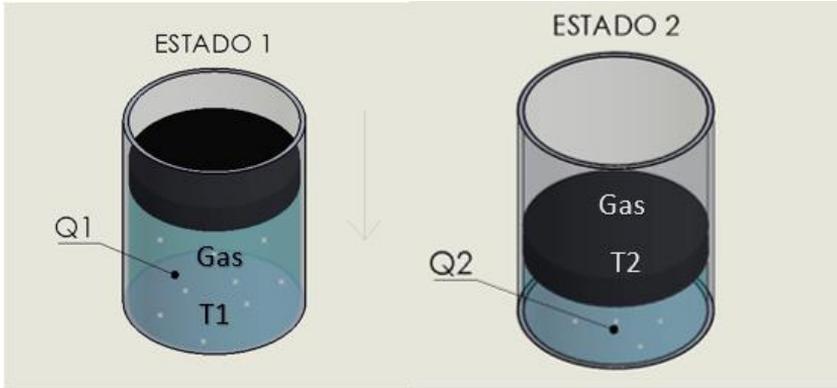
2.1 Leyes de los gases ideales:

- Ley de Boyle-Mariotte $T=\text{cte}$
- Ley de Charles y Gay-Lussac $P=\text{cte}$
- Ley de Charles y Gay-Lussac $V=\text{cte}$
- Ley general de los gases ideales.
- Ley de Joule.

2.1.1 Ley de Boyle-Mariotte T=CTE

Figura 28

Esquema de Ley de Boyle-Mariotte T=CTE

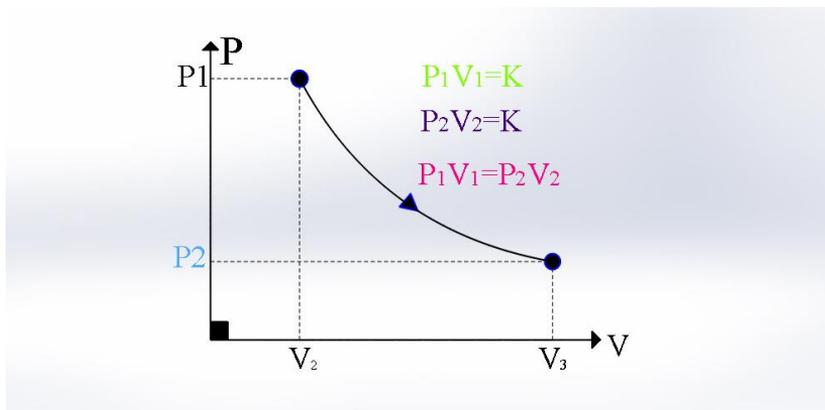


Si la temperatura de un gas permanece constante, la presión varía de forma inversa a su volumen.

$$P \propto \frac{1}{v} \quad P = C \left(\frac{1}{v} \right) \quad P_v = C$$

Figura 29

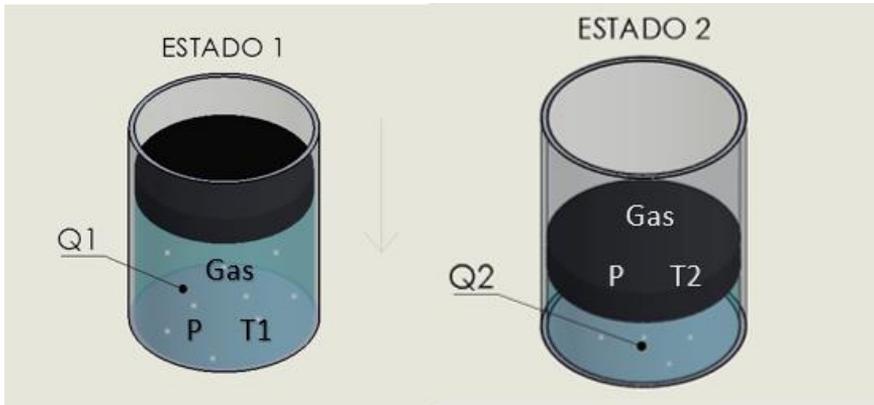
Diagrama termodinámico de Ley de Boyle-Mariotte T=CTE



2.1.2 Ley de Charles y Gay-Lussac $P=CTE$

Figura 30

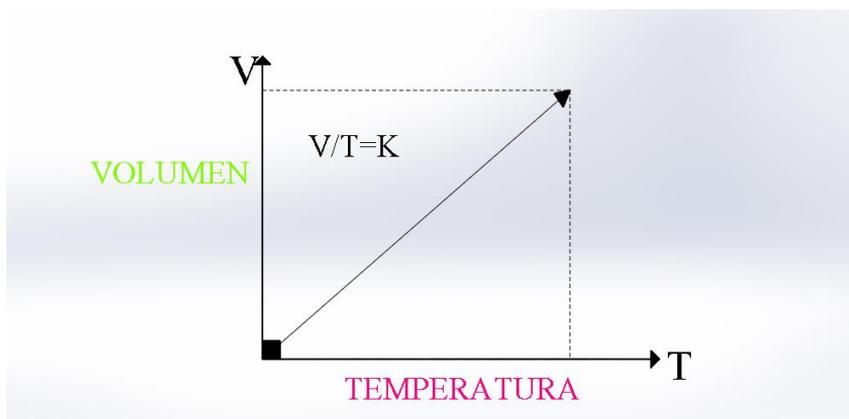
Esquema de Ley de Charles y Gay-Lussac $P=CTE$



Si la presión de un gas ideal permanece constante, su volumen varía de forma directa con su temperatura.

Figura 31

Diagrama termodinámico de Ley de Charles y Gay-Lussac $P=CTE$



$$v \propto T \rightarrow v = CT \rightarrow \frac{v}{T} = C$$

$$y = mx$$

$$\frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2} = \frac{v_3}{T_3} = \dots = \frac{v_n}{T_n} \rightarrow P = cte$$

$$\frac{v_o}{T_o} = \frac{v_f}{T_f}$$

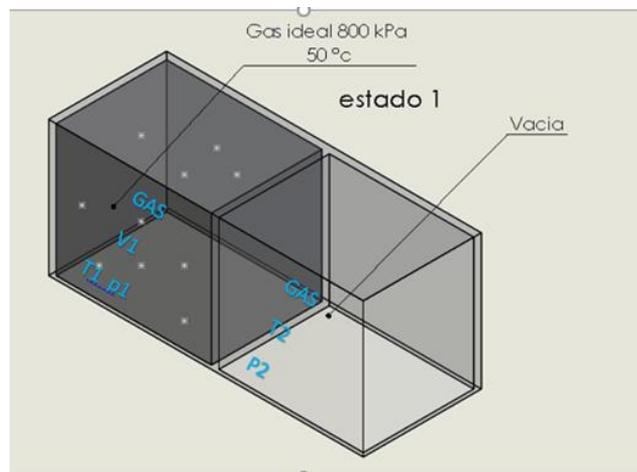
Ejemplos de procesos de presión constante

Calderas, condensadores, evaporadores, regeneradores, intercambiadores de calor.

2.1.3 Ley de Charles y Gay-Lussac $V=CTE$

Figura 32

Esquema de Ley de Charles y Gay-Lussac $V=CTE$



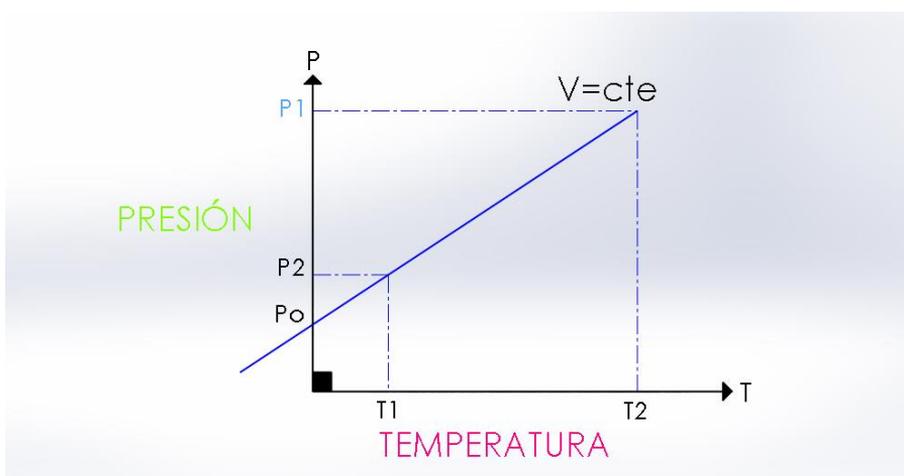
Si el volumen de un gas ideal permanece constante, su presión varía de forma directa con su temperatura.

$$P \propto T \rightarrow P = CT$$

Esta ley está presente en recipientes rígidos, vasijas, tanques o cualquier recipiente con fronteras cerradas sin fronteras móviles.

Figura 33

Diagrama termodinámico de Ley de Charles y Gay-Lussac $V=CTE$



$$\frac{P_o}{T_o} = \frac{P_f}{T_f} \rightarrow v = cte$$

2.1.4 Ley general de los gases ideales:

Ley de Boyle-Mariotte $T=cte \rightarrow P v = C$

Ley de Charles y Gay-Lussac $P=cte \rightarrow \frac{v}{T} = C$

Ley de Charles y Gay-Lussac $V=cte \rightarrow \frac{P}{T} = C$

$$\frac{P v}{T} = R \rightarrow \text{Constante particular de los gases ideales}$$

$$\frac{P_1 v_1}{T_1} = \frac{P_2 v_2}{T_2} = \frac{P_3 v_3}{T_3} = \dots = \frac{P_n v_n}{T_n}$$

$$\frac{P_o v_o}{T_o} = \frac{P_f v_f}{T_f}$$

$$Pv = RT$$

UNIDADES

SI

Inglés

P = Presión absoluta

kPa

$\frac{lbf}{ft^2} = psf$

$\vartheta = \text{volumen específico}$

$\frac{m^3}{kg}$

$\frac{ft^3}{lbm}$

T = Temperatura absoluta

K

°R

R = Constante particular de los gases

$$\frac{kJ}{kg K} \rightarrow \text{TA2}$$

$$\frac{lbm ft}{lbm ^\circ R} \rightarrow \text{TA2} - E$$

V = Volumen Total

m^3

ft^3

m = masa

kg

lbm

$$PV = n \bar{R} T$$

n = número de moles

Kmol

lbm mol

$\bar{R} = \text{constante universal de los gases}$ 8,31447 1,98588

$$\frac{kJ}{Kmol K}$$

$$\frac{BTU}{lbm ^\circ R}$$

$$M = 31,999 \frac{kg}{Kmol}$$

$$\bar{R} = MR \rightarrow R = \frac{\bar{R}}{M} = \frac{8,31447}{31,999} = 0,2598 \frac{kJ}{kg K}$$

2.1.5 Ley de Joule

Primera ley de Joule

La variación de energía interna de un gas ideal es solo función de su temperatura.

Intensiva

$$d\mu = c_v dt$$

$$d\mu = c_p dt$$

Extensiva

$$d\mu = m c_v dt$$

$$dh = m c_p dt$$

Segunda ley de Joule

La variación de entalpía de un gas ideal es solo función de su temperatura.

$$H = U + PV$$

$$PV = mRT$$

$$dH = du + d(Pv)$$

$$m c_p dt = mc_v dT + d(mRt)$$

$$m c_p dt = mc_v dT(+mRd)$$

$$c_p = c_v + R = \text{Mayer}$$

$$\text{Relaciones de los calores especificos } k = \frac{c_p}{c_v}$$

2.2 Ejemplos # 1

Un cilindro-émbolo contiene 2lb de butano a 120 °F y 80 psia se añade calor hasta que su temperatura llega a 300 °F, para calores específicos variables, determine:

- Variación de entalpía en Btu.
- Variación de energía interna en Btu.
- Trabajo no fluente en Btu.
- Calor en Btu.

Para calores específicos constantes:

- Variación de entalpía.
- Variación de energía interna.
- Trabajo no fluente.
- Calor en Btu.

Datos:

$$P = \text{cte.}$$

$$m = 2\text{lb}$$

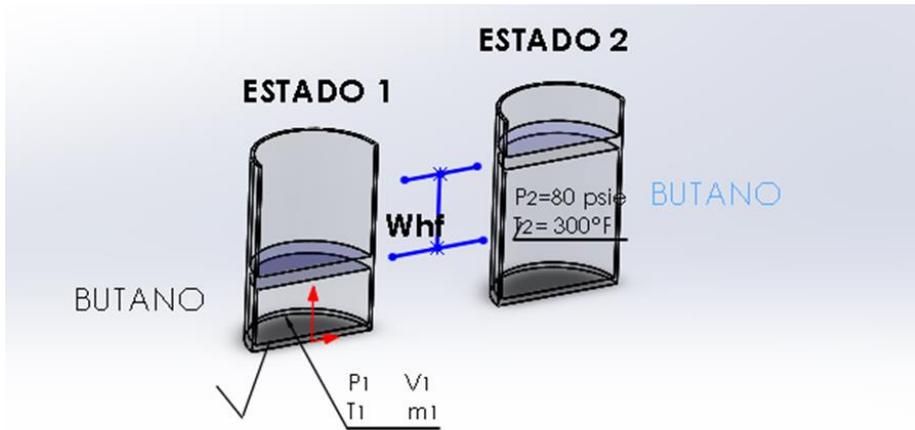
$$T_1 = 120 \text{ °F} = 580 \text{ °R}$$

$$P_1 = 80 \text{ psia} = 11\,520 \frac{\text{lb}_f}{\text{ft}^2}$$

$$T_2 = 300 \text{ °F} = 760 \text{ °R}$$

Figura 34

Figura de Ejemplo 1- Ley de gases Ideales



Butano

$$R = 0,03424 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm}} = \frac{26,64 \text{ lbf ft}}{\text{lbm } ^\circ\text{R}}$$

$$c_p = 0,415 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm } ^\circ\text{R}}$$

$$c_v = 0,381 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm } ^\circ\text{R}}$$

Variable

- $\Delta H = ?$
- $\Delta U = ?$
- $W_{nF} = ?$
- $Q = ?$

Cte

- $$\begin{aligned} \Delta H &= ? \\ \Delta U &= ? \\ W_{nF} &= ? \\ Q &= ? \end{aligned}$$

	<i>Estado 1</i>	<i>Estado 2</i>
P [psf]	11 520	11 520
T [°R]	580	760
V [ft ³]	2,682	3,515
m [lbm]	2	2

$$PV = m R T$$

$$V = \frac{mRT}{P} = \frac{(2\text{lbm})\left(26,64 \frac{\text{lbf ft}}{\text{lbm } ^\circ\text{R}}\right)(580 ^\circ\text{R})}{11\,520 \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2}} = 2,682 \text{ ft}^3$$

$$V_2 = \frac{mRT}{P} = \frac{(2\text{lbm})\left(26,64 \frac{\text{lb} \cdot \text{ft}}{\text{lbm} \cdot ^\circ\text{R}}\right)(760 \text{ } ^\circ\text{R})}{11\,520 \frac{\text{lb} \cdot \text{ft}}{\text{ft}^2}} = 3,515 \text{ ft}^3$$

$$dH = m c_p dT$$

$$\int_1^2 dH = m \int_1^2 C_p dT$$

$$H_2 - H_1 = \int_1^2 C_p dT$$

$$C_p = 0,945 + 4,929 \times 10^{-2} T - 1,352 \times 10^{-5} T^2 + 1,433 \times 10^{-9} T^3$$

$$M = 58,124 \frac{\text{lbm}}{\text{lb mol}}$$

$$C_p = 0,01625 + 8,48 \times 10^{-4} T - 2,326 \times 10^{-3} T^2 + 2,465 \times 10^{-11} T^2$$

$$\Delta H = m (225,28 - 137,63)$$

$$\Delta H = (2\text{lbm})\left(87,65 \frac{\text{btu}}{\text{lbm}}\right) = \quad \mathbf{a) \underline{175,3 \text{ Btu}}}$$

$$C_v = C_p - R$$

$$C_v = 0,01799 + 8,48 \times 10^{-4} T - 2,326 \times 10^{-7} T^2 + 2,465 \times 10^{-11} T^3$$

$$\Delta U = m \left(-0,01799 T + \frac{8,48 \times 10^{-4} T^2}{2} - \frac{2,326 \times 10^{-7} T^3}{3} + \frac{2,465 \times 10^{-11} T^4}{4} \right) \Big|_1^2$$

$$\Delta U = 2\text{lbm} (199,25 - 117,77) \frac{\text{Btu}}{\text{lbm}} \quad \mathbf{b) \underline{162,98 \text{ Btu}}}$$

$$W_{nf} = Pd$$

$$W_{nf} = \int_1^2 dV$$

$$W_{nf} = P (V_2 - V_1) = 11520 \frac{\text{lb}f}{\text{ft}^2} (0,833 \text{ ft}^3)$$

$$W_{nf} = 9596,16 \text{ lb}f \text{ ft} \left(\frac{1 \text{ Btu}}{778,169 \text{ lb}f \text{ ft}} \right) = \quad \underline{\text{c) } W_{nf} = 12,33 \text{ Btu}}$$

$$\int_1^2 dQ = \int_1^2 dU + \int_1^2 dV$$

$$Q = \Delta U + W_{nf}$$

$$Q = 162,98 \text{ Btu} + 12,33 \text{ Btu} \quad \underline{\text{d) } 175,3 \text{ Btu}}$$

$$\Delta H = mC_p (T_2 - T_1)$$

$$\Delta H = (2 \text{ lbm}) \left(0,415 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm} \cdot ^\circ \text{R}} \right) (760 - 580)^\circ \text{R} \quad \underline{\text{e) } \Delta H = 149,4 \text{ Btu}}$$

$$\Delta U = mC_v (T_2 - T_1)$$

$$\Delta U = (2 \text{ lbm}) \left(0,381 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm} \cdot ^\circ \text{R}} \right) (760 - 580)^\circ \text{R} \quad \underline{\text{f) } \Delta U = 137,16 \text{ Btu}}$$

$$W_{nf} = \int_1^2 dV$$

$$W_{nf} = P (V_2 - V_1)$$

$$W_{nf} = \left(11520 \frac{\text{lb}f}{\text{ft}^2} \right) (3,5115 - 2,682) \text{ ft}^2$$

$$W_{nf} = (9596,16 \text{ lb}f \text{ ft}) \left(\frac{1 \text{ Btu}}{728,169 \text{ lb}f \text{ ft}} \right) \quad \underline{\text{g) } W_{nf} = 12,33 \text{ Btu}}$$

$$\int_1^2 dQ = \int_1^2 dU + \int_1^2 dV$$

$$Q = \Delta U + W_{nf}$$

$$Q = (437,16 + 12,33) \text{ Btu} \quad \underline{\text{h) } Q = 149,49 \text{ Btu}}$$

2.3 Ejemplos # 2

Ejercicio # 1

Datos:

$$P = aV^2 \rightarrow a = 80 \frac{\text{kPa}}{\text{m}^6}$$

$$m = 0,3 \text{ Kg}$$

$$= 44,01$$

$$\Delta H = ?$$

$$\Delta U = ?$$

$$W_{nF} = ?$$

$$Q = ? \quad \text{kg/Kmol}$$

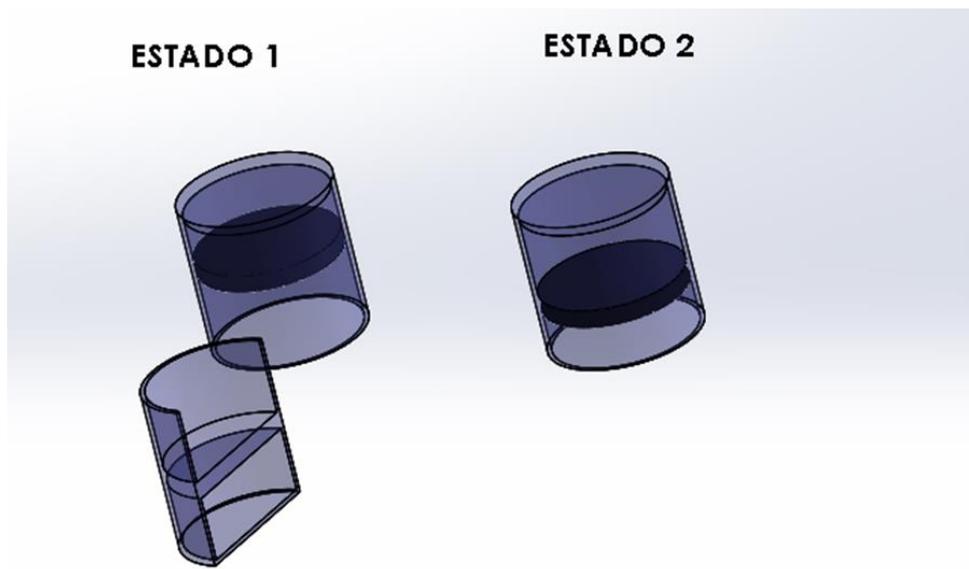
$$V_1 = 0,3 \text{ m}^3$$

$$V_2 = 0,1 \text{ m}^3$$

$$P = 80 \text{ psia} = 11\,520 \frac{\text{lb}_f}{\text{ft}^2}$$

Figura 35

Figura de Ejemplo 2, ejercicio 1 - Ley de gases Ideales



	<i>Estado 1</i>	<i>Estado 2</i>
P [psf]	7,2	0,8
T [K]	38,11	1,412
V [m^3]	0,3	0,1
m [kg]	0,3	0,3

$$P = aV^2$$

$$P_1 = \left(80 \frac{kPa}{m^3}\right) (0,3m^3)^2$$

$$P_1 = 7,2 \text{ kPa}$$

$$P = mRT$$

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

$$T_1 = \frac{(7,2 \text{ kPa})(0,3m^3)}{0,3 \text{ kg} \cdot 0,1889 \frac{kJ \text{ N/m}}{kg \text{ K}}} = 38,11 \text{ K}$$

$$T_2 = \frac{(0,8 \text{ kPa})(0,1m^3)}{0,3 \text{ kg} \cdot 0,1889 \frac{kJ \text{ N/m}}{kg \text{ K}}} = 1,412 \text{ K}$$

$$C_p = 22,26 + 5,981 \times 10^{-2}T - 3,501 \times 10^{-5}T^2 + 7,469 \times 10^{-9}T^3$$

$$C_p$$

$$= \frac{22,26 + 5,981 \times 10^{-2}T - 3,501 \times 10^{-5}T^2 + 7,469 \times 10^{-9}T^3 \text{ kJ/kmol}}{44,01 \frac{kg}{Kmol}}$$

$$C_p = 0,5057 + 1,359 \times 10^{-3}T - 7,955 \times 10^{-7}T^2 + 1,6971 \times 10^{-10}T^3$$

$$C_p = 0.5057 T + \frac{1.359 \times 10^{-3} T}{2} - \frac{7.955 \times 10^{-7} T^3}{3} \\ + \frac{1.6971 \times 10^{-10} T^4}{4} \quad l \begin{matrix} 1,412 \\ 38.11 \end{matrix}$$

$$C_p = (0,7154 - 20.24)$$

$$C_p = -19.52 \frac{kJ}{Kg}$$

$$\Delta H = \left(-19.52 \frac{kJ}{kg} \right) (0.3 kg) = -5,856 kJ$$

Energía interna

$$C_v = 0,3168 + 1359 \times 10^{-3} T - 7955 \times 10^{-7} T^2 + 1,6971 \times 10^{-10} T^3$$

$$C_v = 0,3168 T + \frac{1359 \times 10^{-3} T^2}{2} - \frac{7955 \times 10^{-7} T^3}{3} \\ + \frac{1,6971 \times 10^{-10} T^4}{4} \quad l \begin{matrix} 2 \\ 1 \end{matrix}$$

$$C_v = (0,4487 - 13,04) \frac{kJ}{Kg} = -12,59 \frac{kJ}{Kg}$$

$$\Delta U = \left(-12.59 \frac{kJ}{kg} \right) (0.3 kg) = -3,777 kJ$$

$$W_{nf} = \int_1^2 dV$$

$$W_{nf} = a \frac{V^3}{3} \quad l \begin{matrix} 0.1 \\ 0.3 \end{matrix}$$

$$W_{nf} = a \frac{V^3}{3} \quad l \begin{matrix} 0.1 \\ 0.3 \end{matrix}$$

$$W_{nf} = a \left(\frac{(0.1 \text{ m}^3)^3}{3} - \frac{(0.3 \text{ m}^3)^3}{3} \right)$$

$$W_{nf} = 80 \frac{\text{kPa}}{\text{m}^6} (-8,667 \times 10^{-3} \text{ m}^3) = -0.6934 \text{ kJ}$$

Calor

$$\int_1^2 dQ = \int_1^2 dV + PdV$$

$$Q = \Delta U + W_{nf}$$

$$Q = -3,777 \text{ kJ} - 0,6934 \text{ kJ} = -4,4704 \text{ kJ}$$

Ejercicio # 2

Aire

T = cte.

$$P_1 = 15 \text{ psia} \rightarrow 2160 \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2}$$

$$V = 20 \text{ ft}^3$$

$$P_2 = 90 \text{ psia} \rightarrow 12960 \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2}$$

$$\Delta H = ?$$

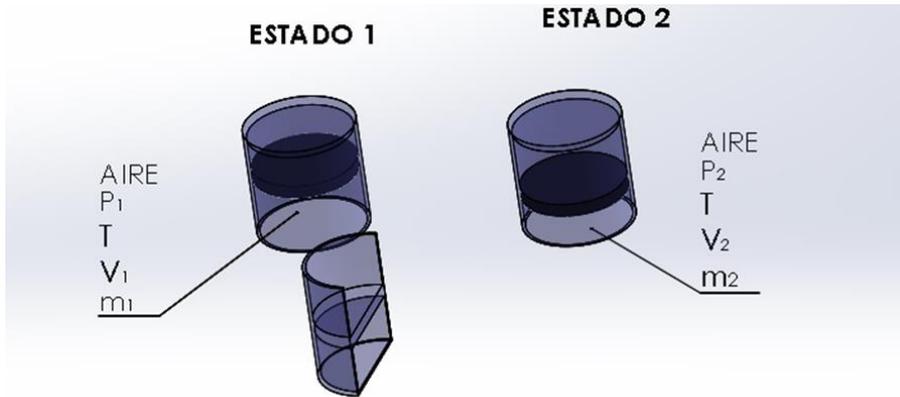
$$\Delta U = ?$$

$$W_{nF} = ?$$

$$Q = ?$$

Figura 36

Figura de Ejemplo 2, ejercicio 2 - Ley de gases Ideales



	<i>Estado 1</i>	<i>Estado 2</i>
P [psf]	2,60	12960
T [°R]	809,85	809,85
V [ft ³]	20	3,333

$$PV = RT$$

$$RO_2 = 0,06859 \frac{Btu}{lbm \text{ } ^\circ R} \frac{778,169 \text{ lbf ft}}{1 \text{ Btu}} = 53,3434 \frac{\text{lbf ft}}{\text{lbm } ^\circ R}$$

$$T = \frac{PV}{R} = \frac{\left(2160 \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2}\right) \left(20 \frac{\text{ft}^3}{\text{lbm}}\right)}{53,3434 \frac{\text{lbf ft}}{\text{lbm } ^\circ R}} = 809.85 \text{ } ^\circ R$$

$$P_o V_o = P_f V_f$$

$$V_f = 3,333 \frac{\text{ft}^3}{\text{lbm}}$$

$$W_{nf} = \int_1^2 \frac{C}{V} PV$$

$$W_{nf} = C (\ln(v)) / 20^{3,33}$$

$$W_{nf} = P_1 V_1 (\ln(3,33) - \ln(20)) \frac{ft^3}{lbm}$$

$$W_{nf} = \left(2100 \frac{lb_f}{ft^2}\right) \left(20 \frac{ft^3}{lbm}\right) (1,793)$$

$$W_{nf} = -77457,6 \frac{lb_f \ ft}{lbm} * \frac{1Btu}{778.169 \ lb_f \ ft} - 99,54 \frac{Btu}{lbm}$$

$$\int_1^2 dQ = \int_1^2 dV + PdV$$

$$Q = \Delta U + W_{nf} = -99,54 \frac{Btu}{lbm}$$

Ejercicio # 3 // // //

Datos

Aire

$$m = 15 \text{ kg}$$

$$T_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C} + 273 = 298 \text{ K}$$

$$T_2 = 95 \text{ }^\circ\text{C} + 273 = 368 \text{ K}$$

$$P_1 = 30 \text{ kPa} \frac{1000 \text{ Pa}}{1 \text{ kPa}} = 30 \ 000 \text{ Pa}$$

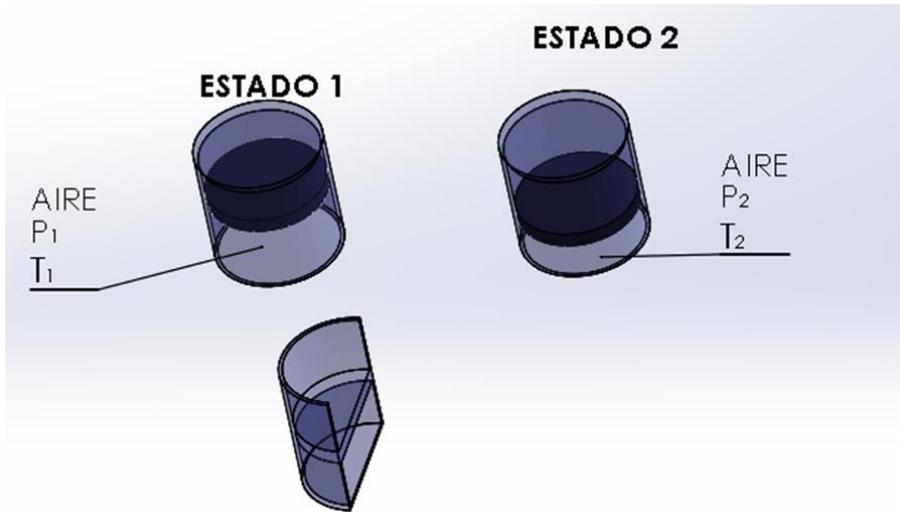
$$Q_{sale} = 60$$

kJ

$$R = 0,2870 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

Figura 37

Figura de Ejemplo 2, ejercicio 3 - Ley de gases Ideales



	<i>Estado 1</i>	<i>Estado 2</i>
P [kPa]	30	30
T [K]	298	368
V [m ³]	4,276	5,281
m [kg]	15	15

$$P_1 V_1 = m R T_1$$

$$V_1 = \frac{m R T_1}{P_1} = \frac{(15 \text{ kg}) \left(0,2870 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right) (298 \text{ K})}{300 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}} = 4,276 \text{ m}^3$$

$$P_1 V_1 = m R T_2$$

$$V_2 = \frac{m R T_2}{P_2} = \frac{(15 \text{ kg}) \left(0,2870 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right) (368 \text{ K})}{300 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}} = 5,281 \text{ m}^3$$

$$\Delta H = m \int_1^2 C_p dT$$

$$C_p = (28,11 + 0,1967 \times 10^{-2} T - 0,4802 \times 10^{-5} T^2 - 1,966 \times 10^{-9} T^3) \frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}}$$

$$M = 28,97 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$$

$$C_p = \frac{c_p}{M}$$

$$C_p = (0,9703 + 6,7898 \times 10^{-5} T + 1,658 \times 10^{-7} T^2 - 6,876 \times 10^{-11} T^3) \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$\Delta H = m \left(0,9703 T + \frac{6,7898 \times 10^{-5} T^2}{2} + \frac{1,658 \times 10^{-7} T^3}{3} - \frac{6,876 \times 10^{-11} T^4}{4} \right) \Big|_{298}^{368}$$

$$\Delta H = (15 \text{ kg}) \left(364,11 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 293,49 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 1059,3 \text{ kJ}$$

$$C_v = C_p - R$$

$$C_v = 0,6833 + 6,7898 \times 10^{-5} T + 1,658 \times 10^{-7} T^2 - 6,876 \times 10^{-11} T^3$$

$$\Delta U = m \int_1^2 C_v dT$$

$$\Delta U = m \left(0,6833 T + \frac{6,7898 \times 10^{-5} T^2}{2} + \frac{1,658 \times 10^{-7} T^3}{3} - \frac{6,876 \times 10^{-11} T^4}{4} \right) \Big|_{298}^{368}$$

$$\Delta H = (15 \text{ kg}) \left(258,495 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 207,97 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 757,875 \text{ kJ}$$

$$W_{nf} = \int_1^2 dV$$

$$W_{nf} = P (V_2 - V_1)$$

$$W_{nf} = \left(300 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right) (5,281 \text{ m}^3 - 4,276 \text{ m}^3) = 304,5 \text{ kJ}$$

