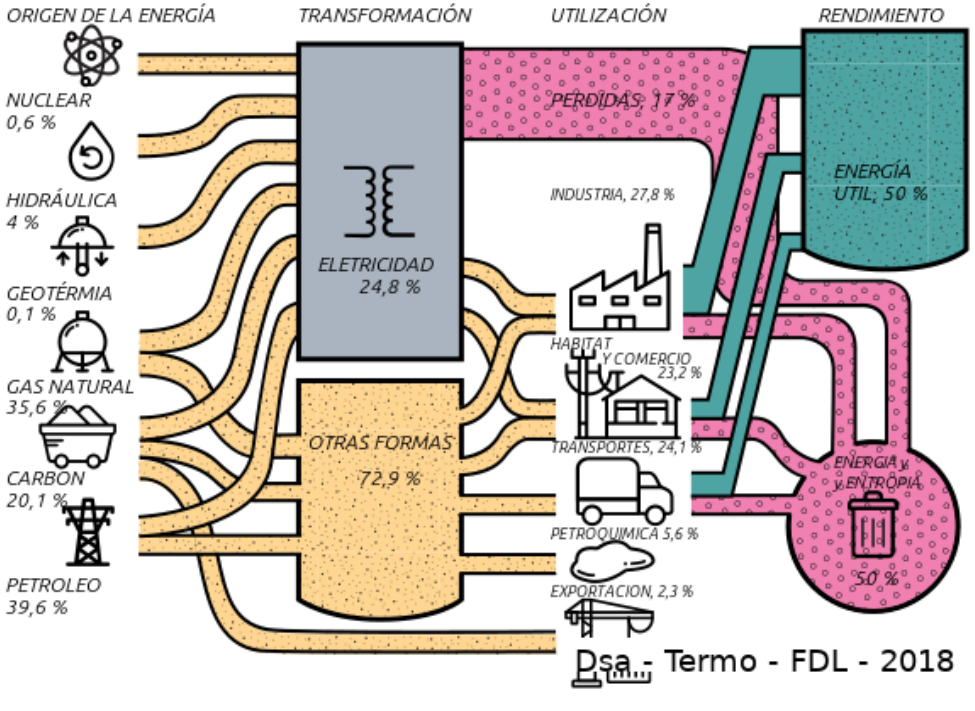
Libro M: Energética

Transformaciones energéticas: termodinámica

Curso de postgrado · Universidad Nacional de Salta

26 y 27 de octubre de 2026

Seis horas de clases teóricas



Diego Saravia Alía

diego.saravia@gmail.com

https://termo.red

https://termo.red/downloads/B00MCurso.pdf

Versión 0.3

Anexo A: Contenidos

1.- Syllabus reducido . . . 11
2.- Programa de Termodinámica . . . 13
3.- Reconocimientos . . . 14
4.- Cronograma tentativo del curso . . . 15
5.- Bibliografía indicada en el curso . . . 16
6.- Bibliografía adicional . . . 17
7.- Materiales de https://termo.red/libro . . . 18
8.- Contenido del libro . . . 19
9.- Apuntes de origen del material (1/2) . . . 20
10.- Apuntes de origen del material (2/2) . . . 21
11.- El hilo del curso: de la energía a las sociedades modernas . . . 22
12.- Recorrido esencial de las tres clases . . . 23

13.- Clase 1: Repaso de Termodinámica . . . 25
14.- **SECCIÓN 1:** DEFINICIONES DE SISTEMAS . . . 26
15.- Cibernética . . . 27
16.- **[E] Sistema** . . . 28
17.- Sistema material . . . 29
18.- Sistema aislado y entorno . . . 30
19.- **[E] Estados de equilibrio y procesos** . . . 31
20.- **[E] Paredes: aislamiento e interacciones** . . . 32
21.- Paredes: ejemplos gráficos . . . 33
22.- Abierto, cerrado o aislado . . . 34
23.- Qué puede atravesar la frontera de un sistema . . . 35
24.- Equilibrio . . . 36

Contenidos

25.- Demonio de Maxwell: una pared activa . . . 37
26.- Estabilidad de un estado de equilibrio . . . 38
27.- Estado estacionario . . . 39
28.- **[E] Reversibilidad** . . . 40
29.- Cierre del tema: Sistemas y procesos . . . 41
30.- **SECCIÓN 2:** MASA, ENERGÍA, ENTROPÍA, TEMPERATURA Y LEYES . . . 42
31.- Masa, materia y reacciones químicas . . . 43
32.- **[E] Energía: conservación local** . . . 44
33.- Preguntas sobre la conservación de la energía . . . 45
34.- Trabajo y energía . . . 46
35.- Energías mecánicas . . . 47
36.- Energías mecánicas: continuación . . . 48
37.- Formas de energía: de la vis viva a la vis tenebris . . . 49
38.- Energía electromagnética, electromecánica y química . . . 50
39.- Campos y dirección del transporte electromagnético . . . 51
40.- Energía interna U . . . 52
41.- **[E] Primero el trabajo adiabático: cómo se construye U** . . . 53
42.- Del trabajo medido a una función de estado . . . 54
43.- **[E] Después de U: el calor cierra el balance de conservación** . . . 55
44.- Calor . . . 56
45.- Un mismo cambio de U, distintos intercambios . . . 57
46.- Experimento de Joule . . . 58
47.- Adiabático no significa reversible . . . 59
48.- Entropía: construcción del mapa . . . 60

Contenidos

49.- **[E] Entropía: reversibilidad y aditividad** . . . 61
50.- **[E] Temperatura: igualdad en el equilibrio térmico** . . . 62
51.- Construir un mapa numérico de entropía y temperatura . . . 64
52.- El puente entre calor, entropía y temperatura . . . 65
53.- A temperatura constante: cambio de entropía y calor . . . 66
54.- **[E] Microestados: muchas maneras de realizar un mismo estado** . . . 67
55.- Por qué aparece un logaritmo . . . 68
56.- Tres descripciones de la entropía . . . 69
57.- Temperatura negativa: qué significa la pendiente de U(S) . . . 71
58.- Dos representaciones: S(U,V) y U(S,V) . . . 73
59.- **[E] Relación fundamental: identidad de estado e intercambios** . . . 74
60.- Alcance general: otras variables y composición . . . 75
61.- Ver las derivadas sobre la superficie S(U,V) . . . 76
62.- **[E] Balance y generación de entropía** . . . 77
63.- Generación de entropía no negativa . . . 78
64.- **[E] Primera y segunda ley de la termodinámica** . . . 79
65.- **[E] Energía, entropía y temperatura: síntesis** . . . 80
66.- Cierre: energía, entropía y las dos leyes . . . 81
67.- **SECCIÓN 3:** SISTEMAS PARTICULARES: GASES IDEALES Y RADIACIÓN . . . 82
68.- Gas ideal diluido: resumen . . . 83
69.- **[E] Tabla de procesos** . . . 84
70.- Procesos del gas ideal: diagramas . . . 85
71.- La radiación como sistema termodinámico . . . 86
72.- Étendue y entropía en la radiación . . . 87

Contenidos

73.- Preguntas de cierre de la clase 1 88

74.- Clase 2: Máquinas térmicas, Exergía y Máxima potencia 89

75.- **SECCIÓN 4:** MÁQUINAS TÉRMICAS: CICLO DE CARNOT, GENERADOR, HELADERA Y BOMBA DE CALOR . . . 90
76.- Ciclo de Carnot: pistón y máquina 91
77.- Ciclo de Carnot: diagramas 92
78.- **[E] Ciclo de Carnot: explicación** 93
79.- Máquinas de Carnot 94
80.- Rendimiento de una máquina térmica 95
81.- **[E] Rendimiento de Carnot** 96
82.- Cierre del tema: Procesos y ciclos del gas ideal 97
83.- **[E] Máquina térmica: tipos** 98
84.- **[E] La misma comparación: motor, heladera y bomba de calor** 99
85.- Motor o generador de trabajo 100
86.- Refrigerador y su COP 101
87.- Bomba de calor 102
88.- Balance de la bomba de calor y COP 103
89.- Tres calefacciones: comparar entradas para el mismo calor 104
90.- Calefacción: demanda y precios observados 105
91.- **[E] Calefacción: costos de cinco años para el mismo calor** 106
92.- Calefacción: límites de la comparación 107
93.- Cierre del tema: Máquinas térmicas 108
94.- **SECCIÓN 5:** EXERGÍA Y MÁXIMA POTENCIA EN TIEMPO FINITO. ECONOMÍA DE LA ENERGÍA 109
95.- Motor endorreversible: irreversibilidad externa 110
96.- Máquina térmica: par, velocidad y potencia 111

Contenidos

97.- **[E] Resistencia térmica y motor en serie** . . . 112
98.- **[E] Motor con resistencia: un punto de operación completo** . . . 113
99.- Relaciones fundamentales del modelo . . . 114
100.- Carga y funcionamiento . . . 115
101.- Trabajo máximo . . . 116
102.- Trabajo perdido . . . 117
103.- **[E] Exergía** . . . 118
104.- Resumen: Gouy–Stodola . . . 119
105.- La energía se conserva; la exergía puede destruirse . . . 120
106.- Máxima potencia: concepto . . . 121
107.- Comparación de casos y cargas . . . 122
108.- Máxima potencia extraída . . . 123
109.- Mismos focos y resistencia: potencia frente a rendimiento . . . 124
110.- **[E] Máxima potencia: curvas del modelo** . . . 125
111.- **[E] Novikov y Curzon–Ahlborn: potencia frente al rendimiento** . . . 126
112.- **[E] La fórmula de raíces y su significado. Rendimiento de Curzon–Ahlborn** . . . 127
113.- Carnot y Curzon–Ahlborn: dos preguntas distintas . . . 128
114.- Carnot, Curzon–Ahlborn y diez centrales . . . 129
115.- **[E] Potencia, entropía y trabajo perdido** . . . 130
116.- Dónde opera una central cuando el combustible tiene costo . . . 131
117.- **[E] Un criterio económico explícito para la misma máquina** . . . 132
118.- El precio del combustible desplaza el punto de operación . . . 133
119.- Operar la central e invertir en ella son decisiones distintas . . . 134
120.- Invertir para obtener más potencia de la misma fuente . . . 135

Contenidos

121.- Matriz de la planilla: tasas . . . 136
122.- Cómo leer la matriz de potencia y entropía . . . 137
123.- Inversión: comparar beneficios y costos marginales . . . 138
124.- **[E] Dos piletas: mezcla directa y generación de entropía** . . . 139
125.- **[E] Dos piletas: extraer trabajo antes de equilibrarlas** . . . 140
126.- Dos piletas: máquina, compuerta y ambiente . . . 141
127.- Las piletas: trabajo extraído y exergía destruida . . . 142
128.- Cierre del tema: Exergía y máxima potencia . . . 143
129.- Preguntas de cierre de la clase 2 . . . 144
130.- Clase 3: Generación de Potencia Útil (1/2) . . . 145
131.- Clase 3: Generación de Potencia Útil (2/2) . . . 146
132.- **SECCIÓN 6:** ENTALPÍA. BALANCES DE ENERGÍA Y ENTROPÍA EN SISTEMAS ABIERTOS . . . 147
133.- Volumen de control . . . 148
134.- **[E] Entalpía H** . . . 149
135.- Entalpía y calor a presión constante . . . 150
136.- Entalpía en sistemas abiertos . . . 151
137.- **[E] Resumen: balances** . . . 152
138.- Cierre del tema: Entalpía y sistemas abiertos . . . 153
139.- **[E] Creación de entropía en sistemas abiertos** . . . 154
140.- Balance energético de la atmósfera y la superficie . . . 155
141.- Cierre del tema: Entropía e irreversibilidad . . . 156
142.- **SECCIÓN 7:** PROPIEDADES DE LA MEZCLA AGUA-VAPOR . . . 157
143.- Fases de la materia y sus cambios . . . 158

Contenidos

144.- Cómo leer el diagrama de fases del agua . . . 159
145.- Agua: superficie tridimensional presión–volumen–temperatura . . . 160
146.- Potencial químico: el equilibrio al intercambiar materia . . . 161
147.- Por qué pueden coexistir fases . . . 162
148.- La coexistencia supera la rama homogénea . . . 164
149.- **[E] Calidad y título del vapor** . . . 165
150.- **[E] Tabla de vapor saturado** . . . 166
151.- Tabla de vapor sobrecalentado . . . 167
152.- Cierre del tema: Fases y propiedades del vapor . . . 168
153.- **SECCIÓN 8:** COMPONENTES DE UNA CENTRAL TERMOELÉCTRICA . . . 169
154.- **[E] Turbina de vapor** . . . 170
155.- Condensador . . . 171
156.- Caldera acuotubular . . . 172
157.- Cierre del tema: Componentes de centrales . . . 173
158.- **SECCIÓN 9:** CICLO RANKINE Y CENTRAL CONVENCIONAL . . . 174
159.- **[E] Proceso de una planta de vapor** . . . 175
160.- Central Térmica Güemes: un caso de Salta . . . 176
161.- Tablero de Termo Andes: valores de los circuitos . . . 177
162.- Diagramas del ciclo Rankine . . . 178
163.- **[E] Rankine simple: cálculos** . . . 179
164.- Rankine con sobrecalentamiento: estados y cálculo . . . 180
165.- Rankine con recalentamiento: estados y cálculo . . . 181
166.- Rankine con regeneración: estados y cálculo . . . 182
167.- Mejoras del Rankine: interpretación y límites . . . 183

Contenidos

168.- Mejoras del Rankine: comparación de casos . . . 184
169.- Rankine con recalentamiento y regeneración . . . 185
170.- Mejoras del Rankine: esquema completo de una central . . . 186
171.- Cierre del tema: Ciclo Rankine . . . 187
172.- **SECCIÓN 10:** GENERACIÓN ALTERNATIVA . . . 188
173.- Reemplazar combustibles por energía solar . . . 189
174.- **[E] Ciclo orgánico de Rankine, ORC** . . . 190
175.- Aplicación geotérmica: criterios . . . 191
176.- Usos de la energía geotérmica según la temperatura . . . 192
177.- Tres formas de aprovechar una fuente geotérmica . . . 193
178.- Cierre del tema: Generación a media y baja temperatura . . . 194
179.- **SECCIÓN 11:** POTENCIA, ECONOMÍA Y SOCIEDADES . . . 195
180.- Del motor a la sociedad: conservar energía y perder disponibilidad . . . 196
181.- Odum: el ecosistema como red de transformaciones . . . 197
182.- **[E] El Macroscopio: fuentes, transformaciones y usos sociales** . . . 198
183.- El Macroscopio: flujos físicos y circulación monetaria . . . 199
184.- Cómo leer los diagramas del Macroscopio . . . 200
185.- Exergía y sociedad: Suecia en 1920 . . . 201
186.- Exergía y sociedad: Suecia en 1975 . . . 202
187.- Comparar sociedades: qué nos dicen los diagramas . . . 203
188.- **[E] La cuestión central del curso** . . . 204
189.- Cierre del tema: Potencia, economía y sociedad . . . 205
190.- Preguntas de cierre de la clase 3 . . . 206
191.- Cinco preguntas para cerrar el curso . . . 207

Contenidos

Anexo B: Referencias 208

Anexo C: Índice de palabras 218

1.- Syllabus reducido

Lectura y trabajo en clase: se analizarán **las láminas de desarrollo marcadas con [E]**. Son puntos de enfoque esencial. Se pivotará sobre ellas en otras láminas. Las demás quedan a disposición de los estudiantes para revisión autónoma y consulta. En los cierres se discutirá una pregunta destacada; las restantes quedan como alternativas de profundización. Podrá hacerse un primer recorrido rápido por las láminas E y luego volver sobre ellas con mayor detalle, priorizando dudas y puntos centrales dentro de las seis horas disponibles.

Módulo: Termodinámica, del curso de posgrado Transformaciones Energéticas. Universidad Nacional de Salta. Docente: Diego Saravia Alía.

Dirección: Carlos Martínez dirige esta instancia de la maestría. Gonzalo Durán dirige el curso Transformaciones Energéticas.

Duración: Seis horas teóricas con Diego Saravia Alía, incluidas preguntas y cierre, y seis horas de clases prácticas a cargo de Andrés Díaz.

Objetivo: Comprender las transformaciones de energía y la producción de energía útil: conservación, generación de entropía, máxima potencia y decisiones económicas; relacionarlas con el funcionamiento de las sociedades modernas.

Destinatarios y requisitos: Profesionales de Ciencias Exactas, Naturales, Ingeniería y Arquitectura; conocimientos básicos de transporte de calor y materia y de computación.

Metodología: Discusión conceptual, balances y ejemplos de cálculo en teoría; clases prácticas con Andrés Díaz en los horarios indicados abajo. Este libro acompaña las seis horas teóricas y amplía los temas para el estudio posterior. No se requiere presentar todas sus láminas durante las clases.

1.- Syllabus reducido

Evaluación: El curso de posgrado prevé un examen escrito al finalizar; este libro corresponde a su módulo teórico de Termodinámica.

Bloque	Fecha	Teoría: Diego Saravia	Práctica: Andrés Díaz
1	Lunes 26/10/2026	8:30–10:30	11:00–13:00
2	Lunes 26/10/2026	15:00–17:00	17:30–19:30
3	Martes 27/10/2026	8:30–10:30	11:00–13:00

El programa completo figura a continuación; su distribución se indica al comienzo de cada sección Universidad Nacional de Salta (2026); Cronograma.

2.- Programa de Termodinámica

(2a) **Energía:** Trabajo, energía cinética y potencial. Primer principio de la termodinámica. Función energía interna. Calor. (6a) Entalpía. Balance de energía en sistemas abiertos. (2b) **Entropía:** (1) Reversibilidad. (4) Ciclo de Carnot. Conversión de energía térmica en mecánica. (2d) Segundo principio de la termodinámica. (2c) Entropía y temperatura. (3) Procesos y balances en ciclos con gases ideales. (2e) Irreversibilidad. Generación de entropía. (6b) Sistemas Abiertos. (5) Exergía. (7) Propiedades de la mezcla agua-vapor. (9) Ciclo Rankine. (8) Centrales termoeléctricas convencionales. (10) Generación en medias y bajas temperaturas.
Los códigos entre paréntesis identifican los temas del programa; las letras distinguen partes de un mismo tema. Las aperturas indican en qué sección del libro se trata cada uno.

Fuente: programa de Termodinámica del curso Transformaciones Energéticas Universidad Nacional de Salta (2026).

Los contenidos se desarrollan en las secciones 1 a 10; la sección 11 integra sus consecuencias económicas y sociales sin añadir un tema nuevo del programa. Las aperturas indican la distribución.

En el texto se suelen denominar leyes a lo que el programa llama principios. No hay una razón detrás del cambio.

3.- Reconocimientos

Autoría y orientación docente: Diego Saravia Alía.
El libro reúne y adapta sus materiales de Termodinámica siguiendo sus indicaciones sobre objetivos, contenidos, enfoque conceptual y organización de las seis horas de clase.

Asistencia de inteligencia artificial: Codex, de OpenAI.
Codex es un asistente de inteligencia artificial que colaboró, bajo la dirección de Diego Saravia Alía, en:

- La selección y organización de las láminas a partir de los libros de origen y del programa del curso.
- La redacción y adaptación de textos, ejemplos, tablas y precisiones conceptuales acordadas durante el trabajo.
- La integración de bibliografía, enlaces, syllabus, cronograma y referencias a los materiales de apoyo.
- La edición de los archivos LaTeX, la compilación del PDF y la comprobación de numeración, citas, índices, enlaces internos y presentación visual.

Claude, de Anthropic, colaboró bajo la misma dirección en la revisión de erratas y los ajustes de octubre de 2026.

Las obras y los materiales utilizados se identifican en las citas, en la lista de libros de origen y en las referencias bibliográficas. Salvo indicación en contrario, las figuras son del autor.

4.- Cronograma tentativo del curso

Cronograma Tentativo

HORARIOS: Semana del 26/10/2026 al 30/10/2026

	Lunes (26/10)	Martes (27/10)	Miércoles (28/10)	Jueves (29/10)	Viernes (30/10)
8:30-10:30	Termodinámica (T1) Diego Saravia	Termodinámica (T3) Diego Saravia	Transferencia-conducción (T3) Sonia Esteban	Transferencia-convección (T2) María Vilte	**Laboratorios** Andrés Díaz José Quiñonez
Café					
11:00-13:00	Termodinámica (Práctica 1) Andrés Díaz	Termodinámica (Práctica 3) Andrés Díaz	**Transferencia Problemas** Andrés Díaz José Quiñonez	Transferencia-radiación (1) Gonzalo Durán	**Transferencia Problemas** Andrés Díaz José Quiñonez
Almuerzo					
15:00-17:00	Termodinámica (T2) Diego Saravia	Transferencia-conducción (T1) Sonia Esteban	Transferencia-convección (T1) María Vilte	Transferencia-radiación (T2) Gonzalo Durán	**Laboratorios** Andrés Díaz José Quiñonez
Café					
17:30-19:30	Termodinámica (Práctica 2) Andrés Díaz	Transferencia-conducción (T2) Sonia Esteban	**Transferencia Problemas** Andrés Díaz José Quiñonez	**Laboratorios** Andrés Díaz José Quiñonez	**Transferencia Problemas** Andrés Díaz José Quiñonez

Figura 1

En verde oscuro: teoría de Termodinámica, Diego Saravia. En verde claro: prácticas de Termodinámica, Andrés Díaz. Semana del 26 al 30 de octubre de 2026 Cronograma.

5.- Bibliografía indicada en el curso

1. Adrian Bejan, *Advanced Engineering Thermodynamics*, 3.ª edición, Wiley. ISBN: 978-0-471-67763-5 (2006).
2. Adrian Bejan, *Entropy Generation Minimization*, CRC Press. ISBN: 9780849396519 (1996b).
3. Alexis de Vos, *Endoreversible Thermodynamics of Solar Energy Conversion*, Oxford University Press. ISBN: 978-0198513926 (1992).
4. Yunus A. Çengel y Michael A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 7.ª edición, McGraw-Hill. ISBN: 978-0073529325 (2011).

6.- Bibliografía adicional

1. H. B. Callen, *Thermodynamics: An Introduction to the Physical Theories of Equilibrium Thermostatistics and Irreversible Thermodynamics* (1963).
2. E. Fermi, *Thermodynamics* (1956).
3. M. Zemansky y R. Dittman, *Calor y Termodinámica* (1981).
4. R. Siri, presentación sobre el ciclo Rankine, Física Térmica, Universidad de la República, Uruguay (2012).
5. Diego Saravia, *Termodinámica. Volumen a: Construyendo ecuaciones desde conceptos*; libro y recursos de apoyo en termo.red/libro (2020).
6. Derek Muller, Veritasium en español, *Pocos entienden esto de la física moderna...*. Video sobre entropía y el intercambio de radiación entre el Sol, la Tierra y el espacio (2023).
7. Instituto de Física Teórica (IFT), *¿Qué es la energía? De la vis viva a la vis tenebris*. Charla de César Gómez (2018).
8. Diego Saravia y ChatGPT 5.3, *Choques moleculares y distribución de Maxwell*. Simulación interactiva, versión 9 (2026).

Las referencias completas de las obras citadas en las láminas se reúnen al final del libro, antes del índice de palabras.

7.- Materiales de https://termo.red/libro

Libro en línea: Termodinámica. Volumen a: Construyendo ecuaciones desde conceptos Saravia (2020).

Planilla del curso: MaquinaResistenciaYPiletas.ods: potencia frente al rendimiento y balances de las dos piletas. Abrir con LibreOffice u OpenOffice Calc. Disponible en termo.red/downloads.

Libro en PDF: SaraviaTermoLibro.pdf Saravia (2020).

Láminas en PDF: SaraviaTermoPrese.pdf Saravia Alía (s. f.c).

Videos: Serie de 26 videos de apoyo; duración indicada: 3 h 52 min Saravia Alía (s. f.d).

PDF de los videos: Directorio de láminas utilizadas en los videos Saravia Alía (s. f.b).

Lectura en inglés: Traducción automática del libro mediante Google Translate.

Material complementario del curso: termo.red/private, de acceso para estudiantes y docentes Saravia Alía (s. f.a).

8.- Contenido del libro

1. Introducción.
2. Definiciones iniciales.
3. Postulados.
4. Energía interna y energía.
5. Entropía y temperatura.
6. Procesos irreversibles.
7. La forma de la función entropía.
8. Esfuerzos, equilibrio y entropía.
9. Leyes y balances.

Índice de *Termodinámica. Volumen a*, disponible en termo.red/libro Saravia (2020). Estos enlaces son lecturas de apoyo; el programa de este módulo sigue distribuido en sus propias secciones.

9.- Apuntes de origen del material (1/2)

B00f01: Presentación, programa y bibliografía. Fuente del syllabus y de las listas bibliográficas de estos preliminares Saravia Alía (2026a).

B00f02: Sistemas materiales. Sistemas, paredes, equilibrio, reversibilidad y discusión inicial de energía, entropía y temperatura Saravia Alía (2026b).

B00f02B: Definiciones y postulados. Sistema material, aislamiento, entorno y estado estacionario Saravia Alía (2026c).

B00f03: Energía. Trabajo, energías mecánicas, experimento de Joule, energía interna y calor Saravia Alía (2026d).

B00f04: Entropía, equilibrio y estabilidad. Balance, generación de entropía y segunda ley Saravia Alía (2026e).

10.- Apuntes de origen del material (2/2)

B00f05: Sistemas típicos, sustancias reales y fases. Máquinas de Carnot, gas ideal y propiedades agua-vapor Saravia Alía (2026f).

B00f06: Máquinas térmicas, exergía y máxima potencia. Motor, heladera, bomba de calor y optimización con resistencia térmica Saravia Alía (2026g).

B00f07: Economía, sociedad y ecología. Diagramas de ecosistemas, flujos sociales y decisiones de inversión De Vos (1995); Wall (1986); de Rosnay (1977).

B00f08: Sistemas abiertos, entalpía y balances. Volumen de control y balances de masa, energía y entropía Saravia Alía (2026h).

B00f09: Componentes de centrales térmicas. Turbina, condensador, caldera y aprovechamiento solar Saravia Alía (2026i).

B00f10: Centrales térmicas y ciclos. Rankine, mejoras, ORC y aplicaciones geotérmicas Saravia Alía (2026j).

Las láminas del libro M son copias y adaptaciones docentes; los libros de origen conservan sus desarrollos completos. Los enlaces abren los PDF publicados en termo.red/downloads.

11.- El hilo del curso: de la energía a las sociedades modernas

Paso	Pregunta que organiza la discusión
Conservación	¿Cómo medimos los cambios de energía y definimos calor a partir del trabajo adiabático?
Disponibilidad	¿Por qué conservar energía no significa conservar su capacidad de producir trabajo?
Potencia	¿Qué rendimiento permite obtener más trabajo por unidad de tiempo, con transferencias y equipos finitos?
Economía	¿Cómo cambian el punto de operación y la inversión cuando el combustible tiene un costo?
Sociedades	¿Cómo se encadenan recursos, máquinas, servicios y disipación en ecosistemas y sociedades?

Idea central: la energía se conserva, pero su disponibilidad se degrada. Producir potencia en los modelos de transferencia finita estudiados implica generar entropía y destruir parte de la exergía disponible.

Referencia: De Vos (1992); Wall (1986).

12.- Recorrido esencial de las tres clases

Marca [E :] Esencial. Láminas a presentar en clase, el resto es opcional; la marca aparece en el título y en el listado. El título se destaca en negrita. La frase inicial expresa la idea central para discutir en clase; el cuerpo conserva su peso normal. Cada vez que se exponga una [E] se puede ir para atrás y adelante con otras láminas; son como puntos de enfoque.

Aperturas: Los separadores de clase y las aperturas de cada tema organizan ese recorrido.

Sin marca: Ampliaciones, otras representaciones y material de consulta. El desarrollo, las condiciones de aplicación y las referencias quedan para la revisión autónoma. Se conservan todas las láminas y los gráficos.

Cierre por tema: Analizar la pregunta destacada dentro del tiempo del tema; la otra queda para consulta.

Cierre por clase: Usar la pregunta destacada durante los minutos finales ya previstos; las restantes son alternativas.

12.- Recorrido esencial de las tres clases

Los ejemplos de la máquina y de las piletas conectan los balances de energía y entropía con el trabajo útil, la exergía y la potencia. La selección no añade horas a las tres clases de dos horas.

13.- Clase 1: Repaso de Termodinámica

Clase 1 de 3

Dos horas

Lunes 26 de octubre, 8:30–10:30

- **Sección 1:** sistemas materiales, fronteras y paredes; estados de equilibrio, procesos y reversibilidad.
  4 láminas [E] × 8 min = 32 min.
- **Sección 2:** masa, trabajo, energía interna y calor; experimento de Joule; entropía, temperatura, microestados y relación fundamental; dos leyes, irreversibilidad y generación de entropía.
  10 láminas [E] × 8 min = 80 min.
- **Sección 3:** procesos y balances con gases ideales; radiación y su termodinámica.
  1 lámina [E] × 8 min = 8 min.

120 min / 15 láminas [E] = 8 min por lámina; aperturas, apoyos y cierres incluidos.

14.- **Sección 1:** Definiciones de sistemas

Contenidos del programa asignados a esta sección

- (1) Reversibilidad.

Enfoque: Vocabulario previo: cibernética, sistema material, entorno, paredes, aislamiento, estado, equilibrio y régimen estacionario.

T1: 32 minutos, incluida esta apertura.

15.- Cibernética

- La cibernética estudia los sistemas, su comportamiento, el control y la comunicación.
- Tomamos de ella un vocabulario: elementos, interacciones, estado, cambio, trayectoria y equilibrio.
- En Termodinámica elegimos un sistema y describimos qué puede intercambiar con su entorno.

Referencia: Ashby (1956).

16.- [E] Sistema

La frontera elegida determina qué queda dentro y qué intercambios contamos.

- Un sistema es un conjunto de elementos e interacciones que elegimos describir como una unidad.
- La elección responde a una pregunta: ¿qué queremos calcular o comprender?
- La frontera separa el sistema de su entorno; puede ser real o imaginaria.
- Un mismo equipo admite distintas elecciones de sistema: el gas, el recipiente o ambos.

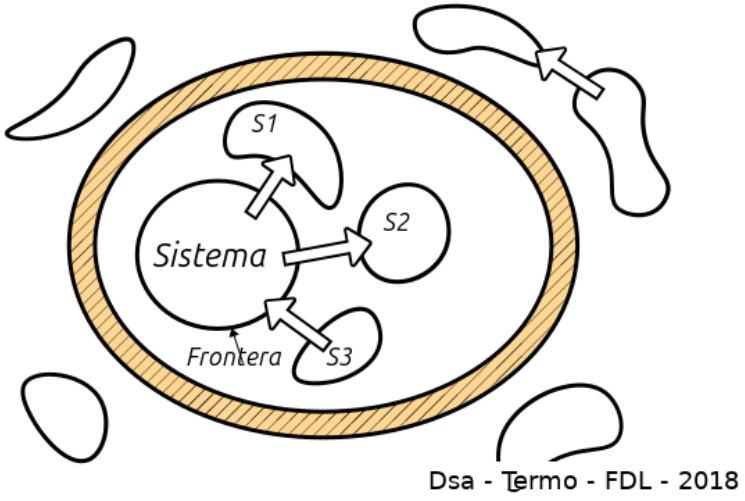


Figura 2

Frontera, subsistemas e interacciones internas y externas.

Referencia: Ashby (1956); Callen (1985).

17.- Sistema material

- Un sistema material o físico es una porción del mundo físico elegida para estudiar.
- Aquí usamos «sistema material» en sentido amplio: no implica por sí solo una masa fija.
- Para nosotros, el vacío también es un **sistema material**. Una región vacía de materia puede contener radiación o no.
- Masa de control: seguimos una cantidad determinada de materia.
- Volumen de control: delimitamos una región que puede ser atravesada por materia.

Referencia: Callen (1985).

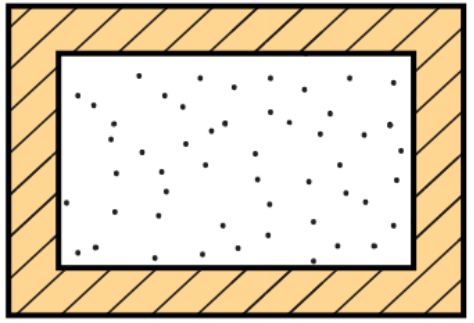


Figura 3

La región elegida y su frontera: también puede estudiarse una cavidad vacía, con o sin radiación.

18.- Sistema aislado y entorno

- El entorno comprende los sistemas exteriores con los que puede interactuar el sistema elegido.
- Un sistema está aislado cuando no interactúa con su entorno: los cambios externos no provocan cambios en él, ni sus cambios provocan cambios externos.
- Podemos ampliar el conjunto estudiado para incluir los elementos con los que antes interactuaba.
- Ejemplo: el gas puede interactuar con una pesa mediante un pistón móvil. Si incluimos gas, pistón y pesa en el sistema, esa interacción pasa a ser interna.

Referencia: Callen (1985).

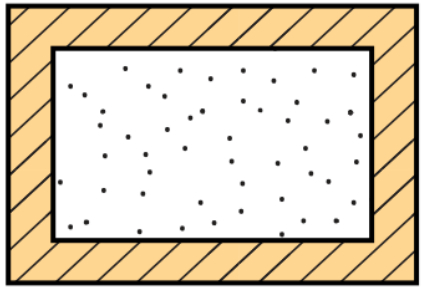


Figura 4

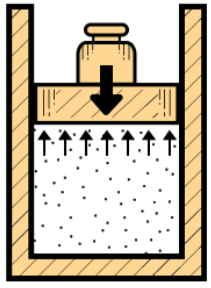


Figura 5

Recipiente aislado y gas que interactúa con una pesa mediante un pistón. Esquemas: D. Saravia (2018).

19.- [E] Estados de equilibrio y procesos

Un proceso entre equilibrios puede pasar por estados fuera del equilibrio.

- Estudiamos **estados de equilibrio y procesos que los conectan**. Las variables elegidas especifican cada estado respetando sus relaciones.
- Los estados inicial y final pueden ser de equilibrio aunque los intermedios no lo sean. Una curva de equilibrio no representa, en general, todo proceso real.
- Un proceso es **cuasiestático** si los cambios impuestos son lentos respecto de la relajación del sistema: idealmente pasa por equilibrios infinitamente próximos y admite una curva en el espacio de estados.
- Una **propiedad de estado** tiene un valor en cada equilibrio; su cambio entre extremos fijados no depende del camino.
- Más adelante veremos que trabajo, calor y entropía generada son **magnitudes de camino**: cuantifican el proceso y pueden diferir entre recorridos con los mismos extremos; no son propiedades almacenadas en el sistema.

Referencia: Callen (1985).

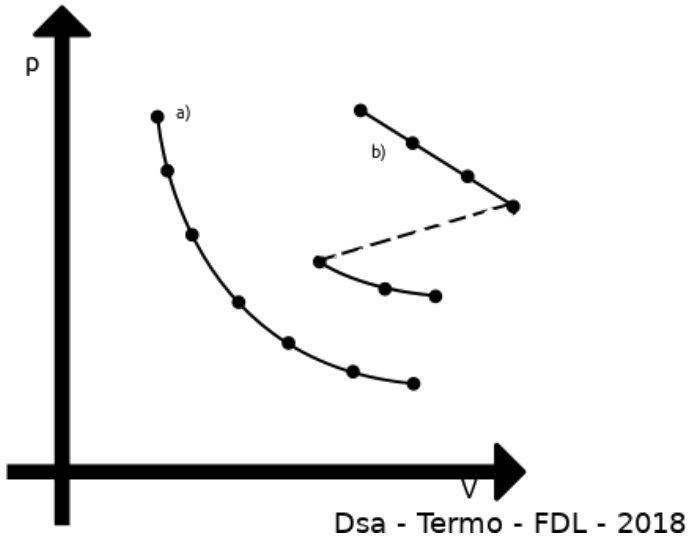


Figura 6

a) Camino cuasiestático. b) Estados de equilibrio separados por procesos cuyos estados intermedios no se representan mediante una curva de equilibrio.

20.- [E] Paredes: aislamiento e interacciones

Clasificamos las paredes por las interacciones que permiten.

Partimos de una pared ideal que aísla y habilitamos distintas formas de interacción. Primero consideramos paredes impermeables, sin conexiones eléctricas, ejes ni otros acoplamientos.

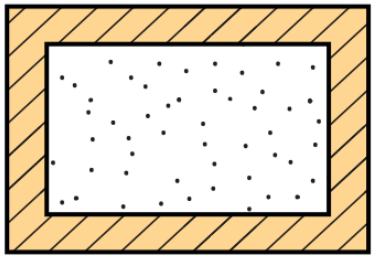
Pared	**Interacción que permite**
Aislante	Ninguna. Impide toda interacción entre el sistema y el entorno.
Adiabática móvil	Solo la interacción asociada al movimiento o deformación de la pared, como en un pistón. Si se inmoviliza, vuelve a aislar en este modelo.
Diatérmica rígida	Permite una interacción aun sin desplazamiento de la pared ni paso de materia: dos cuerpos puestos en ese contacto pueden modificar sus estados hasta alcanzar equilibrio térmico.

- La movilidad y el contacto diatérmico son posibilidades distintas: una pared móvil también puede ser diatérmica. Ser rígida no basta para aislar.
- Si habilitamos el paso de materia, la pared es permeable; si solo permite ciertas sustancias, semipermeable. Esto se clasifica por separado.

Representamos con pistones o agitadores las paredes móviles. La primera cambia el volumen. En amarillo y rayado a 45 grados, las adiabáticas. Las diatérmicas van de negro.

Referencia: Callen (1985).

21.- Paredes: ejemplos gráficos

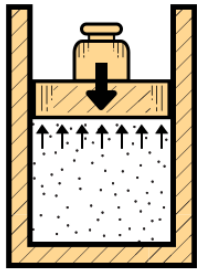


Dsa - Termo - FDL - 2018

Figura 7

Recipiente aislado

No intercambia materia ni interactúa con el entorno.