Balance de energía

$$E_{entra} = E_{sale} + \Delta E$$

$$W_{elect} = Q + W_{nf} + \Delta U$$

$$W_{elect} = 60 \text{ kJ} + 304,5 \text{ kJ} + 757,875 \text{ kJ}$$

$$W_{elect} = 1122,375 \text{ kJ}$$

2.4 Ejemplos # 3

Ejercicio # 1

Datos:

$$m = 2 \text{ lbm}$$

$$V_1 = 400 \text{ in}^3 \rightarrow 0,2314 \text{ ft}^3$$

$$V_2 = 250 \text{ in}^3 \rightarrow 0,1446 \text{ ft}^3$$

$$P = 0,1 \text{ V}^2 - 5V - 1000$$

$$\Delta H = ?$$

$$\Delta U = ?$$

$$W_{nF} = ?$$

$$Q = ?$$

$$R = 0,1238 \frac{Btu}{lbm R}$$

$$Cp = 0,532 \frac{Btu}{lbm R}$$

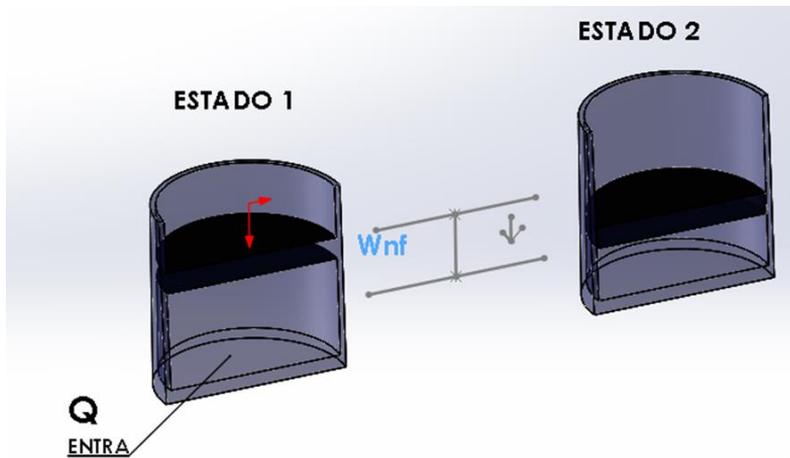
$$Cv = 0,403 \frac{Btu}{lbm R}$$

$$M = 16,043 \frac{lbm}{lb mol}$$

$$R = 96,33 \frac{lb f ft}{lbm R}$$

Figura 38

Figura de Ejemplo 3, ejercicio 1 - Ley de gases Ideales



	<i>Estado 1</i>	<i>Estado 2</i>
$P [psf]$	1 572 000	576 000
$T [^{\circ}R]$	2248,42	432,32
$V [ft^3]$	0,2314	0,1446
$m [lbm]$	2	2

Ley de los gases

$$PV = m R T$$

$$T_1 = \frac{(1872000 \text{ psf})(0,2314 \text{ ft}^3)}{(2 \text{ lbm } 96,33 \text{ lbf ft}) \text{ lbm R}} = 2248,42 \text{ R}$$

$$T_2 = \frac{(576000 \text{ psf})(0,1446 \text{ ft}^3)}{(2 \text{ lbm } 96,33 \text{ lbf ft}) \text{ lbm R}} = 432,32 \text{ R}$$

$$\int_1^2 dH = \int_1^2 m C_p dt$$

$$\Delta H = m \int_1^2 C_p dt$$

$$\Delta H = 2 \text{ lbm} \left(0,2960 T + \frac{4,15508 \times 10^{-4} T^2}{2} + \frac{5,8293 \times 10^{-8} T^3}{3} - \frac{8,811 \times 10^{-11} T^4}{4} \right) \Big|_{2248,42}^{432,32}$$

$$\Delta H = 2 \text{ lbm} (168,1206 - 1753,03)$$

$$\Delta H = -3169,4888 \text{ Btu}$$

$$\int_1^2 dU = \int_1^2 m C_v dT$$

$$\Delta U = 2 \text{ lbm} \left(0,1722 T + \frac{4,15508 \times 10^{-4} T^2}{2} + \frac{5,8293 \times 10^{-8} T^3}{3} - \frac{8,811 \times 10^{-11} T^4}{4} \right) \Big|_{2248,42}^{432,32}$$

$$\Delta U = 2 \text{ lbm} (114,599 - 1995,36)$$

$$\Delta U = -1962,58 \text{ Btu}$$

$$W_{nf} = \int P dv$$

$$W_{nf} = \int_{250}^{400} (0,1 V^2 - 5V - 1000) dv$$

$$W_{nf} = \left(\frac{0,1V^3}{3} \right) - \left(\frac{5V^2}{2} \right) - 1000V \Big|_{250}^{400}$$

$$W_{nf} = \frac{(1\ 333\ 333,333 - 114\ 583,333)}{778,169}$$

$$W_{nf} = 1566,176 \text{ Btu}$$

$$Q = \Delta U + W_{nf}$$

$$Q = -1962,58 \text{ Btu} + 1566,176 \text{ Btu}$$

$$Q = -396,40 \text{ Btu}$$

Ejercicio # 2

$$m = 4 \text{ kg}$$

$$P_1 = 800 \text{ kPa}$$

$$T_1 = 50 \text{ C} \rightarrow 323 \text{ K}$$

$$T_2 = 200 \text{ C} \rightarrow 473 \text{ K}$$

$$C_p = 1,03 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$C_v = 0,68 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$R = C_p - C_v$$

$$R = 0,35 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$\Delta H = ?$$

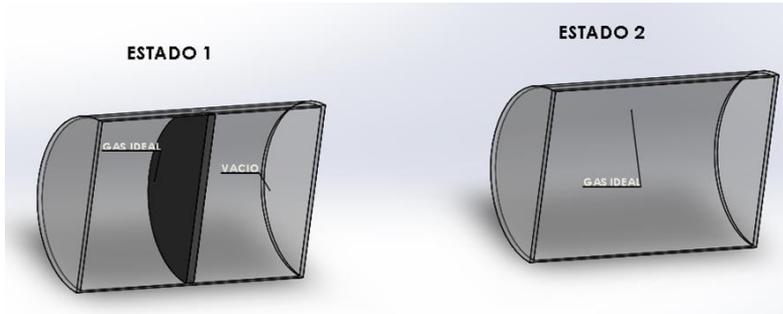
$$\Delta U = ?$$

$$W_{nF} = ?$$

$$Q = ?$$

Figura 39

Figura de Ejemplo 3, ejercicio 2 - Ley de gases Ideales



	<i>Estado 1</i>	<i>Estado 2</i>
P [kPa]	800	586,017
T [K]	323	473
V [m ³]	0,565	1,13
m [kg]	4	4

$$P_1 V_1 = m R T$$

$$V_1 = \frac{m R T_1}{P_1} = \frac{(4 \text{ kg}) \left(0,35 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right) (323 \text{ K})}{800 \text{ kPa}} = 0,565 \text{ m}^3$$

$$V_2 = 0,565 \text{ m}^3 (2) = 1,13 \text{ m}^3$$

$$P_2 = \frac{m R T_2}{V_2} = \frac{(4 \text{ kg}) \left(0,35 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right) (473 \text{ K})}{1,13 \text{ m}^3} = 586,017 \text{ kPa}$$

$$\Delta H = m C_p (T_2 - T_1)$$

$$\Delta H = 4 \text{ kg} (1,03) (473 - 323)$$

$$\Delta H = 618 \text{ kJ}$$

$$W_{nf} = 0$$

$$Q = \Delta U + W_{nf}$$

$$Q = 408 \text{ kJ}$$

$$\Delta U = m C_v(T_2 - T_1)$$

$$\Delta U = 4 \text{ kg} (0,68)(473 - 323)$$

$$\Delta U = 408 \text{ kJ}$$

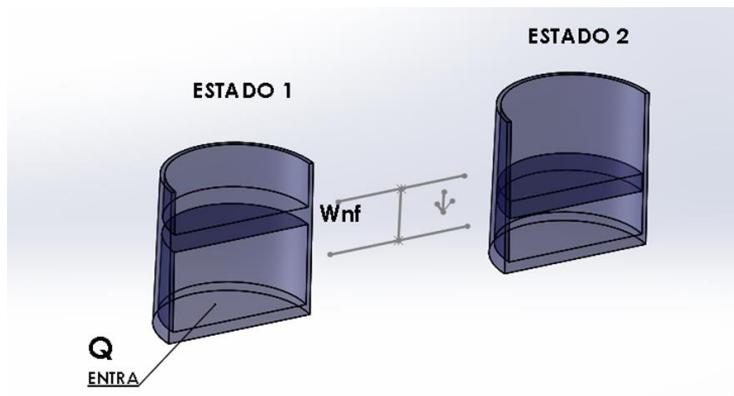
Ejercicio 1

Dispositivo de cilindro - émbolo de carga variable contiene 2 lb de metano, que se comprime de 400 a 250 in^3 . Durante este proceso, la presión y el volumen están relacionados por $P = 0,1V^2 - 5V - 1000$, donde P está en psia y V en in^3 . Determine con calores específicos variables:

- Defina todos los estados en una tabla en unidades inglesas.
- La variación de entalpía.
- La variación de energía interna.
- El trabajo no fluyente.
- El calor.

Figura 40

Figura de Ejercicio 1 - relaciones de energía en gas ideal



Datos

$$m = 2lb$$

$$V_1 = 400 \text{ in}^3 = 0,2315 \text{ ft}^3$$

$$V_2 = 250 \text{ in}^3 = 0,1446 \text{ ft}^3$$

$$P = 0,1V^2 - 5V - 1000$$

$$P \rightarrow \text{psi} \quad V_m^3 \text{ |}$$

Metano

$$R = 0,1238 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}_m \text{ } ^\circ\text{R}} = 96,33 \frac{\text{lb}_f \text{ ft}}{\text{lb}_m \text{ } ^\circ\text{R}}$$

$$cp = 0,532 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}_m \text{ } ^\circ\text{R}}$$

$$cv = 0,403 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}_m \text{ } ^\circ\text{R}}$$

$$M = 16,043 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}_m \text{ } ^\circ\text{R}}$$

Solución

$$P_1 = 0,1 V_1^2 - 5V_1 - 1000$$

$$P_1 = 0,1(400)^2 - 5(400) - 1000$$

$$P_1 = 16000 - 2000 - 1000$$

$$P_1 = 13000 \text{ psi} \left| \frac{144 \text{ psf}}{1 \text{ psi}} \right| = 1872000 \text{ psf}$$

$$P_2 = 0,1 V_2^2 - 5V_2 - 1000$$

$$P_2 = 0,1(250)^2 - 5(250) - 1000$$

$$P_2 = 6250 - 1250 - 1000$$

$$P_2 = 4000 \text{ psi} \left| \frac{144 \text{ psf}}{1 \text{ psi}} \right| = 576000 \text{ psf}$$

	<i>Estado 1</i>	<i>Estado 2</i>
P (psf)	1872 000	576 000
T (°R)	2248,42	432,31
V (ft ³)	0,2315	0,1446
m (lbm)	2	2

$$PV = mRT$$

$$T = \frac{PV}{mR} \quad T_1 = \frac{(1872000 \text{ psf})(0,2315 \text{ ft}^3)}{(2 \text{ lb}_m) \left(76,33 \frac{\text{lb}_f \text{ ft}}{\text{lb}_m \text{ }^\circ\text{R}} \right)} = 2248,42 \text{ }^\circ\text{R}$$

$$T_2 = \frac{(576000 \text{ psf})(0,1446 \text{ ft}^3)}{(2 \text{ lb}_m) \left(96,32 \frac{\text{lb}_f \text{ ft}}{\text{lb}_m \text{ }^\circ\text{R}} \right)} = 432,31 \text{ }^\circ\text{R}$$

$$cv = cp - R$$

$$cp = 4,750 + 0,6666 \times 10^{-2}T + 0,09352 \times 10^{-3}T_2 - 0,4510 \times 10^{-4}T_3$$

$$cp = \frac{cp}{M}$$

$$cp = 0,2961 + 4,1551 \times 10^{-4}T + 5,8293 \times 10^{-8}T^2 - 2,8111 \times 10^{-11}T^3$$

$$\Delta H = m \int cp$$

$$\Delta H = (2lb_m) \left[0,2961T + \frac{4,1551 \times 10^{-4}T^2}{2} + \frac{5,8293 \times 10^{-8}T^3}{3} - \frac{2,8111 \times 10^{-11}T^4}{4} \right]_1$$

$$\Delta H = (2lb_m) [168,1412 - 1758,4668]$$

$$\Delta H = -3180,65 \text{ Btu}$$

$$cu = cv - R$$

$$cu = \left(0,1722T + \frac{4,1551 \times 10^{-4}T^2}{2} + \frac{5,8293 \times 10^{-8}T^3}{3} - \frac{2,8111 \times 10^{-11}T^4}{4} \right)$$

$$\Delta U = (2lb_m) \left(114,59 \frac{\text{Btu}}{lb_m} - 1479,74 \frac{\text{Btu}}{lb_m} \right)$$

$$\Delta U = -2730,3 \text{ Btu}$$

$$Wnf = \int_1^2 Pdv$$

$$Wnf = \int_1^2 0,1V^2 - 5V - 1000$$

$$Wnf = 0,1 \frac{V^3}{3} - \frac{5V^2}{2} - 1000V \Big|_{400}^{250}$$

$$Wnf = (114583,3333 - 1333333,333) \text{ psi} \times \text{in}^3$$

$$W_{nf} = -1218750 \text{ lb}_f \text{ in} \left| \frac{1 \text{ ft}}{12 \text{ in}} \right| = -101562,5 \text{ lb}_f \text{ ft}$$

$$W_{nf} = -101562,5 \text{ lb}_f \text{ ft} \left| \frac{1 \text{ Btu}}{778,169 \text{ lb}_f \text{ ft}} \right|$$

$$W_{nf} = -130,51 \text{ Btu}$$

$$Q = \Delta U + W_{nf}$$

$$Q = -2730,3 \text{ Btu} - 130,51 \text{ Btu}$$

$$Q = -2861,15 \text{ Btu}$$

Ejercicio 2

Un tanque rígido se divide en dos partes iguales mediante una división (figura). Inicialmente, una parte contiene 4 kg de un gas ideal a 800 kPa y 50 °C, y la otra parte está vacía. Se quita la división y se agrega calor hasta que el gas se expande en todo el tanque y su temperatura es de 200°C. Para calores específicos constantes de $c_p=1,03 \text{ kJ/kg K}$ y $c_v=0,68 \text{ kJ/kg K}$. Determine:

- Defina todos los estados en una tabla (SI).
- La variación de entalpía.
- La variación de energía interna.
- El trabajo no fluente.
- El calor.

Figura 41

Figura de Ejercicio 2 estado inicial - relaciones de energía en gas ideal

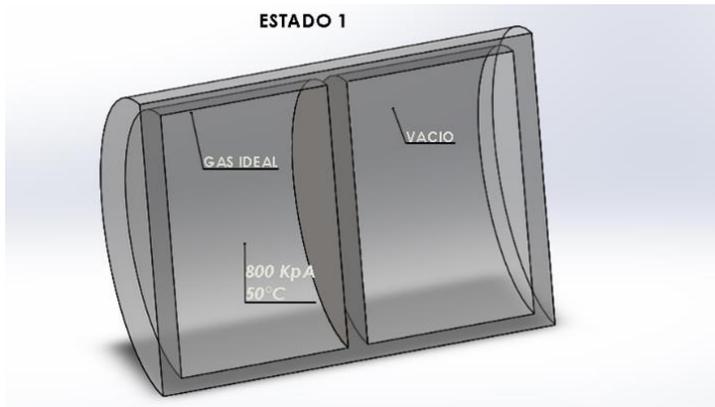
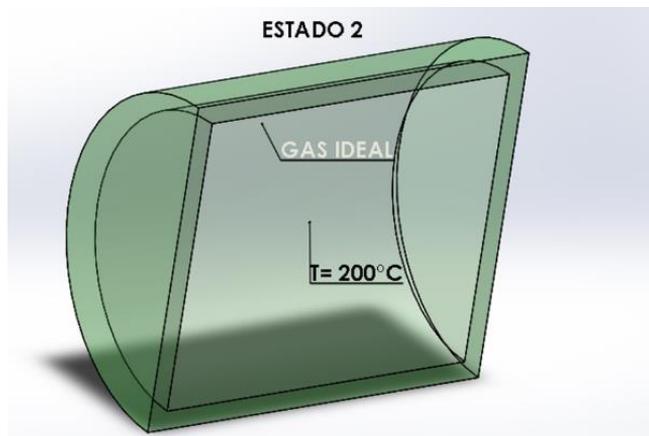


Figura 42

Figura de Ejercicio 2 estado final - relaciones de energía en gas ideal



Datos:

$$m = 4 \text{ kg}$$

$$P_1 = 800 \text{ kPa}$$

$$T_1 = 50 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 323 \text{ K}$$

$$T_2 = 200 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 473 \text{ K}$$

$$P_1 V_1 = m R T_1$$

$$V_1 = \frac{m R T_1}{P_1}$$

$$V_1 = \frac{4 \text{ kg} \left(0,35 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right) 323 \text{ K}}{800 \text{ kPa}}$$

$$V_1 = 0,565 \text{ m}^3$$

$$V_2 = 1,13 \text{ m}^3$$

$$P_2 V_2 = m R T_2$$

$$P_2 = \frac{m R T_2}{V_2}$$

$$P_2 = \frac{4 \text{ kg} \left(0,35 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right) 473 \text{ K}}{1,13 \text{ m}^3}$$

$$P_2 = 586,017 \text{ kPa}$$

	<i>Estado 1</i>	<i>Estado 2</i>
P (kPa)	800	586,017
T (K)	323	473
V (m ³)	0,565	1,13
m (kg)	4	4

$$\Delta H = m c_p (T_2 - T_1)$$

$$\Delta H = 4 \text{ kg} (1,03) (473 \text{ K} - 323 \text{ K})$$

$$\Delta H = 618 \text{ kJ}$$

$$\Delta U = m c_v (T_2 - T_1)$$

$$\Delta U = 4 \text{ kg} (0,68) (473 \text{ K} - 323 \text{ K})$$

$$\Delta U = 408 \text{ kJ}$$

$$W_{nf} = 0$$

$$Q = \Delta U + W_{nf}$$

$$Q = 408 \text{ kJ} + 0$$

$$Q = 408 \text{ kJ}$$

Gas ideal

A. **Gas ideal:** el gas ideal es una sustancia de trabajo que almacena y sede energía

B. **Gas real:** el gas real es el que cumple con las leyes de los gases.

2.5 Entropía

La entropía permite cuantificar el orden. No existe una máquina de movimiento perpetuo que todo proceso degrada la energía y esto se evidencia como un incremento de la entropía del proceso.

Ecuaciones de entropía

$$ds > \frac{dQ}{T}$$

Ecuaciones de entropía

$$\text{Proceso I} \quad ds = \frac{m c_r dt}{T} + \frac{F'}{T} \quad \text{Proceso Real}$$

$$ds = \frac{dQ}{T}$$

$$ds > \frac{dQ}{T}$$

$$ds = \frac{du + Pdv}{T}$$

$$Pv = mRT$$

$$\frac{P}{T} = \frac{mR}{V}$$

$$ds = m c_v \frac{dT}{T} + mR \frac{dV}{V}$$

Hay que recordar que: $\int \frac{dx}{x} = \ln x$

Proceso ideal

$$ds = \frac{dH - VdP}{T}$$

$$ds = m c_p \frac{dT}{T} - \frac{VdP}{T}$$

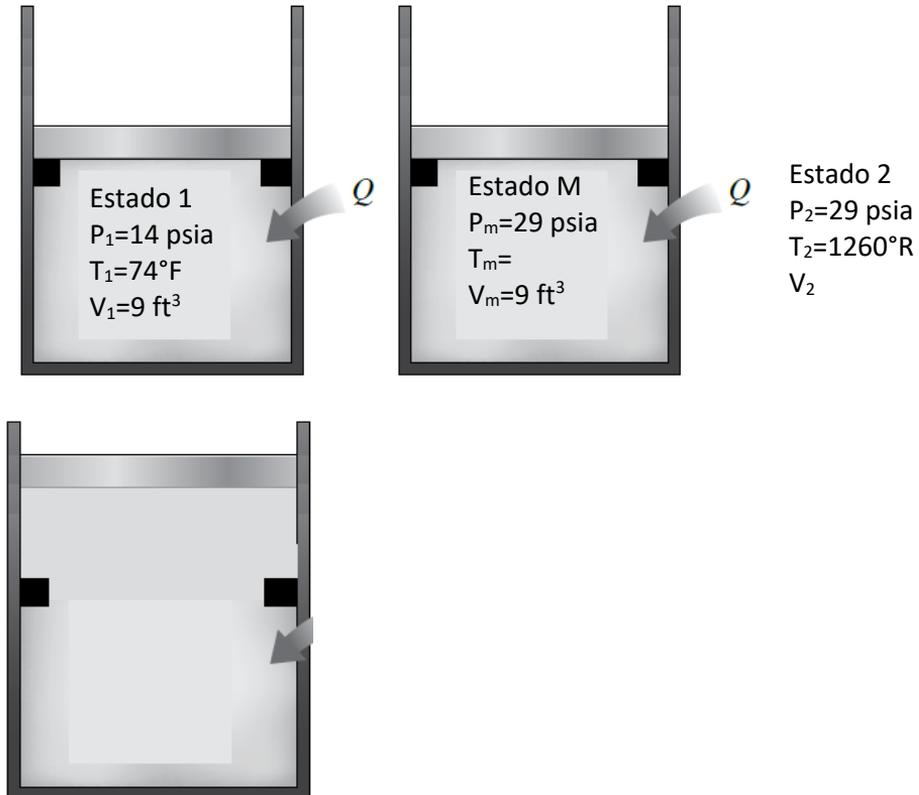
$$ds = m c_p \frac{dT}{T} - mR \frac{dP}{P}$$

Ejemplo

Un dispositivo de cilindro provisto de un cilindro-pistón contiene dióxido de carbono. El émbolo descansa inicialmente en un conjunto de topes, y se necesita una presión de 29 psia para mover el émbolo a presión constante. Inicialmente, el dióxido de carbono está a 14 psia y 74 °F, y ocupa un volumen de 9 ft³. Se transfiere calor al dióxido de carbono hasta que su temperatura es 1260°R.

Figura 43

Figura de Ejemplo final - relaciones de energía en gas ideal



Análisis antes de resolver el ejercicio

El émbolo está descansando sobre los topes desde el estado inicial (1) hasta el estado intermedio (M) el proceso es a volumen constante. Ya que al introducir calor desde el estado 1 – M, la presión se va a elevar hasta el valor de 29 psia (4176 psf).

Cómo se sigue introduciendo calor, ahora desde el estado M al estado final (2), es un proceso a presión constante y el émbolo se mueve, generando un trabajo de frontera.

Solo con los datos:

	<i>Estado 1</i>	<i>Estado M</i>	<i>Estado 2</i>
Presión en psf	2016	4176	4176
Volumen en ft ³	9	9	?
Temperatura en °R	534	?	1260
Masa en lb	?	?	?

Para definir el estado 1, según la tabla falta la masa y siguiendo las recomendaciones de las diapositivas se utiliza la ecuación de estado:

$$P_1 V_1 = m_{CO_2} R_{CO_2} T_1$$

$$R_{CO_2} = 0,04513 \frac{Btu}{lbm \text{ } ^\circ R} = 35,119 \frac{lb f ft}{lbm \text{ } ^\circ R}$$

$$m_{CO_2} = \frac{P_1 V_1}{R_{CO_2} T_1}$$

$$m_{CO_2} = \frac{\left(2016 \frac{lb f}{ft^2}\right) (9 ft^3)}{\left(35,119 \frac{lb f ft}{lbm \text{ } ^\circ R}\right) (534 \text{ } ^\circ R)} = 0,9675 lbm$$

Para definir el estado intermedio M, como ya se conoce la masa lo único que falta es la temperatura.

Entonces con la ecuación de estado se tiene:

$$P_M V_M = m_{CO_2} R_{CO_2} T_M$$

$$T_M = \frac{P_M V_M}{m_{CO_2} R_{CO_2}}$$

$$T_M = \frac{\left(4176 \frac{\text{lb} \cdot \text{ft}}{\text{ft}^2}\right) (9 \text{ ft}^3)}{(0,9675 \text{ lbm}) \left(35,119 \frac{\text{lb} \cdot \text{ft}}{\text{lbm} \cdot \text{°R}}\right)} = 1106,14 \text{ °R}$$

Para definir el estado 2, como ya se tiene la masa solo se despeja de la ecuación de estado:

$$P_2 V_2 = m_{CO_2} R_{CO_2} T_2$$

$$V_2 = \frac{m_{CO_2} R_{CO_2} T_2}{P_2}$$

$$V_2 = \frac{(0,9675 \text{ lbm}) \left(35,119 \frac{\text{lb} \cdot \text{ft}}{\text{lbm} \cdot \text{°R}}\right) (534 \text{ °R})}{\left(4176 \frac{\text{lb} \cdot \text{ft}}{\text{ft}^2}\right)} = 10,25 \text{ ft}^3$$

Para contestar la pregunta se analiza desde el estado inicial hasta el estado final.

	<i>Estado 1</i>	<i>Estado 2</i>
Presión en psf	2016	4176
Volumen en ft ³	9	10,25
Temperatura en °R	534	1260
Masa en lb	0,9675	0,9675

Determine el trabajo de frontera realizado en Btu.

El trabajo de frontera solo existe desde el Estado M al estado 2 y ocurre a presión constante.

La fórmula del trabajo de frontera de las diapositivas es:

$$W_{nf} = \int_M^2 P dV$$

Como la presión es constante se integra:

$$\begin{aligned} W_{nf} &= P_{M-2}(V_2 - V_M) \\ W_{nf} &= \left(4176 \frac{\text{lb}f}{\text{ft}^2}\right) (10,25 \text{ ft}^3 - 9 \text{ ft}^3) \\ &= 5227,69 \frac{\text{lb}f \text{ ft}}{\left| \frac{1 \text{ Btu}}{778,169 \text{ lb}f \text{ ft}} \right|} = 6,7179 \text{ Btu} \end{aligned}$$

Con calores específicos variables determine:

La variación de entalpía en Btu

$$\Delta H = ?$$

$$dH = mc_p dT \quad \text{Ley de Joule}$$

$$\int_1^2 dH = \int_1^2 mc_p dT$$

$$\Delta H = m \int_1^2 c_p dT$$

$$\bar{c}_p = 5,316 + 0,79361 \times 10^{-2} T - 0,2581 \times 10^{-5} T^2 +$$

$$0,3059 \times 10^{-9} T^3 \quad \frac{\text{Btu}}{\text{lbmol} \cdot ^\circ R} \quad \text{Tabla A2-E}$$

$$M = \frac{m}{n} = 44,01 \frac{\text{lbm}}{\text{lbmol}}$$

$$c_p = \frac{\bar{c}_p}{M}$$

$$= \frac{5,316 + 0,79361 \times 10^{-2} T - 0,2581 \times 10^{-5} T^2 + 0,3059 \times 10^{-9} T^3}{44,01 \frac{\text{lbm}}{\text{lbmol}}} \frac{\text{Btu}}{\text{lbmol} \text{ } ^\circ\text{R}}$$

$$c_p = 0,12079 + 1,80325 \times 10^{-4} T - 5,86458 \times 10^{-8} T^2 + 6,95096 \times 10^{-12} T^3 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm} \text{ } ^\circ\text{R}}$$

$$\Delta H = m \int_1^2 (0,12079 + 1,80325 \times 10^{-4} T - 5,86458 \times 10^{-8} T^2 + 6,95096 \times 10^{-12} T^3) dT$$

$$\Delta H = m \left(0,12079 T + \frac{1,80325 \times 10^{-4} T^2}{2} - \frac{5,86458 \times 10^{-8} T^3}{3} + \frac{6,95096 \times 10^{-12} T^4}{4} \right) \Bigg|_{534^\circ\text{R}}^{1260^\circ\text{R}}$$

$$\Delta H = 167,6067 \text{ Btu}$$

La variación de energía interna en Btu:

$$c_p = 0,12079 + 1,80325 \times 10^{-4} T - 5,86458 \times 10^{-8} T^2 + 6,95096 \times 10^{-12} T^3 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm} \text{ } ^\circ\text{R}}$$

$$c_v = c_p - R$$

$$c_v = 0,12079 + 1,80325 \times 10^{-4} T - 5,86458 \times 10^{-8} T^2 + 6,95096 \times 10^{-12} T^3 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm} \text{ } ^\circ\text{R}} - 0,04513 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm} \text{ } ^\circ\text{R}}$$

$$c_v = 0,07566 + 1,80325 \times 10^{-4} T - 5,86458 \times 10^{-8} T^2$$

$$+ 6,95096 \times 10^{-12} T^3 \frac{Btu}{lbm \text{ } ^\circ R}$$

$$\int_1^2 dU = \int_1^2 m c_v dT$$

$$\Delta U = m \int_1^2 c_v dT$$

$$\Delta U = m \int_1^2 (0,07566 + 1,80325 \times 10^{-4} T - 5,86458 \times 10^{-8} T^2$$

$$+ 6,95096 \times 10^{-12} T^3) dT$$

$$\Delta U = m \left(0,07566 T + \frac{1,80325 \times 10^{-4} T^2}{2} - \frac{5,86458 \times 10^{-8} T^3}{3}$$

$$+ \frac{6,95096 \times 10^{-12} T^4}{4} \right) \Bigg|_{534^\circ R}^{1260^\circ R}$$

$$\Delta U = 135,907 \text{ Btu}$$

La variación de entropía en Btu/°R:

$$\int_1^2 dS = \int_1^2 \frac{m c_p dT}{T} - \int_1^2 \frac{m R dP}{P}$$

$$\Delta S = m \int_1^2 \frac{c_p dT}{T} - m R \int_1^2 \frac{dP}{P}$$

ΔS

$$= m \int_1^2 \frac{(0,12079 + 1,80325 \times 10^{-4} T - 5,86458 \times 10^{-8} T^2 + 6,95096 \times 10^{-12} T^3) dT}{T}$$

$$- m R \int_1^2 \frac{dP}{P}$$

$$\Delta S = \int_1^2 \left(\frac{0,12079dT}{T} + \frac{1,80325x10^{-4}TdT}{T} - \frac{5,86458x10^{-8}T^2dT}{T} - \frac{(6,95096x10^{-12}T^3)dT}{T} \right) - mR \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

$$\Delta S = \int_1^2 \left(\frac{0,12079dT}{T} + 1,80325x10^{-4}dT - 5,86458x10^{-8}T^1dT + 6,95096x10^{-12}T^2dT \right) - R \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

$$\Delta S = \left(0,12079 \ln T + 1,80325x10^{-4}T - \frac{5,86458x10^{-8}T^2}{2} + \frac{6,95096x10^{-12}T^3}{3} \right) \Bigg|_{534^{\circ}R}^{1260^{\circ}R} - R \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

$$\Delta S = 0,16238 \frac{Btu}{^{\circ}R}$$

El calor en Btu

De las ecuaciones de calor:

$$\partial Q = dU + PdV$$

$$\partial Q = dH - VdP$$

$$\partial Q = TdS$$

Se toma la primera ecuación y se integra:

$$\partial Q = dU + PdV$$

$$\int_1^2 \partial Q = \int_1^2 dU + \int_1^2 PdV$$

$$Q = \Delta U_{1-2} + W_{nf1-2}$$

$$Q = 135,907 \text{ Btu} + 6,7179 \text{ Btu} = 142,62 \text{ Btu}$$

Con calores específicos constantes determine:

La variación de energía interna en Btu:

$$\int_1^2 dU = \int_1^2 mc_v dT$$

$$\Delta U = mc_v \int_1^2 dT$$

$$\Delta U = mc_v(T_2 - T_1)$$

$$\Delta U = (0,9675 \text{ lbm}) \left(0,158 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm} \cdot ^\circ\text{R}} \right) (1260 \text{ } ^\circ\text{R} - 534 \text{ } ^\circ\text{R})$$

$$\Delta U = 110,98 \text{ Btu}$$

La variación de entalpía en Btu:

$$\int_1^2 dH = \int_1^2 mc_p dT$$

$$\Delta H = mc_p \int_1^2 dT$$

$$\Delta H = mc_p(T_2 - T_1)$$

$$\Delta H = (0,9675 \text{ lbm}) \left(0,203 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm} \cdot ^\circ\text{R}} \right) (1260 \text{ } ^\circ\text{R} - 534 \text{ } ^\circ\text{R})$$

$$\Delta H = 142,58 \text{ Btu}$$

La variación de entropía en Btu/°R:

$$\int_1^2 dS = \int_1^2 \frac{mc_p dT}{T} - \int_1^2 \frac{mR dP}{P}$$

$$\Delta S = mc_p \int_1^2 \frac{dT}{T} - mR \int_1^2 \frac{dP}{P}$$

$$\Delta S = mc_p \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - mR \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

$$\Delta S = (0,9675 \text{ lbm}) \left(0,203 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm } ^\circ\text{R}}\right) \ln\left(\frac{1260^\circ\text{R}}{534^\circ\text{R}}\right)$$

$$- (0,9675 \text{ lbm}) \left(0,04513 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm } ^\circ\text{R}}\right) \ln\left(\frac{4176 \text{ psf}}{2016 \text{ psf}}\right)$$

$$\Delta S = 0,1369 \frac{\text{Btu}}{^\circ\text{R}}$$

El calor en Btu

De las ecuaciones de calor:

$$\partial Q = dU + PdV$$

$$\partial Q = dH - VdP$$

$$\partial Q = TdS$$

Se toma la primera ecuación y se integra:

$$\partial Q = dU + PdV$$

$$\int_1^2 \partial Q = \int_1^2 dU + \int_1^2 PdV$$

$$Q = \Delta U_{1-2} + W_{nf1-2}$$

$$Q = 110,98 \text{ Btu} + 6,7179 \text{ Btu} = 117,698 \text{ Btu}$$

Parte c) El error porcentual entre las respuestas de la parte a y b:

$$\%Error = \frac{(\Delta U_{cvariable} - \Delta U_{cvconstante})}{\Delta U_{cvariable}}$$
$$\%Error = \frac{(\Delta U_{cvariable} - \Delta U_{cvconstante})}{\Delta U_{cvariable}}$$

Error en la variación de energía interna en %:

$$\%Error = \frac{(\Delta U_{cvariable} - \Delta U_{cvconstante})}{\Delta U_{cvariable}} = 18,38\%$$

Error en la variación de entalpía en %:

$$\%Error = \frac{(\Delta H_{cvariable} - \Delta H_{cpconstante})}{\Delta H_{cvariable}} = 14,93\%$$

Error en el calor en %:

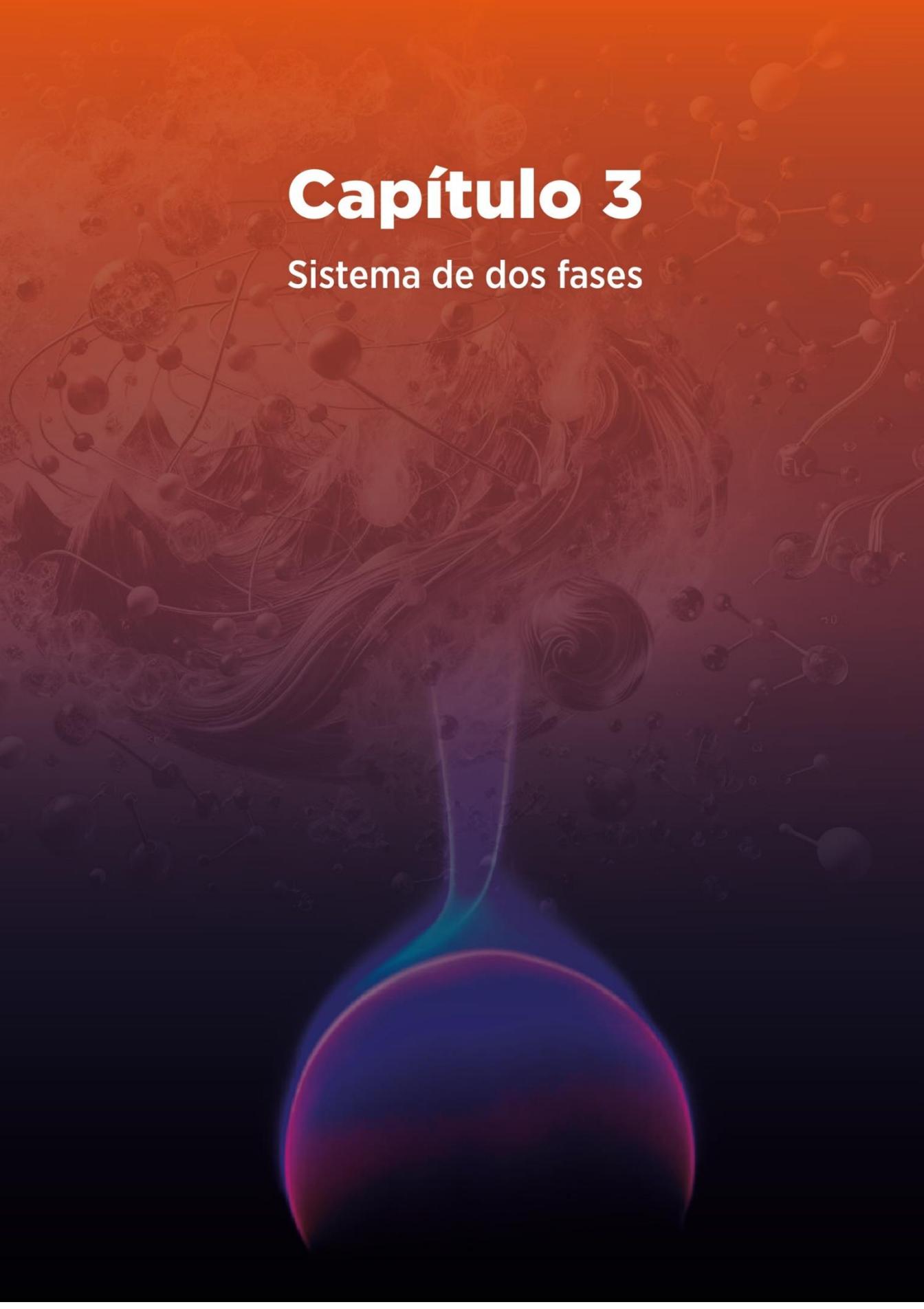
$$\%Error = \frac{(Q_{cvariable} - Q_{cpconstante})}{Q_{cvariable}} = 17,48\%$$

Error en la variación de entropía en %:

$$\%Error = \frac{(\Delta S_{variable} - \Delta S_{constante})}{\Delta S_{variable}} = 15,75\%$$

Capítulo 3

Sistema de dos fases





Capítulo

3

Sistema de dos fases

El Capítulo 3 de este libro nos invita a sumergirnos en el universo de los sistemas de dos fases, un área de estudio fundamental en la termodinámica que analiza el comportamiento de mezclas que coexisten en dos fases distintas, como líquido y vapor, sólido y líquido, o sólido y gas.