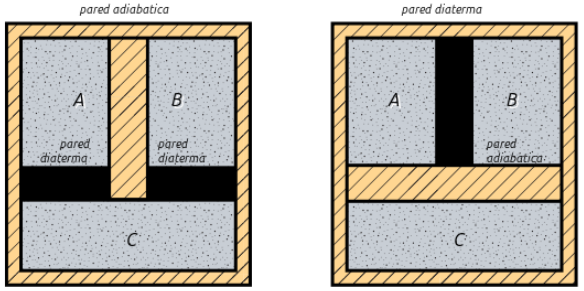


Dsa - Termo - FDL - 2018

Figura 8

Pared adiabática móvil

El pistón permite una interacción mecánica.



Dsa - Termo - FDL - 2018

Figura 9

Paredes diatérmicas

Permiten alcanzar equilibrio térmico sin mover las paredes ni intercambiar materia.

Se mantienen las idealizaciones y condiciones de aislamiento indicadas en la clasificación.

22.- Abierto, cerrado o aislado

Cerrado impide el paso de materia; aislado impide toda interacción.

Sistema	Paso de materia	Otras interacciones
Abierto	Permitido	Pueden estar permitidas.
Cerrado	Impedido	Pueden darse mediante paredes móviles, diatérmicas u otros acoplamientos.
Aislado	Impedido	Todas impedidas.

- Un cilindro sellado con pistón móvil es cerrado, pero no está aislado mientras pueda interactuar mediante el pistón.
- Un recipiente rígido con paredes diatérmicas también puede ser cerrado y no aislado.
- Para aislar el sistema deben bloquearse todas sus conexiones con el entorno, no solo el paso de materia o el movimiento de una pared.

Condición de aplicación: para que esta definición de aislamiento sea operativa, suponemos eliminados o despreciables los efectos a distancia entre el sistema y su entorno, como los gravitatorios y electromagnéticos. No conozco una pared que evite la gravedad.

Salvo indicación en contrario, nuestros sistemas estarán en reposo respecto de marcos de referencia inerciales. En los estados de equilibrio no girarán ni se deformarán.

Referencia: Callen (1985).

23.- Qué puede atravesar la frontera de un sistema

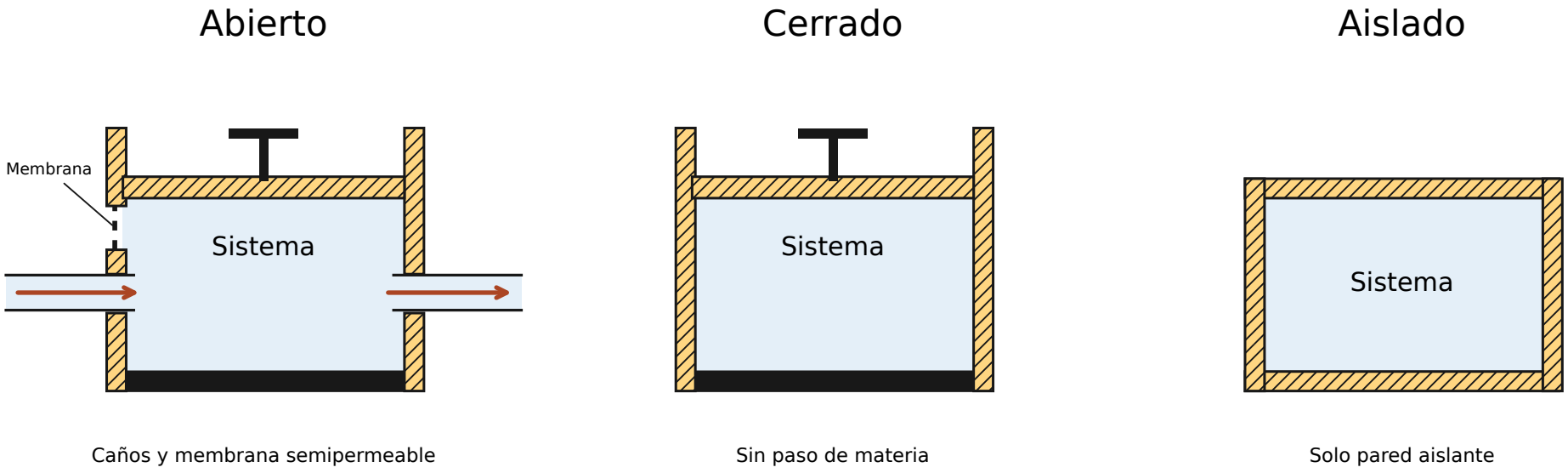


Figura 10

La clasificación depende de la frontera elegida. Los caños permiten entrada y salida de materia; la membrana semipermeable deja pasar solo ciertas sustancias. El pistón permite movimiento y la pared negra es diatérmica. El sistema cerrado conserva esas paredes, pero no tiene caños.

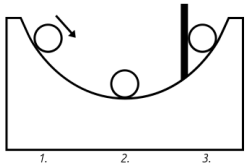
Veremos qué es la energía; por ahora, pensala como otros efectos.

Diagrama propio; Cengel and Boles (2006).

24.- Equilibrio

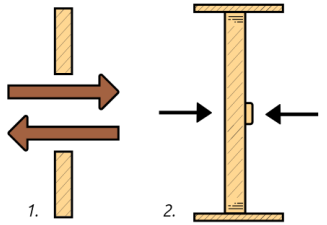
- En equilibrio termodinámico no hay evolución macroscópica espontánea bajo las restricciones impuestas.
- No hay desequilibrios internos que impulsen flujos disipativos.
- Esto no significa ausencia literal de fuerzas: presión y gravedad pueden equilibrarse en un fluido en reposo.
- Dos cuerpos alcanzan equilibrio térmico mutuo cuando, puestos en contacto mediante una pared diatérmica y sin otras interacciones, ya no modifican sus estados por ese contacto. Más adelante introduciremos la temperatura para caracterizarlo.

Referencia: Callen (1985).



Dsa - Termo - FDL - 2018

Figura 11



Dsa - Termo - FDL - 2018

Figura 12

Analogías mecánicas: equilibrio y compensación de esfuerzos. Un equilibrio puede ser estable, inestable o indiferente.

25.- Demonio de Maxwell: una pared activa

La compuerta cambia de estado según lo que observa un controlador.

- Una puerta separa dos cámaras con gas. Un controlador observa partículas y decide cuándo abrirla para dejar pasar algunas y retener otras.
- No es una membrana semipermeable pasiva: la regla de paso requiere sensor, memoria y accionamiento.
- Si se mira solo el gas, la selección puede parecer una disminución espontánea de entropía. El balance completo incluye controlador, alimentación y entorno.
- Para repetir un ciclo también hay que restaurar el estado del controlador. La segunda ley se aplica al conjunto completo.

Referencias: Maxwell (1871); Callen (1985).

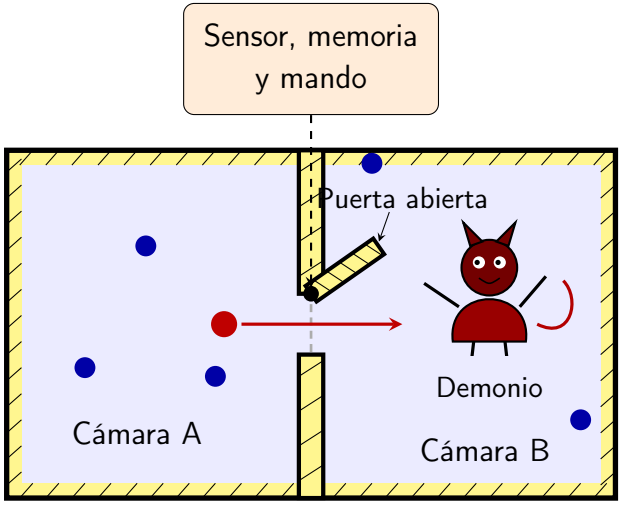
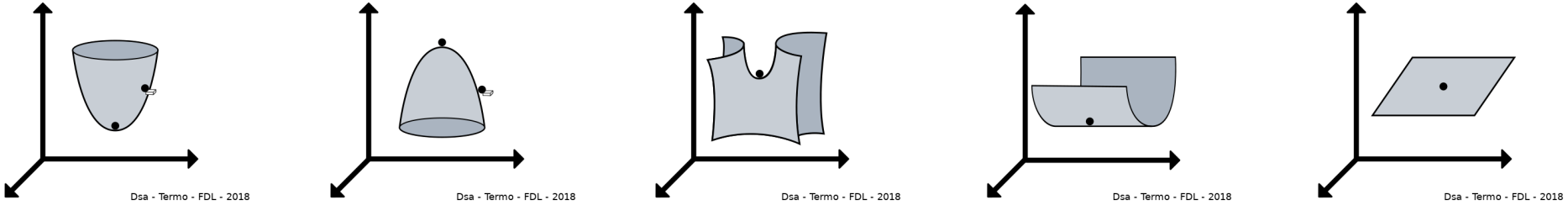


Figura 13
Compuerta selectiva controlada por mediciones; esquema conceptual.

26.- Estabilidad de un estado de equilibrio

Estar en equilibrio y ser estable son cuestiones diferentes.

Manteniendo las restricciones, perturbamos ligeramente el estado y observamos su respuesta.



Mínimo: estable | Máximo: inestable | Silla: mixto | Canal: estable/indiferente | Plano: indiferente

Figura 14

Analogías mecánicas de estabilidad en dos direcciones de perturbación. Dibujos del material original del curso.

- **Estable:** permanece cerca del equilibrio; **inestable:** una perturbación puede alejarlo; **indiferente:** puede quedar en otro equilibrio cercano.
- El comportamiento puede diferir según la dirección, como en la silla y el canal. La altura de estos dibujos representa energía potencial mecánica; el criterio termodinámico depende de las restricciones impuestas.

27.- Estado estacionario

- En un estado estacionario, las variables macroscópicas no cambian con el tiempo.
- Puede haber entradas y salidas permanentes de materia y energía: por ejemplo, una turbina en régimen constante.
- Estacionario no implica equilibrio: puede mantenerse un gradiente de temperatura y generarse entropía.
- Muchas veces estos estados se estudian mediante la mecánica de fluidos o de medios continuos. Bajo la hipótesis de equilibrio local, cada punto representa un pequeño elemento material que se trata como un sistema termodinámico local distinto, con sus propias variables de estado; estas pueden variar de un punto a otro.
- Un estado estacionario fuera del equilibrio puede cambiar al aislarlo de los suministros que lo mantienen.

Referencia: de Groot and Mazur (1962).

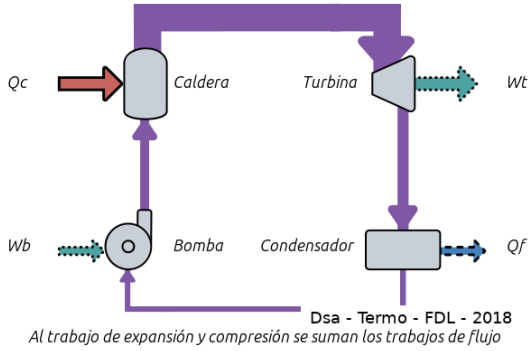


Figura 15

El fluido circula; cada equipo puede mantener sus variables constantes.

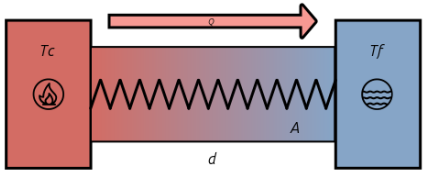


Figura 16

Barra conductora: el perfil de temperatura permanece fijo mientras fluye calor del lado rojo al azul.

28.- [E] Reversibilidad

Revertir exige restituir tanto el sistema como su entorno.

- Un proceso es reversible si es posible restituir sistema y entorno a sus estados iniciales sin otros cambios netos.
- Cuasiestático no significa necesariamente reversible: además deben excluirse el rozamiento y otras fuentes de irreversibilidad.
- No basta con devolver solamente el sistema a su estado inicial.
- Un ciclo puede ser irreversible aunque el fluido vuelva al mismo estado.
- Hacer un proceso lentamente no elimina por sí solo el rozamiento ni otras fuentes de irreversibilidad.

Referencia: Callen (1985).

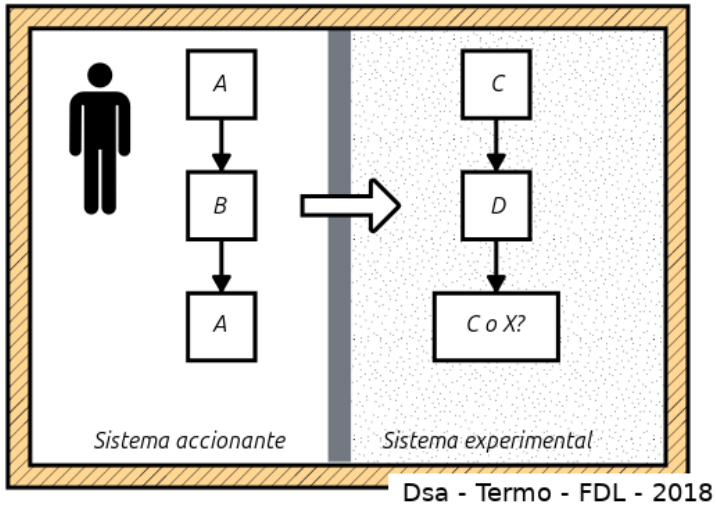


Figura 17

Para revertir el proceso deben restituirse tanto el sistema experimental como el sistema accionante.

29.- Cierre del tema: Sistemas y procesos

1. ¿Qué cambia al elegir como sistema solo el agua o el conjunto agua, recipiente y pistón?
2. **¿Un proceso lento es necesariamente reversible? ¿Qué condiciones faltan?**

La pregunta destacada se analiza en clase; la otra queda para revisión y consulta.

30.- **Sección 2:** Masa, energía, entropía, temperatura y leyes

Contenidos del programa asignados a esta sección

- (2a) Energía: Trabajo, energía cinética y potencial. Primer principio de la termodinámica. Función energía interna. Calor.
- (2b) Entropía.
- (2c) Entropía y temperatura.
- (2d) Segundo principio de la termodinámica.
- (2e) Irreversibilidad.
- Generación de entropía.

Enfoque: Conservación local, trabajo mecánico, balance de energía y experimento de Joule; aditividad, calor reversible y conexión cualitativa con microestados. Sin demostraciones estadísticas.

Distinguir transferencia y generación de entropía en sistemas cerrados.

Ampliación posterior: balance de entropía en sistemas abiertos.

T1: 80 minutos en total para estos contenidos, incluida esta apertura.

31.- Masa, materia y reacciones químicas

- **Modelo clásico:** la masa de un sistema cerrado se conserva. En un sistema abierto, su variación se calcula contando la masa que entra y la que sale.
- **Reacción química:** los átomos se reorganizan en otras moléculas o especies. Se conserva la cantidad de átomos de cada elemento; no necesariamente la cantidad de moléculas.

$$2\,\mathrm{H_2} + \mathrm{O_2} \longrightarrow 2\,\mathrm{H_2O}$$

- A ambos lados hay cuatro átomos de hidrógeno y dos de oxígeno. Si intervienen gases, también debemos incluirlos en el balance.
- **Alcance:** la igualdad entre la suma de masas en reposo de reactivos y productos es una aproximación excelente en química ordinaria. Sus diferencias se relacionan con la energía liberada o absorbida; en reacciones nucleares son mucho más apreciables.

Pregunta: ¿es lo mismo conservar la masa, la cantidad de moléculas y la energía?

32.- [E] Energía: conservación local

La energía acumulada cambia por lo que entra menos lo que sale.

- En el marco de la termodinámica clásica, la energía es una magnitud de estado que permite expresar una conservación local: el cambio de lo acumulado en una región corresponde a lo que entra menos lo que sale por su frontera.
- Si disminuye una forma de energía, puede aumentar otra dentro del mismo sistema o transferirse energía a un sistema vecino.
- En un sistema aislado la energía total permanece constante. En uno abierto debemos contar también la energía que transporta la materia.

$$\text{cambio de energía acumulada} = \text{energía que entra} - \text{energía que sale}.$$

La conservación local y el trabajo intercambiado en condiciones adiabáticas definen la energía interna.

Referencia: Callen (1985).

33.- Preguntas sobre la conservación de la energía

1. **Frenado:** cuando frenamos un cuerpo, ¿dónde queda la energía cinética que pierde?
2. **Subida:** un proyectil lanzado hacia arriba, sin propulsión y en el vacío, pierde velocidad mientras asciende. ¿Dónde queda su energía cinética?
3. **Reacción nuclear:** si cambia la suma de las masas en reposo de reactivos y productos, ¿qué ocurre con la energía? ¿Qué expresa $E_0 = mc^2$?
4. **Expansión cosmológica:** un proyectil libre puede perder velocidad respecto de los observadores que acompañan la expansión del universo. ¿Disminuye su energía cinética medida por ellos? ¿Significa que esa energía desaparece?

Precisión: en relatividad general se mantiene una ley local de conservación de energía y momento; en un espacio-tiempo dinámico no siempre existe una energía global conservada.

Lectura: Sean Carroll: *Energy Is Not Conserved* (2010).

34.- Trabajo y energía

El trabajo mecánico es una transferencia de energía asociada a fuerzas y desplazamientos:

$$W = \int \vec{F} \cdot d\vec{r}.$$

- Una fuerza sin desplazamiento de su punto de aplicación no realiza trabajo mecánico.
- Adoptamos $Q > 0$ hacia el sistema y $W > 0$ entregado por el sistema.
- Para un sistema cerrado: $\Delta E = Q - W$.

Referencia: Goldstein et al. (2002); Fermi (1956).

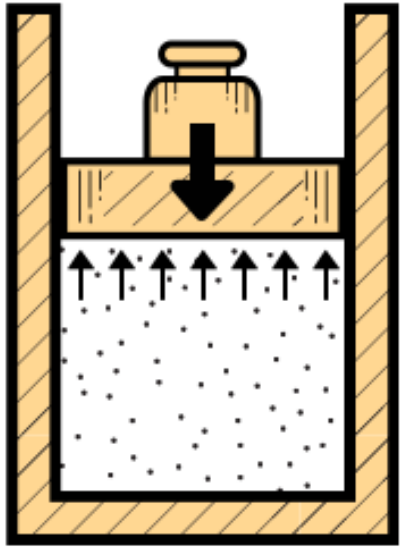


Figura 18

Una fuerza desplaza el pistón: el gas y la pesa intercambian trabajo.

35.- Energías mecánicas

Para una partícula de masa constante, el trabajo de la fuerza resultante modifica su energía cinética:

$$W_{\text{neto}} = \Delta E_c, \qquad E_c = \frac{1}{2} m v^2.$$

- La expresión supone el marco de la mecánica clásica.
- No todo trabajo sobre un cuerpo se convierte en energía cinética macroscópica: también puede cambiar su energía interna.

Referencia: Goldstein et al. (2002).

36.- Energías mecánicas: continuación

Para fuerzas conservativas se define una energía potencial:

$$W_{\text{conservativo}} = -\Delta E_p, \qquad E_p = mgz \quad \text{(gravedad uniforme)}.$$

- Si solo actúan fuerzas conservativas, $E_c + E_p$ permanece constante.
- Con rozamiento puede disminuir la energía mecánica y aumentar la energía interna.
- La energía total sigue conservándose al incluir sistema, entorno e intercambios.

Referencia: Goldstein et al. (2002).

37.- Formas de energía: de la vis viva a la vis tenebris

Descripción	Expresión o ejemplo	Qué permite reconocer
Cinética clásica	$E_c = \frac{1}{2}mv^2$	La *vis viva*: movimiento y capacidad de realizar trabajo.
Potencial	$E_p = mgh$; resorte $\frac{1}{2}kx^2$	Interacciones y configuración del sistema elegido.
Electromagnética	Campos E, B; flujo S_P	Energía de los campos; vector de Poynting y conversión electromecánica en motores y generadores.
Química	Composición, enlaces y reacciones	Cambios de energía interna; pilas, combustión y síntesis. No es una reserva adicional a U.
Relativista	$E_0 = mc^2$	La energía en reposo; los balances nucleares incluyen masas en reposo, movimiento y radiación.
Cuántica	Fotón: $E = h\nu$; transiciones: $\Delta E = h\nu$	Intercambios en cuantos y diferencias entre niveles de energía. No toda energía cuántica se reduce a la de un fotón.
Térmica y estadística	Energía interna U	La misma energía puede distribuirse entre muchos grados de libertad y tener distinta disponibilidad para producir trabajo.
Cosmológica	Energía oscura: *vis tenebris*	Amplía la discusión hacia la expansión del universo; su balance no se identifica sin más con el de una máquina térmica clásica.

Lectura: descripciones relacionadas, no reservas independientes que se suman. Síntesis propia, no transcripción de la charla.

Charla de César Gómez (IFT): de la vis viva a la vis tenebris. Instituto de Física Teórica IFT (2018).

38.- Energía electromagnética, electromecánica y química

- **Campos electromagnéticos:** contienen energía y la transportan. En vacío, su densidad de energía y el vector de Poynting son:

$$u_{\mathrm{em}} = \frac{\epsilon_0 E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0}, \qquad \mathrm{S}_P = \frac{1}{\mu_0}\mathrm{E} \times \mathrm{B} = \mathrm{E} \times \mathrm{H}.$$

- S_P indica dirección y flujo de energía por unidad de área ($\mathrm{W/m^2}$); $\int_A \mathrm{S}_P \cdot \hat{\mathrm{n}}\, dA$ es la potencia que atraviesa una superficie orientada. No es la entropía S.
- **Conversión electromecánica:** las fuerzas electromagnéticas permiten producir movimiento en un motor o electricidad en un generador. En un motor de corriente continua estacionario, con tensión V y corriente I: $VI = \tau\omega + \dot{W}_{\text{pérdidas}}$; no debe contarse dos veces la misma energía transferida.
- **Química:** al reaccionar cambia la composición y la energía interna asociada a la configuración electrónica y molecular. Romper enlaces requiere energía; formarlos la libera. El balance completo determina si la reacción libera o absorbe energía.
- Una pila puede entregar trabajo eléctrico; una combustión puede suministrar calor. La contribución química ya forma parte de U cuando se contabiliza la composición: no se suma nuevamente como una reserva independiente.



Figura 19

Referencias: OpenStax (c); Atkins and de Paula (2010).

39.- Campos y dirección del transporte electromagnético

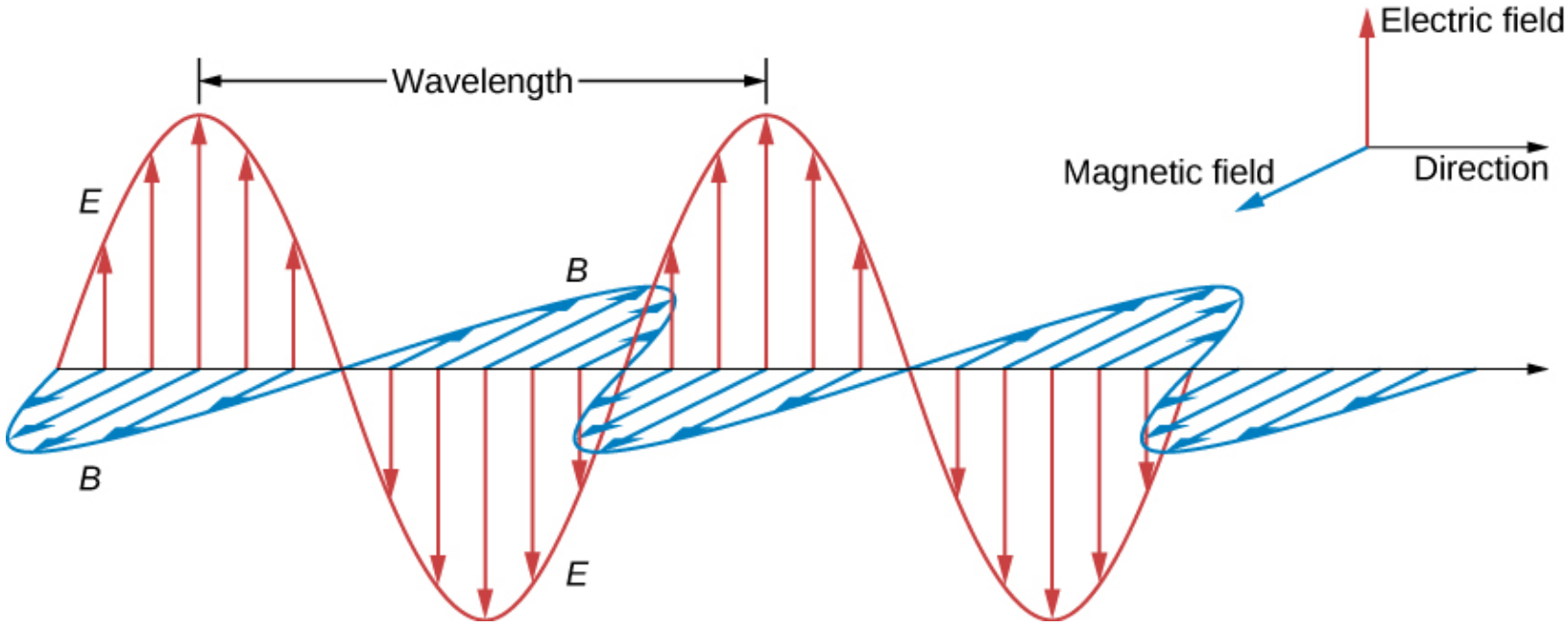


Figura 20

En una onda plana en el vacío, E y B son transversales. El vector de Poynting $S_P = E \times B/\mu_0$ señala el flujo de energía.

En la figura: rojo, campo eléctrico; azul, campo magnético; flecha horizontal, dirección de propagación. No son trayectorias de partículas.

OpenStax, figura 16.8, sin modificaciones; CC BY-NC-SA 4.0. OpenStax (b).

40.- Energía interna U

U caracteriza el estado.

- U es la energía interna: una propiedad de estado. Su cero de referencia es convencional.
- Separar la energía interna de la energía cinética y potencial macroscópicas exige elegir un marco y un sistema.
- Para un sistema cerrado con $\Delta E_c = \Delta E_p = 0$: $\boxed{\Delta U = Q - W}$.
- El trabajo adiabático permite determinar diferencias de U; el trabajo por una trayectoria general no es una función de estado.
- Todo par de estados se conecta con trabajo adiabático en al menos un sentido. Es decir, se puede determinar U por completo con estos mecanismos.

Referencia: Callen (1985).

41.- [E] Primero el trabajo adiabático: cómo se construye U

El trabajo adiabático permite medir diferencias de energía interna U.

1. Elegimos un sistema cerrado y estados extremos sin cambios de energía cinética o potencial macroscópica.
2. Lo rodeamos con una pared aislante y actuamos mediante pistón o agitador. Medimos trabajo con fuerzas y desplazamientos, o con par y giro.
3. La experiencia, recogida en los postulados del apunte, establece que el trabajo adiabático total entre los mismos estados extremos no depende del procedimiento admisible utilizado.
4. Fijamos un estado de referencia y asignamos diferencias de U mediante ese trabajo: $\Delta U = -W_{\mathrm{ad}}$, con $W > 0$ cuando sale del sistema.

No exigimos reversibilidad: el pistón ideal y el agitador irreversible aportan mecanismos distintos a esta construcción. *Referencia:* Gyftopoulos and Beretta (2005); Fermi (1956).

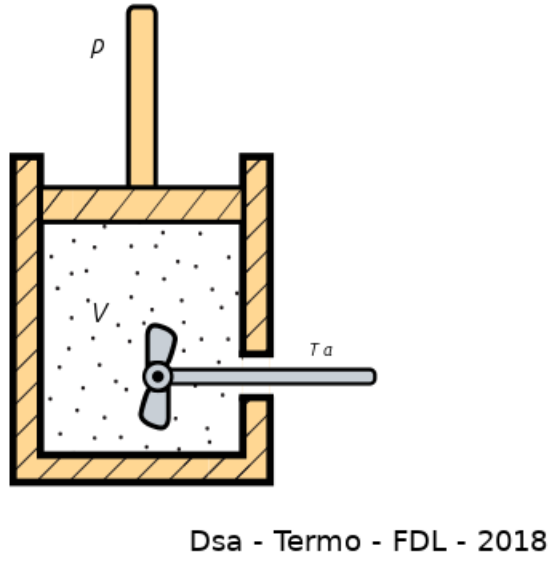


Figura 21

Pistón y agitador: dos mecanismos de trabajo adiabático para cambiar U. El dispositivo permite medir ambos trabajos con aislamiento térmico.

42.- Del trabajo medido a una función de estado

Sea R un estado de referencia, al que asignamos un valor arbitrario U_R.

Proceso adiabático realizable	**Diferencia de energía interna**
De R a B	$U_B - U_R = -W_{R\to B}$
De B a R	$U_B - U_R = +W_{B\to R}$

- Cambiar el signo al escribir una diferencia en sentido contrario es una operación algebraica; no significa que se pueda realizar físicamente el proceso inverso.
- Para construir el mapa completo se usa la conectividad adiabática prevista por los postulados, junto con la compatibilidad de los trabajos medidos.
- Una vez conocido U_B, su valor sirve para cualquier proceso que llegue a B, aunque ese proceso no sea adiabático.

La independencia del trabajo adiabático para estados extremos dados es contenido físico de la primera ley; no se deduce de bautizar una función como U.

Referencia: Gyftopoulos and Beretta (2005).

43.- [E] Después de U: el calor cierra el balance de conservación

Conocidos ΔU y el trabajo, el calor completa el balance.

1. El trabajo adiabático ya permitió determinar el cambio $\Delta U = U_B - U_A$ sin introducir el calor como magnitud de medida independiente.
2. Habilitamos una interacción mediante una pared no adiabática. El trabajo medido puede dejar de dar cuenta de todo el cambio de U.
3. Exigimos el balance de conservación de energía del sistema cerrado. Llamamos calor recibido al intercambio que completa ese balance:

$$\boxed{Q = \Delta U + W} \qquad \Longleftrightarrow \qquad \boxed{\Delta U = Q - W}.$$

- $Q > 0$: calor que entra. $W > 0$: trabajo que sale. En un proceso adiabático resulta $Q = 0$.
- Conservar energía no exige $\Delta U = 0$: exige contabilizar sus cambios y sus intercambios. Si cambian también E_c o E_p, corresponde usar $\Delta E = Q - W$.
- El calor no es una propiedad almacenada: U caracteriza el estado; Q y W caracterizan el proceso.

Referencia: Fermi (1956); Gyftopoulos and Beretta (2005).

44.- Calor

- Después de construir U mediante trabajo adiabático, definimos el calor recibido por conservación: $Q = \Delta U + W$. La transferencia térmica por una diferencia de temperatura es la interacción que luego identificamos experimentalmente con ese término del balance.
- Ahora podemos expresar la clasificación anterior: una pared adiabática impide esa transferencia; una diatérmica la permite. La interacción mediante el movimiento de la pared se contabiliza como trabajo.
- El calor no es una sustancia ni una propiedad almacenada en el sistema.
- Para un sistema cerrado sin cambios macroscópicos de energía cinética o potencial, $Q = \Delta U + W$.
- Dos procesos entre los mismos estados tienen igual ΔU, pero pueden tener distintos Q y W.

Referencia: Besson (2003); Fermi (1956).

45.- Un mismo cambio de U, distintos intercambios

Un fluido en un recipiente rígido pasa entre dos estados de equilibrio con $\Delta U = 200\,\mathrm{J}$. Se comparan tres procedimientos que llegan al mismo estado final:

Procedimiento	W (J)	Q (J)	ΔU (J)
Agitación adiabática	−200	0	200
Intercambio por la pared, sin agitador	0	200	200
Agitación e intercambio por la pared	−80	120	200

- El trabajo negativo de la primera fila significa trabajo recibido por el fluido. La paleta realiza un proceso irreversible; no ingresa calor.
- En todas las filas se verifica $Q = \Delta U + W$. El estado final no informa por sí solo cuánto calor o trabajo se intercambió.
- Este es el sentido operativo de la construcción: primero se calibra U mediante trabajo adiabático y luego se determina Q mediante el balance.

Referencia: Fermi (1956).

46.- Experimento de Joule

- Una pesa mueve un agitador dentro de un recipiente térmicamente aislado.
- El trabajo recibido por el fluido aumenta su energía interna; puede observarse un aumento de temperatura.
- Con cambios despreciables de energía cinética y potencial del fluido: $Q = 0$ y $\Delta U = -W = W_{\text{recibido}}$.
- El aumento de temperatura por agitación no es calor recibido: en el experimento adiabático ingresa trabajo y aumenta U. Así se calibra la energía interna mediante una medida mecánica.

Referencia: Fermi (1956).

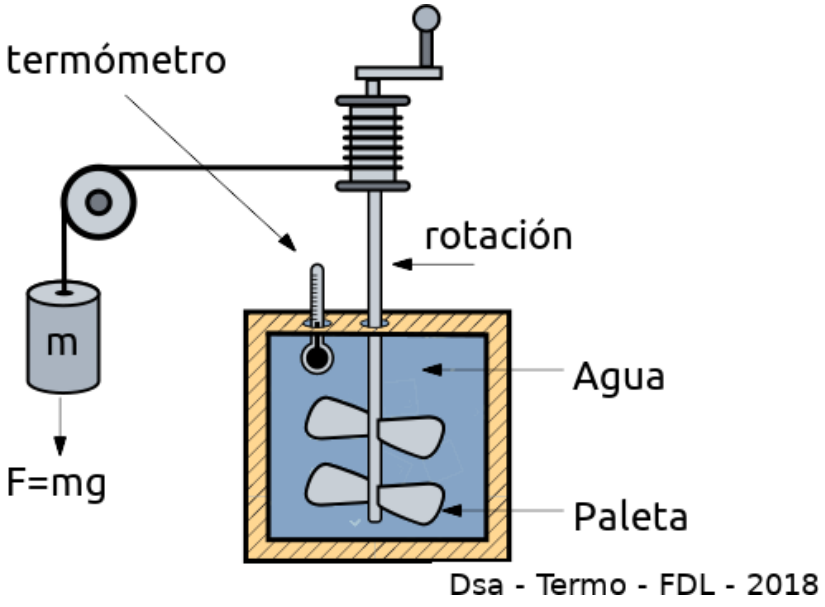


Figura 22

La pesa desciende y hace girar las paletas en el agua. El termómetro registra el cambio térmico.

47.- Adiabático no significa reversible

Irreversible es todo proceso que no cumple la definición de reversible.

- Una compresión o expansión con pistón ideal puede aproximarse a un proceso reversible si se eliminan fricciones y desequilibrios finitos.
- La agitación de un fluido viscoso es irreversible aunque las paredes sean aislantes. Invertir el giro de la paleta sigue ingresando trabajo; no deshace el calentamiento.
- No todos los estados son accesibles adiabáticamente en ambos sentidos. Tampoco se afirma que un mismo par de estados admita simultáneamente una conexión reversible y otra irreversible.
- Un recorrido irreversible no tiene por qué atravesar estados internos de equilibrio: su representación en p–V es esquemática.

Referencia: Gyftopoulos and Beretta (2005).

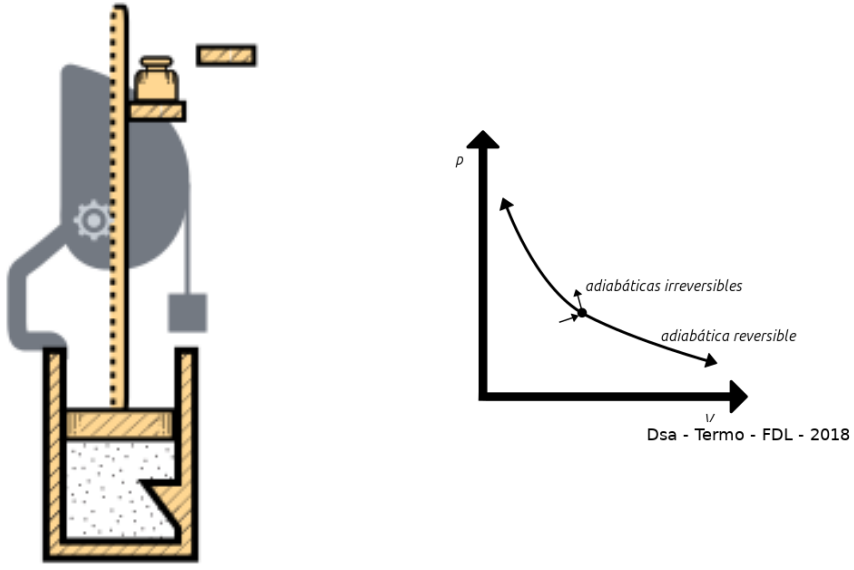


Figura 23
Izquierda: la leva de radio variable $r(V)$ ajusta la carga del pistón y permite aproximar una adiabática reversible con aislamiento, ajuste lento y sin fricción. Derecha: accesibilidad mediante recorridos adiabáticos reversibles e irreversibles.

48.- Entropía: construcción del mapa

Así **definimos la entropía**, lo hacemos en sistemas aislados: debe conservarse en todo proceso reversible, y además debe ser aditiva entre sistemas. Solo falta fijar el cero, lo que se conoce como tercera ley y no veremos. Básicamente asigna un cero a un conjunto de estados que se recorren simultáneamente con una adiabática y una isoterma (definimos después temperatura).

Con esto tenemos un mapa: ya no importa si lo aplicamos a un sistema no aislado, el mapa vale.

49.- [E] Entropía: reversibilidad y aditividad

En un conjunto aislado reversible, la entropía total se conserva, por definición en este texto.

- Un proceso es reversible si puede restituirse el estado inicial del sistema y de su entorno, sin otros cambios.
- Buscamos una magnitud de estado, la entropía S, que sea aditiva: la del conjunto es la suma de las de sus subsistemas.
- En un conjunto aislado que cambia reversiblemente, esa suma permanece constante; en un cambio irreversible aumenta.

$$S_{\text{total}} = \sum_i S_i, \qquad \Delta S_{\text{total}} = 0 \text{ (reversible)}, \qquad \Delta S_{\text{total}} > 0 \text{ (irreversible)}.$$

La entropía de un subsistema puede aumentar mientras la de otro disminuye. La constancia se refiere al **total aislado** Callen (1985).

Referencia: Callen (1985).