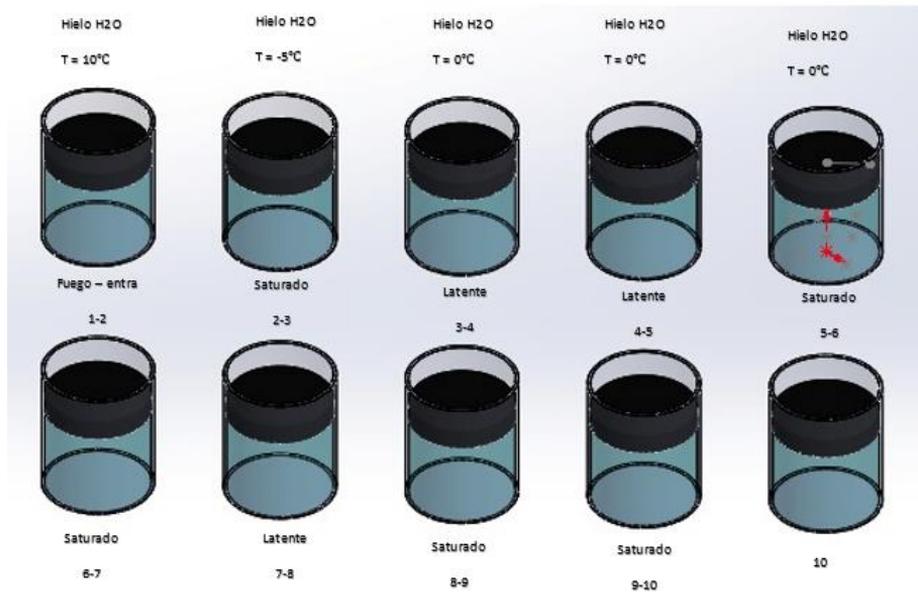
Equilibrio termodinámico:

- Equilibrio térmico.
- Equilibrio mecánico.
- Equilibrio químico.

(Estados de equilibrio)

Figura 44

Esquematación del cambio de fase en un experimento a presión constante



3.1 Calor sensible

Es la energía que almacena o cede una distancia a presión constante para variar su temperatura.

3.2 Calor latente

Es la energía que almacena o sede una sustancia o presión y temperatura constante para su cambio o generar un cambio de fase.

3.3 Vapor húmedo

Es la mezcla de vapor saturado o líquido saturado.

- Líquido comprimido ← → Subenfriado
- Vapor sobrecalentado ← → Recalentado

Figura 45

Diagrama termodinámico P - v con curva de saturación con zonas de fases

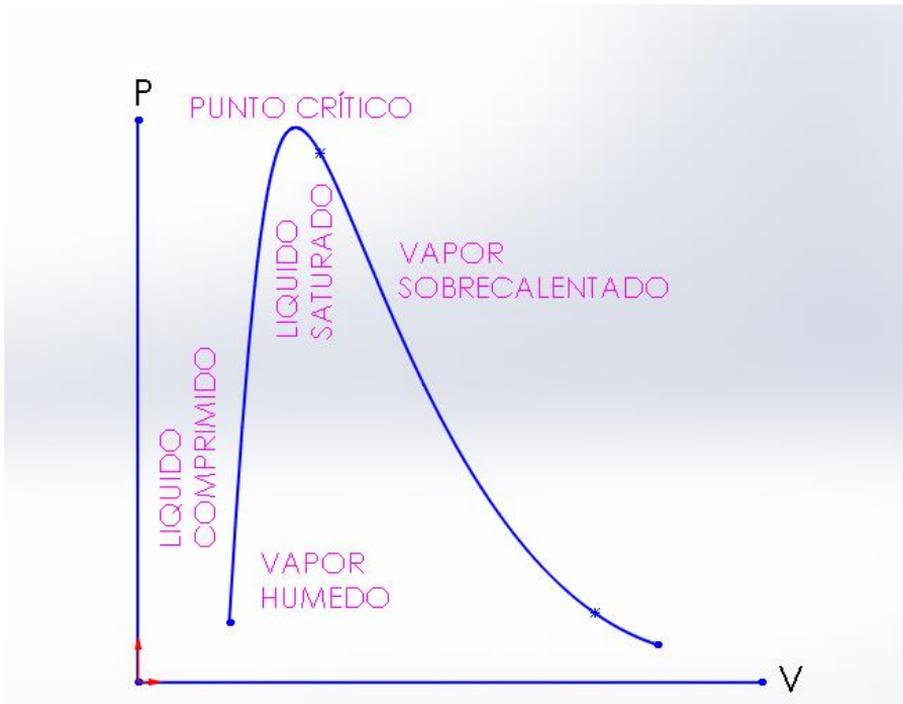


Figura 46

Diagrama termodinámico $h - s$ con curva de saturación con zonas de fases

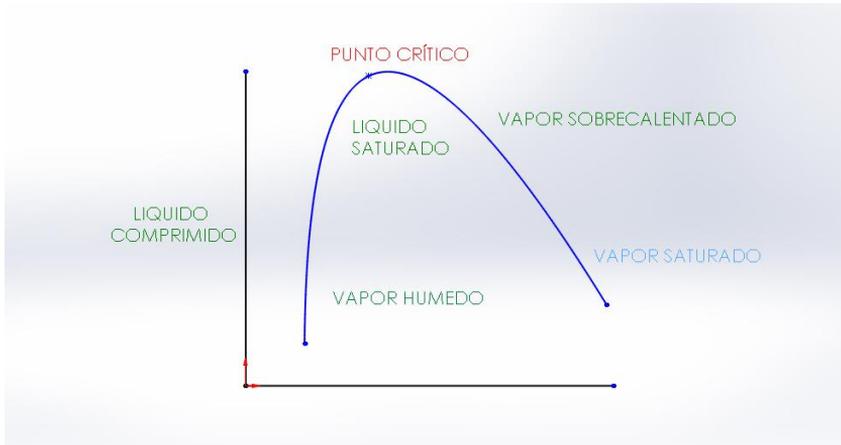
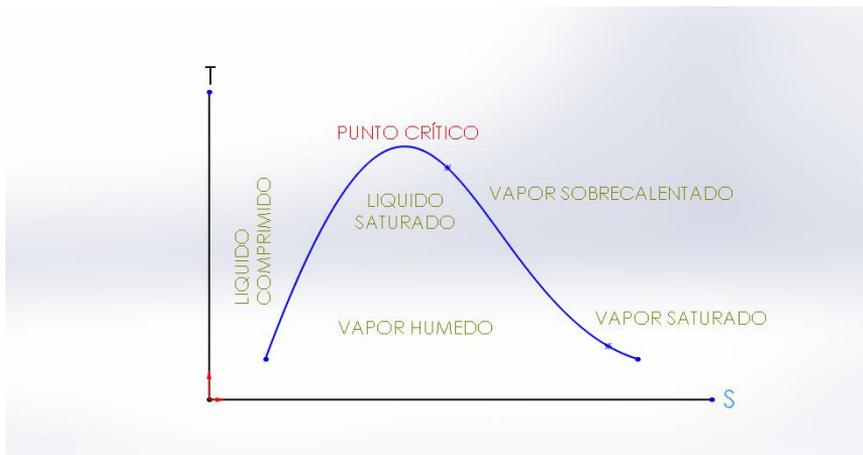


Figura 47

Diagrama termodinámico $T - s$ con curva de saturación con zonas de fases



Ejes ortogonales y ordenados:

- ❖ Líquido comprimido.
- ❖ Líquido saturado.
- ❖ Vapor húmedo.
- ❖ Vapor saturado.
- ❖ Vapor recalentado.

Figura 48

Forma de dos isobaras en el diagrama $P - v$

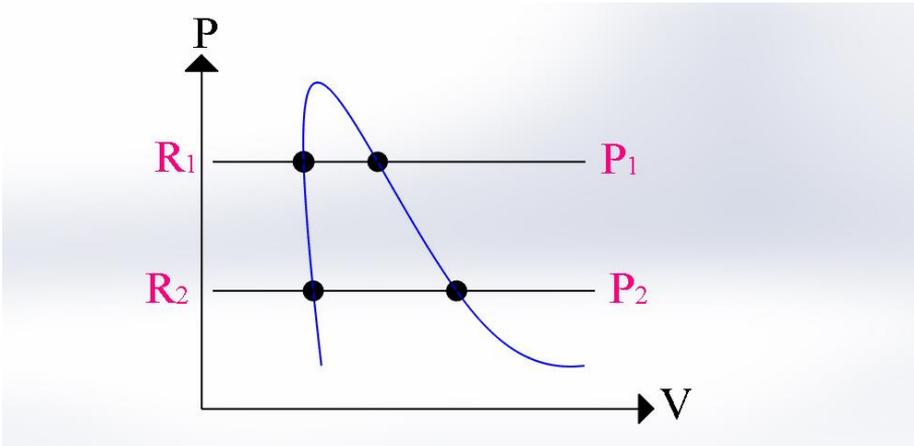


Figura 49

Forma de dos isobaras en el diagrama $T - s$

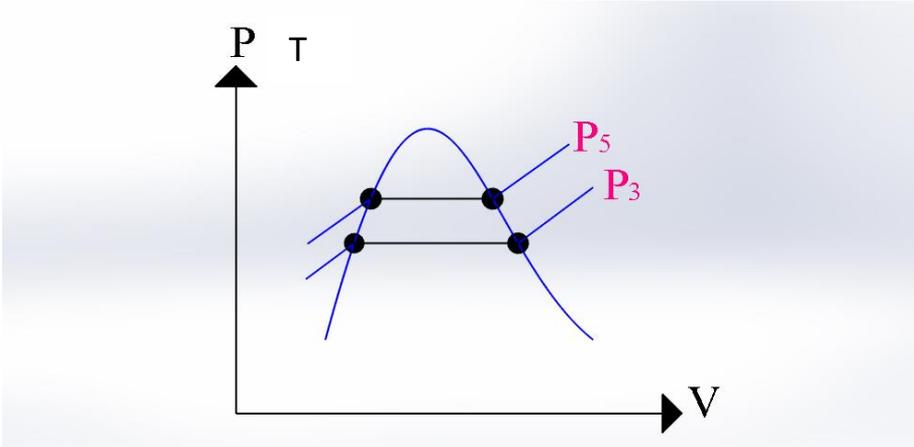
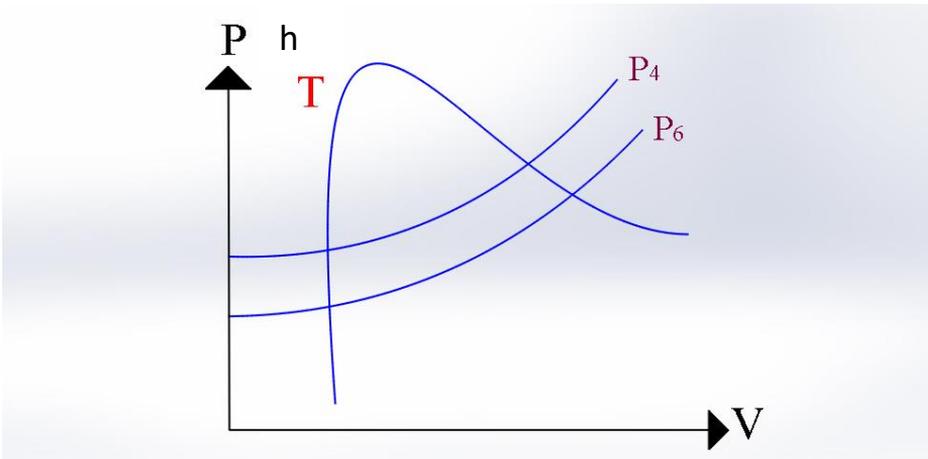


Figura 50

Forma de dos isobaras en el diagrama $h - s$



Isoterma: la unión de todos los puntos que tienen la misma temperatura.

Figura 51

Forma de dos isothermas en el diagrama $P - v$

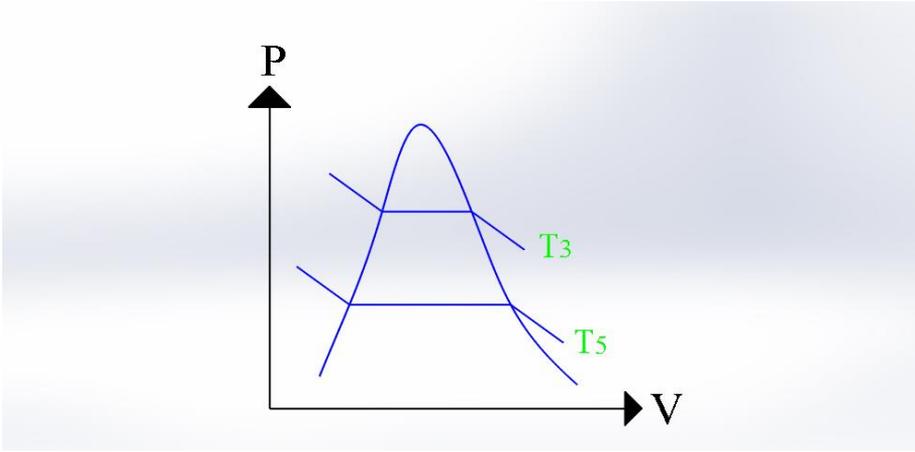


Figura 52

Forma de dos isothermas en el diagrama $T - s$

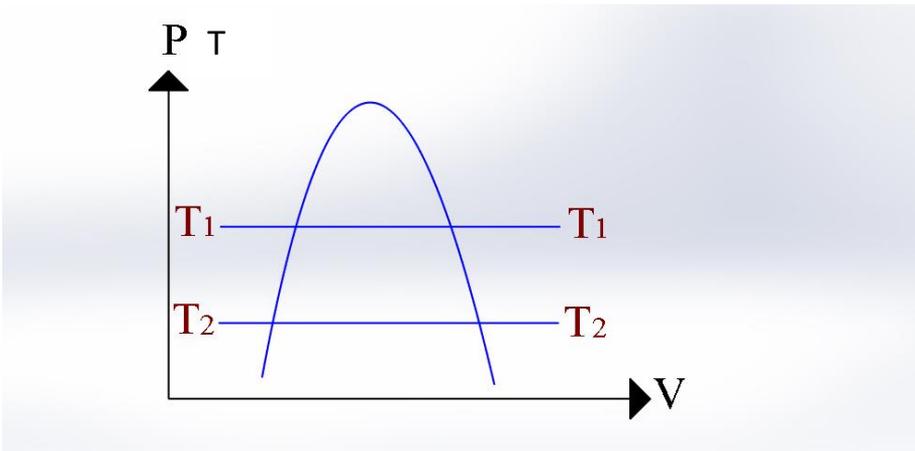


Figura 53

Forma de dos isotermas en el diagrama h - s

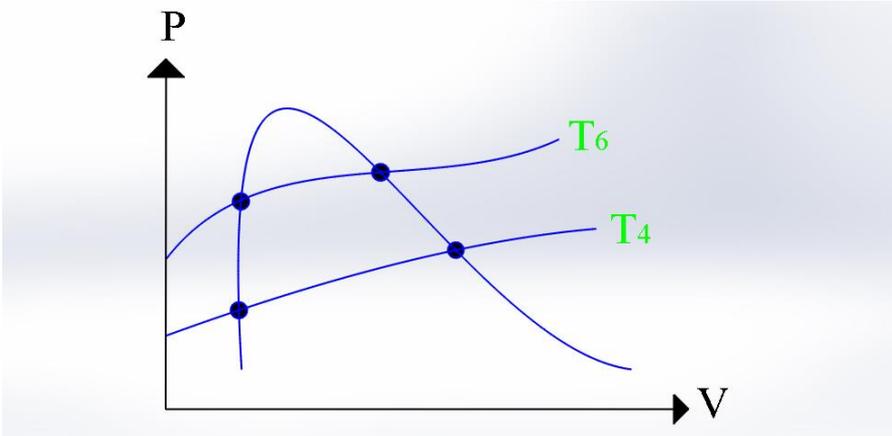


Figura 54

Temperatura de saturación de una presión determinada

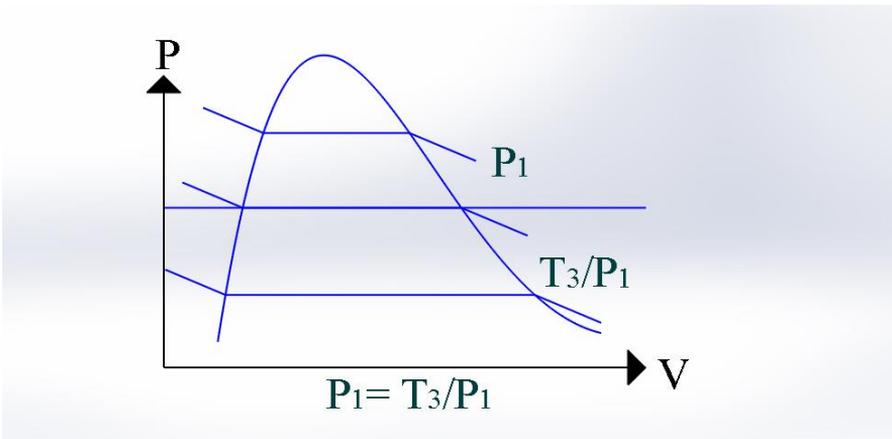
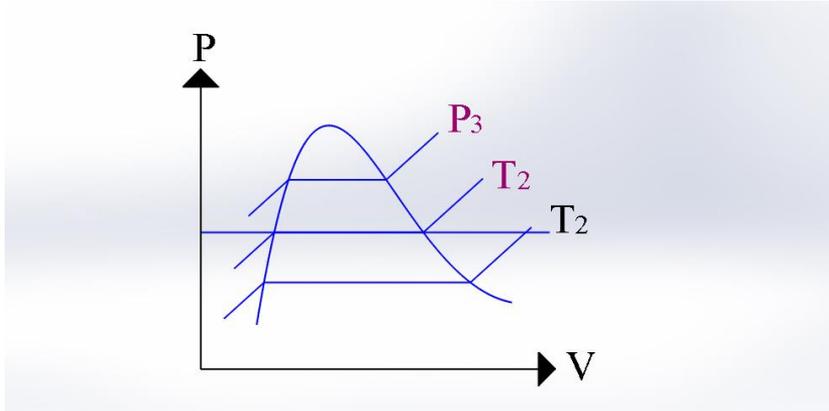


Figura 55

Temperatura de saturación de una presión determinada

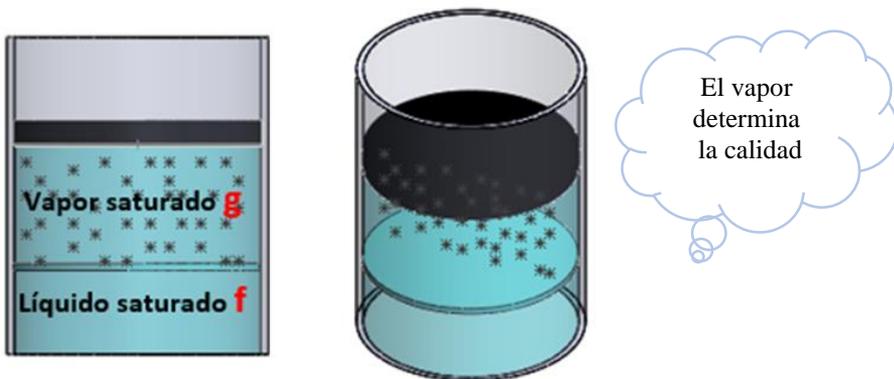


3.4 Calidad o título de vapor (x)

Se define a la razón entre la masa de vapor saturado y la masa de vapor húmedo (solo existe en la zona de vapor húmedo).

Figura 56

Estado termodinámico de vapor saturado



$$x = \frac{m_g}{m}$$

x = Calidad [-] [%]

m_g = masa de vapor saturado

m = masa de vapor humedo $m = m_g + m_f$

3.5 Humedad (y)

La humedad del vapor se define como la razón entre la masa de líquido saturado y la masa de vapor húmedo.

$$y = \frac{m_f}{m}$$

y = humedad [-] [%]

m_f = masa de líquido saturado

m = masa de vapor humedo

Figura 57

Estado termodinámico de vapor saturado en un cilindro – émbolo



$$m_g = 30 \text{ kg}$$

$$m_g = 4 \text{ lb}$$

$$m_f = 10 \text{ kg}$$

$$m_f = 8 \text{ lb}$$

$$m = 40 \text{ kg}$$

$$m = 12 \text{ lb}$$

$$x = \frac{30 \text{ kg}}{40 \text{ kg}} = 0,75 = 75\%$$

$$x = \frac{4 \text{ lb}}{12 \text{ lb}} = 0,3333 = 33\%$$

$$y = 0,25 = 25\%$$

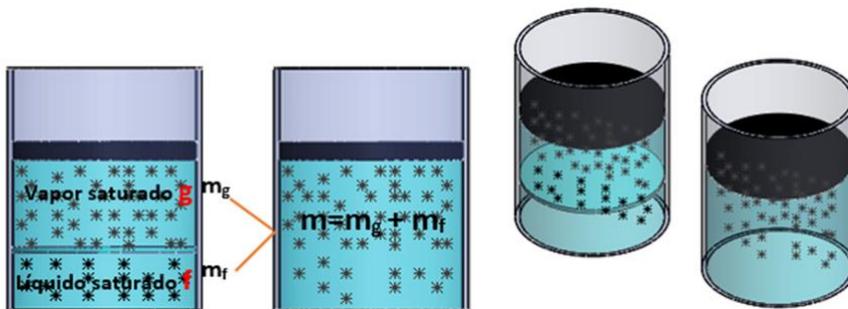
$$y = 0,67 = 67\%$$

Vapor húmedo

Mezcla de líquido saturado y vapor saturado.

Figura 58

Estado termodinámico de vapor saturado en un cilindro – émbolo



$$V = V_g + V_f$$

$$v = \frac{V}{m}$$

$$(m)(v) = m_g v_g + m_f v_f$$

$$V = m v$$

$$\frac{m \cdot v}{m} = \frac{m_g}{m} v_g + \frac{m_f}{m} v_f$$

$$v = \frac{m_g}{m} v_g + \frac{m_f}{m} v_f$$

$$v = x v_g + y v_f$$

$$v = x v_g + (1 - x) v_f$$

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

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

$$v = v_f + x v_{fg}$$

$$v = v_f + x v_{fg}$$

$$v = v_f - y v_{fg}$$

$$h = h_f + x h_{fg}$$

$$h = h_f - y h_{fg}$$

$$u = u_f + x u_{fg}$$

$$u = u_f - y u_{fg}$$

$$s = s_f + x s_{fg}$$

$$s = s_f - y s_{fg}$$

$$v_{fg} = v_g - v_f$$

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

$$u_{fg} = u_g - u_f$$

$$s_{fg} = s_g - s_f$$

Definición de estado

Estado termodinámico es el punto de una fase en equilibrio, definido por dos propiedades intensivas e independientes.

Presión	Temperatura	Volumen	Entalpía	Energía	Entropía	Calidad	Humedad
P	T	v	H	U	s	x	y

Listado de tablas del libro de (Çengel, 2019):

	TEMPERATURA	PRESIÓN
ZONAS	TABLA A4 Y A4-E	TABLA A5 Y A5-E
Líquido comprimido	Tabla A7	Tabla A7-E
Líquido saturado	Tabla A4 y A5	Tabla A4-E y A5-E
Vapor comprimido	Tabla A4 y A5	Tabla A4-E y A5-E
Vapor saturado	Tabla A4 y A5	Tabla A4-E y A5-E
Vapor recalentado	Tabla A6	Tabla A6-E

Nota: Si no tenemos el valor en tablas ni presión, tampoco temperatura existe en la Tabla 6 o A6-E “Recalentado”.

Casos para la resolución

Caso 1

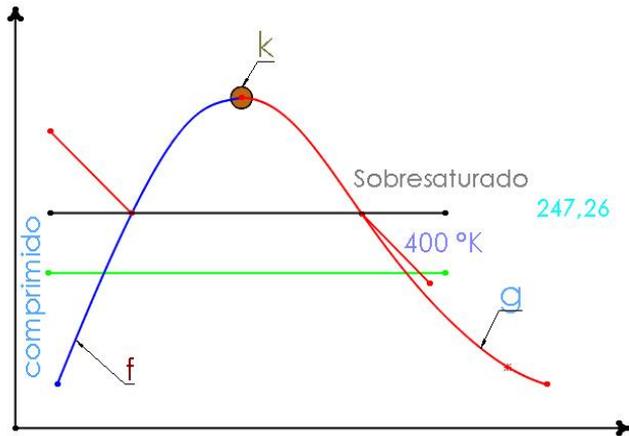
$$P = 100 \text{ psia}$$

$$T = 400 \text{ °F}$$

Paso 1.- Identificar la Zona e ir a TABLA A4-E

Figura 59

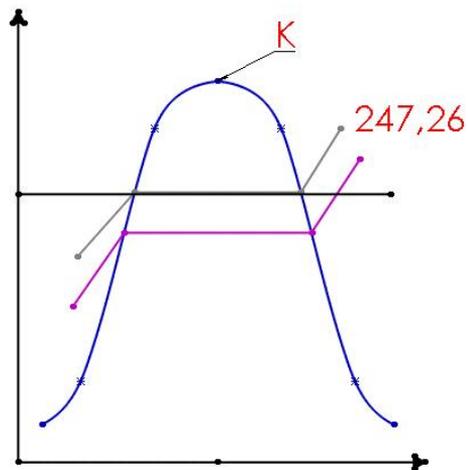
Estado termodinámico caso 1 en el diagrama P - v



Zona de vapor sobrecalentado

Figura 60

Estado termodinámico caso 1 en el diagrama T - s



$$P = 100 \text{ psia}$$

$$u = 1136,4 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm}}$$

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

$$s = 1,6521 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm}\cdot\text{R}}$$

$$v = 4,9359 \frac{\text{ft}^3}{\text{lbm}}$$

x= No existe

$$h = 1227,8 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm}}$$

y= No existe

Caso 2

$$P = 600 \text{ kPa}$$

$$S = 7 \frac{\text{kJ}}{\text{Kg K}}$$

Figura 61

Estado termodinámico caso 2 en el diagrama P - v

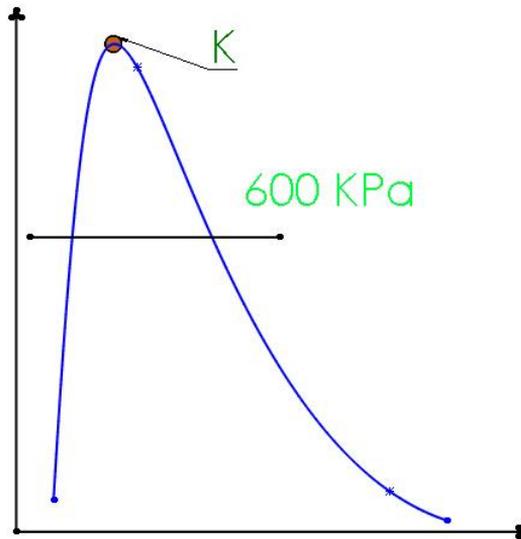
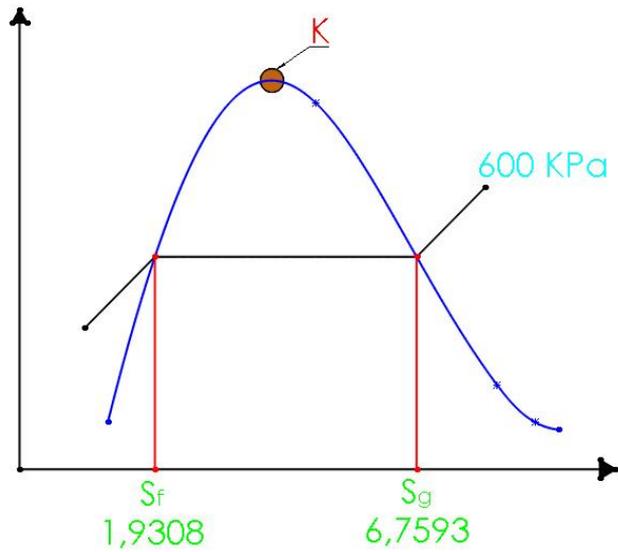


Figura 62

Estado termodinámico caso 2 en el diagrama T - s



Vapor sobrecalentado

$$s > s_g$$

$$7 > 6,7593$$

Nos dirigimos a la tabla 6

$$P = 600 \text{ kPa} \frac{1 \text{ MPa}}{1000 \text{ kPa}} = 0,6 \text{ MPa}$$

Procedimiento

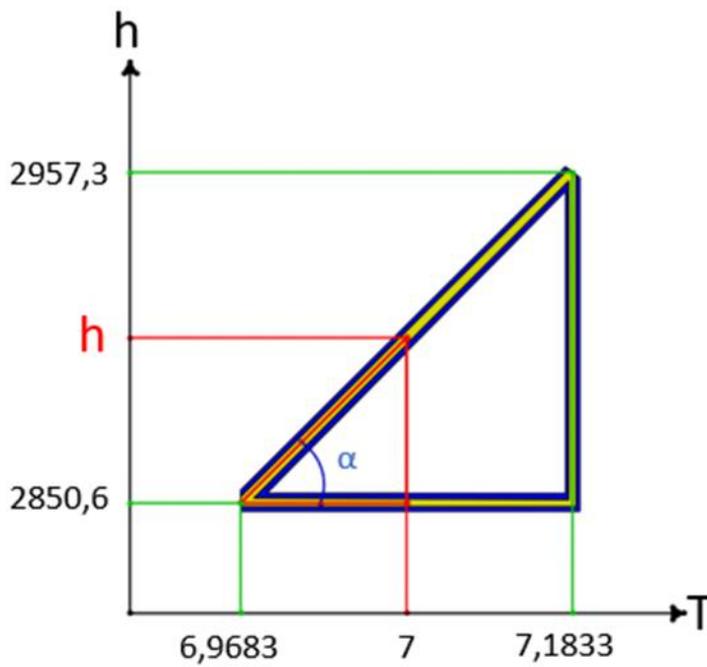
$$P = 0,6 \text{ MPa}$$

Interpolar

	S	h	U	V	T
Superior	7,1833	2957,3	2721,2	0,3939	250
Conocido	7	2866,38	2651,46	0,3582	251,47
Inferior	6,9683	2850,6	2639,4	0,35212	260

Figura 63

Interpolación 1

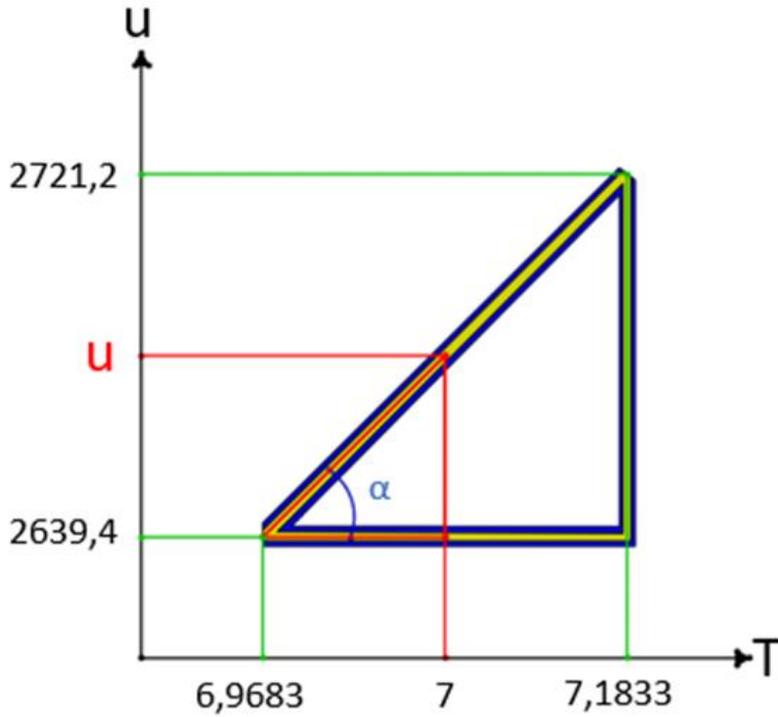


$$\operatorname{tag} \alpha = \frac{2957,3 - 2850,6}{7,1833 - 6,9683} = \frac{x - 2850,6}{7 - 6,9683}$$

$$x = 2866,38 \frac{\text{kJ}}{\text{Kg}} = h$$

Figura 64

Interpolación 2

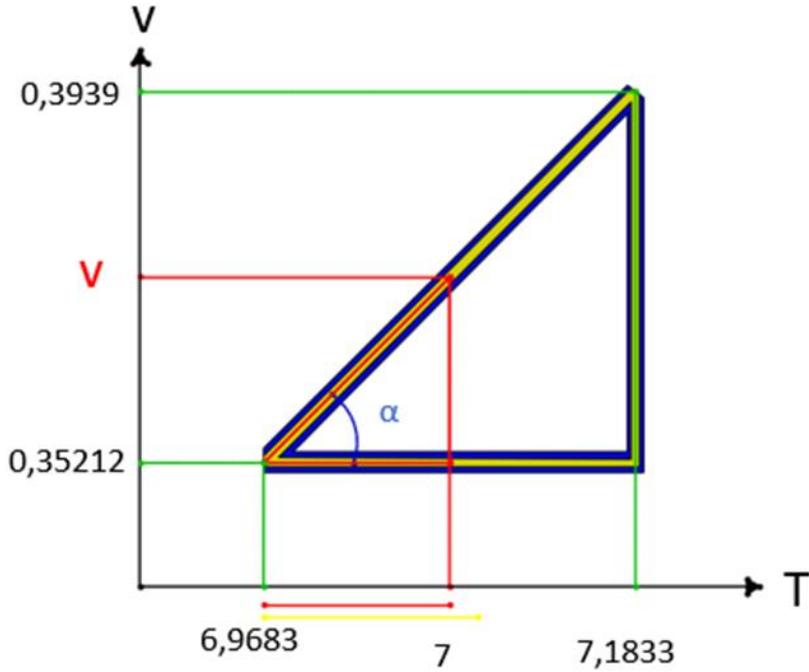


$$\text{tag } \alpha = \frac{2721,2 - 2639,4}{7,1833 - 6,9683} = \frac{x - 2639,4}{7 - 6,9683}$$

$$x = 2651,46 \frac{\text{kJ}}{\text{Kg}} = u$$

Figura 65

Interpolación 3

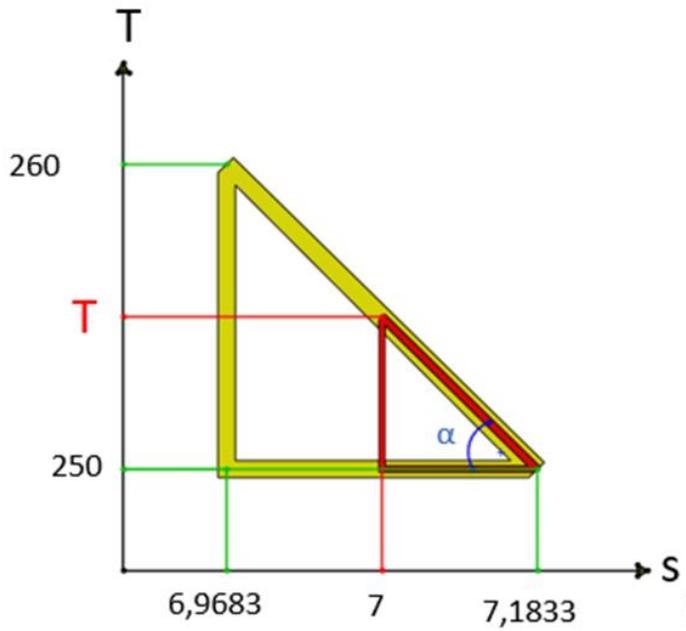


$$\operatorname{tag} \alpha = \frac{0,3939 - 0,35212}{7,1833 - 6,9683} = \frac{x - 0,35212}{7 - 6,9683}$$

$$x = 0,3582 \frac{m^3}{Kg} = v$$

Figura 66

Interpolación 4



$$\text{tag } \alpha = \frac{260 - 250}{7,1833 - 6,9683} = \frac{x - 250}{7 - 6,9683}$$

$$x = 251,47 \text{ } ^\circ\text{C} = T$$

Caso 6

$$T = 596 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$X = 45 \%$$

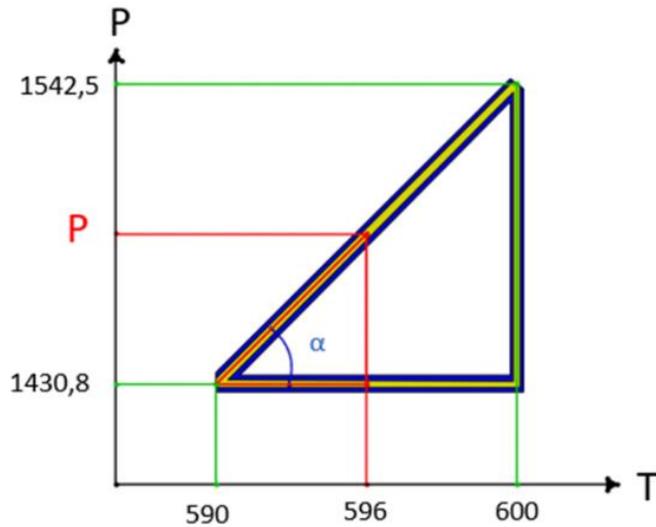
Zona de vapor húmedo

Tabla A4-E

	T	P	v_f	v_g	u_f	u_{fg}	h_f	h_{fg}	s_f	s_{fg}
Superior	60	1542,5	0,023	0,267	610,18	480,10	616,92	549,67	0,813	0,518
Conocido	59	1497,82	0,234	0,287	604,75	491,09	611,25	561,89	0,808	0,533
Inferior	59	1430,8	0,231	0,293	596,61	498,43	602,75	570,04	0,800	0,543

Figura 67

Interpolación 5

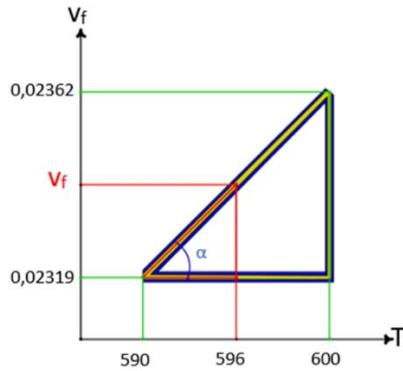


$$\text{tag } \alpha = \frac{1542,5 - 1430,8}{600 - 590} = \frac{x - 1430,8}{596 - 590}$$

$$x = 1497,82 \text{ psia} = P$$

Figura 68

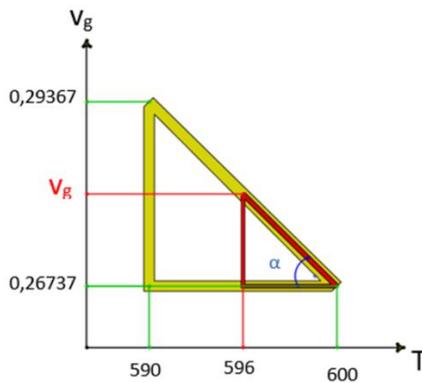
Interpolación 6



$$\text{tag } \alpha = \frac{0,02362 - 0,02319}{600 - 590} = \frac{x - 0,02319}{596 - 590}$$
$$x = 0,02344 = v_f$$

Figura 69

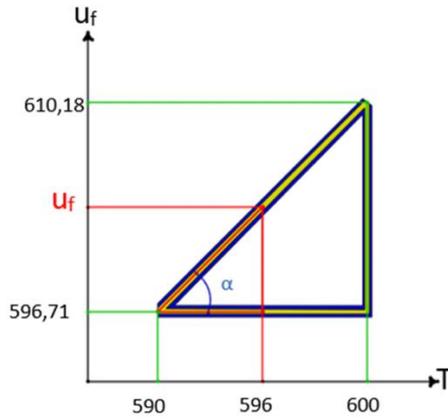
Interpolación 7



$$\text{tag } \alpha = \frac{0,29367 - 0,26737}{600 - 590} = \frac{x - 0,26737}{596 - 590}$$
$$x = 0,2871 = v_g$$

Figura 70

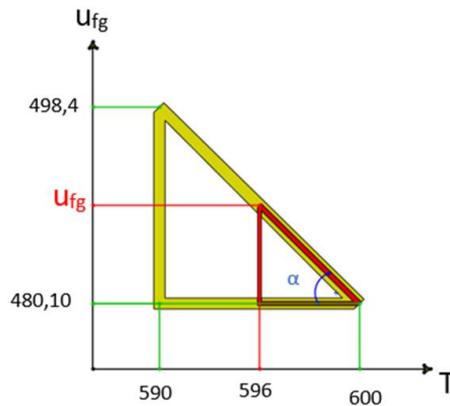
Interpolación 8



$$\operatorname{tag} \alpha = \frac{610,18 - 596,61}{600 - 590} = \frac{x - 596,61}{596 - 590}$$
$$x = 604,75 = u_f$$

Figura 71

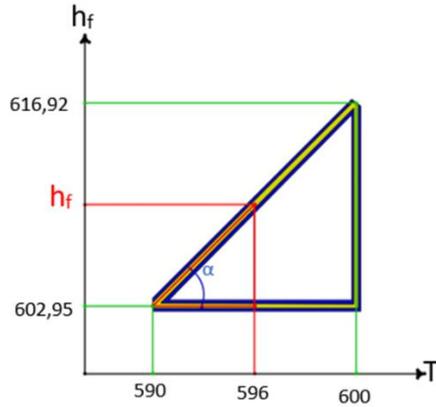
Interpolación 9



$$\operatorname{tag} \alpha = \frac{498,43 - 480,1}{600 - 590} = \frac{x - 480,1}{596 - 590}$$
$$x = 491,09 = u_{fg}$$

Figura 72

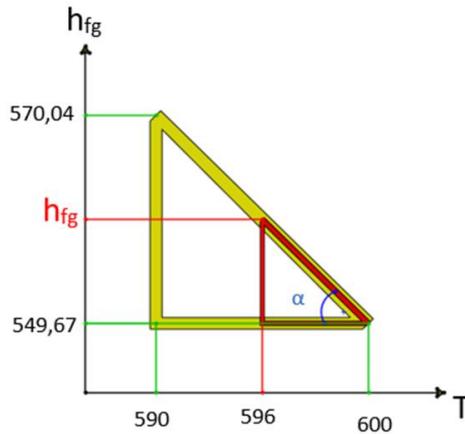
Interpolación 10



$$\text{tag } \alpha = \frac{616,92 - 602,75}{600 - 590} = \frac{x - 602,75}{596 - 590}$$
$$x = 611,25 = h_f$$

Figura 73

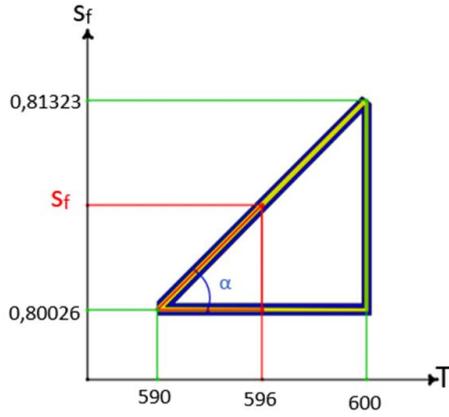
Interpolación 11



$$\text{tag } \alpha = \frac{570,04 - 549,67}{600 - 590} = \frac{x - 549,67}{596 - 590}$$
$$x = 561,89 = h_{f,g}$$

Figura 74

Interpolación 12

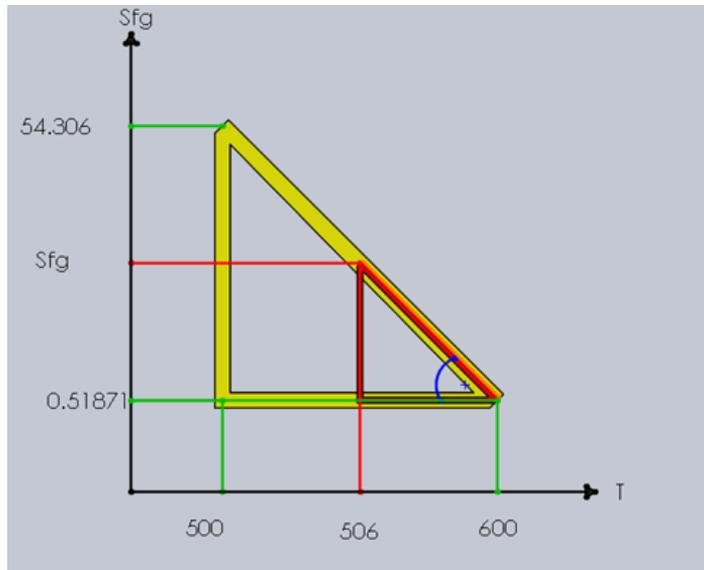


$$\text{tag } \alpha = \frac{0,81323 - 0,80026}{600 - 590} = \frac{x - 0,80026}{596 - 590}$$

$$x = 0,80804 = S_f$$

Figura 75

Interpolación 13



$$tag \propto = \frac{0,54306 - 0,51871}{600 - 590} = \frac{x - 0,51871}{596 - 590}$$

$$x = 0,53332 = S_{fg}$$

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

$$v = 0,02344 + 0,45(0,2831 - 0,02344)$$

$$v = 0,140287 \frac{ft^3}{lbm}$$

$$h = h_f + x h_{fg}$$

$$h = 611,25 + 0,45(561,89)$$

$$h = 864,10 \frac{Btu}{lbm}$$

$$u = u_f + x u_{fg}$$

$$u = 604,75 + 0,45(491,09)$$

$$u = 825,74 \frac{Btu}{lbm}$$

$$s = s_f + x s_{fg}$$

$$s = 0,80804 + 0,45(0,53332)$$

$$s = 1,04803 \frac{Btu}{lbm R}$$

P	1497,82 psia
T	596 °F
v	$0,140287 \frac{ft^3}{lbm}$
h	$864,10 \frac{Btu}{lbm}$
u	$825,74 \frac{Btu}{lbm}$
s	$1,04803 \frac{Btu}{lbm R}$
x	45%
y	55%

Caso 3

Temperatura y energía interna

Datos:

$$T = 495 \text{ } ^\circ F$$

$$\mu = 700 \frac{Btu}{Lbm}$$

FÓRMULAS-Zona húmeda

$$V = v_f + X(v_{fg})$$

$$h = h_f + X(h_{fg})$$

$$\mu = \mu_f + X(\mu_{fg})$$

$$S = s_f + X(S_{fg})$$

T (°F)	$\mu(\frac{Btu}{Lbm})$	μ_g	μ_{fg}	v_f	v_g	h_f	h_{fg}	s_f	s_{fg}	P
500	485,32	1117,3	631,94	0,02044	0,67958	487,89	714,44	0,68899	0,74445	680,56
495	479,54	1117,7	638,16	0,02033	0,70927	481,99	720,92	0,682925	0,755195	650,9
490	473,77	1118,1	644,32	0,02022	0,74296	476,09	727,40	0,67686	0,76394	621,24

Interpolar:

$$\text{tag } \alpha = \frac{485,32 - 473,77}{500 - 490} = \frac{x - 473,77}{495 - 490}$$

$$X = \frac{\mu - \mu_C}{\mu_{fg}}$$

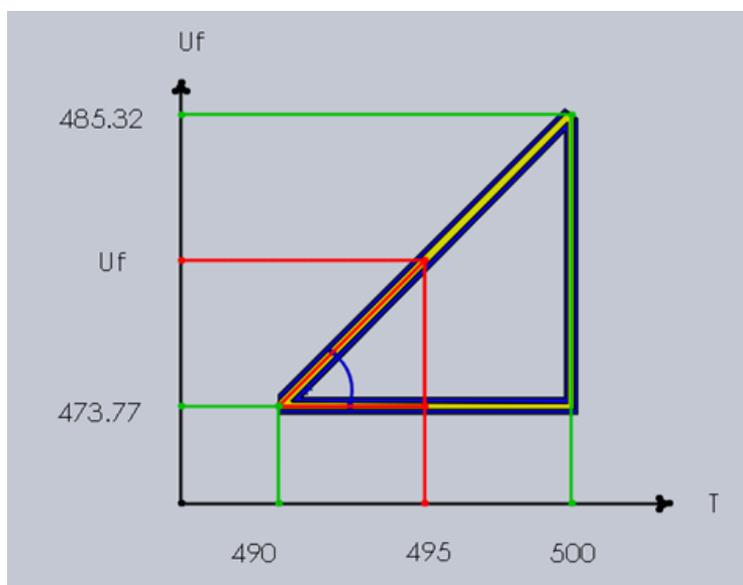
$$X = \frac{700 - 479,54}{638,16}$$

$$X = 0,3455$$

- $x = 473,77 + \left(\frac{485,32 - 473,77}{500 - 490}\right) (495 - 490) = 479,54$

Figura 76

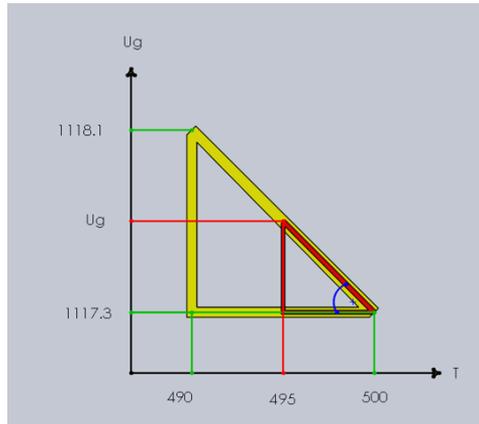
Interpolación 14



- $X = 1118,1 + \left(\frac{1117,3 - 1118,1}{500 - 490} \right) (495 - 490) = 1117,7$

Figura 77

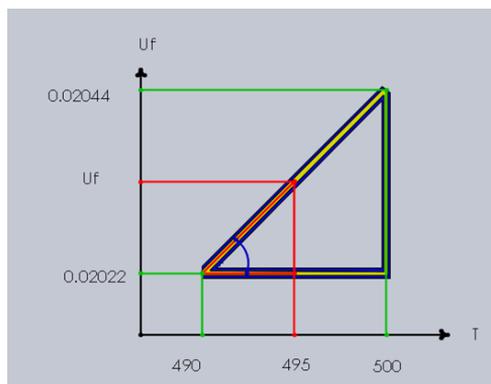
Interpolación 15



- $X = 0,02022 + \left(\frac{0,02044 - 0,02022}{500 - 490} \right) (495 - 490) = 0,02033$

Figura 78

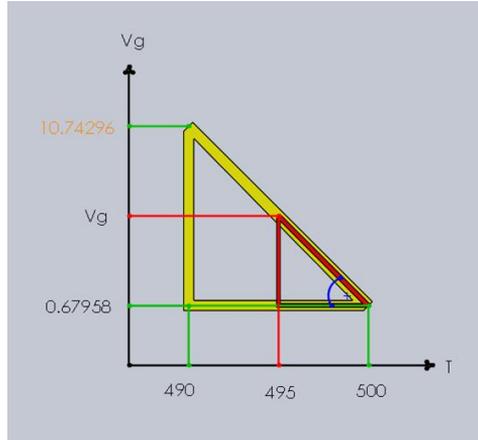
Interpolación 16



- $$X = 0,67958 + \left(\frac{0,74296 - 0,67958}{500 - 490} \right) (495 - 490) = 0,70927$$

Figura 79

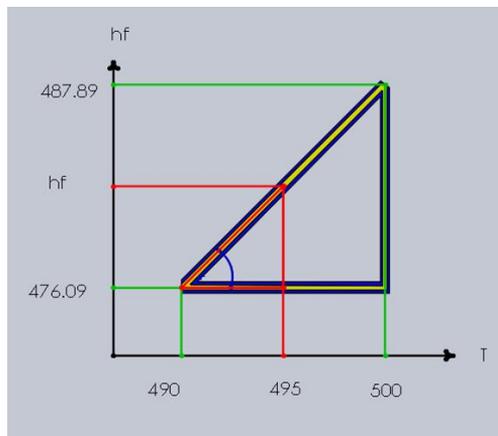
Interpolación 17



- $$X = 476,09 + \left(\frac{487,89 - 476,09}{500 - 490} \right) (495 - 490) = 481,9$$

Figura 80

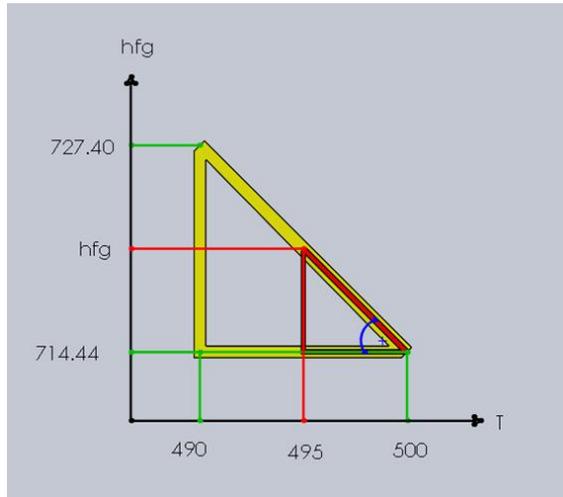
Interpolación 18



- $X = 714,44 + \left(\frac{727,40 - 714,44}{500 - 490} \right) (495 - 490) = 720,92$

Figura 81

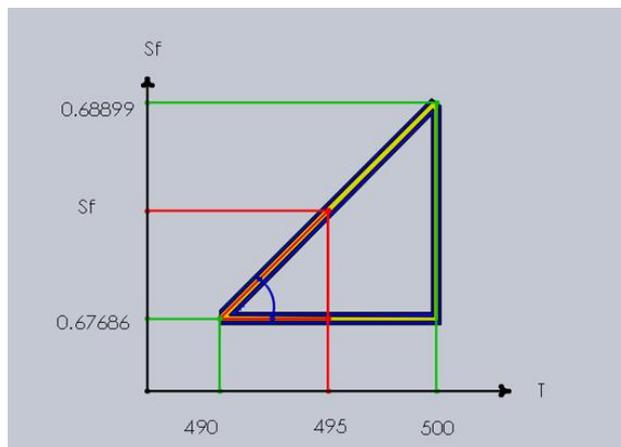
Interpolación 19



- $X = 0,67686 + \left(\frac{0,68899 - 0,67686}{500 - 490} \right) (495 - 490) = 0,682925$

Figura 82

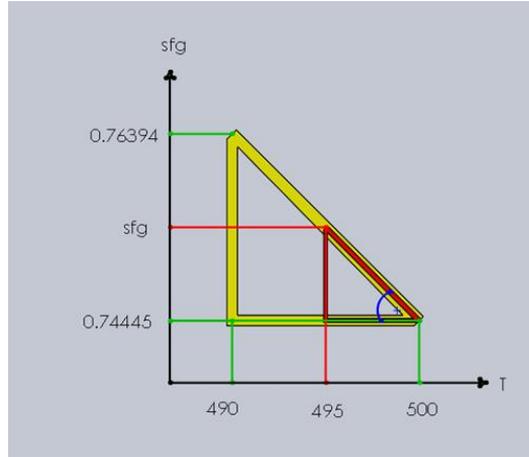
Interpolación 20



- $$X = 0,74445 + \left(\frac{0,76594 - 0,74445}{500 - 490} \right) (495 - 490) = 0,755195$$

Figura 83

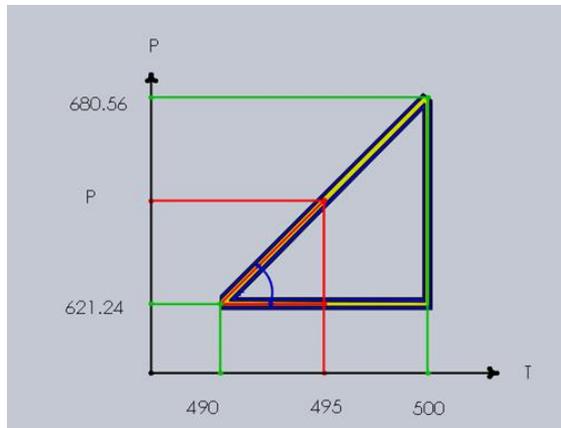
Interpolación 21



- $$X = 621,24 + \left(\frac{680,56 - 621,24}{500 - 490} \right) (495 - 490) = 650,9$$

Figura 84

Interpolación 22



Reemplazar en las fórmulas:

$$V = v_f + X(v_g - v_f) = 0,02033 + 0,3455(0,70927 - 0,02033)$$

$$= 0,2583 \frac{ft^3}{Lbm}$$

$$h = h_f + X(h_{fg}) = 481,99 + 0,3455 (720,92) = 731,06 \frac{Btu}{Lbm}$$

$$S = s_f + X(S_{fg}) = 0,682925 + 0,3455(0,755195) = 0,9438 \frac{Btu}{Lbm \text{ } ^\circ R}$$

$$X = 34,55 \%$$

$$Y = 65,45 \%$$

Caso 4

Entalpía y temperatura

Datos:

$$T = 600 \text{ } ^\circ F$$

$$h = 1300 \frac{Btu}{Lbm}$$

ZONA A 4-E

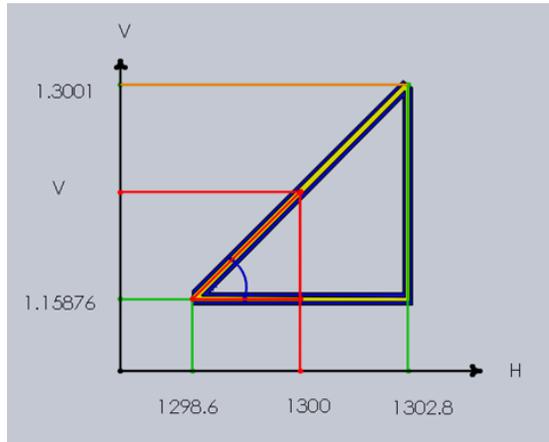
h_f	h_g
616,92	1166,6

→ Zona vapor recalentado
 $h > h_g$ TABLA

h	P	V	μ	S
1302,8	450	1,3001	1194,6	1,5737
1300	466,67	1,2058	1192,46	1,5639
1298,6	500	1,15876	1191,4	1,5590

Figura 86

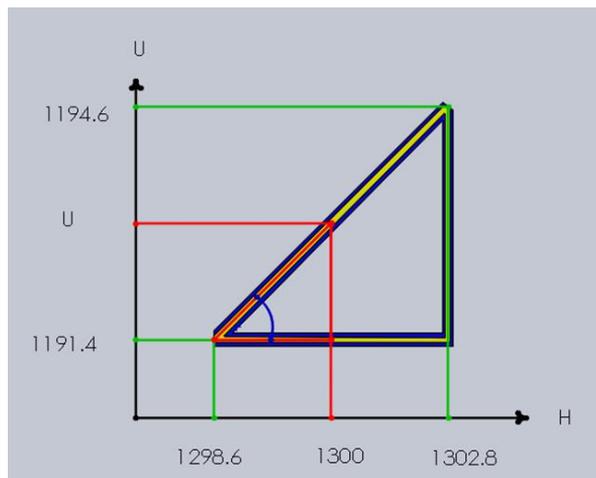
Interpolación 24



- $$X_{\mu} = 1191,4 + \left(\frac{1194,6 - 1191,4}{1302,8 - 1298,6} \right) (1300 - 1298,6) = 1192,46$$

Figura 87

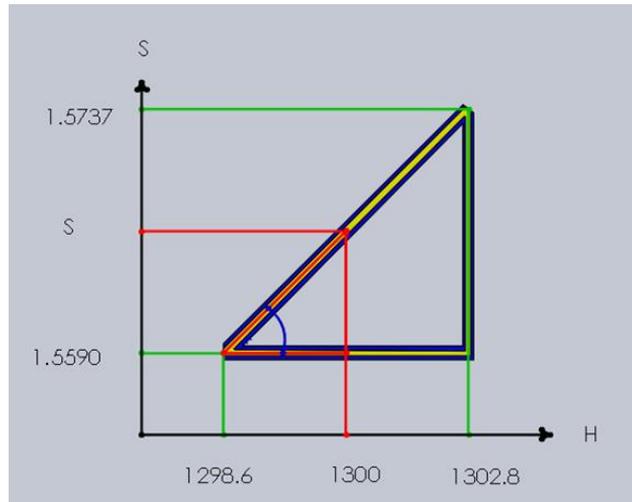
Interpolación 25



- $$X_S = 1,5590 + \left(\frac{1,5737 - 1,5590}{1302,8 - 1298,6} \right) (1300 - 1298,6) = 1,5639$$

Figura 88

Interpolación 26



Caso 5

Presión y energía interna

Datos:

$$P = 134 \text{ Psia}$$

$$\mu = 300 \frac{\text{Btu}}{\text{Lbm}}$$

ZONA A 5-E

Zona líquido comprimido

$$\mu < \mu_f$$

TABLA A4-E

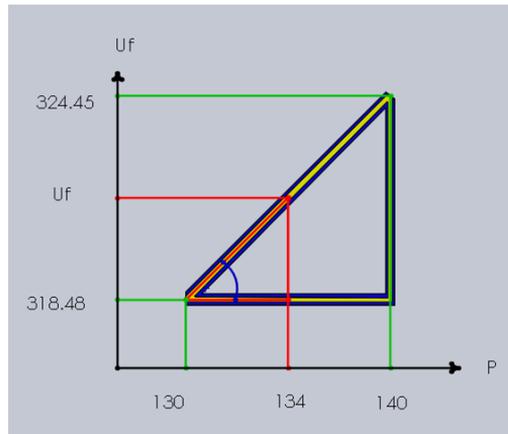
P	μ_f	μ_g	P	T	V_f	h_f	S_f
140	324,45	1109,9	134,63	350	0,01799	321,73	0,50321
134	320,84	1109,36	134	349,69	0,01798	321,33	0,50271
130	318,48	1109,0	118,02	340	0,01787	321,24	0,49024

Interpolar:

- $\mu_p = 318,48 + \left(\frac{324,45-318,48}{140-130} \right) (134 - 130) = 320,84$

Figura 89

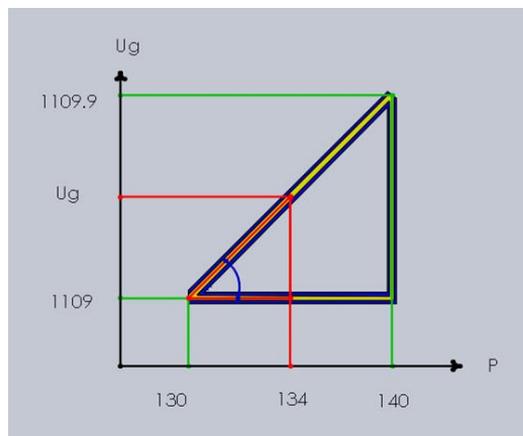
Interpolación 27



- $\mu_g = 1109,0 + \left(\frac{1109,9-1109,0}{140-130} \right) (134 - 130) = 1109,36$

Figura 90

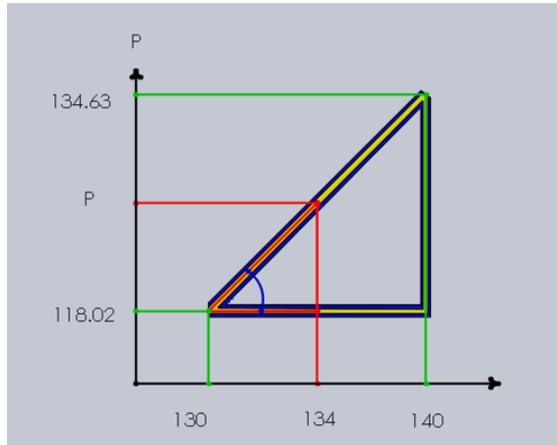
Interpolación 28



- $$P = 118,02 + \left(\frac{134,63 - 118,02}{140 - 130} \right) (134 - 130) = 134$$