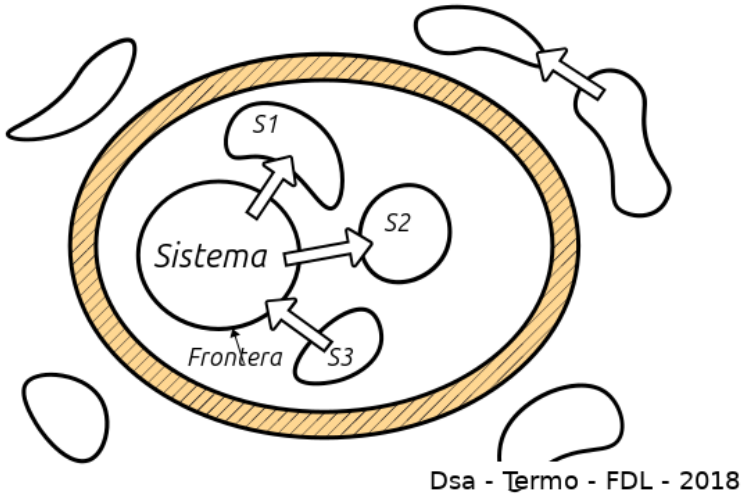


Figura 24

Al considerar el conjunto aislado, los intercambios entre subsistemas pasan a ser internos.

50.- [E] Temperatura: igualdad en el equilibrio térmico

Igual temperatura caracteriza el equilibrio térmico mutuo. Así se define la temperatura.

- Dos sistemas en equilibrio térmico tienen el mismo valor de una variable que llamamos temperatura.
- Si A está en equilibrio térmico con C, y B también lo está con C, entonces A y B están en equilibrio térmico entre sí.
- Esta propiedad permite comparar temperaturas mediante un tercer sistema: un termómetro.
- Igual temperatura no significa igual energía interna ni igual entropía: una taza y un tanque de agua pueden tener la misma temperatura.
- Dos cuerpos intercambian calor reversiblemente: $\delta Q_A + \delta Q_B = 0$ y $dS_A + dS_B = 0$, luego $\delta Q_A/dS_A = \delta Q_B/dS_B$. Esa razón común es la temperatura absoluta: $\delta Q_{\text{rev}} = T\,dS$.

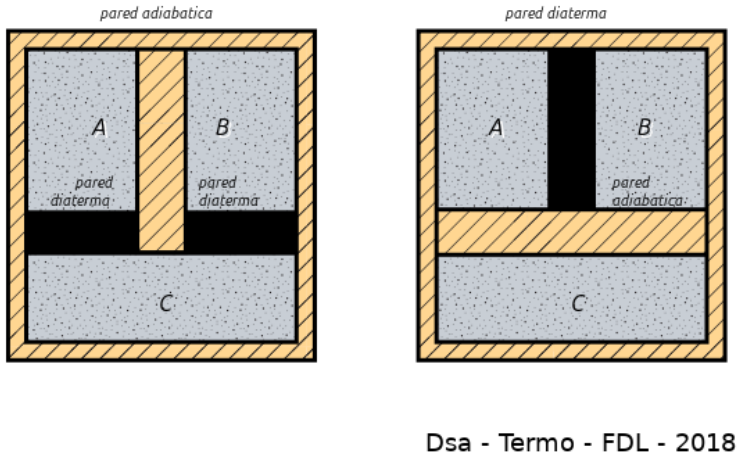


Figura 25
Equilibrio térmico: A y B se comparan mediante un tercer sistema C.

Dos pasos: reconocer temperaturas iguales permite construir una escala empírica; su conexión con calor y

50.- [E] Temperatura: igualdad en el equilibrio térmico

Nota: en un gas ideal no cuántico la temperatura resulta vinculada a la energía cinética media de sus partículas. Es un resultado, no una definición, ni un concepto definitorio. El equilibrio térmico sí.

Referencia: Fermi (1956).

51.- Construir un mapa numérico de entropía y temperatura

La equivalencia adiabática reversible y la aditividad organizan el mapa de entropía.

1. **Clases de equivalencia.** Agrupamos estados de equilibrio interconvertibles mediante procesos **adiabáticos reversibles**: pertenecen a una misma clase de entropía. Se permiten intercambios mecánicos reversibles con el exterior.
2. **Mapa aditivo.** Bajo las hipótesis termodinámicas de composición, escalamiento y comparabilidad, asignamos números compatibles con $S_{A+B} = S_A + S_B$. La aditividad permite coordinar las escalas de distintos sistemas; no basta numerar arbitrariamente cada clase.
3. **Calor reversible y temperatura.** El intercambio reversible enlaza clases diferentes. La relación $\delta Q_{\mathrm{rev}} = T\,dS$ articula las escalas numéricas de S y T; fijamos una normalización común. Para un sistema simple, $1/T = (\partial S/\partial U)_{V,N}$.
4. **Reversibilidad del conjunto.** En un intercambio reversible, un subsistema puede ganar entropía y otro perderla: la suma se conserva. La generación de entropía describe la irreversibilidad del proceso; no sustituye esta construcción de la función de estado.

Distinción: igualdad de S caracteriza la equivalencia adiabática reversible dentro de este marco. Reversible con intercambio de calor no significa necesariamente isentrópico.

Síntesis conceptual, sin demostración axiomática; Lieb and Yngvason (1999); Callen (1985).

52.- El puente entre calor, entropía y temperatura

- Consideremos dos subsistemas que intercambian una cantidad infinitesimal de calor reversiblemente, sin intercambio de calor con el exterior.
- En este contacto directo, sin una máquina interpuesta, el calor que sale de uno entra en el otro. Por reversibilidad y aditividad, sus cambios de entropía se compensan.

$$\delta Q_A + \delta Q_B = 0, \qquad dS_A + dS_B = 0 \quad \Longrightarrow \quad \frac{\delta Q_{A,\mathrm{rev}}}{dS_A} = \frac{\delta Q_{B,\mathrm{rev}}}{dS_B}.$$

La construcción termodinámica identifica esa razón común con la temperatura absoluta:

$$\boxed{\delta Q_{\mathrm{rev}} = T\, dS}.$$

La transferencia reversible de calor se entiende como un límite con diferencia infinitesimal de temperaturas. La escala de S se elige de manera compatible con la escala kelvin Callen (1985). *Referencia:* Callen (1985).

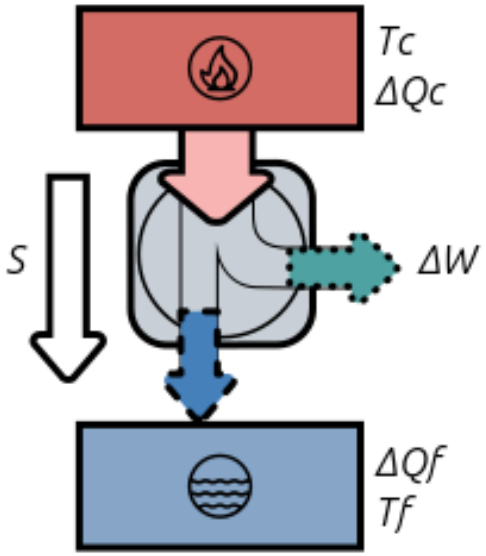


Figura 26

Otro caso: un motor entre focos distintos. Los calores no son iguales: su diferencia sale como trabajo; las entropías transferidas sí son iguales. Esquema: D. Saravia (2018).

53.- A temperatura constante: cambio de entropía y calor

Para calcular ΔS con calor, usamos un camino reversible.

$$\Delta S = \int_i^f \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T}, \qquad \boxed{\Delta S = \frac{Q_{\text{rev}}}{T} \quad \text{si } T \text{ es constante.}}$$

- Es una relación para el **cambio** de entropía entre estados, calculado mediante un camino reversible.
- En un proceso irreversible no basta dividir el calor real por la temperatura: hay entropía generada dentro del sistema.
- En un sistema cerrado que intercambia calor con un único foco a temperatura constante T_0, el balance es $\Delta S = Q/T_0 + S_g$, con $S_g \geq 0$, incluyendo en el sistema la zona donde se produce la irreversibilidad de la transferencia.

Ejemplo reversible: recibir $300\,\text{J}$ a $300\,\text{K}$ produce un aumento de entropía de $1\,\text{J/K}$.

Referencia: Callen (1985).

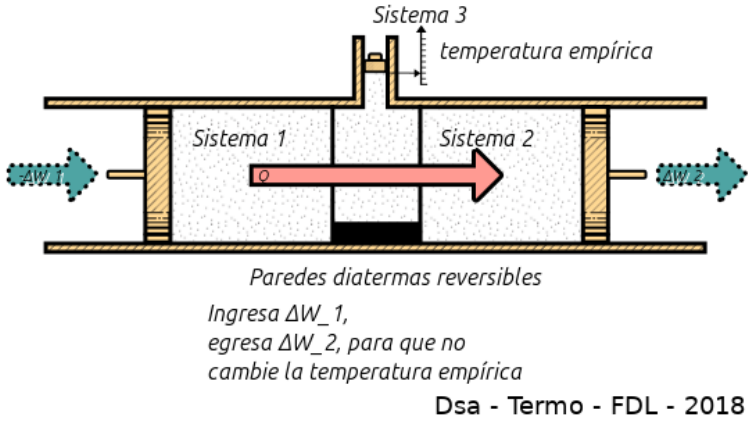


Figura 27

Intercambio reversible ideal entre sistemas a la misma temperatura; el dispositivo regula los cambios mecánicos.

54.- [E] Microestados: muchas maneras de realizar un mismo estado

Más microestados equiprobables compatibles significan mayor entropía.

Esta visión requiere cuántica, sin la cual es imposible contar estados. Dio inicio a la cuántica. Contar estados obligó a cuantizar: esta visión dio inicio a la cuántica.

- El estado macroscópico describe propiedades como energía, volumen y cantidad de materia.
- Un microestado especifica la configuración microscópica compatible con esa descripción. Muchos microestados pueden corresponder al mismo macroestado.
- La mecánica estadística relaciona la entropía con ese número de posibilidades. Si los microestados compatibles son equiprobables:

$$\boxed{S = k_B \ln \Omega}.$$

Ω es el número de microestados compatibles y k_B es la constante de Boltzmann. Más posibilidades microscópicas corresponden a mayor entropía Landau and Lifshitz (1980).
Referencia: Callen (1985).

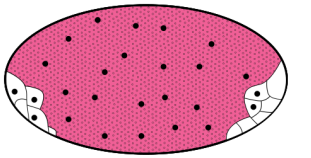
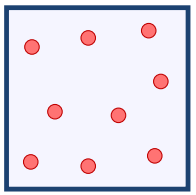
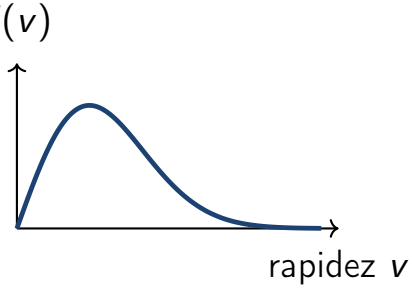


Figura 28
El macroestado no fija cada posición y movimiento microscópico.



Moléculas



Distribución de Maxwell (2D)

Abrir simulación de Maxwell

Histograma de velocidades; no cuenta microestados Saravia and ChatGPT 5.3 (2026).

55.- Por qué aparece un logaritmo

- Si dos subsistemas pueden combinar sus microestados independientemente, cada posibilidad de A puede combinarse con cada posibilidad de B.
- Por eso las cantidades de posibilidades se multiplican. El logaritmo convierte ese producto en una suma, como requiere la aditividad de la entropía.

$$\Omega_{AB} = \Omega_A \Omega_B, \qquad S_{AB} = k_B \ln(\Omega_A \Omega_B) = S_A + S_B.$$

Sistema	Microestados	Entropía/k_B
A	10	$\ln 10$
B	100	$\ln 100$
$A + B$	1000	$\ln 1000 = \ln 10 + \ln 100$

Referencia: Callen (1985).

56.- Tres descripciones de la entropía

Lo más sorprendente del concepto es que es equivalente en tres esquemas que parecen no relacionados: a) reversibilidad; b) calor y temperatura; c) probabilidad y cantidad de microestados (cuántica). Se puede definir con cualquiera y demostrar los otros; la equivalencia con c) se demuestra en estadística cuántica, y solo para algunos sistemas.

- En termodinámica, S expresa aditividad, reversibilidad y dirección de los cambios; sus diferencias pueden calcularse con calor reversible.
- En mecánica estadística, S expresa cuántas posibilidades microscópicas son compatibles con un estado macroscópico.
- Con las hipótesis estadísticas apropiadas, ambas descripciones coinciden. Un macroestado con muchas más posibilidades microscópicas es mucho más probable.

56.- Tres descripciones de la entropía

Imagen para discutir: al quitar un tabique, un gas puede ocupar todo el recipiente. Hay muchas más configuraciones con partículas distribuidas por todo el volumen que con todas confinadas en una mitad.

El aumento de posibilidades explica estadísticamente la expansión espontánea y el aumento de entropía. Esta imagen ilustra la conexión; no requiere desarrollar aquí una demostración estadística.

Referencia: Callen (1985).

57.- Temperatura negativa: qué significa la pendiente de U(S)

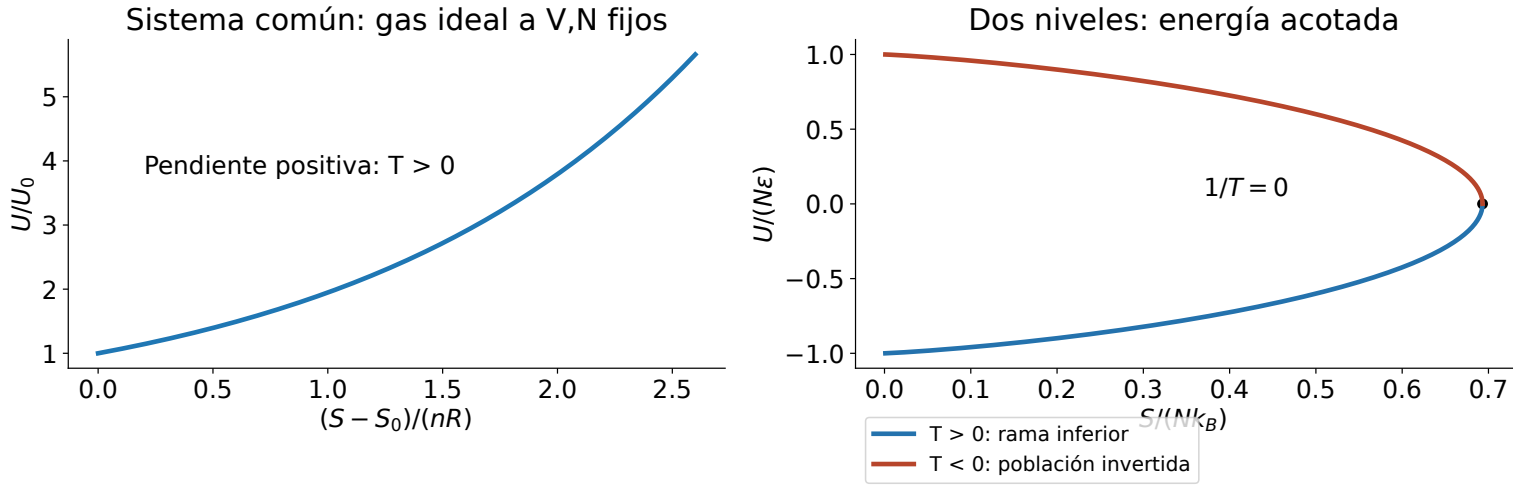


Figura 29

- A variables restantes fijas, $T = \partial U/\partial S$. En sistemas comunes la pendiente es positiva. En el modelo de dos niveles, la rama superior tiene pendiente negativa: al aumentar U, disminuye S.
- Requiere energía acotada superiormente y población invertida, con equilibrio interno del subsistema considerado. No se obtiene enfriando un gas común por debajo de 0 K.
- $T < 0$ es más caliente que cualquier $T > 0$: al ponerlos en contacto, la energía fluye del sistema negativo al positivo. En el máximo de S, $1/T = 0$; las dos ramas de $U(S)$ deben distinguirse.

57.- Temperatura negativa: qué significa la pendiente de U(S)

Es mejor usar $-1/T$ como variable en estos sistemas. Claro, no vamos a dar partes meteorológicos indicando una temperatura negativa.

Ejemplo: láseres.

Gráfico propio: gas ideal y modelo de dos niveles con entropía de Boltzmann; Ramsey (1956).

58.- Dos representaciones: S(U,V) y U(S,V)

Temperatura y presión se obtienen como derivadas de la relación fundamental.

Consideremos un sistema simple compresible, en equilibrio, con cantidad y composición fijas. En una región diferenciable, con $T > 0$, podemos usar dos representaciones equivalentes:

Representación entrópica

$S = S(U, V)$

$$dS = \frac{1}{T}\,dU + \frac{p}{T}\,dV$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial U}\right)_V = \frac{1}{T}$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_U = \frac{p}{T}$$

Representación energética

$U = U(S, V)$

$$dU = T\,dS - p\,dV$$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_V = T$$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_S = -p$$

- Las derivadas son pendientes de la superficie de estados; el subíndice indica qué variable se mantiene fija. La cantidad y composición se mantienen fijas en todas ellas.
- Una relación fundamental completa permite obtener temperatura, presión y otras propiedades. Si intervienen otras variables de estado o cambia la composición, **se amplían las funciones y sus ecuaciones diferenciales con los términos correspondientes**. No basta con conocer solamente $pV = nRT$.

Los mapas $S(U)$ y $U(S)$ son funciones biyectivas, es decir, se pueden invertir sin problema. Salvo en temperaturas negativas, ahí lo son a tramos.

Referencias: Callen (1985); DeVoe (2020).

59.- [E] Relación fundamental: identidad de estado e intercambios

$T\,dS$ y $p\,dV$ no son siempre el calor y el trabajo del proceso real.

- **Primera ley:** en un sistema cerrado, $\Delta E = Q - W$, con $W > 0$ entregado por el sistema. Si no cambia su energía cinética ni potencial macroscópica, $\Delta U = Q - W$.
- **Relación fundamental:** para el sistema simple de composición fija, $dU = T\,dS - p\,dV$. Es una identidad entre propiedades de estados de equilibrio próximos; no exige que el proceso real entre los estados sea reversible.
- **Identificación de términos:** en un proceso reversible con solo trabajo de expansión, $\delta Q_{\mathrm{rev}} = T\,dS$ y $\delta W_{\mathrm{rev}} = p\,dV$. En un proceso general, esos términos no son necesariamente el calor y el trabajo reales.

Joule, recipiente rígido y adiabático: $Q = 0$, $\Delta V = 0$, pero $\Delta U = W_{\mathrm{recibido}} > 0$ y $\Delta S > 0$.

En Joule, comparar los estados de equilibrio a volumen fijo da $\Delta U = \int_{S_1}^{S_2} T(S, V_0)\,dS$. Ese término no representa calor recibido: la energía entró como trabajo de eje. La integral no describe los estados fuera del equilibrio durante la agitación.

Referencias: Callen (1985); Massachusetts Institute of Technology.

60.- Alcance general: otras variables y composición

La relación fundamental de equilibrio se amplía cuando el estado requiere otras variables. Además de S, V, incluimos las coordenadas x_a y las cantidades de sustancia n_i:

$$U = U(S, V, \{x_a\}, \{n_i\}), \qquad dU = T\,dS - p\,dV + \sum_a X_a\,dx_a + \sum_i \mu_i\,dn_i.$$

- Cada variable adicional aporta un término conjugado: por ejemplo, tensión superficial por cambio de área ($\gamma\,dA$), fuerza por elongación ($F\,dL$) o potencial eléctrico por carga ($\phi\,dq$), según el sistema y la convención elegida. En general, $X_a = (\partial U/\partial x_a)$ manteniendo fijas las demás variables.
- $\mu_i = (\partial U/\partial n_i)_{S,V,\{x_a\},n_{j\neq i}}$ es el potencial químico. La composición puede cambiar por transferencia de materia o por reacciones dentro de un sistema cerrado.
- Conocer la relación fundamental permite obtener las variables conjugadas mediante derivadas. La forma reducida $dU = T\,dS - p\,dV$ corresponde al caso en que no varían otras coordenadas ni la composición.
- Esta identidad de equilibrio no reemplaza el balance del proceso: para un sistema abierto deben contarse además los flujos de energía transportados por la materia; no basta sumar $\mu_i\,dn_i$ como si fuera todo ese transporte.

Referencias: Callen (1985); DeVoe (2020).

61.- Ver las derivadas sobre la superficie S(U,V)

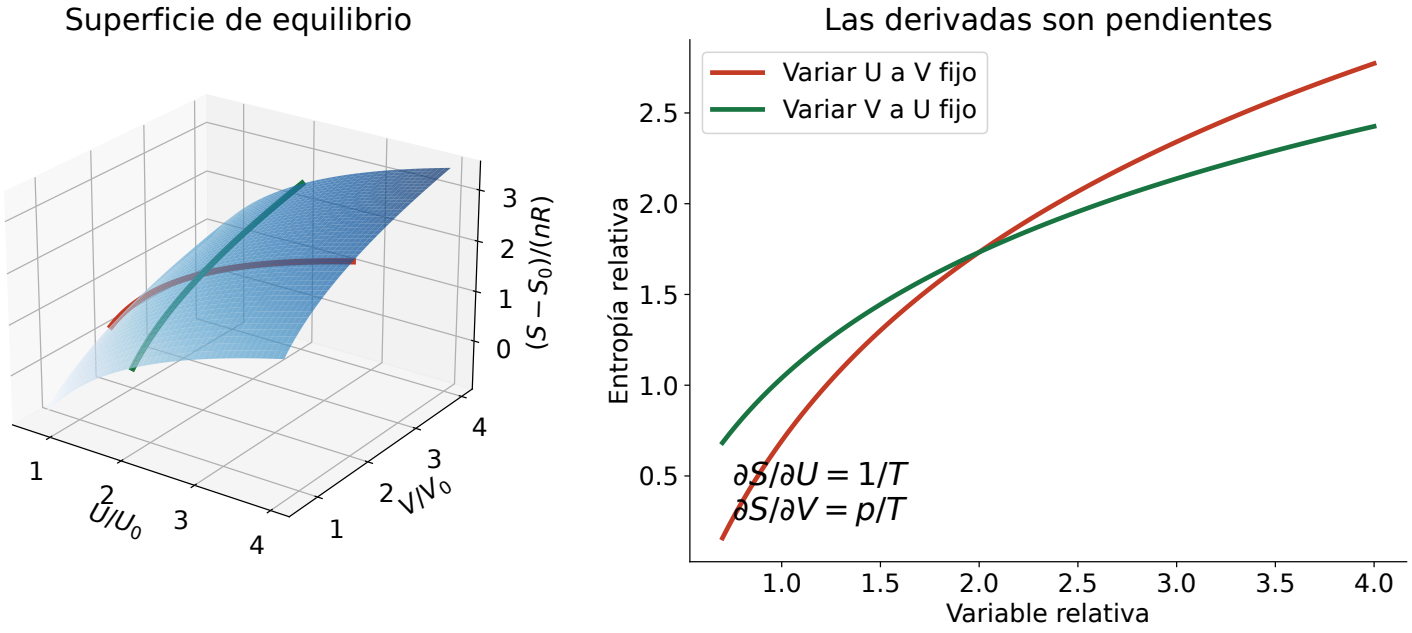


Figura 30

Ejemplo: gas ideal monoatómico, $S - S_0 = nR[\frac{3}{2}\ln(U/U_0) + \ln(V/V_0)]$, con N fijo. Los colores identifican dos cortes; en variables dimensionales sus pendientes son $1/T$ y p/T.

Gráfico propio a partir de la relación fundamental del gas ideal; Callen (1985).

62.- [E] Balance y generación de entropía

El cambio de entropía suma transferencia y generación interna.

Para un sistema cerrado, el balance separa transferencia y generación:

$$\Delta S = \int \frac{\delta Q}{T_b} + S_{\text{gen}}.$$

- T_b es la temperatura local de la frontera donde cruza el calor.
- $S_{\text{gen}} \geq 0$ es la entropía generada dentro de la frontera: cero si el proceso allí es reversible. $Q > 0$ significa calor recibido.
- Si se usa la temperatura de un foco externo, debe incluirse la zona de transferencia en el balance y su generación de entropía.

Referencia: Callen (1985); Bejan (2006).

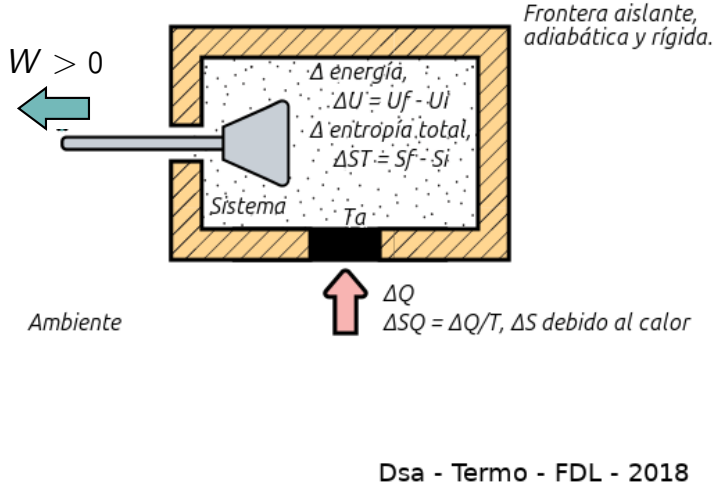


Figura 31

Sistema cerrado: no hay flujo de materia. Las conexiones permiten intercambios térmicos y mecánicos; distinguir transferencia y generación de entropía.

63.- Generación de entropía no negativa

$$\boxed{S_{\text{gen}} \geq 0}.$$

- Proceso reversible: $S_{\text{gen}} = 0$; irreversible: $S_{\text{gen}} > 0$.
- Un sistema aislado cumple $\Delta S = S_{\text{gen}} \geq 0$.
- Un sistema no aislado puede disminuir su entropía exportándola: no contradice la segunda ley.
- Rozamiento, expansión libre y transferencia de calor con diferencia finita de temperaturas generan entropía.

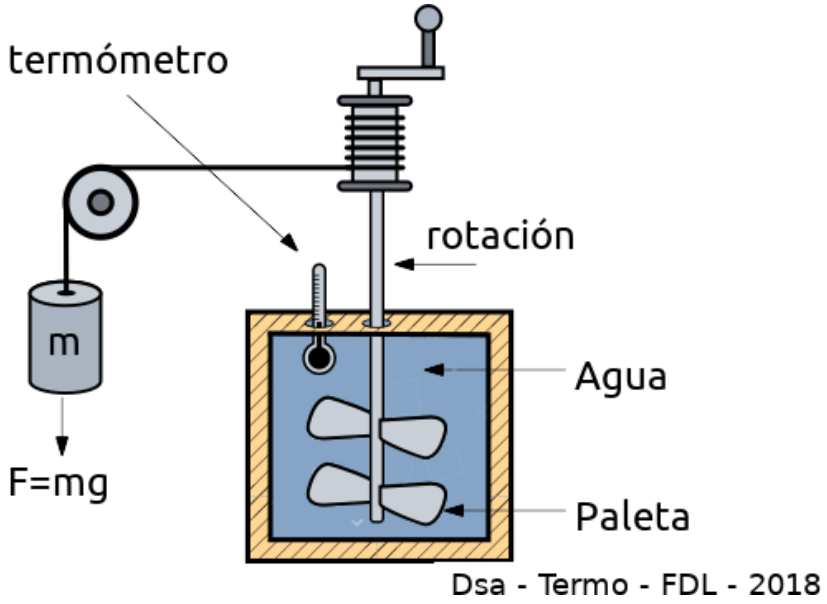


Figura 32

La agitación adiabática genera entropía aunque no entre calor.

Referencia: Callen (1985); Bejan (2006).

64.- [E] Primera y segunda ley de la termodinámica

La primera ley conserva energía; la segunda establece la dirección posible de los procesos.

Ley	**Balance para un sistema cerrado**	**Qué expresa**
Primera	$\Delta E = Q - W$, con $E = U + E_c + E_p$	La energía cambia por el calor recibido y el trabajo entregado; $Q > 0$ entra y $W > 0$ sale.
Segunda	$\Delta S = \sum_j \int \frac{\delta Q_j}{T_{b,j}} + S_g$, $S_g \geq 0$	La entropía cambia por la que acompaña al calor y por la generada dentro del sistema. $T_{b,j}$ es la temperatura absoluta de cada contacto térmico.

- **Sistema aislado:** $Q = W = 0$, luego $\Delta E = 0$ y $\Delta S = S_g \geq 0$; en el límite reversible, $S_g = 0$.
- **Experimento de Joule:** el recipiente es adiabático, pero recibe trabajo de las paletas: $Q = 0$, $W < 0$, $\Delta U = -W > 0$ y $\Delta S = S_g > 0$.

Referencias: Callen (1985); de Groot and Mazur (1962).

65.- [E] Energía, entropía y temperatura: síntesis

Magnitud	Idea que la identifica	Conexión operativa
Energía	Conservación local: lo acumulado cambia por lo que entra y sale.	En condiciones adiabáticas, su cambio se mide mediante trabajo.
Entropía	Aditiva; constante en un conjunto aislado reversible y creciente en uno irreversible.	$dS = \delta Q_{\mathrm{rev}}/T$; estadísticamente, $S = k_B \ln \Omega$ para microestados equiprobables.
Temperatura	Igual en sistemas en equilibrio térmico.	Conecta calor reversible y cambio de entropía: $\delta Q_{\mathrm{rev}} = T\, dS$.

Para discutir: si la energía se conserva, ¿por qué no todo proceso puede deshacerse y por qué no toda la energía puede convertirse en trabajo útil?

Referencia: Callen (1985).

66.- Cierre: energía, entropía y las dos leyes

1. **Si dos sistemas tienen igual temperatura, ¿deben tener igual energía interna?**
2. ¿Puede conservarse la energía de un conjunto aislado y aumentar su entropía?
3. **Si una paleta agita agua en un recipiente rígido y adiabático, ¿qué intercambio explica el aumento de U?**
4. ¿Por qué conocer el cambio de U no determina por separado el calor y el trabajo?

Las preguntas destacadas se analizan en clase; las otras quedan para revisión y consulta.

67.- **Sección 3:** Sistemas particulares: gases ideales y radiación

Contenidos del programa asignados a esta sección

- (3) Procesos y balances en ciclos con gases ideales.

Enfoque: Comparar los balances y diagramas de los procesos elementales del gas ideal para preparar el cálculo de un ciclo; ampliar con la radiación como sistema termodinámico.

T1: 8 minutos, incluida esta apertura.

68.- Gas ideal diluido: resumen

$$pV = nRT, \qquad dU = nc_v(T)\,dT, \qquad dH = nc_p(T)\,dT.$$

- Para un gas ideal, U y H dependen solo de la temperatura para cantidad y composición fijas. $H = U + pV$ es la entalpía.
- Aquí n se mide en mol; c_v, c_p y R se expresan en J/(mol K). La ecuación de estado no exige capacidades caloríficas constantes.
- En los ejemplos siguientes usaremos capacidades caloríficas constantes: $c_p - c_v = R$ y $\gamma = c_p/c_v$.

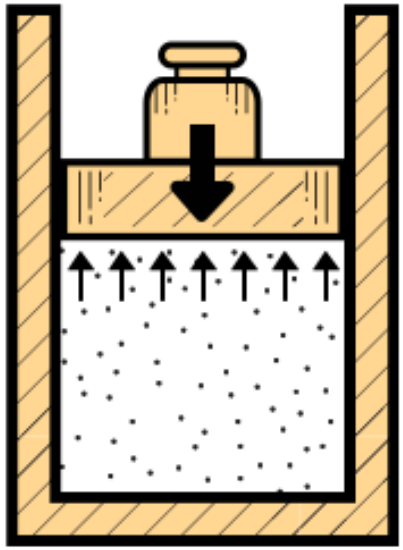


Figura 33
Gas en un cilindro: presión, volumen y temperatura describen sus estados de equilibrio.

Referencia: Cengel and Boles (2006).

69.- [E] Tabla de procesos

El balance es el mismo; cada proceso impone condiciones diferentes.

Gas ideal, n constante; trabajo de expansión positivo; procesos reversibles y c_v, c_p constantes. Usamos $\Delta T = T_2 - T_1$ y $\gamma = c_p/c_v$.

Proceso	W	ΔU	Q
Isócoro	0	$nc_v\Delta T$	$nc_v\Delta T$
Isóbaro	$nR\Delta T$	$nc_v\Delta T$	$nc_p\Delta T$
Isotermo	$nRT\ln(V_2/V_1)$	0	W
Adiabático	$-nc_v\Delta T = \dfrac{p_1V_1 - p_2V_2}{\gamma - 1}$	$nc_v\Delta T$	0

Para la adiabática reversible: $pV^\gamma = \mathrm{cte}$. Para el ciclo completo: $\Delta U_{\mathrm{ciclo}} = 0$ y $Q_{\mathrm{neto}} = W_{\mathrm{neto}}$.

Referencia: Cengel and Boles (2006).

70.- Procesos del gas ideal: diagramas

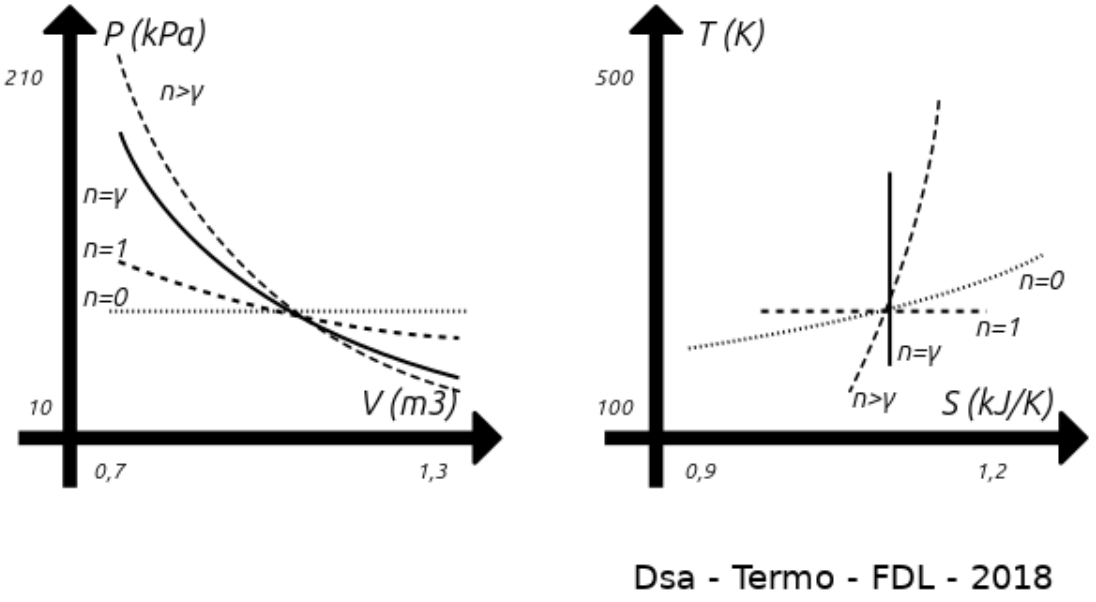


Figura 34

- En $pV^n = \text{cte}$: $n = 0$ representa una isóbara; $n = 1$, una isoterma del gas ideal; $n = \gamma$, una adiabática reversible con capacidades caloríficas constantes.
- El exponente n de esta figura no es la cantidad de moles usada antes. El límite isócoro es vertical en p–V. En T–S, la isoterma es horizontal y la adiabática reversible, vertical.

Referencia: Cengel and Boles (2006).

71.- La radiación como sistema termodinámico

La radiación puede constituir un sistema termodinámico: posee energía, entropía y ejerce presión, incluso en una cavidad sin materia en su interior.

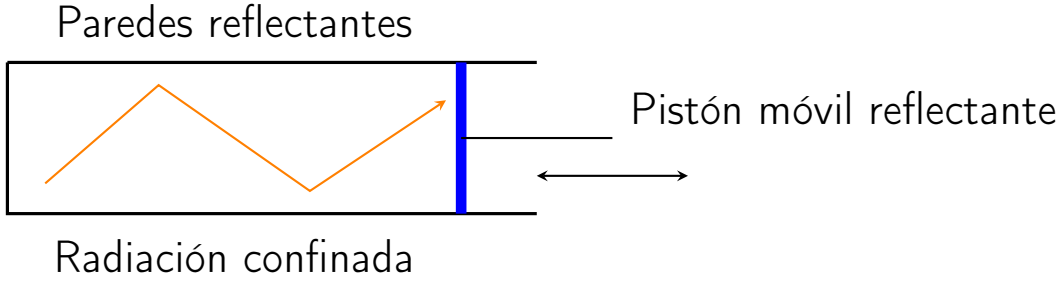


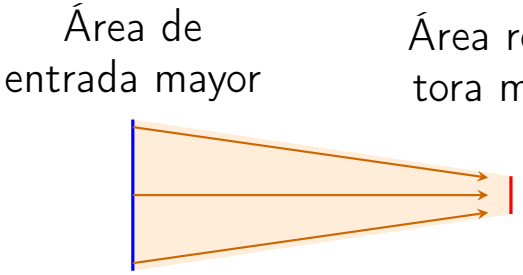
Figura 35

- Podemos imaginar **máquinas con paredes espejadas y pistones móviles** para analizar su termodinámica: al mover el pistón, la radiación intercambia trabajo y cambia su energía y su volumen.
- Las reflexiones sobre un espejo móvil modifican la frecuencia de los fotones. En una expansión, la radiación realiza trabajo sobre el pistón; en una compresión, recibe trabajo.
- Para radiación **en equilibrio térmico** podemos definir una temperatura y una relación fundamental. En una transformación reversible, $dU = T\,dS - p\,dV$; con paredes ideales reflectantes y movimiento reversible, $dS = 0$.
- Una radiación arbitraria no tiene necesariamente una única temperatura. Los espejos perfectos, por sí solos, no garantizan que alcance equilibrio térmico.

Referencia: Callen (1985).

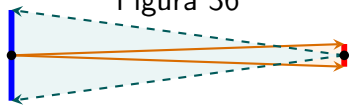
72.- Étendue y entropía en la radiación

Pregunta: ¿puede concentrarse la luz del Sol para obtener temperaturas mayores que la del Sol?



Menos área exige mayor apertura angular del haz.

Figura 36



Mismas superficies; dos rayos desde cada centro.

Figura 37

$$G = n_r^2 \int_A \int_\Omega \cos\theta \, d\Omega \, dA$$

n_r: índice de refracción; θ: ángulo con la normal. G mide extensión espacial y angular.