Figura 91

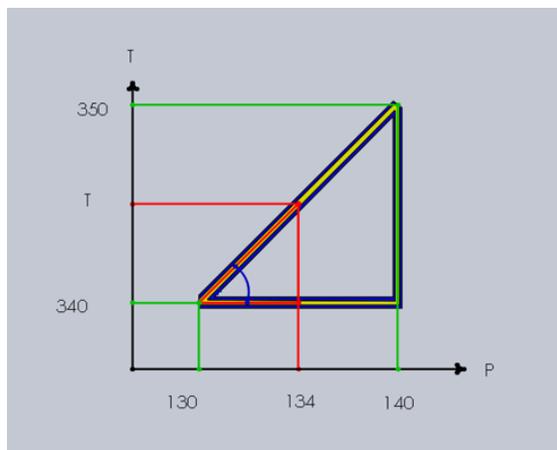
Interpolación 29



- $$T = 340 + \left(\frac{350 - 340}{140 - 130} \right) (134 - 130) = 349,69$$

Figura 92

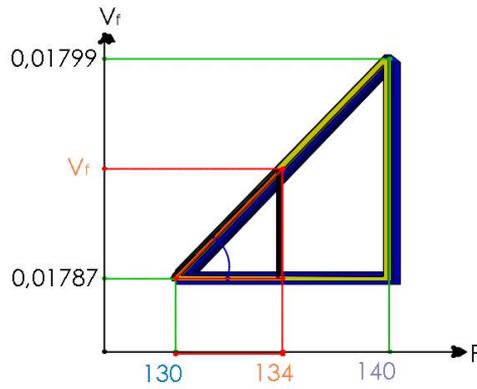
Interpolación 29



- $V_f = 0,01787 + \left(\frac{0,01799 - 0,01787}{140 - 130} \right) (134 - 130) = 0,01798$

Figura 93

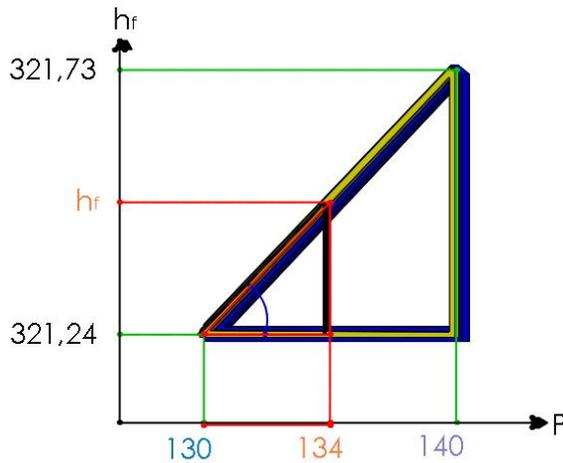
Interpolación 31



- $h_f = 321,24 + \left(\frac{321,73 - 321,24}{140 - 130} \right) (134 - 130) = 321,33$

Figura 94

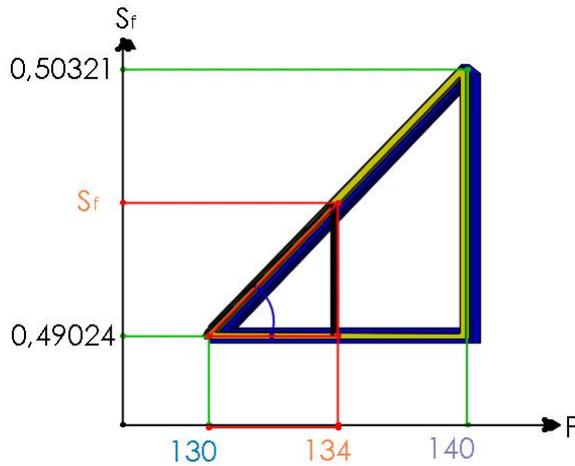
Interpolación 32



- $S_f = 0,49024 + \left(\frac{0,50321 - 0,49024}{140 - 130} \right) (134 - 130) = 0,50271$

Figura 95

Interpolación 33



Caso 6

T = 596 °F

X = 45 %

Zona de vapor húmedo

Tabla A4-E

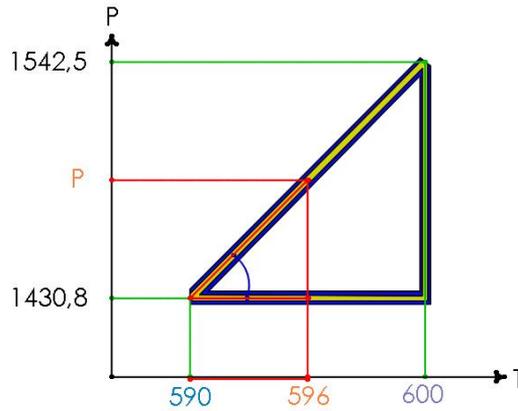
T	P	v_f	v_g	u_f	u_{fg}	h_f	h_{fg}	s_f	s_{fg}
600	1542,5	0,02362	0,26737	610,18	480,10	616,92	549,67	0,81323	0,51871
596	1497,82	0,2344	0,2871	604,75	491,09	611,25	561,89	0,80804	0,53332
590	1430,8	0,2319	0,29367	596,61	498,43	602,75	570,04	0,80026	0,54306

Interpolar:

- $$\text{tag } \alpha = \frac{1542,5 - 1430,8}{600 - 590} = \frac{x - 1430,8}{596 - 590} \quad x = 1497,82 \text{ psia} = P$$

Figura 96

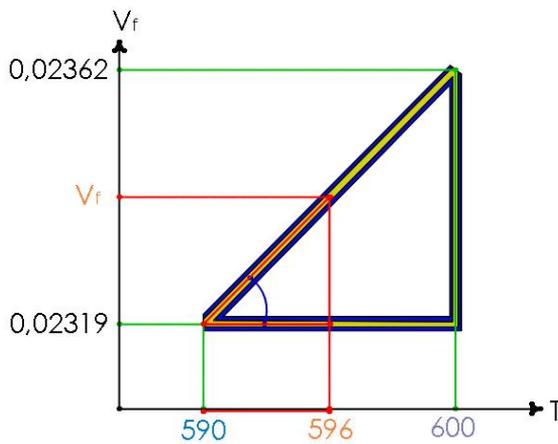
Interpolación 34



- $$\text{tag } \alpha = \frac{0,02362 - 0,02319}{600 - 590} = \frac{x - 0,02319}{596 - 590} \quad x = 0,02344 = v_f$$

Figura 97

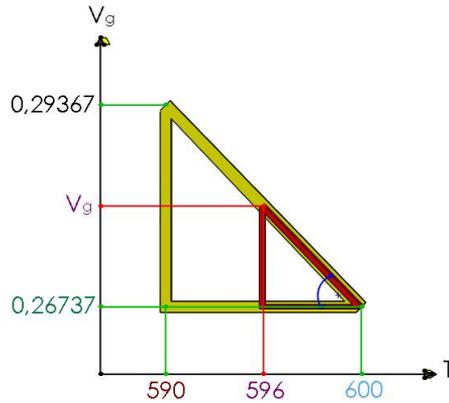
Interpolación 35



- $$\text{tag } \alpha = \frac{0,29367 - 0,26737}{600 - 590} = \frac{x - 0,26737}{596 - 590} \quad x = 0,2871 = v_g$$

Figura 98

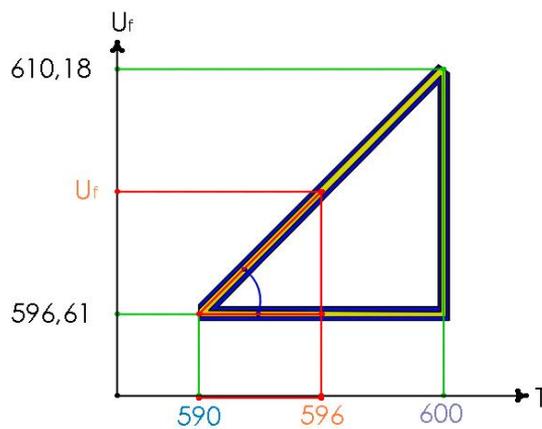
Interpolación 36



- $$\text{tag } \alpha = \frac{610,18 - 596,61}{600 - 590} = \frac{x - 596,61}{596 - 590} \quad x = 604,75 = u_f$$

Figura 99

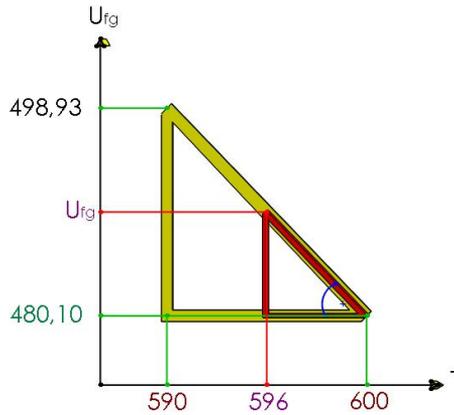
Interpolación 37



- $$\text{tag } \alpha = \frac{498,43 - 480,1}{600 - 590} = \frac{x - 480,1}{596 - 590} x = 491,09 = u_{fg}$$

Figura 100

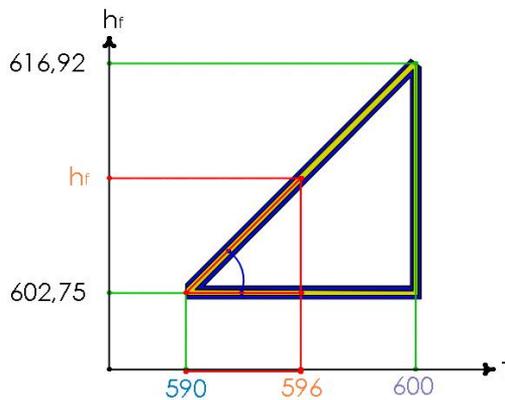
Interpolación 38



- $$\text{tag } \alpha = \frac{616,92 - 602,75}{600 - 590} = \frac{x - 602,75}{596 - 590} x = 611,25 = h_f$$

Figura 101

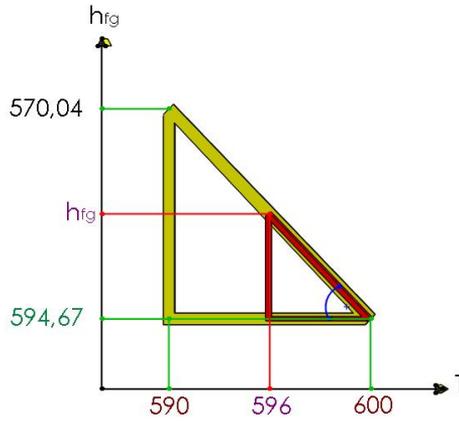
Interpolación 39



- $$\text{tag } \alpha = \frac{570,04 - 549,67}{600 - 590} = \frac{x - 549,67}{596 - 590} \quad x = 561,89 = h_{fg}$$

Figura 102

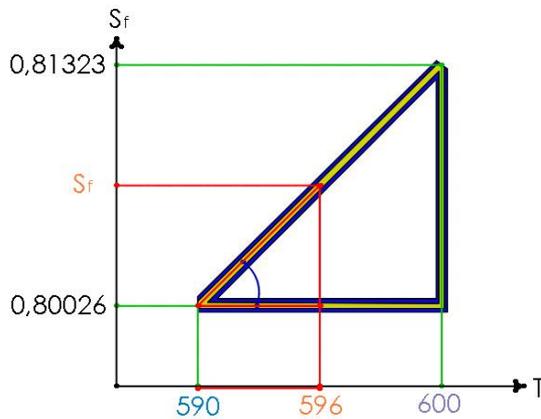
Interpolación 40



- $$\text{tag } \alpha = \frac{0,81323 - 0,80026}{600 - 590} = \frac{x - 0,80026}{596 - 590} \quad x = 0,80804 = s_f$$

Figura 103

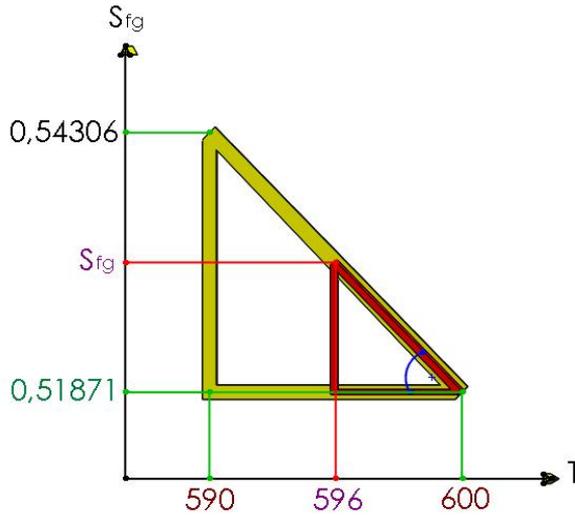
Interpolación 41



- $$\text{tag } \alpha = \frac{0,54306 - 0,51871}{600 - 590} = \frac{x - 0,51871}{596 - 590} x = 0,53332 = S_{fg}$$

Figura 104

Interpolación 42



- $$v = v_f + x(v_g - v_f) = 0,02344 + 0,45(0,2831 - 0,02344) = 0,140287 \frac{ft^3}{lbm}$$
- $$h = h_f + x h_{fg} = h = 611,25 + 0,45(561,89) = 864,10 \frac{Btu}{lbm}$$
- $$u = u_f + x u_{fg} = u = 604,75 + 0,45(491,09) = 825,74 \frac{Btu}{lbm}$$
- $$s = s_f + x s_{fg} = s = 0,80804 + 0,45(0,53332) = 1,04803 \frac{Btu}{lbm \cdot R}$$

P	1497,82 psia
X	45%
Y	55%

Caso 7

Datos:

$$h = 930 \text{ Btu/Lbm}$$

$$x = 70\%$$

ZONA A 5-E



Zona vapor húmedo

$$h = h_f + x h_{fg}$$

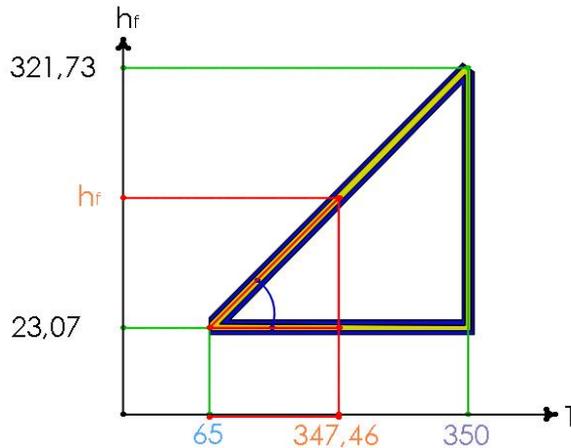
T	h_f	h_{fg}	H
65	23,07	1062,2	766,61
347,46	319	872	930
350	321,73	870,42	931,416

Interpolar:

$$h_f = 23,07 + \left(\frac{321,73 - 23,07}{350 - 65} \right) (347,46 - 65) = 319$$

Figura 105

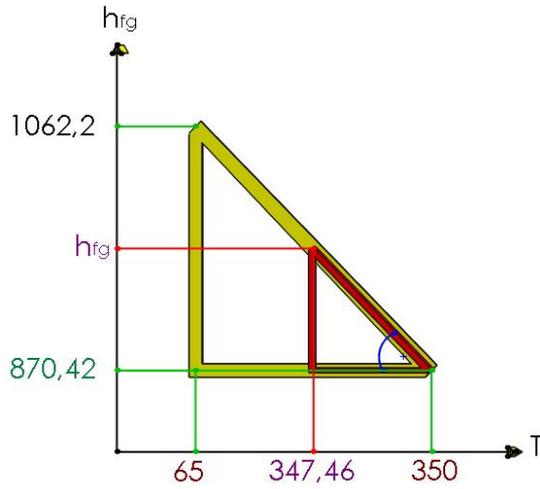
Interpolación 43



$$h_{fg} = 1062,2 + \left(\frac{870,42 - 1062,2}{350 - 65} \right) (347,46 - 65) = 872$$

Figura 106

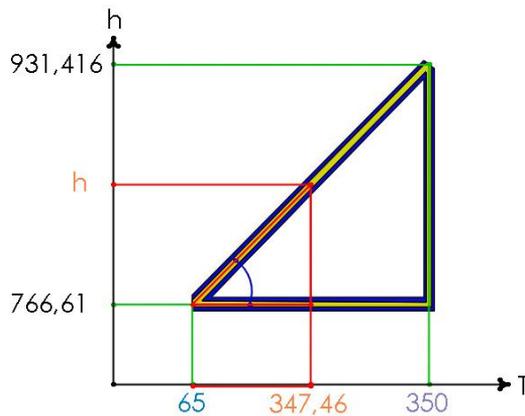
Interpolación 44



$$h = 766,61 + \left(\frac{931,416 - 766,61}{350 - 65} \right) (347,46 - 65) = 930$$

Figura 107

Interpolación 45



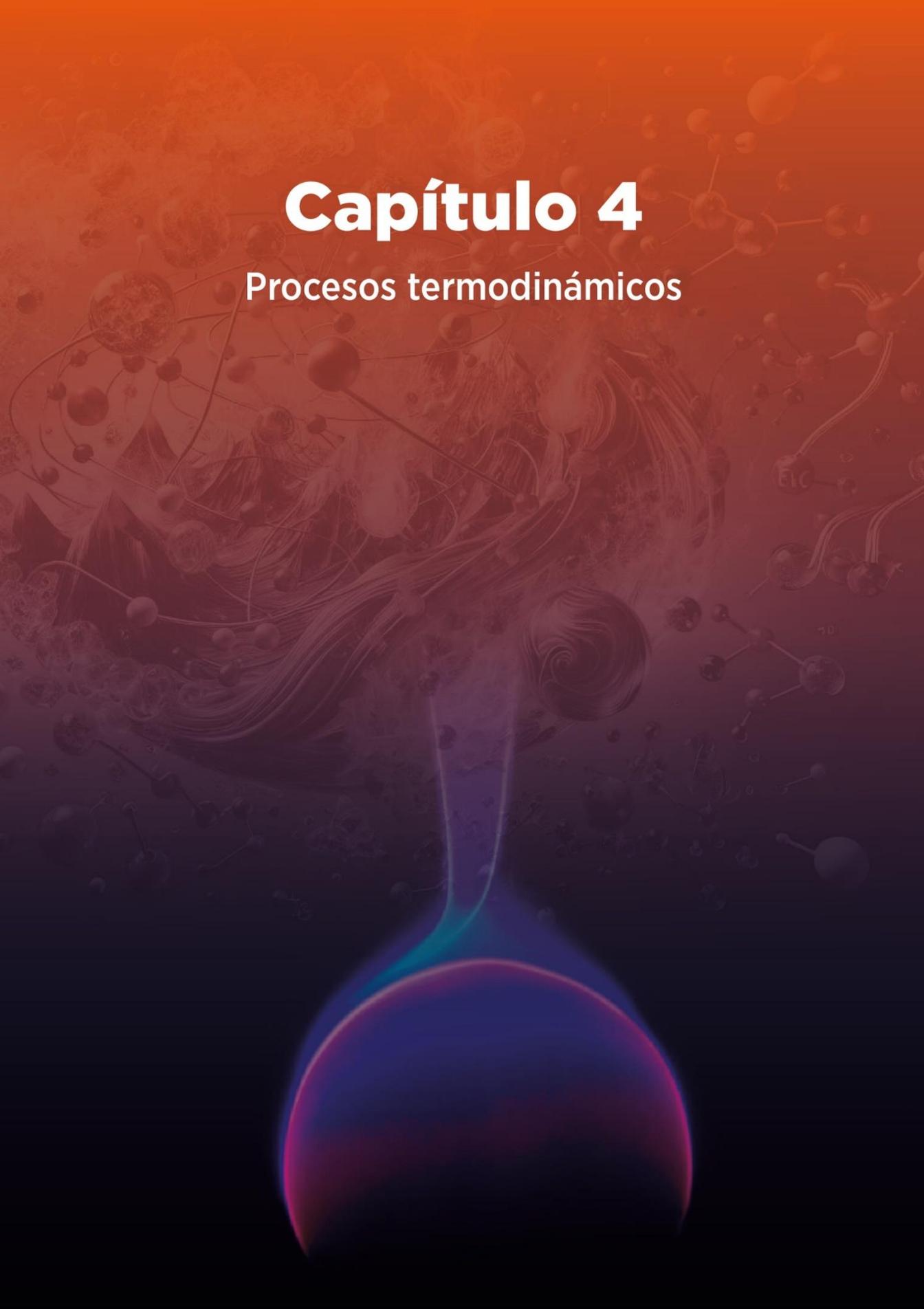
Segunda interpolación:

H	T	P	V_f	V_g	μ_f	μ_{fg}	S_f	S_{fg}
931,374	350	134,63	0,01799	3,3425	321,73	870,98	0,50321	1,07370
930	347,06	129,82	0,01795	3,4733	318,05	873,39	0,4994	1,0826
926,64	340	118,02	0,01787	3,7881	311,24	874,21	0,49024	1,0945

- $V = v_f + X(v_g - (v_f) = 0,011951 + 0,7(3,4133 - 0,01745) = 2,4366 \frac{ft^3}{Lbm}$
- $\mu = \mu_f + X(\mu_g - (\mu_f) = 316,63 + 0,7(365,39) = 572,403 \frac{ft^3}{Lbm}$
- $S = s_f + X(S_{fg}) = 0,4994 + 0,7(1,1826) = 1,1312 \frac{Btu}{Lbm \text{ } ^\circ R}$

Capítulo 4

Procesos termodinámicos





Capítulo

4

Procesos termodinámicos

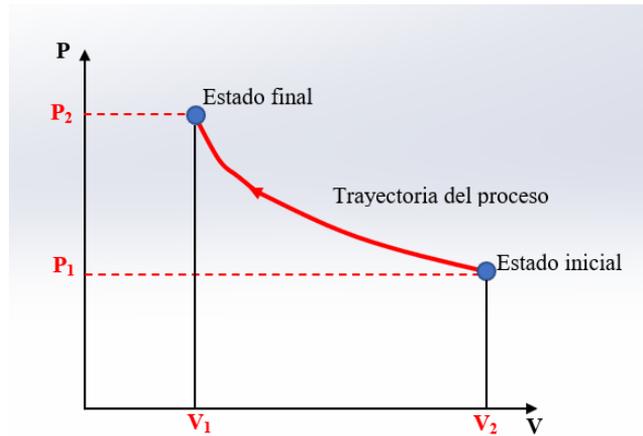
El Capítulo 4 de este libro nos invita a embarcarnos en un viaje por el universo de los procesos termodinámicos, un área de estudio crucial en la termodinámica que analiza los cambios de estado que experimentan los sistemas termodinámicos. A lo largo de este capítulo, nos adentraremos en los diferentes tipos de procesos termodinámicos, tanto para gases ideales como para gases reales, comprendiendo sus características y aplicaciones.

4.1 Procesos termodinámicos gases ideales

Es todo cambio que experimenta un sistema termodinámico de un estado de equilibrio a otro.

Figura 108

Proceso termodinámico de estado inicial a estado final en diagrama $P - v$



4.2 Proceso isobárico "presión constante"

Toda transformación en equilibrio que ocurre a presión constante se denomina proceso isobárico.

Figura 109

Proceso isobárico "presión constante" de 1 a 2 en diagrama $T - s$

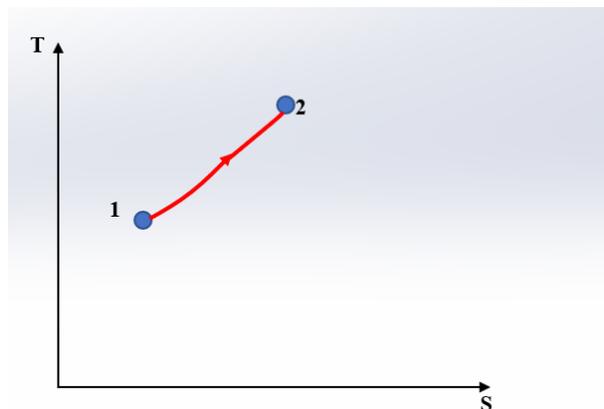


Figura 110

Proceso isobárico “presión constante” de 1 a 2 en diagrama $P - v$

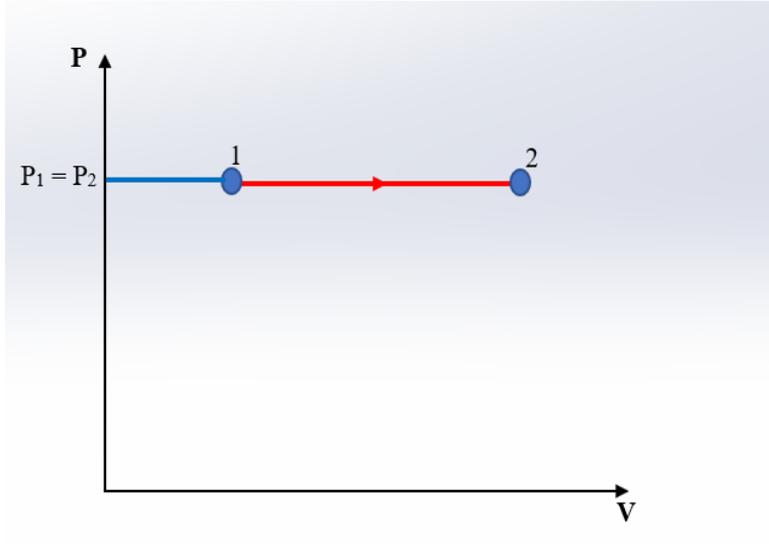
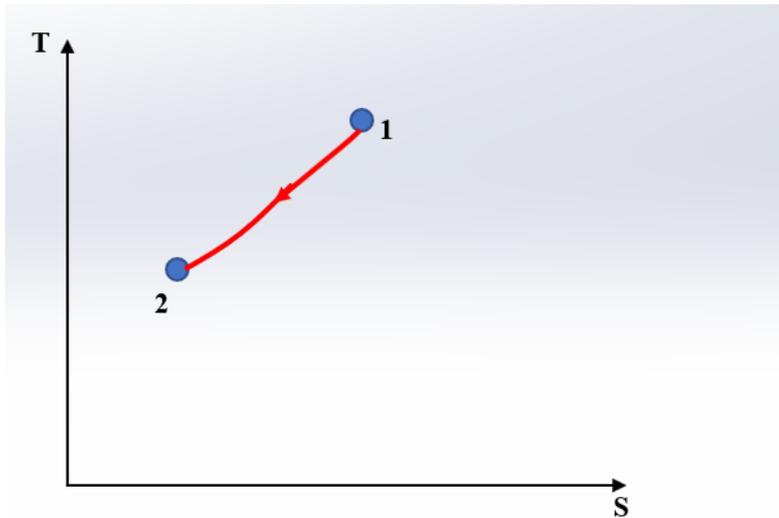


Figura 111

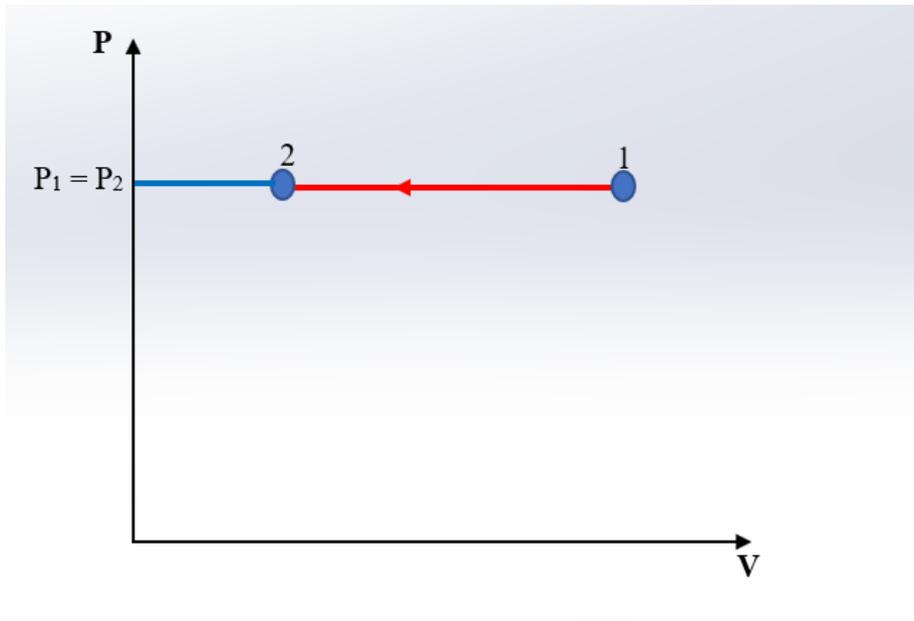
Proceso isobárico “presión constante” de 2 a 1 en diagrama $T - s$



Ley de Charles

Figura 112

Proceso isobárico “presión constante” de 2 a 1 en diagrama P - v



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

$$\frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2} = \frac{v_3}{T_3} = \frac{v_n}{T_n} \dots = C$$

$$\frac{v_0}{T_0} = \frac{v_f}{T_f}$$

Ecuación de estado

$$PV = mRT$$

Variación de energía interna

$$dU = mc_v dT \quad \text{integrando}$$

$$\int_0^f dU = \int_0^f m c_v dT$$

$$\Delta U = mc_v \int_0^f dT$$

$$\Delta U = mc_v (T_f - T_0)$$

$$\Delta U = mc_v \Delta T$$

Variación de entalpía

$$dH = mc_p dT \quad \text{integrando}$$

$$\int_0^f dH = \int_0^f m c_p dT$$

$$\Delta H = mc_p \int_0^f dT$$

$$\Delta H = mc_p (T_f - T_0)$$

$$\Delta H = mc_p \Delta T$$

Calor

$$\partial Q = dU + PdV \quad \Rightarrow \quad \partial Q = dU + PdV$$

$$\partial Q = dH - VdP \quad \int_0^f \partial Q = \int_0^f dU + P \int_0^f dV$$

$$\partial Q = TdS \quad Q = U_f - U_0 + P(V_f - V_0)$$

$$Q = \Delta U + P(\Delta V)$$

$$Q = mc_v \Delta T + P(\Delta V)$$

$$\partial Q = dU + PdV$$

$$\partial Q = dH - VdP$$

$$\partial Q = TdS$$

$$Q = mc_p\Delta T$$

$$\partial Q = dH + VdP$$

$$\int_0^f \partial Q = \int_0^f dH$$

$$Q = H_f - H_0$$

$$Q = \Delta H$$

$$Q = mc_p(T_f - T_0)$$

Trabajo

Trabajo:

$$\partial Q = dH + dP + dK + \partial W_{eje} \quad \partial Q$$

$$= dH + dP + dK + \partial W_{eje}$$

$$W_{nf} = \int PdV \quad \int_0^f \partial Q$$

$$= \int_0^f dH + \int_0^f dP + \int_0^f dK + \int_0^f \partial W_{eje}$$

$$Q = \Delta H + \Delta P + \Delta K + \partial W_{eje}$$

Trabajo no fluente

$$W_{nf} = \int PdV$$

$$W_{nf} = P(V_f - V_0)$$

$$W_{nf} = P(\Delta V)$$

4.3 Proceso isométrico “volumen constante”

Toda transformación en equilibrio que ocurre a volumen constante se denomina proceso isométrico.

Figura 113

Proceso isométrico “volumen constante” de 1 a 2 en diagrama T - s

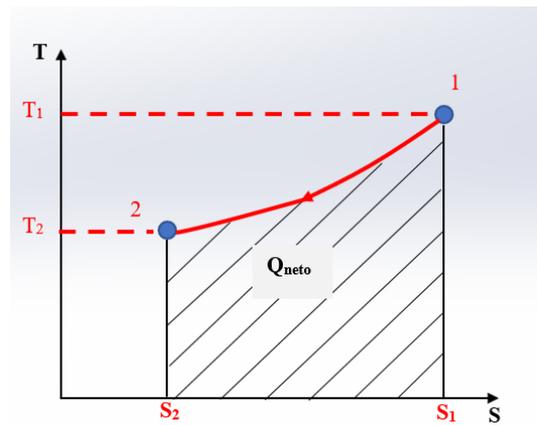


Figura 114

Proceso isométrico “volumen constante” de 1 a 2 en diagrama P - v

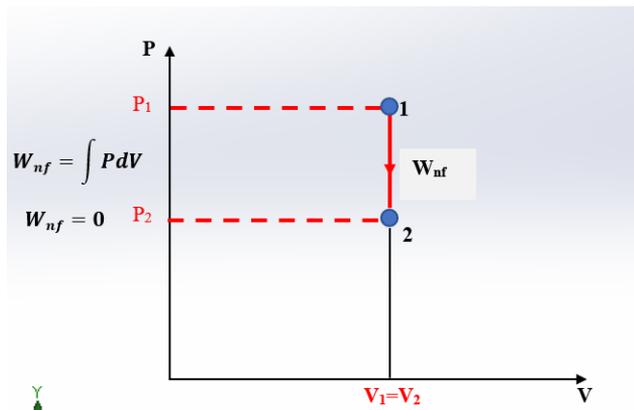


Figura 115

Proceso isométrico “volumen constante” de 2 a 1 en diagrama P- v

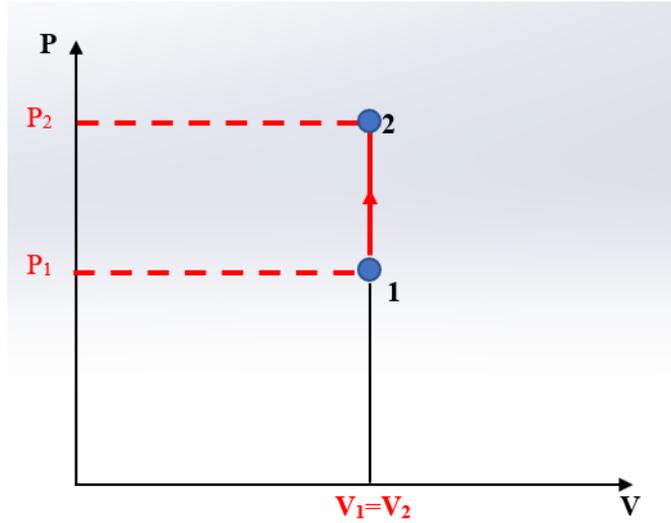
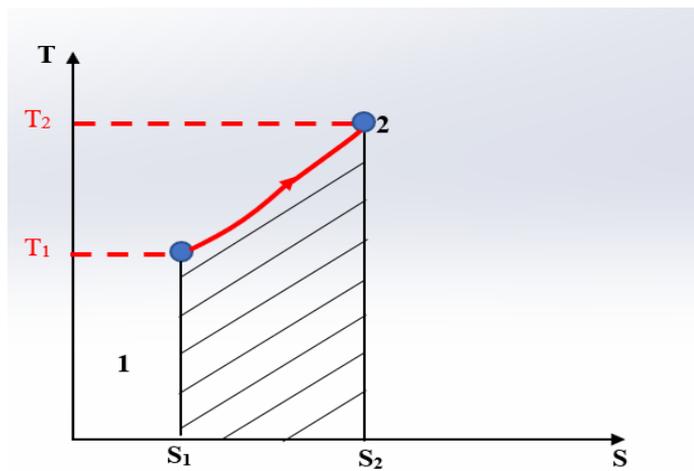


Figura 116

Proceso isométrico “volumen constante” de 2 a 1 en diagrama T - s

Propiedades de estado



Ley de Gay-Lussac

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

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} = \frac{P_3}{T_3} = \frac{P_n}{T_n} \dots = C$$

$$\frac{P_0}{T_0} = \frac{P_f}{T_f}$$

Ecuación de estado

$$PV = mRT$$

Variación de energía interna

$$dU = mc_v dT$$

$$\int_0^f dU = \int_0^f m c_v dT$$

$$\Delta U = mc_v \int_0^f dT$$

$$\Delta U = mc_v (T_f - T_0)$$

$$\Delta U = mc_v \Delta T$$

Variación de entalpía

$$dH = mc_p dT$$

$$\int_0^f dH = \int_0^f m c_p dT$$

$$\Delta H = mc_p \int_0^f dT$$

$$\Delta H = mc_p (T_f - T_0)$$

$$\Delta H = mc_p \Delta T$$

Calor

$$\partial Q = dU + PdV \quad \Rightarrow \quad \partial Q = dU + PdV$$

$$\partial Q = dH - VdP \quad \partial Q = dU$$

$$\partial Q = TdS \quad \int_0^f \partial Q = \int_0^f dU$$

$$Q = U_f - U_0$$

$$Q = \Delta U = mc_v(T_f - T_0)$$

$$Q = \Delta U = mc_v\Delta T$$

Variación de entropía

$$\partial Q = dU + PdV \quad dS = \frac{\partial Q}{T}$$

$$dU = mc_v dT$$

$$dS = \frac{dU + PdV}{T} = \frac{PdU}{T}$$

$$\partial Q = TdS$$

$$dS = \frac{mc_v dT}{T} \quad \text{integrando}$$

$$\int_0^f dS = \int_0^f \frac{mc_v dT}{T}$$

$$\Delta S = mc_v \ln \frac{T_f}{T_0}$$

$$\partial Q = dH - VdP$$

$$dS = \frac{\partial Q}{T}$$

$$dS = \frac{dH - VdP}{T} = \frac{dH}{T} - \frac{VdP}{T} \quad dS = mc_p dT$$

$$dS = \frac{mc_p dT}{T} = \frac{mRdP}{P} \quad PV = mRt$$

$$\int_0^f dS = \int_0^f \frac{mc_p dT}{T} - \int_0^f \frac{mRdP}{P} \quad \text{integrando}$$

$$\Delta S = mc_p \ln \frac{T_f}{T_0} - mR \ln \frac{P_f}{P_0}$$

$$\Delta S = mR \ln \frac{P_0}{P_f}$$

4.4 Proceso isotérmico “temperatura constante”

Toda transformación en equilibrio que ocurre a temperatura constante se denomina proceso isotérmico.

Figura 117

Proceso isotérmico “temperatura constante” de 1 a 2 en diagrama T-s

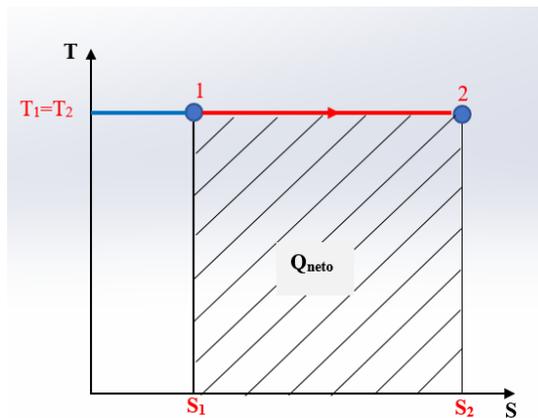
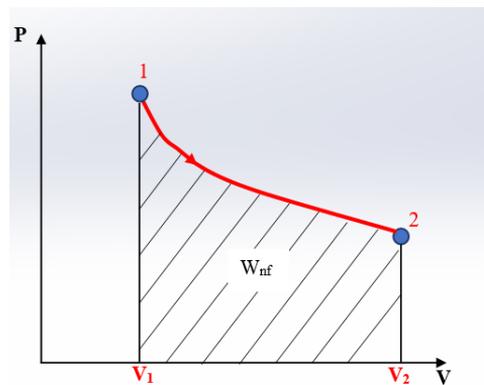


Figura 118

Proceso isotérmico “temperatura constante” de 1 a 2 en diagrama P-v



Propiedades de estado

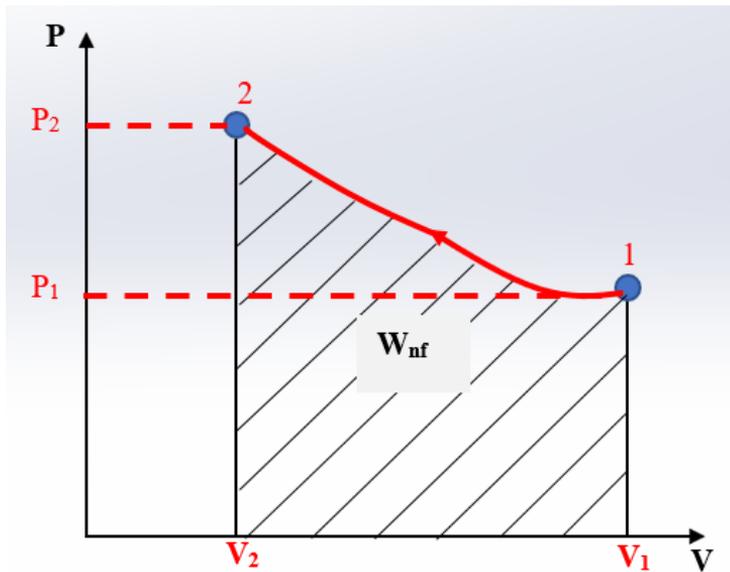
Boyle-Mariotte

$$Pv = C \quad P_1v_1 = P_2v_2 = P_3v_3 = P_nv_n \dots \dots = C$$

$$P_0v_0 = P_fv_f$$

Figura 119

Proceso isotérmico “temperatura constante” de 2 a 1 en diagrama P-v.



Ecuación de estado

$$PV = mRT$$

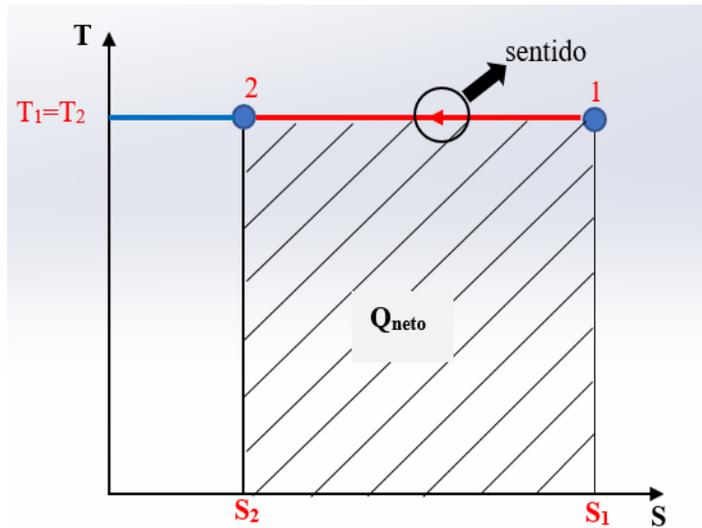
Variación de energía interna

$$dU = mc_v dT \Rightarrow dT = 0$$

$$\Delta U = 0$$

Figura 120

Proceso isotérmico “temperatura constante” de 2 a 1 en diagrama T-s.



Variación de entalpía

$$dH = mc_p dT \Rightarrow dT = 0$$

$$\Delta U = 0$$

Calor

$$\partial Q = dU + PdV \Rightarrow \partial Q = dU + PdV$$

$$\partial Q = dH - VdP \quad \int_0^f \partial Q = \int_0^f PdV$$

$$\partial Q = TdS \quad Q = PV \ln\left(\frac{V_f}{V_0}\right)$$

$$PV = mRT$$

$$Q = mRT \ln\left(\frac{V_f}{V_0}\right)$$

Variación de entropía

$$\partial Q = dU + PdV$$

$$dS = \frac{\partial Q}{T}$$

$$dU = mc_v dT$$

$$dS = \frac{dU + PdV}{T} = \frac{PdV}{T} \quad PV =$$

$$mRT$$

$$\partial Q = TdS$$

$$dS = \frac{mRTdV}{V T} \quad \text{integrando}$$

$$\int_0^f dS = \int_0^f \frac{mRdV}{V}$$

$$\Delta S = mR \ln \frac{V_f}{V_0}$$

$$\partial Q = dH - VdP$$

$$dS = \frac{\partial Q}{T}$$

$$dS = \frac{dH + VdP}{T} = \frac{VdP}{T}$$

$$dS = \frac{mRTdP}{TP} = \frac{PdV}{T} \quad \text{integrando}$$

$$\int_0^f dS = - \int_0^f \frac{mRdP}{P}$$

$$\Delta S = -mR \ln \frac{P_f}{P_0}$$

$$\Delta S = mR \ln \frac{P_0}{P_f}$$

4.5 Proceso isoentrópico “entropía constante”

Toda transformación en equilibrio que ocurre a entropía constante se denomina proceso isoentrópico.

Figura 121

Proceso isoentrópico “entropía constante” de 1 a 2 en diagrama P - v

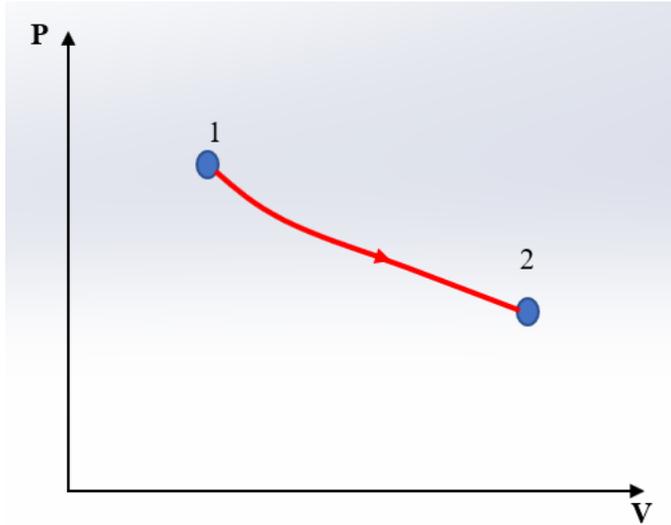


Figura 122

Proceso isoentrópico “entropía constante” de 1 a 2 en diagrama T - s

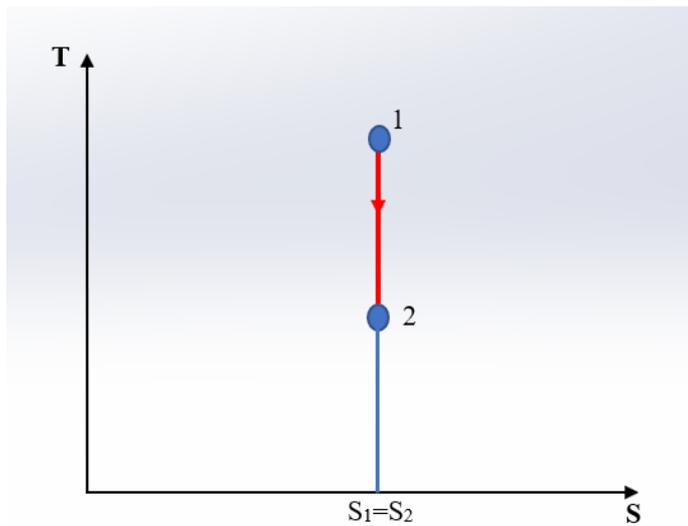


Figura 123

Proceso isoentrópico “entropía constante” de 2 a 1 en diagrama P- v.

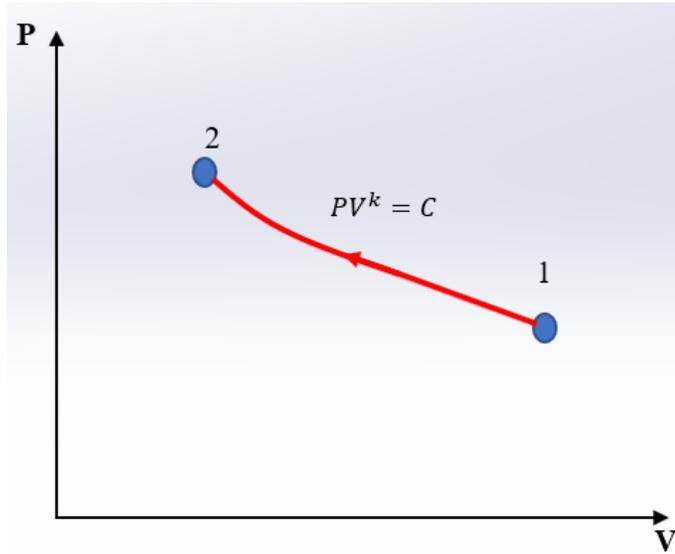
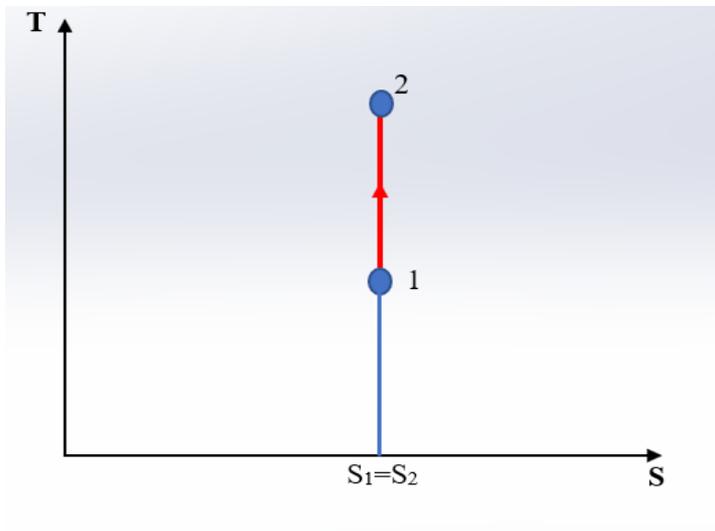


Figura 124

Proceso isoentrópico “entropía constante” de 2 a 1 en diagrama T - s.



Propiedades de estado

$$PV^k = C$$

$$P_0V_0^k = P_fV_f^k$$

$$\frac{T_f}{T_0} = \left(\frac{V_0}{V_f}\right)^{k-1}$$

$$\frac{T_f}{T_0} = \left(\frac{P_f}{P_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

Ecuación de estado

$$PV = mRT$$

Variación de energía interna

$$dU = mc_v dT \quad \text{integrando}$$

$$\int_0^f dU = \int_0^f m c_v dT$$

$$\Delta U = mc_v \int_0^f dT$$

$$\Delta U = mc_v (T_f - T_0)$$

$$\Delta U = mc_v \Delta T$$

Variación de entalpía

$$dH = mc_p dT \quad \text{integrando}$$

$$\int_0^f dH = \int_0^f m c_p dT$$

$$\Delta H = mc_p \int_0^f dT$$

$$\Delta H = mc_p (T_f - T_0)$$

$$\Delta H = mc_p \Delta T$$

Calor

$$\partial Q = dU + PdV \quad \partial Q = TdS$$

$$\partial Q = dH - VdP \quad \partial Q = 0$$

$$\partial Q = TdS$$

Variación de entropía

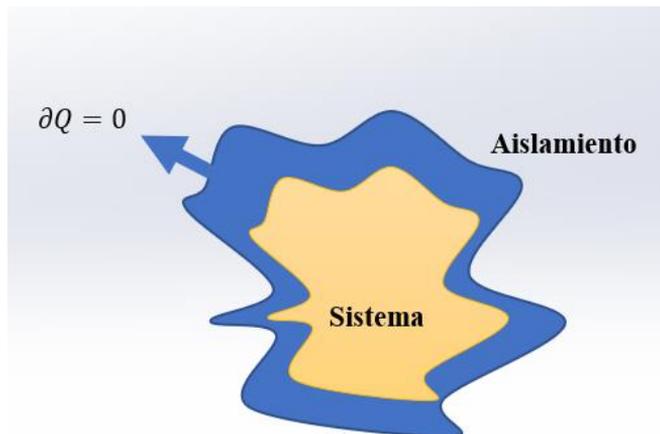
$$dS = 0$$

Adiabáticos “calor constante”

Se denomina adiabática a una transformación termodinámica en la que el sistema ni entrega ni recibe calor, es decir:

Figura 125

Sistemas adiabáticos gas ideal “calor =0”



4.6 Proceso politrópico

Se denomina politrópico al proceso termodinámico reversible que satisface la ecuación siguiente:

$$PV^n = C$$

Figura 126

Proceso politrópico de 1 a 2 en diagrama P - v

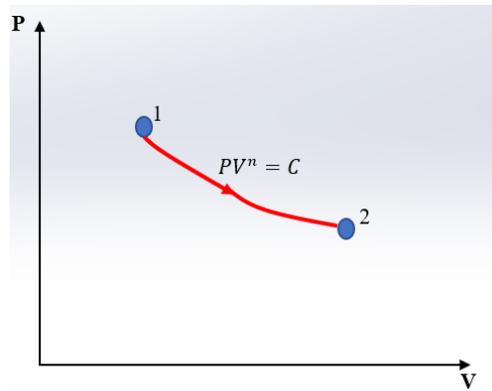


Figura 127

Proceso politrópico de 1 a 2 en diagrama T - s.

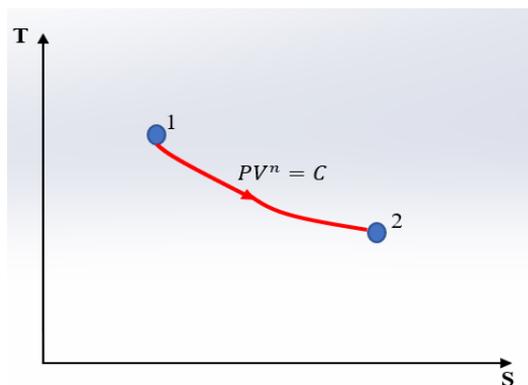


Figura 128

Proceso politrópico de 2 a 1 en diagrama P- v

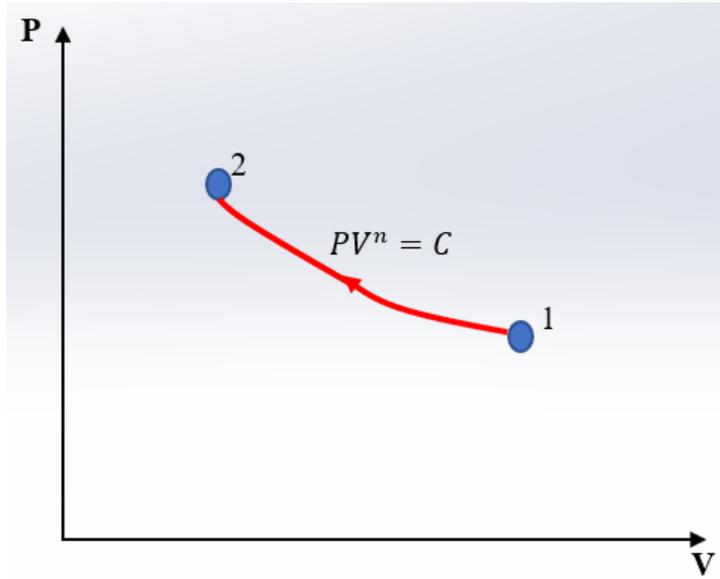
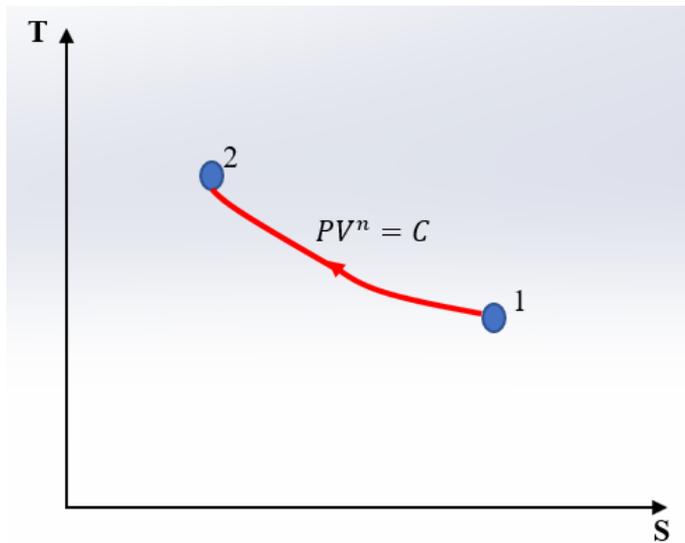


Figura 129

Proceso politrópico de 2 a 1 en diagrama T - s



La magnitud n se llama exponente politrópico, puede tomar valores desde $+\infty$ hasta $-\infty$. La curva del proceso politrópico en los diagramas de estado se denomina politrópica.

Propiedades de estado

$$PV^n = C$$

$$P_0V_0^n = P_fV_f^n$$

$$\frac{T_f}{T_0} = \left(\frac{V_0}{V_f}\right)^{n-1} \quad n = \frac{\ln\left(\frac{P_0}{P_f}\right)}{\ln\left(\frac{V_f}{V_0}\right)}$$

$$\frac{T_f}{T_0} = \left(\frac{P_f}{P_0}\right)^{\frac{n-1}{n}}$$

Ecuación de estado

$$PV = mRT$$

Variación de energía interna

$$dU = mc_v dT \quad \text{integrando}$$

$$\int_0^f dU = \int_0^f m c_v dT$$

$$\Delta U = mc_v \int_0^f dT$$

$$\Delta U = mc_v (T_f - T_0)$$

$$\Delta U = mc_v \Delta T$$

Variación de entalpía

$$dH = mc_p dT \quad \text{integrando}$$

$$\int_0^f dH = \int_0^f m c_p dT$$

$$\Delta H = m c_p \int_0^f dT$$

$$\Delta H = m c_p (T_f - T_0)$$

$$\Delta H = m c_p \Delta T$$

Calor

$$Q = m c_v \Delta T + \frac{mR(\Delta T)}{1-n}$$

$$R = c_v(k-1)$$

$$Q = m c_v \Delta T + \frac{m(c_v(k-1))(\Delta T)}{1-n}$$

$$Q = m c_v \left(1 + \frac{(K-n)}{1-n} \right) \Delta T$$

$$Q = m c_v \left(\frac{(K-n)}{1-n} \right) \Delta T$$

$$c_n = c_v \left(\frac{(K-n)}{1-n} \right)$$

$$Q = m c_n \Delta T$$

Variación de entropía

$$\partial Q = dU + PdV \quad dS = \frac{\partial Q}{T}$$

$$dU = m c_v dT$$

$$dS = \frac{dU + PdV}{T} = \frac{dU}{T} + \frac{PdV}{T}$$

$$PV = mRT$$

$$\partial Q = T dS$$

$$dS = \frac{m c_v dT}{T} + \frac{m R dV}{V T} \quad \text{integrando}$$

$$\int_0^f dS = \int_0^f \frac{m c_v dT}{T} + \int_0^f \frac{m R dV}{V}$$

$$\Delta S = m c_v \ln \frac{T_f}{T_0} + m R \ln \frac{T_f}{T_0}$$

$$\partial Q = dH - VdP$$

$$dS = \frac{\partial Q}{T}$$

$$dS = \frac{dH + VdP}{T} = \frac{dH}{T} - \frac{VdP}{T}$$

$$dH = mc_p dT$$

$$PV = mRT$$

$$dS = \frac{mc_p dT}{T} - \frac{mRdP}{P} \quad \text{integrando}$$

$$\int_0^f dS = \int_0^f \frac{mc_p dT}{T} - \int_0^f \frac{mRdP}{P}$$

$$\Delta S = mc_p \ln \frac{T_f}{T_0} - mR \ln \frac{P_f}{P_0}$$

Trabajo

$$\partial Q = dH + dP + dK + \partial W_{eje} \quad \partial Q = dH + dP + dK + \partial W_{eje}$$

$$W_{nf} = \int PdV$$

$$\int_0^f \partial Q = \int_0^f dH + \int_0^f dP + \int_0^f dK + \int_0^f \partial W_{eje}$$

$$Q = \Delta H + \Delta P + \Delta K + \partial W_{eje}$$

Trabajo no fluente

$$W_{nf} = \int PdV$$

$$W_{nf} = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - n}$$

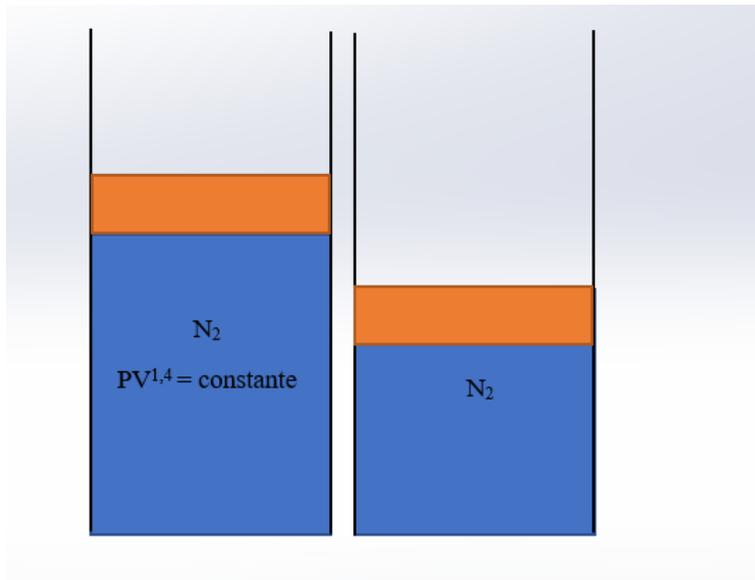
$$W_{nf} = \frac{mR(T_2 - T_1)}{1 - n}$$

Ejercicio gas Ideal

Un dispositivo de cilindro-émbolo sin fricción contiene 3 lb de nitrógeno a 14 psia y 450°R. El nitrógeno se comprime entonces lentamente, siguiendo la relación $PV^{1.4} = \text{constante}$ hasta que llega a una temperatura final de 810 °R.

Figura 130

Ejercicio procesos con gas Ideal



Determine las propiedades inicial y final del nitrógeno:

Propiedades	Estado inicial	Estado final
Presión en psf	2016	15774,0893
Temperatura en °R	450	810
Volumen en ft ³	36,9456577	8,49928004
Masa en lb	3	3

Encuentre la variación de energía interna en Btu

$$\Delta U_{1-2} = mc_v(T_2 - T_1)$$

$$\Delta U_{1-2} = (3lbm) \left(0,177 \frac{Btu}{lbm \text{ } ^\circ R} \right) (810 \text{ } ^\circ R - 450 \text{ } ^\circ R) = 191,16 \text{ Btu}$$

Encuentre la variación de entalpía en Btu

$$\Delta H_{1-2} = mc_p(T_2 - T_1)$$

$$\Delta H_{1-2} = (3lbm) \left(0,248 \frac{Btu}{lbm \text{ } ^\circ R} \right) (810 \text{ } ^\circ R - 450 \text{ } ^\circ R) = 267,84 \text{ Btu}$$

Encuentre la variación de entropía en Btu/°R

$$\Delta S_{1-2} = mc_p \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - mR \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

$$\Delta S_{1-2} = (3lbm) \left(0,248 \frac{Btu}{lbm \text{ } ^\circ R} \right) \ln \left(\frac{810 \text{ } ^\circ R}{450 \text{ } ^\circ R} \right) - (3lbm) \left(0,0709 \frac{Btu}{lbm \text{ } ^\circ R} \right) \ln \left(\frac{15774,0893 \text{ psf}}{2016 \text{ psf}} \right)$$

$$\Delta S_{1-2} = 0$$

Encuentre el trabajo de frontera en Btu

$$W_{nf} = \frac{mR(T_2 - T_1)}{1 - n}$$

$$W_{nf} = \frac{(3lbm) \left(0,0709 \frac{Btu}{lbm \text{ } ^\circ R} \right) (810 \text{ } ^\circ R - 450 \text{ } ^\circ R)}{1 - 1,4} = -191,16 \text{ Btu}$$

Encuentre el calor en Btu

$$Q = mc_v(T_2 - T_1) + \frac{mR(T_2 - T_1)}{1 - n}$$

$$Q = 191,16 \text{ Btu} - 191,16 \text{ Btu} = 0$$

El integral $-\int VdP$

$$-\int VdP = -n \frac{mR(T_2 - T_1)}{n-1} = -267,9927015$$

4.7 Procesos termodinámicos gases reales

Todo cambio que existe desde un estado en equilibrio a otro estado en equilibrio.

Figura 131

Diagrama P - v ejercicio con gas ideal

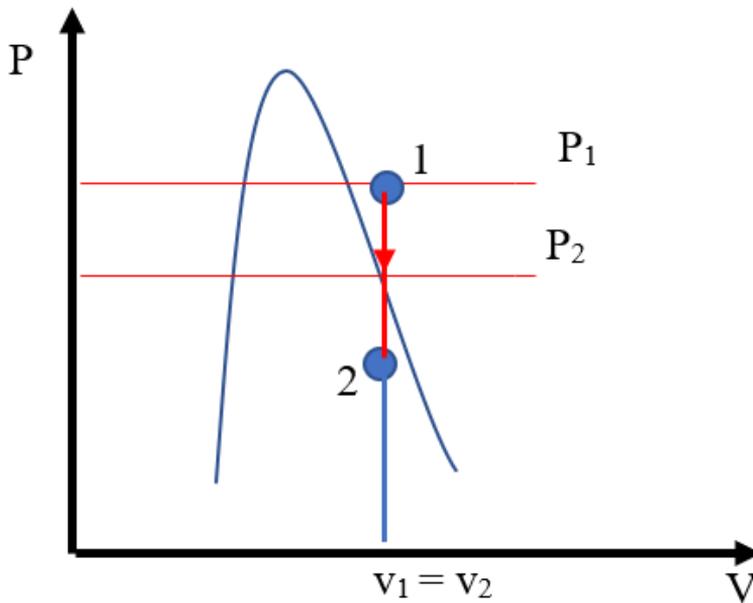


Figura 132

Diagrama $T - s$ ejercicio con gas ideal

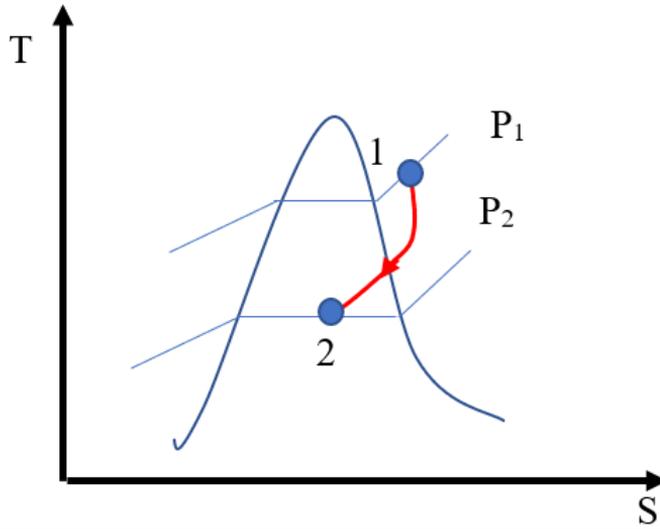
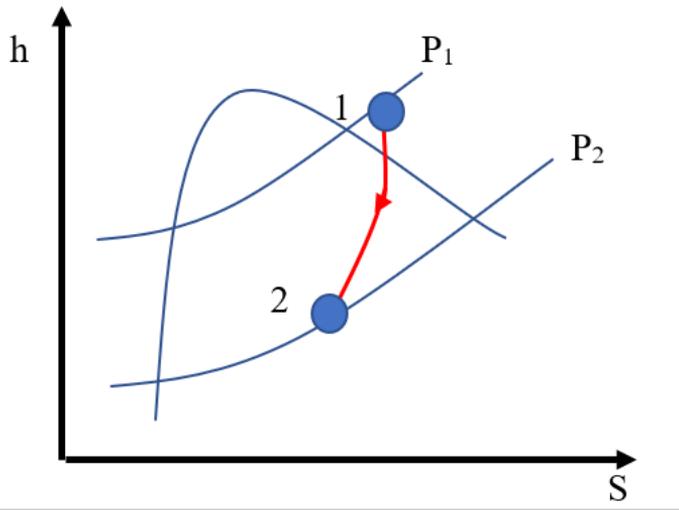


Figura 133

Diagrama $h - s$ ejercicio con gas ideal



4.8 Procesos isométricos “volumen constante”

Todo cambio que existe desde un estado en equilibrio a otro estado en equilibrio a volumen constante.