- **Óptica pasiva ideal:** conserva la étendue del haz completo y L/n_r^2, donde L es la radiancia. Puede aumentar la irradiancia sobre un área menor, pero no el brillo radiométrico en el mismo medio. Recortar el haz pierde potencia.
- **Entropía:** G no es la entropía; describe posiciones y direcciones disponibles para la radiación. La óptica reversible no genera entropía; la absorción y termalización pueden generarla.
- **Límite:** la concentración pasiva no permite mantener un receptor más caliente que la temperatura de brillo de la fuente: aproximadamente la de la **fotosfera**, no la del núcleo solar. Superarla requiere otro proceso, como convertir energía solar en trabajo y usarlo para calentar.

Referencias: Ikeda; Lovegrove and Stein (2012).

73.- Preguntas de cierre de la clase 1

1. **Elegí una frontera para agua calentada y agitada: ¿qué energía entra, cuál sale y qué cambia dentro?**
2. ¿Cómo distinguirías calor, trabajo y energía interna en ese ejemplo?
3. ¿Qué observación permitiría afirmar que hubo irreversibilidad?

La pregunta destacada guía el cierre de clase; las otras quedan como alternativas de consulta.

74.- Clase 2: Máquinas térmicas, Exergía y Máxima potencia

Clase 2 de 3

Dos horas

Lunes 26 de octubre, 15:00–17:00

- **Sección 4:** ciclo de Carnot; motor, heladera y bomba de calor; rendimiento, COP y comparación económica de calefacciones.
  5 láminas [E] $\times$ 8 min $=$ 40 min.
- **Sección 5:** exergía, generación de entropía y máxima potencia en tiempo finito; motor endorreversible, resistencia térmica, inversión y dos piletas.
  10 láminas [E] $\times$ 8 min $=$ 80 min.

120 min / 15 láminas [E] = 8 min por lámina; aperturas, apoyos y cierres incluidos.

75.- **Sección 4:** Máquinas térmicas: ciclo de Carnot, generador, heladera y bomba de calor

Contenidos del programa asignados a esta sección

- (4) Ciclo de Carnot.
- Conversión de energía térmica en mecánica.

Enfoque: Comparar generador de trabajo, heladera y bomba de calor; distinguir rendimiento y COP, y representar el ciclo de Carnot con gas ideal.

T2: 40 minutos, incluida esta apertura.

76.- Ciclo de Carnot: pistón y máquina

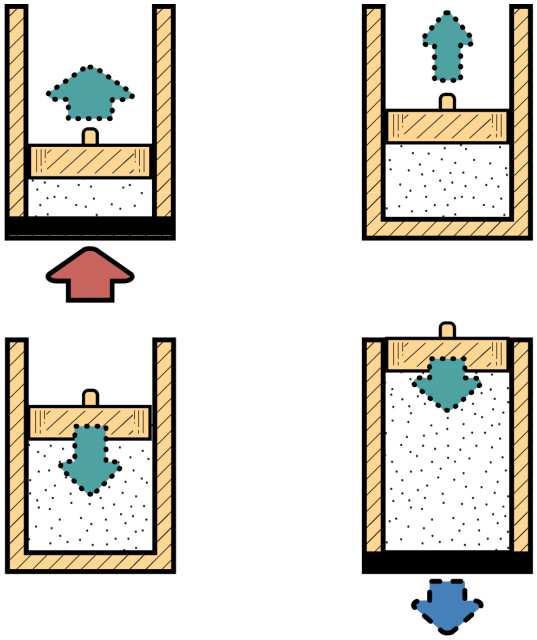


Figura 38

1. Isoterma T_c: entra Q_c. 2. Expansión adiabática.
4. Compresión adiabática. 3. Isoterma T_f: sale Q_f.

Cuatro etapas del gas en el pistón.

Referencia: Carnot (1824); Cengel and Boles (2006).

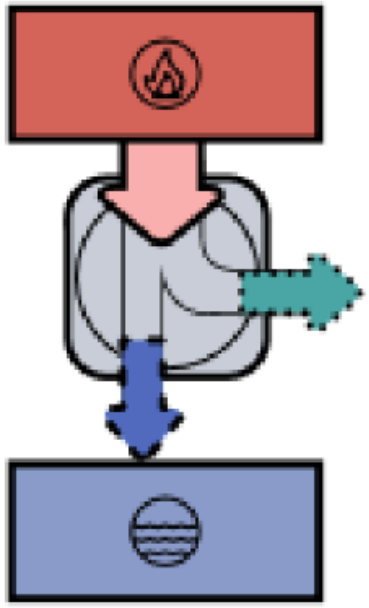


Figura 39

Máquina entre los focos térmicos.

77.- Ciclo de Carnot: diagramas

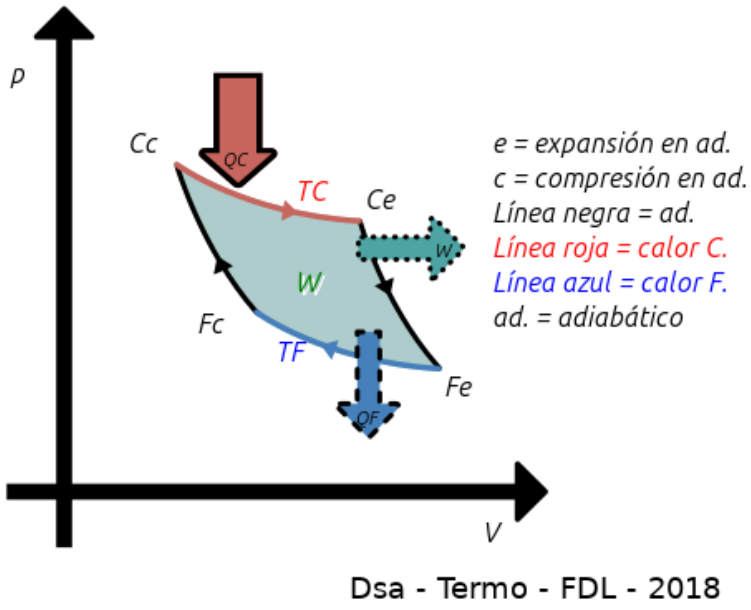


Figura 40

Ciclo en el plano presión–volumen.

Referencia: Carnot (1824); Cengel and Boles (2006).

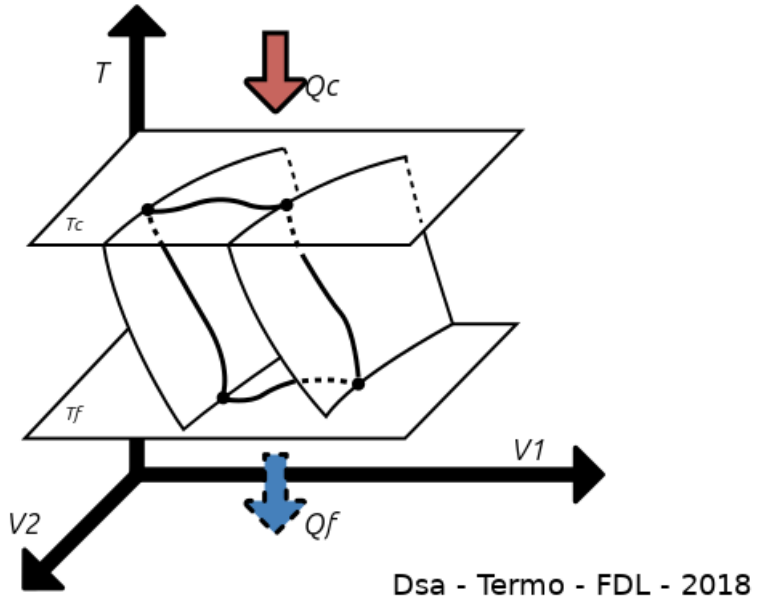


Figura 41

Representación tridimensional del ciclo.

78.- [E] Ciclo de Carnot: explicación

Dos isotermas y dos adiabáticas reversibles cierran el ciclo.

1. Expansión isoterma a T_c: el gas recibe Q_c y entrega trabajo.
2. Expansión adiabática reversible: la temperatura baja de T_c a T_f.
3. Compresión isoterma a T_f: el gas entrega Q_f y recibe trabajo.
4. Compresión adiabática reversible: la temperatura vuelve a T_c.

$$\Delta U_{\text{ciclo}} = 0, \quad W_{\text{neto}} = Q_c - Q_f, \quad \Delta S_{\text{ciclo}} = 0.$$

En el diagrama p–V del gas ideal, las adiabáticas reversibles tienen mayor pendiente en valor absoluto que las isotermas que pasan por el mismo punto.

Referencia: Cengel and Boles (2006).

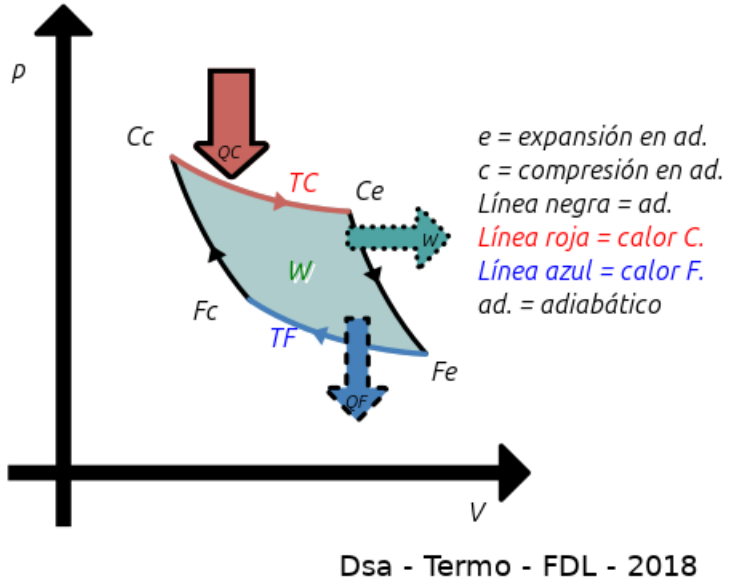


Figura 42

Dos isotermas y dos adiabáticas reversibles cierran el ciclo.

79.- Máquinas de Carnot

Una máquina de Carnot opera reversiblemente entre dos focos de temperaturas constantes.

$$\frac{Q_c}{T_c} = \frac{Q_f}{T_f} = \Delta S_{\text{transferida}}.$$

- El fluido completa un ciclo: su cambio neto de entropía es cero.
- La entropía que recibe del foco caliente se entrega al frío; no se genera entropía.
- Q/T expresa entropía transferida por ciclo, no la entropía absoluta del motor.

Referencia: Carnot (1824); Callen (1985).

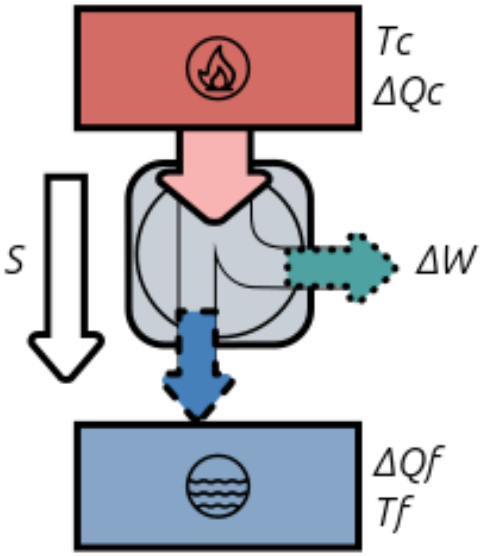


Figura 43

La misma entropía sale del foco caliente y llega al frío en el ciclo reversible. Esquema: D. Saravia (2018).

80.- Rendimiento de una máquina térmica

$$\eta = \frac{W_{\text{salida}}}{Q_c}, \qquad W_{\text{salida}} = Q_c - Q_f.$$

- Para un motor cíclico entre dos focos, la conservación no determina por sí sola cuánto calor debe rechazarse.
- La segunda ley limita la conversión de calor en trabajo.
- Ejemplo: recibir $100\,\mathrm{kJ}$ y rechazar $60\,\mathrm{kJ}$ permite entregar $40\,\mathrm{kJ}$: $\eta = 0{,}40$.

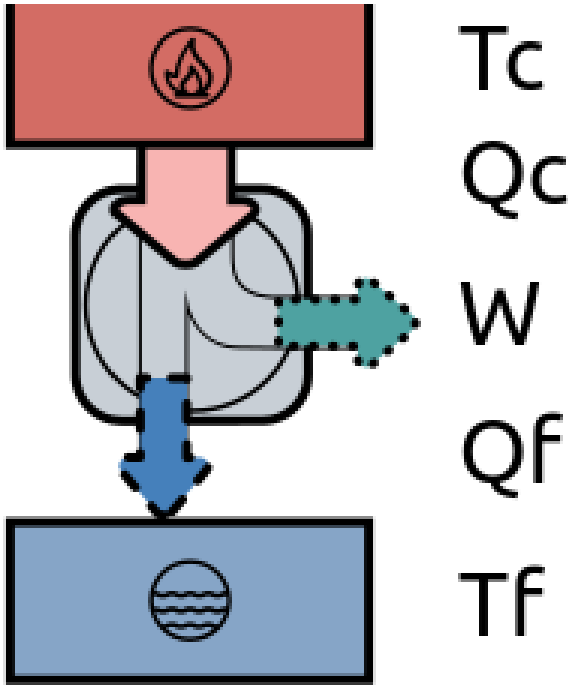


Figura 44

El trabajo es la diferencia entre el calor recibido y el rechazado.

Referencia: Cengel and Boles (2006).

81.- [E] Rendimiento de Carnot

Dos focos fijan un límite de rendimiento; no el rendimiento real.

$$\eta \leq \eta_C = 1 - \frac{T_f}{T_c}.$$

- Igualdad para una máquina reversible entre los dos focos.
- Las temperaturas de la razón se expresan en kelvin.
- Ejemplo: $T_c = 600\,\mathrm{K}$ y $T_f = 300\,\mathrm{K}$ dan $\eta_C = 0{,}50$.
- Una fuente de menor temperatura, con el mismo foco frío, permite una menor fracción máxima de conversión en trabajo.

Referencia: Carnot (1824); Cengel and Boles (2006).

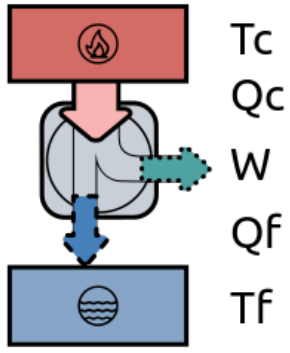


Figura 45
Dos focos constantes delimitan el rendimiento reversible del motor.

82.- Cierre del tema: Procesos y ciclos del gas ideal

1. **En un ciclo, ¿por qué el cambio de U es cero aunque el trabajo neto no lo sea?**
2. ¿Qué área representa trabajo en el diagrama p–V y bajo qué condiciones?

La pregunta destacada se analiza en clase; la otra queda para revisión y consulta.

83.- [E] Máquina térmica: tipos

Una máquina térmica intercambia energía con dos focos y mediante trabajo. El propósito determina qué intercambio se considera útil.

Máquina	Objetivo útil
Motor o generador	Obtener trabajo a partir de parte del calor suministrado.
Heladera	Extraer calor del foco frío mediante trabajo recibido.
Bomba de calor	Entregar calor al foco caliente mediante trabajo recibido.

$\eta = W/Q_c$; $\mathrm{COP}_R = Q_f/W$; $\mathrm{COP}_{BC} = Q_c/W = \mathrm{COP}_R + 1$. Los focos tienen temperaturas absolutas $T_c > T_f$. En esta sección Q_c, Q_f, W son magnitudes positivas por ciclo.

Referencia: Cengel and Boles (2006).

84.- [E] La misma comparación: motor, heladera y bomba de calor

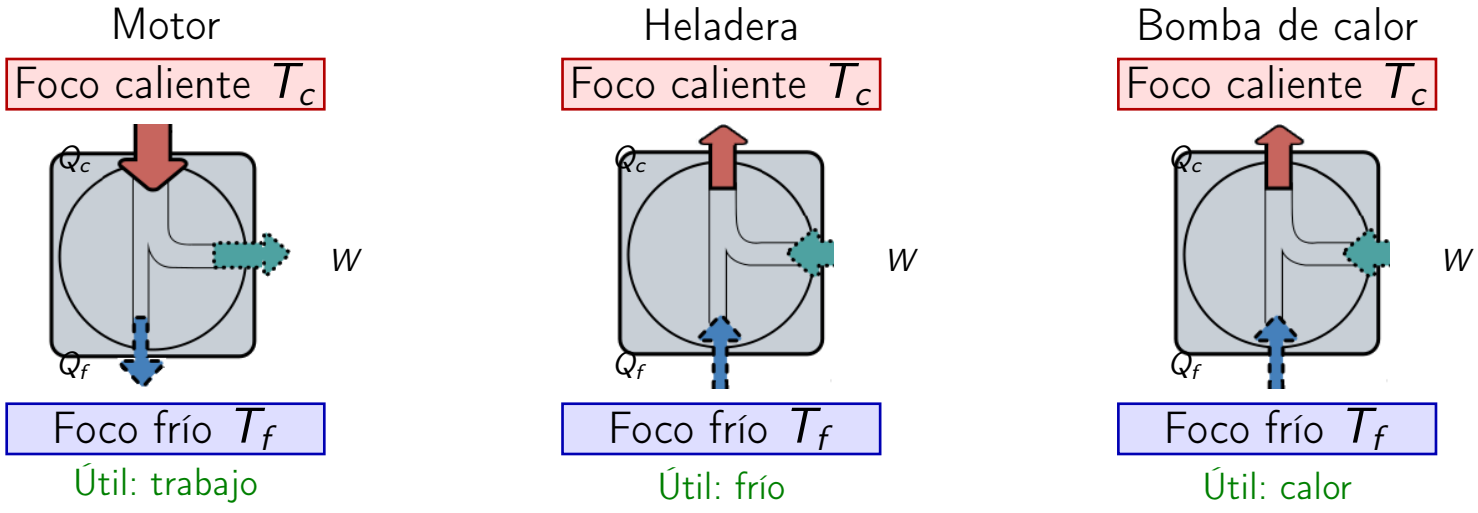


Figura 46

Las flechas muestran intercambios por ciclo: Q_c, Q_f, $W > 0$ indican magnitudes. El motor entrega trabajo; la heladera y la bomba de calor lo reciben. Estas últimas se distinguen por el efecto útil elegido: extraer Q_f o entregar Q_c.

Simbología de los apuntes del curso; Cengel and Boles (2006).

85.- Motor o generador de trabajo

El motor entrega como trabajo parte del calor recibido.

$$Q_c = W_{\text{salida}} + Q_f, \qquad \eta = \frac{W_{\text{salida}}}{Q_c} = 1 - \frac{Q_f}{Q_c}.$$

- $T_c > T_f > 0$: focos caliente y frío, en kelvin. $Q_c, Q_f, W_{\text{salida}}$ son cantidades positivas por ciclo. El motor recibe Q_c, entrega trabajo y cede Q_f.
- «Generador de trabajo» describe aquí la función termodinámica. Un generador eléctrico acoplado convierte el trabajo mecánico en electricidad.
- El rendimiento de Carnot es el límite reversible entre dos focos, no el rendimiento de cualquier motor.