Variación de energía interna

$$\Delta U_{1-2} = U_2 - U_1$$

Variación de energía interna específica

$$\Delta u_{1-2} = u_2 - u_1$$

Variación de entalpía

$$\Delta H_{1-2} = H_2 - H_1$$

Variación de entalpía específica

$$\Delta h_{1-2} = h_2 - h_1$$

Variación de entropía

$$\Delta S_{1-2} = S_2 - S_1$$

Variación de entropía específica

$$\Delta s_{1-2} = s_2 - s_1$$

4.9 Procesos isobáricos “presión constante”

Todo cambio que existe desde un estado en equilibrio a otro estado en equilibrio a presión constante

El área bajo la curva del diagrama P-v es el trabajo de frontera:

$$W_{nf} = PdV$$
$$\int_1^2 W_{nf} = \int_1^2 PdV$$
$$W_{nf} = \int_1^2 PdV$$

Si el proceso es de derecha a izquierda el área es negativa (Trabajo entra al sistema).

Si el proceso es de izquierda a derecha el área es positiva (Trabajo sale del sistema).

Proceso a presión constante

Figura 134

Proceso a presión constante gas real diagrama P - v

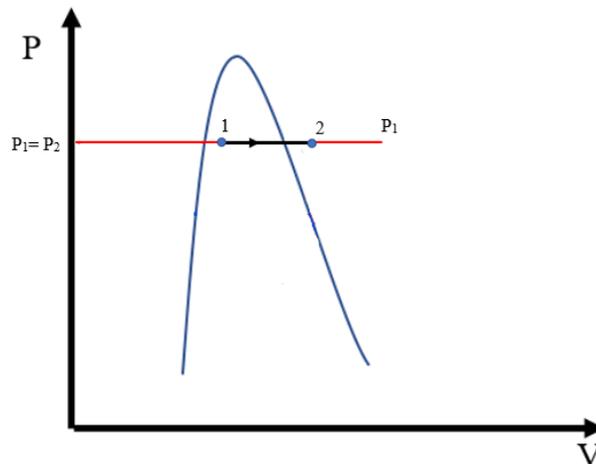


Figura 135

Proceso a presión constante gas real diagrama T - s

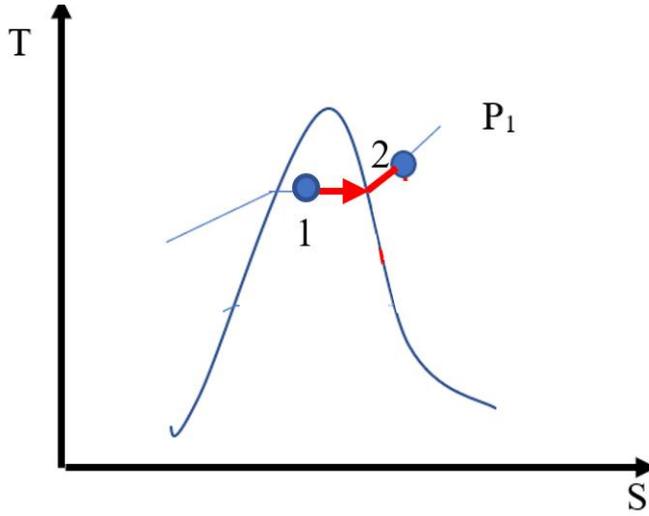
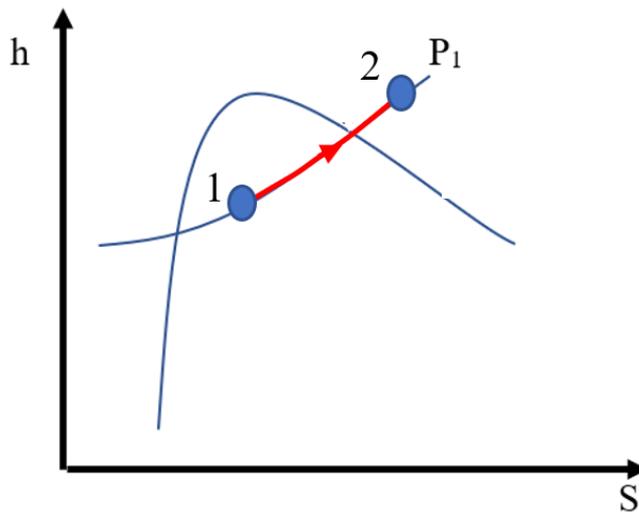


Figura 136

Proceso a presión constante gas real diagrama h - s



Proceso a presión constante

Variación de energía interna

$$\Delta U_{1-2} = U_2 - U_1$$

Variación de entalpía

$$\Delta H_{1-2} = H_2 - H_1$$

Variación de entropía

$$\Delta S_{1-2} = S_2 - S_1$$

Calor:

$$\partial Q = dU + PdV$$

$$\partial Q = dH - VdP$$

$$\partial Q = TdS$$

$$\partial Q = dU + PdV$$

Integrando:

$$\int_1^2 \partial Q = \int_1^2 dU + P \int_1^2 dV$$

$$Q = U_2 - U_1 + P(V_2 - V_1)$$

$$Q = \Delta U_{1-2} + P(\Delta V_{1-2})$$

4.10 Proceso isotérmico “temperatura constante”

Todo cambio que existe desde un estado en equilibrio a otro estado en equilibrio a temperatura constante.

Figura 137

Proceso a temperatura constante gas real diagrama P - v

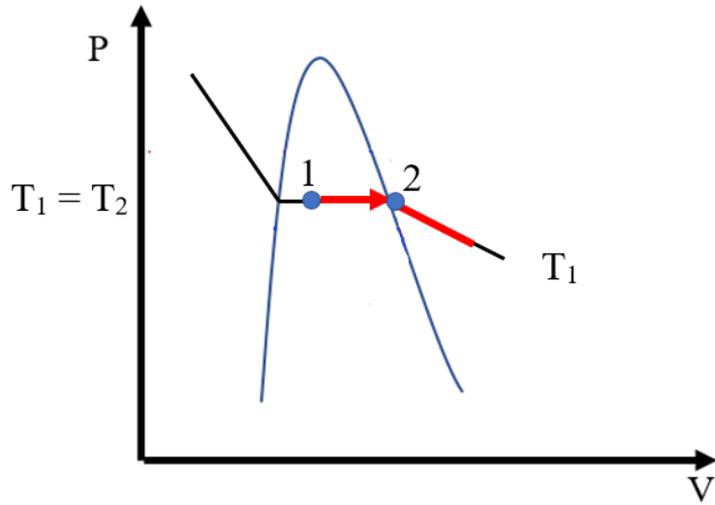


Figura 138

Proceso a temperatura constante gas real diagrama T - s

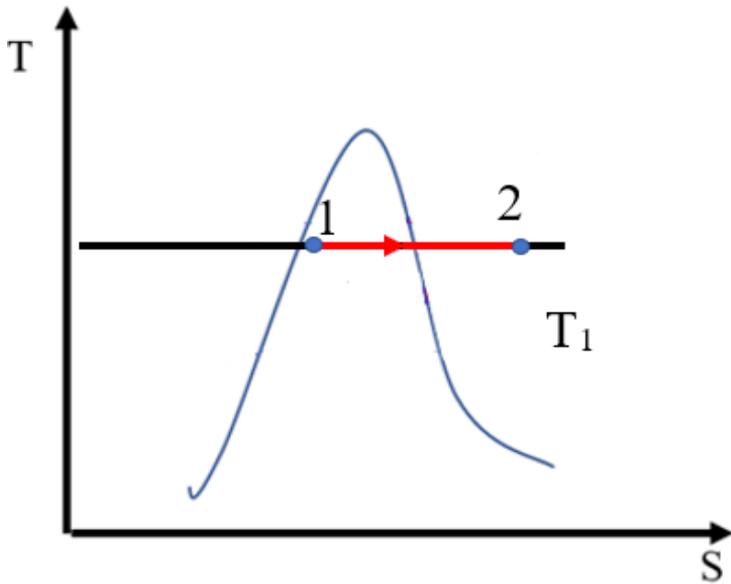


Figura 139

Proceso a temperatura constante gas real diagrama $h-s$

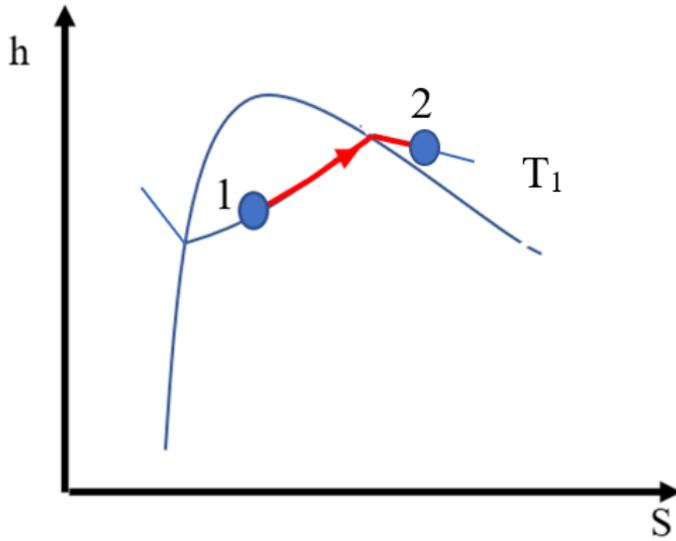
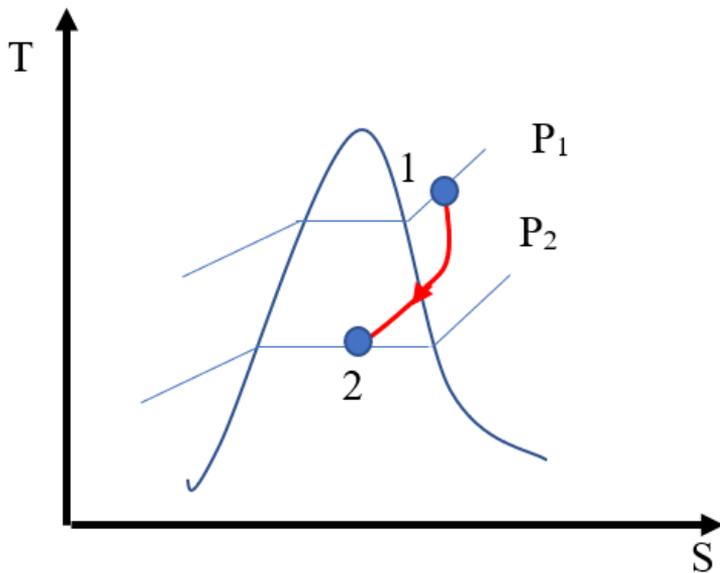


Figura 140

Proceso a temperatura constante con isobaras gas real diagrama $P-v$



Proceso a temperatura constante

Variación de energía interna

$$\Delta U_{1-2} = U_2 - U_1$$

Variación de entalpía

$$\Delta H_{1-2} = H_2 - H_1$$

Variación de entropía

$$\Delta S_{1-2} = S_2 - S_1$$

Calor:

$$\partial Q = dU + PdV$$

$$\partial Q = dH - VdP$$

$$\partial Q = TdS$$

Integrando:

$$\int_1^2 \partial Q = T \int_1^2 dS$$

$$Q = T(S_2 - S_1)$$

$$Q = T(\Delta S_{1-2})$$

Trabajo:

$$\partial Q = dH + dP + dK + \partial W_{eje}$$

$$\partial Q = dU + PdV$$

Integrando:

$$\int_1^2 \partial Q = \int_1^2 dU + \int_1^2 PdV$$

$$\int_1^2 PdV = \int_1^2 \partial Q - (U_2 - U_1)$$

$$W_{nf} = T(\Delta S_{1-2}) - \Delta U_{1-2}$$

$$W_{nf} = \int PdV$$

Trabajo no fluente:

$$W_{nf} = \int_1^2 PdV$$

Integrando:

$$\begin{aligned} \int_1^2 \partial Q &= \int_1^2 dU + \int_1^2 PdV \\ \int_1^2 PdV &= \int_1^2 \partial Q - (U_2 - U_1) \\ W_{nf} &= T(\Delta S_{1-2}) - \Delta U_{1-2} \end{aligned}$$

$$\partial Q = dH - VdP$$

Integrando:

$$\begin{aligned} \int_1^2 \partial Q &= \int_1^2 dH - \int_1^2 VdP \\ \int_1^2 VdP &= (H_2 - H_1) - \int_1^2 \partial Q \\ \int_1^2 VdP &= \Delta H_{1-2} - T(\Delta S_{1-2}) \end{aligned}$$

Trabajo:

$$\begin{aligned} \partial Q &= dH + dP + dK + \partial W_{eje} \\ \partial Q &= dH + dP + dK + \partial W_{eje} \\ \int_1^2 \partial Q &= \int_1^2 dH + \int_1^2 dP + \int_1^2 dK + \int_1^2 \partial W_{eje} \\ Q &= \Delta H_{1-2} + \Delta P_{1-2} + \Delta K_{1-2} + W_{eje} \end{aligned}$$

4.11 Proceso politrópico

Se denominan procesos politrópicos a las transformaciones termodinámicas reversibles que satisfacen la ecuación:

$$PV^n = C$$

La magnitud n se llama exponente politrópico, puede tomar valores desde $+\infty$ hasta $-\infty$.

La curva del proceso politrópico en los diagramas de estado se denomina politrópica.

Figura 141

Proceso politrópico gas real diagrama P - v

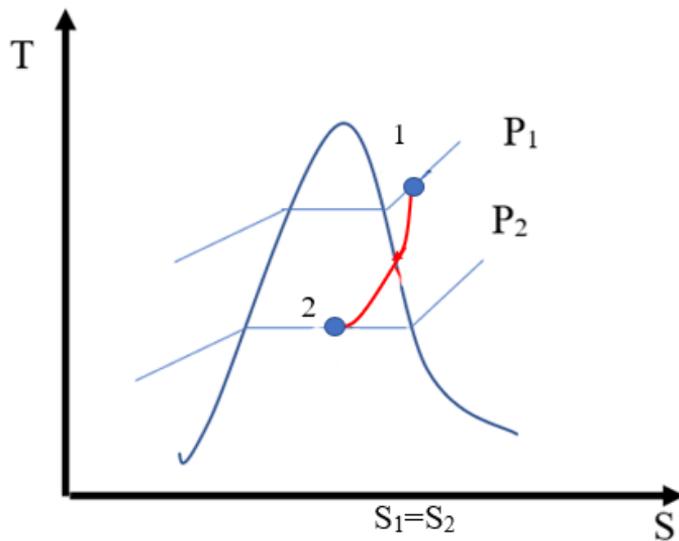


Figura 142

Proceso politrópico gas real diagrama $T - s$

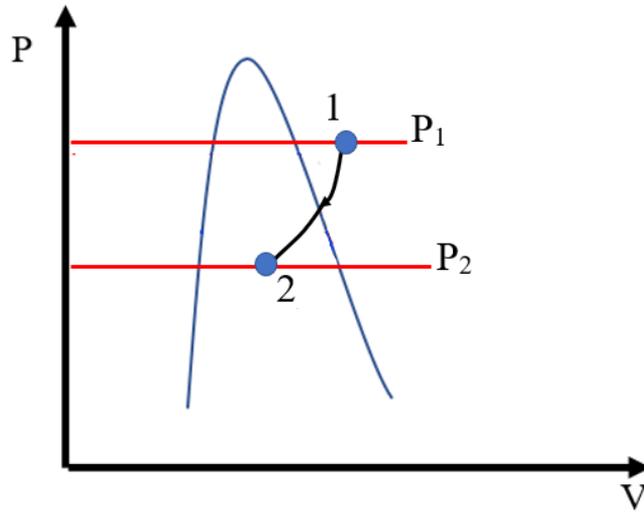
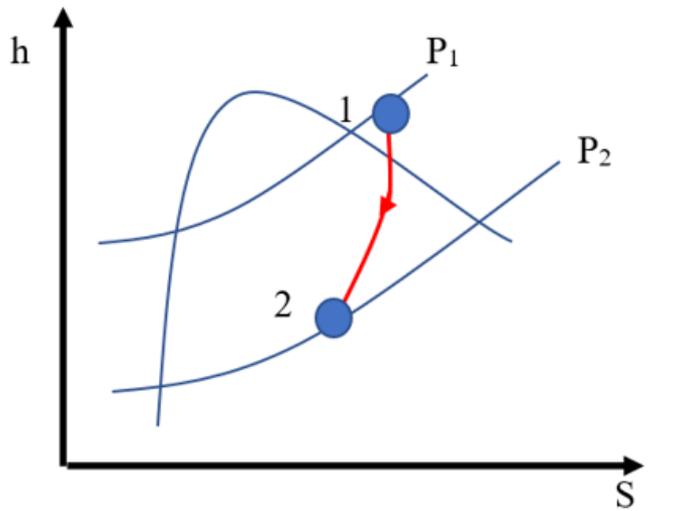


Figura 143

Proceso politrópico gas real diagrama $h - s$



4.12 Proceso politrópico

Variación de energía interna

$$\Delta U_{1-2} = U_2 - U_1$$

Variación de entalpía

$$\Delta H_{1-2} = H_2 - H_1$$

Variación de entropía

$$\Delta S_{1-2} = S_2 - S_1$$

Calor:

$$\partial Q = dU + PdV$$

$$\partial Q = dH - VdP$$

$$\partial Q = TdS$$

$$\partial Q = dU + PdV$$

Integrando:

$$\int_1^2 \partial Q = \int_1^2 dU + \int_1^2 PdV$$

$$Q = U_2 - U_1 + \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{1-n}$$

$$Q = \Delta U_{1-2} + \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{1-n}$$

$$\partial Q = dH - VdP$$

Integrando:

$$\int_1^2 \partial Q = \int_1^2 dH - \int_1^2 VdP$$

$$Q = H_2 - H_1 - \left(\frac{P_1 V_1 - P_2 V_2}{1 - n} \right) n$$

$$Q = \Delta H_{1-2} - \left(\frac{P_1 V_1 - P_2 V_2}{1 - n} \right) n$$

Trabajo:

$$\partial Q = dH + dP + dK + \partial W_{eje}$$

$$W_{nf} = \int P dV$$

Trabajo no fluente:

$$W_{nf} = \int_1^2 P dV$$

$$W_{nf} = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - n}$$

Trabajo:

$$\partial Q = dH + dP + dK + \partial W_{eje}$$

$$\partial Q = dH + dP + dK + \partial W_{eje}$$

$$\int_1^2 \partial Q = \int_1^2 dH + \int_1^2 dP + \int_1^2 dK + \int_1^2 \partial W_{eje}$$

$$Q = \Delta H_{1-2} + \Delta P_{1-2} + \Delta K_{1-2} + W_{eje}$$

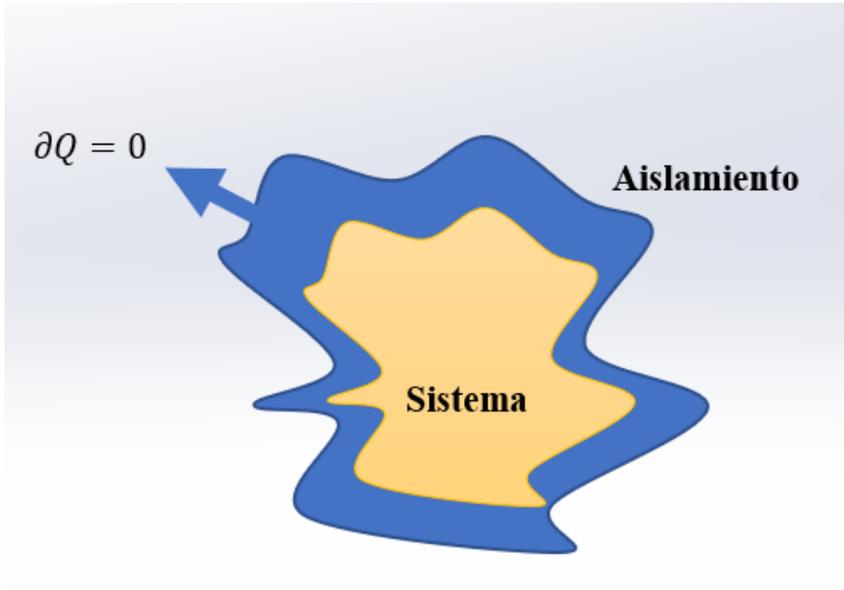
Proceso “procesos adiabáticos”

Se denomina adiabática a una transformación termodinámica en la que el sistema ni entrega ni recibe calor, es decir:

$$\partial Q = 0$$

Figura 144

Sistemas adiabáticos gas real “calor =0”



Segunda ley de la termodinámica

$$dS \geq \frac{\partial Q}{T} \quad \rightarrow \quad 0$$

$$\partial Q = 0$$

$$dS \geq 0$$

Integrando

$$dS = 0$$

$$dS > 0$$

$$\Delta S_{1-2} = S_2 - S_1 = 0$$

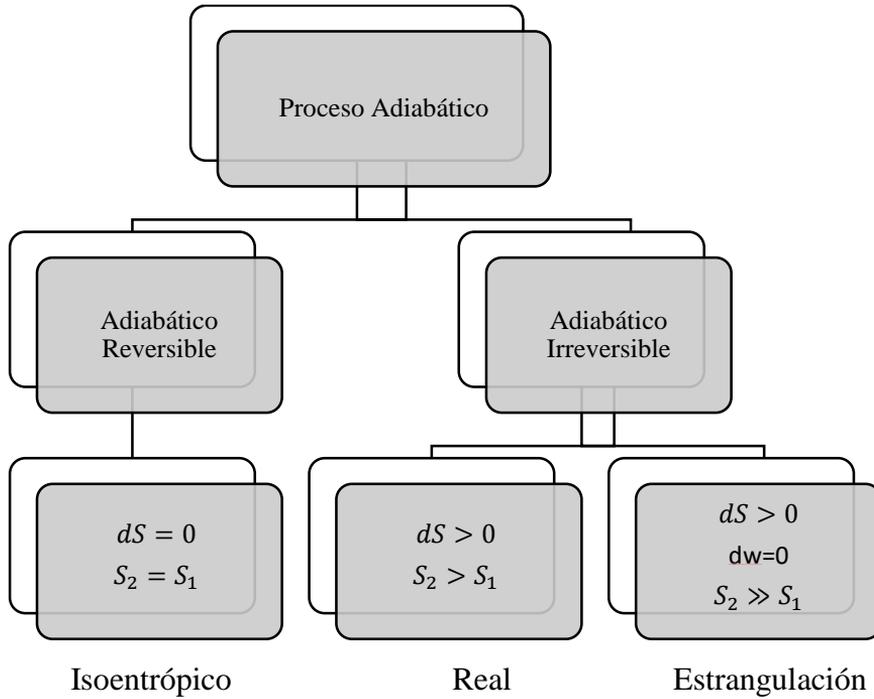
$$\Delta S_{1-2} = S_2 - S_1 > 0$$

$$S_2 = S_1$$

$$\Delta S_2 > S_1$$

Figura 145

Esquemas de procesos adiabáticos gas real



Proceso adiabático reversible

Todo cambio que existe desde un estado en equilibrio a otro estado en equilibrio que ocurre a entropía constante.

Figura 146

Proceso adiabático reversible gas real diagrama P - v

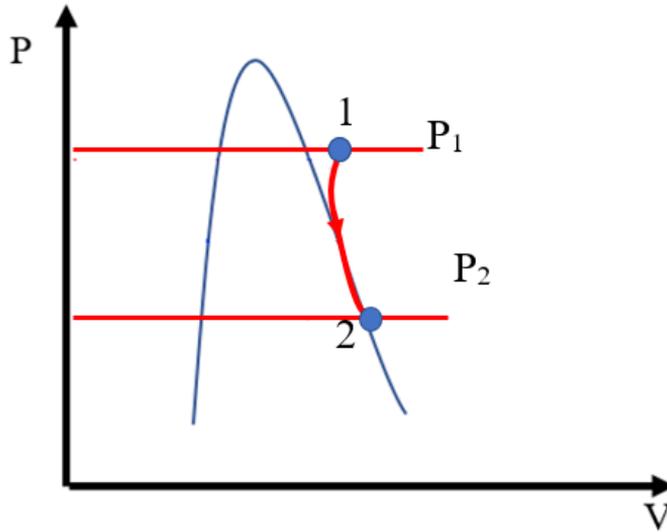


Figura 147

Proceso adiabático reversible gas real diagrama T - s

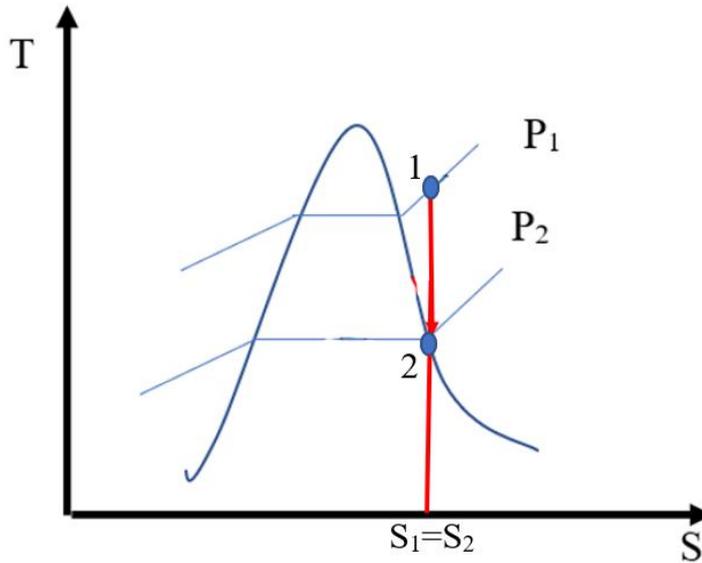
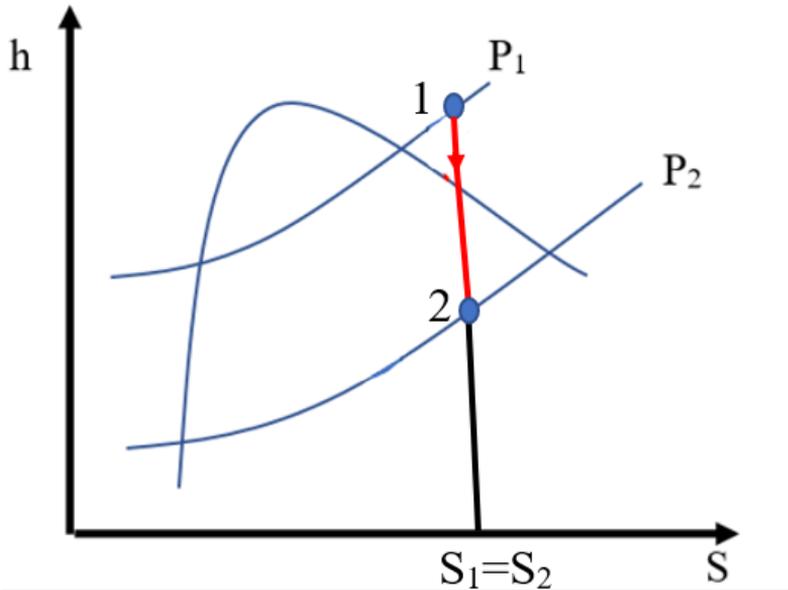


Figura 148

Proceso adiabático reversible gas real diagrama h -s



Proceso adiabático reversible

Variación de energía interna:

$$\Delta U_{1-2} = U_2 - U_1$$

Variación de entalpía:

$$\Delta H_{1-2} = H_2 - H_1$$

Variación de entropía:

$$\Delta S_{1-2} = S_2 - S_1 = 0$$

Calor:

$$\partial Q = dU + PdV$$

$$\partial Q = dH - VdP$$

$$\partial Q = TdS$$

$$\partial Q = TdS$$

$$\partial Q = 0$$

0

$$dS = 0$$

$$\partial Q = dH - VdP$$

Integrando:

$$0 = \int_1^2 dH - \int_1^2 VdP$$

$$\int_1^2 VdP = H_2 - H_1$$

$$\int_1^2 VdP = \Delta H_{1-2}$$

Trabajo:

$$\partial Q = dH + dP + dK + \partial W_{eje}$$

$$W_{nf} = \int PdV$$

Trabajo no fluente:

$$W_{nf} = \int_1^2 PdV$$

$$\partial Q = dU + PdV$$

Integrando:

$$0 = \int_1^2 dU + \int_1^2 PdV$$

$$\int_1^2 P dV = -(U_2 - U_1)$$

$$\int_1^2 P dV = -(\Delta U_{1-2})$$

Trabajo:

$$\partial Q = dH + \overset{0}{dP} + dK + \partial W_{eje}$$

$$0 = dH + dP + dK + \partial W_{eje}$$

$$0 = \int_1^2 dH + \int_1^2 dP + \int_1^2 dK + \int_1^2 \partial W_{eje}$$

$$0 = \Delta H_{1-2} + \Delta P_{1-2} + \Delta K_{1-2} + W_{eje}$$

Proceso adiabático irreversible

Figura 149

Proceso adiabático irreversible gas real diagrama P - v

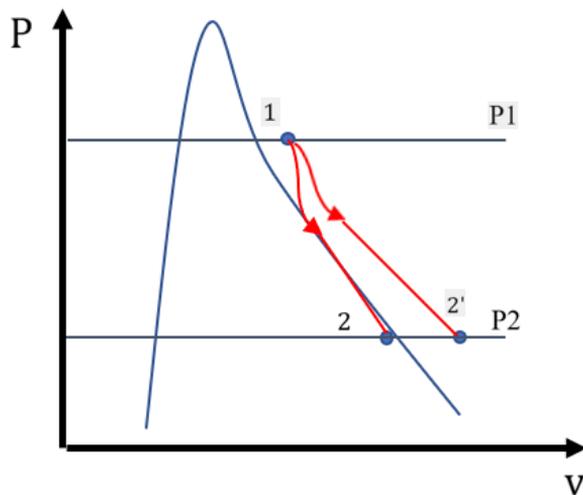


Figura 150

Proceso adiabático irreversible gas real diagrama T - s

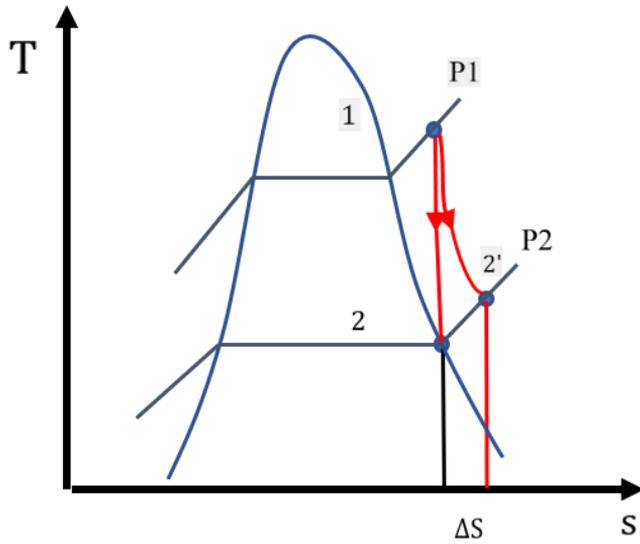
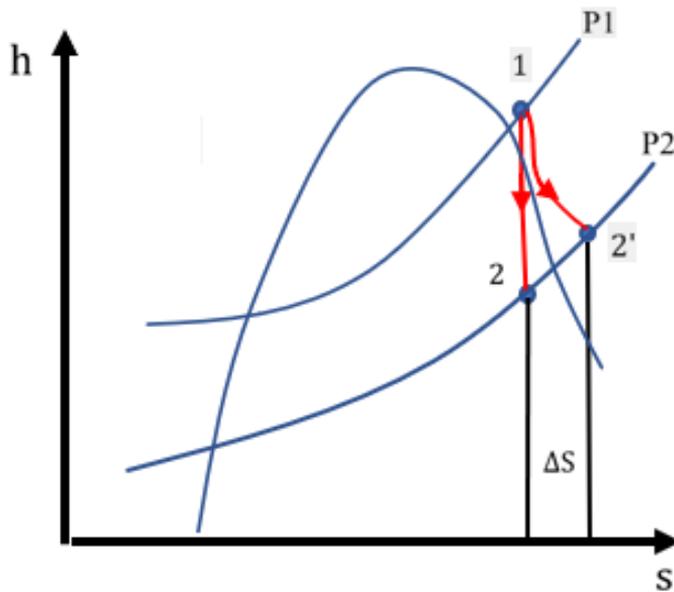


Figura 151

Proceso adiabático irreversible gas real diagrama h - s



Proceso adiabático irreversible

Variación de energía interna:

$$\Delta U_{1-2} = U_2 - U_1$$

Variación de entalpía:

$$\Delta H_{1-2} = H_2 - H_1$$

Variación de entropía:

$$\Delta S_{1-2} = S_2 - S_1$$

Calor:

$$\partial Q = dU + PdV$$

$$\partial Q = dH - VdP$$

$$\partial Q = TdS$$

$$\partial Q = dH - \overset{0}{VdP}$$

Integrando:

$$0 = \int_1^2 dH - \int_1^2 VdP$$

$$\int_1^2 VdP = H_2 - H_1$$

$$\int_1^2 VdP = \Delta H_{1-2}$$

Trabajo:

$$\partial Q = dH + dP + dK + \partial W_{eje}$$

$$W_{nf} = \int PdV$$

Trabajo no fluente:

$$W_{nf} = \int_1^2 P dV$$

$$\partial Q = dU + \overset{0}{P} dV$$

Integrando:

$$0 = \int_1^2 dU + \int_1^2 P dV$$

$$\int_1^2 P dV = -(U_2 - U_1)$$

$$\int_1^2 P dV = -(\Delta U_{1-2})$$

Trabajo:

$$\partial Q = dH + \overset{0}{dP} + dK + \partial W_{eje}$$

$$0 = dH + dP + dK + \partial W_{eje}$$

$$0 = \int_1^2 dH + \int_1^2 dP + \int_1^2 dK + \int_1^2 \partial W_{eje}$$

$$0 = \Delta H_{1-2} + \Delta P_{1-2} + \Delta K_{1-2} + W_{eje}$$

Proceso estrangulación

Este proceso se define como aquel en el cual toda la energía se disipa en forma de calor irreversible.

Figura 152

Proceso estrangulación gas real diagrama P - v

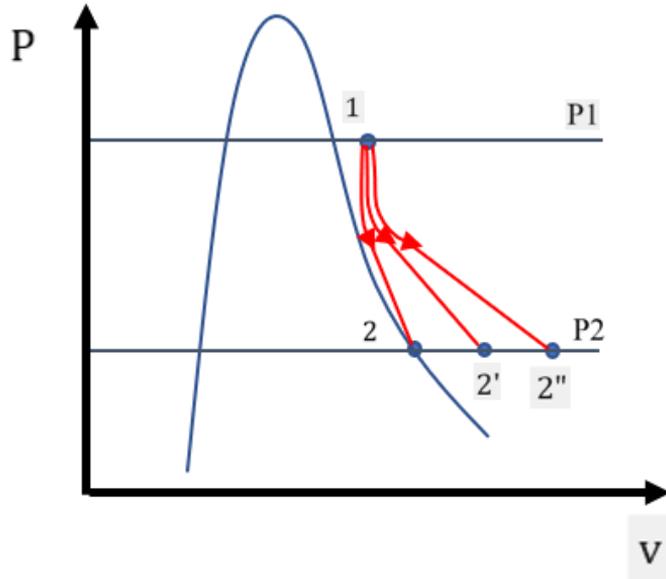


Figura 153

Proceso estrangulación gas real diagrama T - s

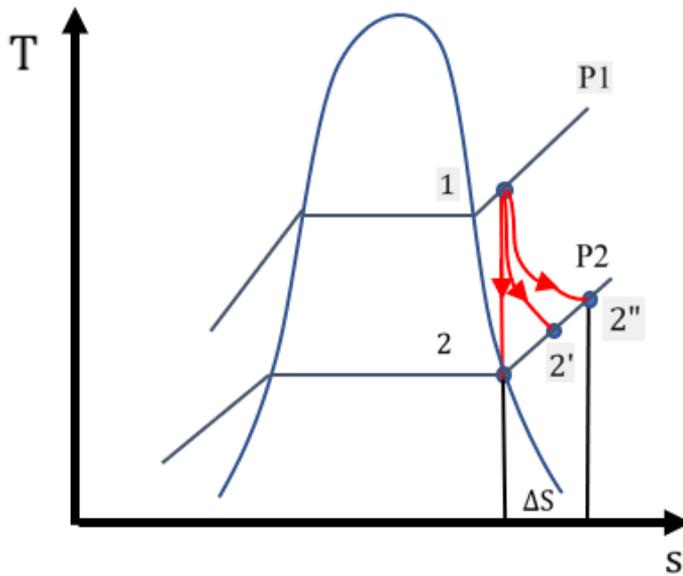
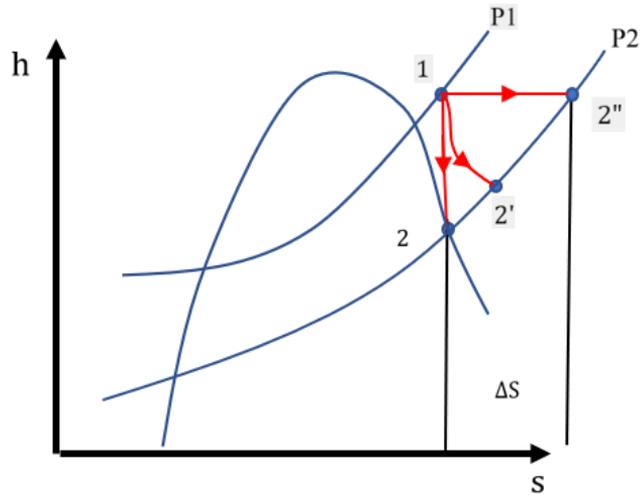


Figura 154

Proceso estrangulación gas real diagrama h - s



Trabajo:

$$\cancel{\partial Q} = \cancel{dH} + \cancel{dP} + \cancel{dK} + \cancel{\partial W_{e/e}}$$

$$0 = dH$$

$$dH = 0$$

$$\Delta H_{1-2} = H_2 - H_1$$

Integrando:

$$\Delta H_{1-2} = 0$$

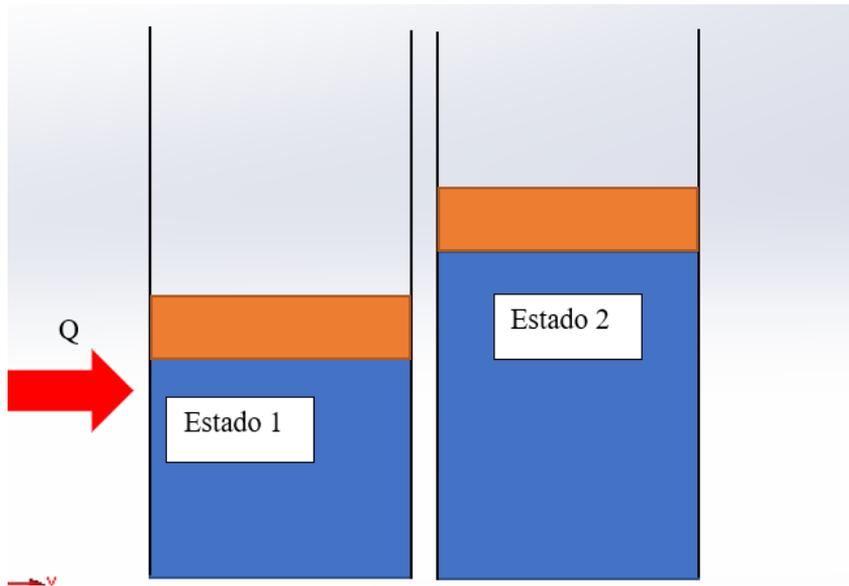
$$H_1 = H_2$$

Ejercicios

Se expande isotérmicamente 0,3 ft³ de agua líquida saturada a 400°F en un cilindro – émbolo de carga variable hasta que su calidad llega a 80 por ciento.

Figura 155

Ejercicio procesos con gas real



Determine:

Estado inicial y final de agua.

Propiedades	Estado inicial	Estado final
Zona	Líquido saturado	Vapor húmedo
Presión en psia	247,26	247,26
Temperatura en °F	400	400
Volumen específico en ft ³ /lb	0,01864	1,494848
Entalpía específica en Btu/lb	375,04	1036,152
Energía interna específica en Btu/lb	374,19	967,766
Entropía específica en Btu/lb °R	0,56663	1,335646
Calidad en %	0	80

Propiedades	Estado inicial	Estado final
Humedad en %	100	20

Agua saturada. Tabla de temperaturas (conclusión)

Temp., T °F	Pres. sat., P_{sat} psia	Volumen específico, pie ³ /lbm		Energía interna, Btu/lbm			Entalpía, Btu/lbm			Entropía, Btu/lbm · R		
		Liq. sat., v_f	Vapor sat., v_g	Liq. sat., u_f	Evap., u_{fg}	Vapor sat., u_g	Liq. sat., h_f	Evap., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Liq. sat., s_f	Evap., s_{fg}	Vapor sat., s_g
400	247.26	0.01864	1.8639	374.19	741.97	1116.2	375.04	826.39	1201.4	0.56663	0.96127	1.5279

(Çengel, 2019)

Encuentre la masa en lb:

En el estado 1

$$v = \frac{V}{m}$$

$$m = \frac{V}{v} = \frac{0,3 \text{ ft}^3}{0,01864 \frac{\text{ft}^3}{\text{lbm}}} = 16,0944206 \text{ l}$$

Encuentre la variación de energía interna en Btu:

$$\Delta U = m(u_2 - u_1)$$

$$\begin{aligned} \Delta U &= 16,0944206 \text{ lbm} \left(967,766 \text{ btu} \frac{\text{Btu}}{\text{lbm}} - 374,19 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm}} \right) \\ &= 9553,261803 \text{ Btu} \end{aligned}$$

Encuentre la variación de entalpía en Btu:

$$\Delta h = m(h_2 - h_1)$$

$$\begin{aligned} \Delta H &= 16,0944206 \text{ lbm} \left(1036,152 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm}} - 375,04 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm}} \right) \\ &= 10640,22 \text{ Btu} \end{aligned}$$

Encuentre la variación de entropía en Btu/°R:

$$\Delta S = m(s_2 - s_1)$$

$$\begin{aligned}\Delta S &= 16,0944206 \text{ lbm} \left(1,3356466 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm} \text{ } ^\circ\text{R}} - 0,566663 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm} \text{ } ^\circ\text{R}} \right) \\ &= 12,377 \frac{\text{Btu}}{^\circ\text{R}}\end{aligned}$$

Encuentre el calor en Btu:

$$\partial Q = T dS$$

$$Q = T \Delta S$$

$$Q = (860 \text{ } ^\circ\text{R}) \left(12,377 \frac{\text{Btu}}{^\circ\text{R}} \right) = 10644,10558 \text{ Btu}$$

Encuentre el trabajo de frontera en Btu:

$$\delta Q = dU + PdV$$

$$Q = \Delta H - \int V dP$$

$$- \int V dP = Q - \Delta H$$

$$\begin{aligned}- \int V dP &= 10644,10558 \text{ Btu} - 10640,22 \text{ Btu} \\ &= 3,890987124 \text{ Btu}\end{aligned}$$

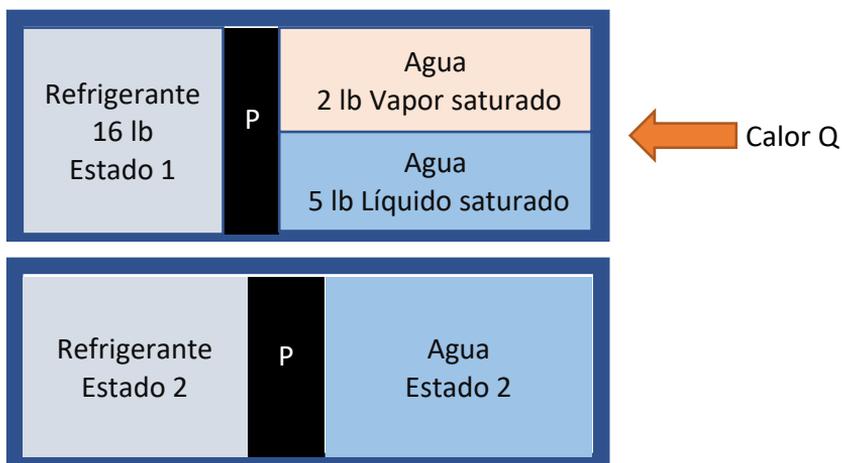
Ejercicio gas real

Un sistema termodinámico consiste en un cilindro de 20 ft³ no conductor cerrado y horizontal, que contiene un émbolo móvil P, no conductor, sin peso, sin rozamiento, cuya área es 0,5 ft². Véase la figura. Al lado derecho del émbolo hay 2lb de vapor saturado y 5 lb de líquido saturado

de agua en equilibrio. Y al lado izquierdo hay 16 lb refrigerante R134a a 100 psi. Se añade calor hasta que la mitad del agua se evapora. La presión del refrigerante en ese instante es de 120 psia. Determine todas las propiedades inicial y final de agua y del refrigerante:

Figura 156

Ejercicio gas real



Solución: Para que el émbolo se encuentre en equilibrio, es decir sin movimiento, la fuerza ejercida por el fluido de la derecha (Agua) debe ser igual a la fuerza ejercida por el fluido de la izquierda (Refrigerante), es decir las presiones son las mismas.

Propiedades	Agua		Refrigerante	
	Estado inicial	Estado final	Estado inicial	Estado final
Zona	Vapor húmedo	Vapor húmedo	Vapor recalentado	Vapor recalentado
Presión en psia	100	120	100	120
Temperatura en °F	327,81	341,25	235,379112	115,124813
Volumen específico en ft ³ /lb	1,27909407	1,873395	0,69039634	0,43038969
Entalpía específica en Btu/lb	552,494443	710,055	151,247882	121,340954
Energía interna específica en Btu/lb	528,832753	751,65	137,702897	111,787209
Entropía específica en Btu/lb°R	0,79679102	1,0401	0,28073265	0,23021929
Calidad en %	28,57%	50,00%	No existe	No existe
Humedad en %	71,43%	50,00%	No Existe	No Existe

Estado inicial del agua, por condiciones físicas la presión inicial es de 100 psia.

La calidad se define como:

$$x = \frac{m_g}{m}$$

$$m_g = 2 \text{ lb}$$

$$m = m_g + m_f = 2 \text{ lb} + 5 \text{ lb} = 7 \text{ lb}$$

$$x = \frac{2 \text{ lb}}{7 \text{ lb}} = 0,2857 \text{ es decir } 28,57\%$$

Para definir el estado inicial del agua

P=100 Psia

x=28,57%

Zona: Como tienen calidad está en la zona de vapor saturado.

De la Tabla A5:

Agua saturada. Tabla de presiones

Pres., P psia	Temp. sat., T _{sat} °F	Volumen específico, pie ³ /lbm		Energía interna, Btu/lbm			Entalpía, Btu/lbm			Entropía, Btu/lbm · R		
		Liq. sat., v _f	Vapor sat., v _g	Liq. sat., u _f	Evap., u _{fg}	Vapor sat., u _g	Liq. sat., h _f	Evap., h _{fg}	Vapor sat., h _g	Liq. sat., s _f	Evap., s _{fg}	Vapor sat., s _g
100	327.81	0.01774	4.4327	298.19	807.29	1105.5	298.51	888.99	1187.5	0.47427	1.12888	1.6032

(Çengel, 2019)

Para el volumen:

$$v = v_f + x v_{fg}$$

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

$$v = 0,01774 + 0,2857 (4,4327 - 0,01774) = 1,279094072 \frac{ft^3}{lbm}$$

Para la energía interna:

$$u = u_f + x u_{fg}$$

$$u = 298,19 + 0,2857 (807,29) = 528,832753 \frac{Btu}{lbm}$$

Para la entalpía:

$$h = h_f + x h_{fg}$$

$$h = 298,51 + 0,2857 (888,99) = 552,494443 \frac{Btu}{lbm}$$

Para la entropía:

$$s = s_f + x s_{fg}$$

$$s = 0,47427 + 0,2857 (1,12888) = 0,796791016 \frac{Btu}{lbm \cdot ^\circ R}$$

La humedad es:

$$y = 100\% - x$$

$$y = 100\% - 28,57\% = 71,43\%$$

Para el refrigerante:

El volumen que ocupa el agua será:

$$V_{1agua} = mv_1 = 7 \text{ lbm} \left(1,279094072 \frac{ft^3}{lbm} \right) = 8,9537 \text{ ft}^3$$

Si el volumen total del recipiente es $V_{total} = 20 \text{ ft}^3$ se tiene que:

$$\begin{aligned} V_{total} &= V_{1agua} + V_{1refrigerante} \\ V_{1refrigerante} &= V_{total} - V_{1agua} = 20 \text{ ft}^3 - 8,9537 \text{ ft}^3 \\ &= 11,0463415 \text{ ft}^3 \end{aligned}$$

El volumen específico será:

$$v = \frac{V_{1refrigerante}}{m_{refri}} = \frac{11,0463415 \text{ ft}^3}{16 \text{ lb}} = 0,690396 \frac{ft^3}{lbm}$$

Estado inicial refrigerante:

$P_1 = 100 \text{ psia}$

$$V_1 = 0,690396 \frac{ft^3}{lbm}$$

Zona, para 100 psi de refrigerante se tiene $v_g = 0,47811 \frac{ft^3}{lbm}$

Como v es mayor que v_g entonces se encuentra en la zona de vapor recalentado:

$$v > v_g$$

Para definir el estado se usa la Tabla A-13

T °F	v pie ³ /lbm	u Btu/lbm	h Btu/lbm	s Btu/lbm · R
$P = 100 \text{ psia } (T_{\text{sat}} = 79.12 \text{ °F})$				
Sat.	0.47811	105.01	113.85	0.21981
80	0.47906	105.19	114.06	0.22018
100	0.51076	109.46	118.91	0.22902
120	0.54022	113.66	123.66	0.23735
140	0.56821	117.86	128.38	0.24535
160	0.59513	122.09	133.10	0.25310
180	0.62122	126.36	137.85	0.26065
200	0.64667	130.68	142.64	0.26802
220	0.67158	135.05	147.48	0.27525
240	0.69605	139.50	152.38	0.28234
260	0.72016	144.00	157.33	0.28932
280	0.74396	148.58	162.34	0.29620
300	0.76749	153.22	167.42	0.30297
320	0.79079	157.94	172.57	0.30966

(Çengel, 2019)

Tabla de interpolación

Volumen	Temperatura	Energía interna	Entalpía	Entropía
0,69605	240	138,5	152,38	0,28238
0,690396344	235,379112	137,7028968	151,247882	0,28073265
0,67158	220	135,05	147,48	0,27525

Estado final del agua

Por el principio anterior la presión final del agua debe ser la misma presión final del refrigerante:

Estado final Agua

$P=120 \text{ psi}$

$X=50\%$

Zona: Como tienen calidad está en la zona de vapor saturado.

De la Tabla A5:

Agua saturada. Tabla de presiones

Pres., <i>P</i> psia	Temp. sat., <i>T</i> _{sat} °F	Volumen específico, pie ³ /lbm		Energía interna, Btu/lbm			Entalpía, Btu/lbm			Entropía, Btu/lbm · R		
		Líquido sat., <i>v</i> _f	Vapor sat., <i>v</i> _g	Líquido sat., <i>u</i> _f	Evap., <i>u</i> _{fg}	Vapor sat., <i>u</i> _g	Líquido sat., <i>h</i> _f	Evap., <i>h</i> _{fg}	Vapor sat., <i>h</i> _g	Líquido sat., <i>s</i> _f	Evap., <i>s</i> _{fg}	Vapor sat., <i>s</i> _g
120	341.25	0.01789	3.7289	312.16	795.79	1107.9	312.55	878.20	1190.8	0.49187	1.09646	1.5883

(Çengel, 2019)

Para el volumen:

$$v = v_f + x v_{fg}$$

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

$$v = 0,01789 + 0,5 (3,7289 - 0,01789) = 1,873395 \frac{ft^3}{lbm}$$

Para la energía interna:

$$u = u_f + x u_{fg}$$

$$u = 312,16 + 0,5 (795,79) = 751,65 \frac{Btu}{lbm}$$

Para la entalpía:

$$h = h_f + x h_{fg}$$

$$h = 312,55 + 0,5 (878,2) = 710,055 \frac{Btu}{lbm}$$

Para la entropía:

$$s = s_f + x s_{fg}$$

$$s = 0,49189 + 0,5 (1,09646) = 1,0401 \frac{Btu}{lbm \cdot R}$$

La humedad es:

$$y = 100\% - x$$
$$y = 100\% - 50\% = 50\%$$

Para el refrigerante:

El volumen que ocupa el agua será:

$$V_{2agua} = mv_2 = 7 \text{ lbm} \left(1,873395 \frac{ft^3}{lbm} \right) = 13,113765 \text{ ft}^3$$

Si el volumen total del recipiente es $V_{total} = 20 \text{ ft}^3$ se tiene que:

$$V_{total} = V_{2agua} + V_{2refrigerante}$$
$$V_{2refrigerante} = V_{total} - V_{2agua} = 20 \text{ ft}^3 - 13,113765 \text{ ft}^3$$
$$= 6,886235 \text{ ft}^3$$

El volumen específico será:

$$v = \frac{V_{2refrigerante}}{m_{refri}} = \frac{6,886235 \text{ ft}^3}{16 \text{ lb}} = 0,430389688 \frac{ft^3}{lbm}$$

Estado final refrigerante:

$P_1 = 120 \text{ psia}$

$$V_1 = 0,430389688 \frac{ft^3}{lbm}$$

Zona para 100 psi de refrigerante se tiene $v_g = 0,39681 \frac{ft^3}{lbm}$

Como v es mayor que v_g entonces se encuentra en la zona de vapor recalentado:

$$v > v_g$$

Para definir el estado se usa la tabla A-13

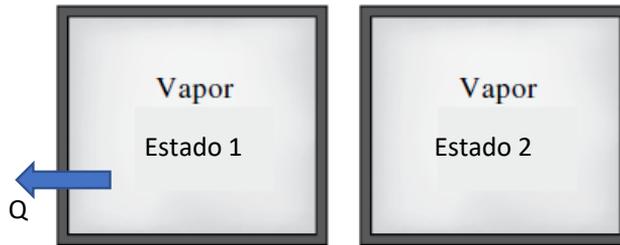
T °F	v pie ³ /lbm	u Btu/lbm	h Btu/lbm	s Btu/lbm · R
$P = 120 \text{ psia } (T_{\text{sat}} = 90.49 \text{ °F})$				
Sat.	0.39681	106.37	115.18	0.21928
80				
100	0.41013	108.49	117.59	0.22364
120	0.43692	112.85	122.55	0.23234
140	0.46190	117.16	127.42	0.24059
160	0.48563	121.47	132.25	0.24853
180	0.50844	125.80	137.09	0.25621
200	0.53054	130.18	141.96	0.26370
220	0.55206	134.60	146.86	0.27102
240	0.57312	139.08	151.80	0.27819
260	0.59379	143.62	156.80	0.28523
280	0.61413	148.22	161.86	0.29216
300	0.63420	152.89	166.97	0.29898
320	0.65402	157.62	172.15	0.30571

(Çengel, 2019)

Tabla de interpolación

Volumen	Temperatura	Energía interna	Entalpía	Entropía
0,43692	120	112,85	122,55	0,2323
0,430389688	115,124813	111,7872093	121,340954	0,23021929
0,41013	100	108,49	117,59	0,22364

Un recipiente rígido de 24 ft³ contiene 2 lb de vapor de agua a una temperatura de 750°F. Se deja enfriar hasta que la mitad de masa se condensa. Determine:



Propiedades	Agua	
	Estado inicial	Estado final
Zona	Vapor recalentado	Vapor húmedo
Presión en psia	59,8143291	16,62192
Temperatura en °F	750	218,14099
Volumen específico en ft ³ /lb	12	12
Entalpía específica en Btu/lb	1406,55836	1153,102871
Energía interna específica en Btu/lb	1273,9065	632,7371002
Entropía específica en Btu/lb°R	1,88237054	1,034113199
Calidad en %	No Existe	50,00%
Humedad en %	No Existe	50,00%

El volumen del recipiente es $V = 24 \text{ ft}^3$ y la masa es 2 lb

El volumen específico será:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{24 \text{ ft}^3}{2 \text{ lb}} = 12 \frac{\text{ft}^3}{\text{lb}}$$

Estado inicial agua:

$T_1 = 750^\circ\text{F}$ psia

$V_1 = 12 \frac{\text{ft}^3}{\text{lbm}}$

Zona: cómo la temperatura es mayor a la temperatura crítica el estado se encuentra en la zona de vapor recalentado.

$$T > T_k$$

Para definir el estado se usa la tabla A-4

	$P = 60 \text{ psia (292.69 } ^\circ\text{F)}$			
Sat.	7.1766	1098.1	1177.8	1.6442
320	7.4863	1109.6	1192.7	1.6636
360	7.9259	1125.5	1213.5	1.6897
400	8.3548	1140.9	1233.7	1.7138
440	8.7766	1156.1	1253.6	1.7364
500	9.4005	1178.8	1283.1	1.7682
600	10.4256	1216.5	1332.2	1.8168
700	11.4401	1254.5	1381.6	1.8613
800	12.4484	1293.3	1431.5	1.9026
1000	14.4543	1373.0	1533.5	1.9777
1200	16.4525	1456.2	1638.9	2.0454
1400	18.4464	1543.0	1747.8	2.1073
1600	20.438	1633.5	1860.5	2.1648
1800	22.428	1727.6	1976.6	2.2187
2000	24.417	1825.2	2096.3	2.2694

(Çengel, 2019)

$P=60 \text{ psia}$

Temperatura $^\circ\text{F}$	Volumen	Energía interna	Entalpía	Entropía
800	12,4484	1293,3	1431,5	1,9026
750	11,94425	1273,9	1406,55	1,88195
700	11,4401	1254,5	1381,6	1,8613

	$P = 40 \text{ psia (267.22 } ^\circ\text{F)}$			
Sat.	10.501	1092.1	1169.8	1.6766
240				
280	10.713	1097.3	1176.6	1.6858
320	11.363	1112.9	1197.1	1.7128
360	11.999	1128.1	1216.9	1.7376
400	12.625	1143.1	1236.5	1.7610
440	13.244	1157.9	1256.0	1.7831
500	14.165	1180.2	1285.0	1.8143
600	15.686	1217.5	1333.6	1.8625
700	17.197	1255.3	1382.6	1.9067
800	18.702	1293.9	1432.3	1.9478
1000	21.700	1373.4	1534.1	2.0227
1200	24.691	1456.5	1639.3	2.0902
1400	27.678	1543.3	1748.1	2.1522
1600	30.662	1633.7	1860.7	2.2096

(Çengel, 2019)

P=40 psia

Temperatura °F	Volumen	Energía interna	Entalpía	Entropía
800	18,702	1293,9	1432,3	1,9478
750	17,9495	1274,6	1407,45	1,92725
700	17,197	1255,3	1382,6	1,9067

Volumen	Presión psia	Energía interna	Entalpía	Entropía
11,94425	60	1273,9	1406,55	1,88195
12	59,8143291	1273,906498	1406,55836	1,88237054
17,9495	40	1274,6	1407,45	1,92725

El volumen del estado es igual al volumen del estado 1 porque es un recipiente rígido.

Y la calidad del estado dos es 50% porque la mitad de agua se condensa.

Estado final agua:

$$V_2 = 12 \frac{ft^3}{lbm}$$

$$X_2 = 50\%$$

Para determinar las propiedades se realiza una estimación del volumen necesario con la Tabla A4.

Primera interpolación.

Se selecciona una temperatura de 200°F

Temp., T °F	Pres. sat., P _{sat} psia	Volumen específico, pie ³ /lbm		Energía interna, Btu/lbm			Entalpía, Btu/lbm			Entropía, Btu/lbm · R		
		Liq. sat., v _f	Vapor sat., v _g	Liq. sat., u _f	Evap., u _{fg}	Vapor sat., u _g	Liq. sat., h _f	Evap., h _{fg}	Vapor sat., h _g	Liq. sat., s _f	Evap., s _{fg}	Vapor sat., s _g
200	11.538	0.01663	33.613	168.10	905.87	1074.0	168.13	977.60	1145.7	0.29409	1.48191	1.7760

(Çengel, 2019)

$$v = v_f + x v_{fg}$$

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

$$v = 0,01663 + 0,5 (33,613 - 0,01663) = 16,814815 \frac{ft^3}{lbm}$$

Se selecciona una temperatura de 250°F

Temp., T °F	Pres. sat., P _{sat} psia	Volumen específico, pie ³ /lbm		Energía interna, Btu/lbm			Entalpía, Btu/lbm			Entropía, Btu/lbm · R		
		Liq. sat., v _f	Vapor sat., v _g	Liq. sat., u _f	Evap., u _{fg}	Vapor sat., u _g	Liq. sat., h _f	Evap., h _{fg}	Vapor sat., h _g	Liq. sat., s _f	Evap., s _{fg}	Vapor sat., s _g
250	29.844	0.01700	13.816	218.54	869.21	1087.7	218.63	945.41	1164.0	0.36779	1.33216	1.6999

(Çengel, 2019)

$$v = v_f + x v_{fg}$$

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

$$v = 0,017 + 0,5 (13,816 - 0,017) = 6,9165 \frac{ft^3}{lbm}$$

Tabla de interpolación

Volumen	Temperatura
6,9165	250
12	215,8914219
16,814815	200

Segunda interpolación. Se elige el rango más cercano a 215,89°F que es 212 y 220

Se selecciona una temperatura de 212°F

Temp., T °F	Pres. sat., P _{sat} psia	Volumen específico, pie ³ /lbm		Energía interna, Btu/lbm			Entalpía, Btu/lbm			Entropía, Btu/lbm · R		
		Liq. sat., v _f	Vapor sat., v _g	Liq. sat., u _f	Evap., u _{fg}	Vapor sat., u _g	Liq. sat., h _f	Evap., h _{fg}	Vapor sat., h _g	Liq. sat., s _f	Evap., s _{fg}	Vapor sat., s _g
212	14.709	0.01671	26.782	180.16	897.24	1077.4	180.21	970.09	1150.3	0.31222	1.44427	1.7565

(Çengel, 2019)

$$v = v_f + x v_{fg}$$

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

$$v = 0,01671 + 0,5 (26,782 - 0,01671) = 13,399355 \frac{ft^3}{lbm}$$

Se selecciona una temperatura de 220°F

Temp., T °F	Pres. sat., P _{sat} psia	Volumen específico, pie ³ /lbm		Energía interna, Btu/lbm			Entalpía, Btu/lbm			Entropía, Btu/lbm · R		
		Liq. sat., v _f	Vapor sat., v _g	Liq. sat., u _f	Evap., u _{fg}	Vapor sat., u _g	Liq. sat., h _f	Evap., h _{fg}	Vapor sat., h _g	Liq. sat., s _f	Evap., s _{fg}	Vapor sat., s _g
220	17.201	0.01677	23.136	188.22	891.43	1079.6	188.28	965.02	1153.3	0.32414	1.41980	1.7439

(Çengel, 2019)

$$v = v_f + x v_{fg}$$

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

$$v = 0,01677 + 0,5 (23,136 - 0,01677) = 11,576385 \frac{ft^3}{lbm}$$

Tabla de interpolación

Volumen	Temperatura
11,576385	220
12	218,1409897
13,399355	212

Con la temperatura calculada de 218,14°F se interpola.

Temperatura	Presión	uf	ufg	hf	hfg	sf	sfg
212	14,709 00	180,160 00	897,240 00	180,210 00	970,090 00	0,3122 2	1,4442 7
218,14099	16,621 92	186,347 05	892,780 11	186,404 72	966,198 15	0,3213 7	1,4254 9
220	17,201 00	188,220 00	891,430 00	188,280 00	965,020 00	0,3241 4	1,4198 0

Para la energía interna:

$$u = u_f + x u_{fg}$$

$$u = 186,347 + 0,5 (892,78) = 632,7371002 \frac{Btu}{lbm}$$

Para la entalpía:

$$h = h_f + x h_{fg}$$

$$h = 186,4047 + 0,5 (966,19) = 1153,102871 \frac{Btu}{lbm}$$

Para la entropía:

$$s = s_f + x s_{fg}$$

$$s = 0,32137 + 0,5 (1,42549) = 1,034113199 \frac{Btu}{lbm^{\circ}R}$$

La humedad es:

$$y = 100\% - x$$

$$y = 100\% - 50\% = 50\%$$

Encuentre la variación de energía interna en Btu:

$$\Delta U = m(u_2 - u_1) = -1282,338796 Btu$$

Encuentre la variación de entalpía en Btu:

$$\Delta H = m(h_2 - h_1) = -506,9109681 Btu$$

Encuentre la variación de entropía en Btu/°R:

$$\Delta S = m(s_2 - s_1) = -1,696514692 \frac{Btu}{^{\circ}R}$$

Encuentre el trabajo de frontera en Btu:

$$W_{nf} = \int P dV$$

Como el volumen es constante la derivada de una constante es cero
 $dV = 0$

$$W_{nf} = 0$$

Para el calor:

$$\partial Q = dU + PdV$$

$$dV = 0$$

$$\partial Q = dU$$

$$Q = \Delta U = -1282,338796 \text{ Btu}$$

Conclusión:

El problema se ha resuelto satisfactoriamente, determinando todas las propiedades iniciales y finales del agua y del refrigerante. Se ha utilizado un análisis termodinámico completo, incluyendo la aplicación de las tablas de propiedades y la verificación de las leyes de la termodinámica.

Observaciones:

Este ejercicio requiere un conocimiento profundo de los principios de la termodinámica, incluyendo las propiedades del agua y del refrigerante R134a.

La solución del problema puede variar ligeramente dependiendo de las aproximaciones utilizadas y de la precisión de las tablas de propiedades.

Es importante verificar cuidadosamente los resultados y asegurarse de que cumplen con las leyes de la termodinámica.

Referencias

Çengel, Y. A. (2019). *Termodinámica*.

Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2007). *Transferencia de calor y masa* (Vol. 53). McGraw-Hill Interamericana.

Faires, V. M., Simmang, C. M., & Brewer, A. V. (1991). *Problemas de termodinámica*.

Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2018). *Fundamentos de termodinámica técnica*. Reverté.

Moring Faires, V. (2004). *Termodinámica*.

Müller, E. A. (2002). *Termodinámica básica*. Kemitechnik.

Pineda, C. F., & Maíllo, S. V. (2009). *Termodinámica*. Editorial Universitaria Ramón Areces.

Tipler, P. A., & Mosca, G. (2000). *Mecánica, oscilaciones y ondas, termodinámica*.

CIDE

EDITORIAL



ISBN: 978-9942-636-83-6



9789942636836