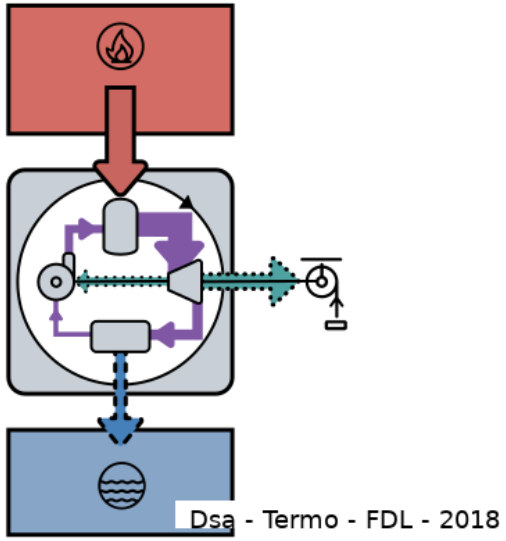


Figura 47

Motor: recibe calor del foco caliente, entrega trabajo y rechaza calor al foco frío.

Referencia: Cengel and Boles (2006).

86.- Refrigerador y su COP

La heladera recibe trabajo para extraer calor del foco frío.

$$Q_c = Q_f + W_{\text{entrada}}, \qquad \boxed{\text{COP}_R = \frac{Q_f}{W_{\text{entrada}}}}.$$

- El objetivo es extraer calor del foco frío.
- La heladera de compresión combina evaporación, compresión, condensación y expansión. La refrigeración no se explica solamente por el efecto Joule–Thomson.
- Entre dos focos constantes: $\text{COP}_R \leq T_f/(T_c - T_f)$, con igualdad reversible.

Referencia: Cengel and Boles (2006).

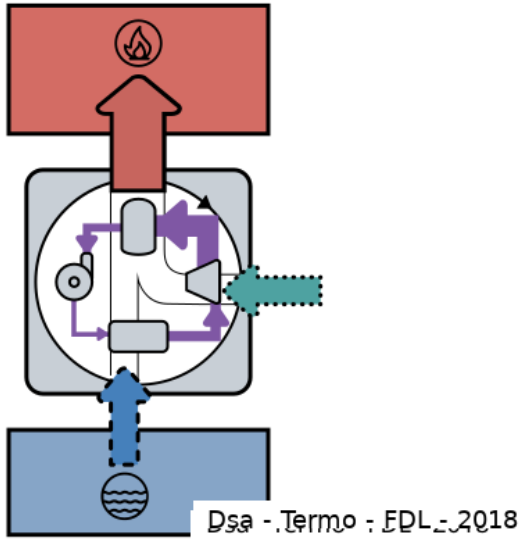


Figura 48

Refrigerador: recibe trabajo para extraer calor del foco frío y entregarlo al caliente.

87.- Bomba de calor

- La bomba de calor entrega al foco caliente el calor extraído del foco frío más el trabajo recibido.
- Puede extraer calor del aire, del agua o del suelo; la fuente fría no es necesariamente la atmósfera.
- Una válvula inversora permite que algunos equipos alternen calefacción y refrigeración; no es un requisito para toda bomba de calor.
- La misma máquina se evalúa de manera diferente si interesa enfriar el foco frío o calentar el caliente.

Referencia: Cengel and Boles (2006).

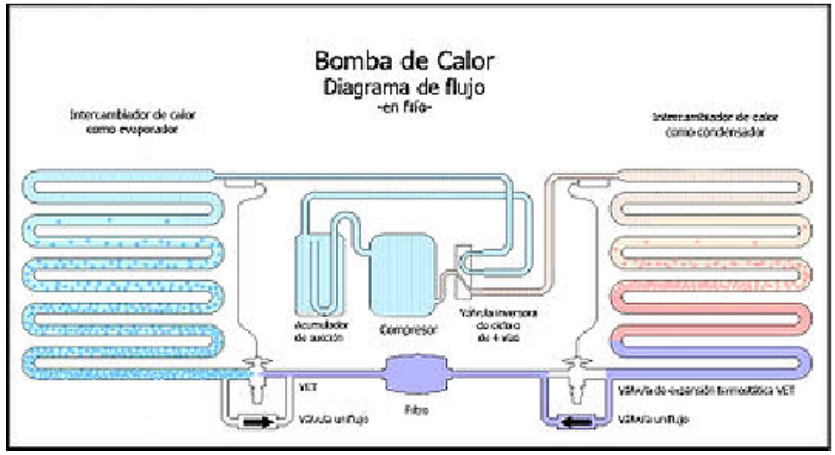


Figura 49

Circuito de compresión de vapor: evaporador, compresor, condensador y expansión.

88.- Balance de la bomba de calor y COP

La bomba entrega el calor extraído más el trabajo recibido.

$$\mathrm{COP}_{BC} = \frac{Q_c}{W_{\text{entrada}}}, \qquad Q_c = Q_f + W_{\text{entrada}}.$$

Para el mismo equipo y los mismos límites:

$$\boxed{\mathrm{COP}_{BC} = \mathrm{COP}_R + 1}.$$

- Un COP mayor que uno no viola la conservación: parte del calor entregado proviene de la fuente fría.
- Si usamos potencias, todos los términos del balance deben ser tasas: $\dot{Q}_c = \dot{Q}_f + \dot{W}_{\text{entrada}}$.
- Entre dos focos constantes: $\mathrm{COP}_{BC} \leq T_c/(T_c - T_f)$.

Referencia: Cengel and Boles (2006).

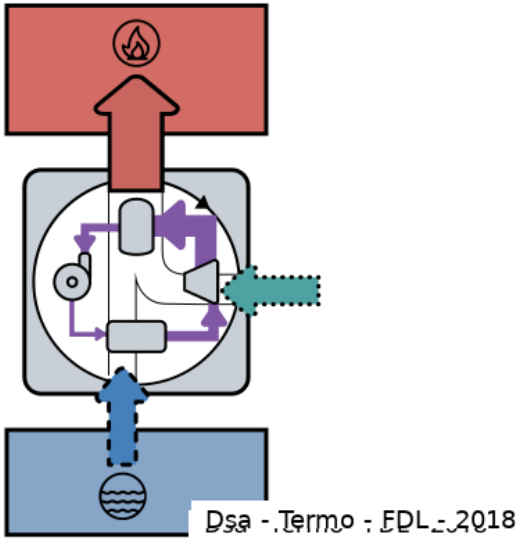


Figura 50

El calor entregado arriba incluye el calor extraído abajo y el trabajo recibido.

89.- Tres calefacciones: comparar entradas para el mismo calor

Frontera: equipo y ambiente interior. Ejemplos reales a régimen nominal; comparamos energía entregada como calor, no precios ni energía primaria. En una hora:

Equipo	Entrada	Calor útil	COP o η	Entrada por 1 kWh útil
Aire acondicionado en calor Surrey 553ICQ0901F	0,77 kWh eléctricos	2,65 kWh	COP $= 3,44$	0,291 kWh eléctricos
Estufa de cuarzo Liliana CV026	1,20 kWh eléctricos	$\simeq 1,20$ kWh	$\eta \simeq 100\,\%$	$\simeq 1$ kWh eléctrico
Estufa a gas con evacuación Rinnai 309FT	13 MJ de gas $= 3,611$ kWh + 0,042 kWh eléctricos	2,90 kWh	$\eta \simeq 79,4\,\%$	1,245 kWh de gas + 0,0145 kWh eléctricos

- **Bomba de calor:** no crea energía. En el ejemplo, $2,65 = 0,77 + 1,88$ kWh: la diferencia se toma del exterior. El COP nominal cambia con las temperaturas, la carga y el deshielo; no es un promedio anual.
- **Cuarzo:** el 100 % es una aproximación del balance local si toda la electricidad termina calentando el interior; no implica aprovechar bien su exergía ni describe las pérdidas de generación y transporte eléctrico.
- **Gas:** rendimiento calculado con las entradas publicadas, incluido el auxiliar eléctrico. El gas y la electricidad son recursos distintos: para decidir faltan tarifas, origen de la electricidad, inversión, confort, emisiones y mantenimiento.

Datos nominales de los fabricantes, consultados el 24/10/2026: Surrey; Liliana S.R.L.; Rinnai Australia. Las fichas no constituyen un ensayo comparativo bajo idénticas condiciones; normalizar por calor útil permite discutir el balance.

90.- Calefacción: demanda y precios observados

Servicio idéntico: 2 kW de calor útil durante 8 h/día, 30 días/mes y 4 meses/año, por cinco años. Son 1 920 kWh útiles/año y 9 600 kWh útiles en cinco años.

- **Datos observados:** facturas particulares de EDESA y Naturgy de septiembre de 2026. El gas registra un poder calorífico de 9 654 kcal/m^3; las tarifas marginales calculadas aparecen en la tabla siguiente.
- La tarifa eléctrica agrega al cargo variable T1R2 el IVA y el alumbrado variable. La tarifa de gas agrega al cargo variable el descuento Zona Fría del 30 %, IVA y tributos variables.
- Modelo de calefacción: gas con $\eta = 0{,}80$, bomba de calor con COP estacional $= 3$ y resistencia de cuarzo con $\eta \simeq 1$ dentro del local. Son hipótesis para comparar, no prestaciones medidas de esos equipos.
- El descuento de Zona Fría y el escalón tarifario pueden variar con el consumo: los precios marginales observados se usan como **escenario**, no como promesa de tarifa futura.

Facturas del autor, sin datos personales reproducidos. Precios marginales calculados sobre cargos variables; cargos fijos de conexiones existentes excluidos. Régimen de Zona Fría: ENARGAS (2026).

91.- [E] Calefacción: costos de cinco años para el mismo calor

Equipo	Tarifa variable	Compra + montaje	Consumo anual	Costo anual	Total 5 años
Calefactor a gas	\$264,89/m^3	\$706 499	213,8 m^3	\$56 632	\$989 661
Split frío/calor (COP 3)	\$401,29/kWh	\$1 229 999	640 kWh	\$256 824	\$2 514 117
Dos cuarzos de 1,2 kW	\$401,29/kWh	\$65 292	1 920 kWh	\$770 471	\$3 917 647

- Cálculo: $C_5 = C_{\text{equipo+montaje}} + 5C_{\text{energa/ao}}$. Para gas, $1\,920/(0{,}80 \times 9\,654/860) = 213{,}8$ m^3/año. Para el split, $1\,920/3 = 640$ kWh/año. El cuarzo necesita dos unidades para entregar 2 kW continuos y trabajarían con ciclos de encendido.
- **Resultado del escenario:** el gas tiene menor costo monetario estimado. El split también ofrece refrigeración, que no se valoró aquí. La resistencia es barata de comprar pero costosa de operar con estos precios.

Precios de equipo consultados en octubre de 2026: calefactor Calden \$556 499, split BGH \$999 999 y dos cuarzos Herbi $2 \times$ \$32 646; montaje gas \$150 000 y split \$230 000, estimaciones que requieren presupuesto local. Mercado Libre (2026a); BGH (2026); Mercado Libre (2026b); Clickie (2026); Mercado Libre (2026c). El split tarifado es distinto del comparado en la lámina anterior.

92.- Calefacción: límites de la comparación

- Los totales usan **pesos constantes de octubre de 2026**: no incluyen inflación, actualización real de tarifas, descuento financiero, mantenimiento, piloto del calefactor ni cambios de equipos. Ya existen las conexiones de gas y electricidad.
- La demanda agregada sería unos 53 m^3 de gas por mes, 160 kWh eléctricos por mes con el split o 480 kWh por mes con cuarzo. Puede cambiar el bloque tarifario y el descuento aplicable: hay que recalcular con la factura siguiente.
- Si el COP estacional del split fuese 2,5 o 3,5, el total de cinco años sería aproximadamente $2,77 o $2,33 millones, respectivamente, con el mismo precio eléctrico.
- El orden económico no agota la decisión: importan el confort, la refrigeración de verano, la ventilación y evacuación de gases, las emisiones, la disponibilidad de combustible y el presupuesto inicial.

Los modelos elegidos tienen potencias nominales distintas de 2 kW; se supone modulación o encendido intermitente para entregar el calor útil fijado. Consultar precios y presupuestos vigentes antes de comprar.

93.- Cierre del tema: Máquinas térmicas

1. **¿Qué cambia entre una heladera y una bomba de calor: el balance o el efecto útil elegido?**
2. ¿Por qué un COP mayor que uno no viola la conservación de la energía?

La pregunta destacada se analiza en clase; la otra queda para revisión y consulta.

94.- **Sección 5:** Exergía y máxima potencia en tiempo finito. Economía de la energía

Contenidos del programa asignados a esta sección

- (5) Exergía.

Enfoque: Termodinámica de tiempo finito con un motor endorreversible: núcleo reversible, intercambio de calor irreversible a través de una resistencia térmica y carga variable. Comparar trabajo máximo, rendimiento y potencia.

T2: 80 minutos, incluida esta apertura.

95.- Motor endorreversible: irreversibilidad externa

- **Endorreversible** significa reversible internamente: el núcleo del motor no genera entropía. El sistema completo sí puede generarla en sus intercambios con el exterior.
- El foco caliente permanece a T_c y el frío a T_0; el motor recibe calor a una temperatura intermedia T_i.
- Con resistencia térmica finita, el calor fluye de T_c a $T_i < T_c$: esa diferencia de temperatura genera entropía **fuera del núcleo**.
- Estudiar potencia exige considerar el tiempo: $\dot{W}$. La carga fija T_i y el flujo; al acercarnos al intercambio reversible, $T_i \to T_c$, el flujo y la potencia tienden a cero en este modelo.

Referencia: De Vos (1992).

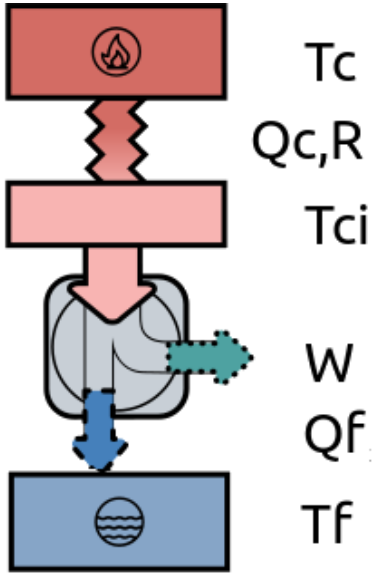


Figura 51

Motor con resistencia térmica caliente. En esta figura: $T_{ci} = T_i$ y $T_f = T_0$; para potencia interpretamos los flujos como tasas.

96.- Máquina térmica: par, velocidad y potencia

En nuestro caso, del lado mecánico, como son máquinas rotativas:

- El torque es el esfuerzo: τ.
- Y la velocidad angular el flujo: ω.
- Su producto es la potencia $\dot{W}$.

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

Para elevar una pesa a velocidad constante: $\tau = Mgr$ y $\dot{W} = Mg\dot{z}$. Un par grande no garantiza una potencia grande si la velocidad es pequeña.

Referencia: De Vos (1992).

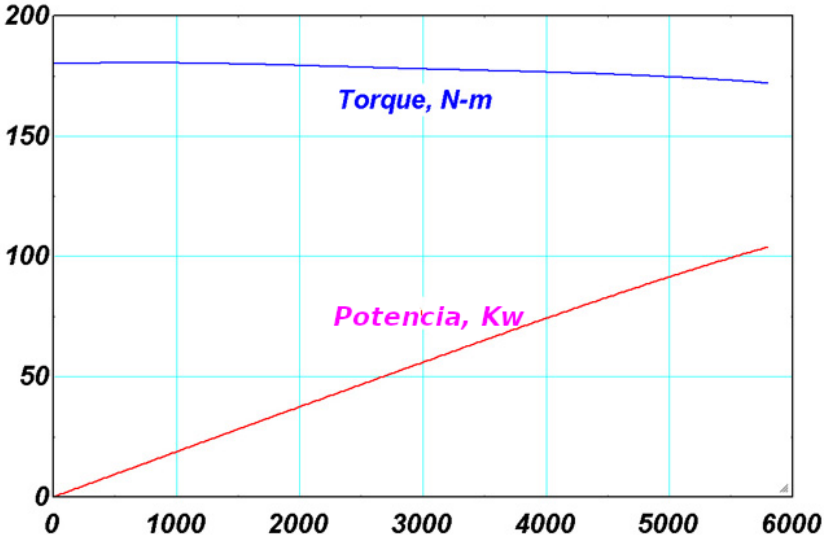


Figura 52

Ejemplo ilustrativo de par y potencia frente a velocidad. Esta curva no es una ley universal ni sustituye las ecuaciones del modelo del curso.

97.- [E] Resistencia térmica y motor en serie

La resistencia limita el flujo; el núcleo reversible convierte parte en potencia.

$$\boxed{\text{Foco caliente } T_c} \xrightarrow{\dot{Q}_c} \boxed{\text{Resistencia } R} \longrightarrow \boxed{\text{Motor a } T_i, T_0} \xrightarrow{\dot{Q}_f} \boxed{\text{Foco frío } T_0}$$

Figura 53

$$\dot{Q}_c = \frac{T_c - T_i}{R}, \qquad \dot{W} = \dot{Q}_c \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right), \qquad T_0 < T_i < T_c.$$

- El motor entrega potencia para elevar una pesa.
- Su núcleo es reversible; la diferencia $T_c - T_i$ produce irreversibilidad en el contacto caliente. R es constante, en K/W si las potencias se expresan en W; no hay resistencia en el contacto frío.
- La resistencia es térmica, no una resistencia eléctrica calentadora.

Referencia: De Vos (1992).

98.- [E] Motor con resistencia: un punto de operación completo

A 450 K, el motor entrega 50 kW y la resistencia destruye 25 kW de exergía.

Focos constantes: $T_c = 600$ K y $T_0 = 300$ K. Resistencia térmica caliente $R = 1$ K/kW. Núcleo reversible a $T_i = 450$ K y T_0; sin resistencia en el contacto frío.

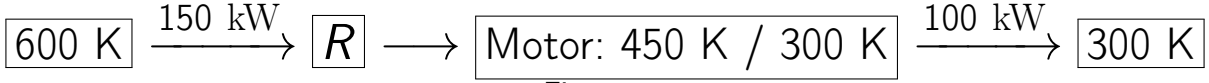


Figura 54

Calor recibido	$\dot{Q}_c = (600 - 450)/1 = 150$ kW
Rendimiento y potencia	$\eta = 1 - 300/450 = 1/3$; $\dot{W} = \eta \dot{Q}_c = 50$ kW
Calor rechazado	$\dot{Q}_f = \dot{Q}_c - \dot{W} = 100$ kW
Entropía generada	$\dot{S}_g = \dot{Q}_c(1/450 - 1/600) = 0{,}08333$ kW/K
Exergía de entrada	$\dot{B}_c = (1 - 300/600)\dot{Q}_c = 75$ kW
Potencia perdida	$T_0 \dot{S}_g = 25$ kW; balance: $75 = 50 + 25$

La resistencia genera toda la entropía de este modelo. El núcleo convierte parte del calor en trabajo sin generar entropía. En una hora: entrega 50 kWh, pierde 25 kWh de trabajo disponible y genera 300 kJ/K de entropía.

Cálculo propio a partir del modelo con resistencia caliente; De Vos (1992); Cengel and Boles (2006).

99.- Relaciones fundamentales del modelo

Para visualizar el ajuste de carga adoptamos un modelo de par medio lineal:

$$\tau = j(T_i - T_0), \qquad \tau_{\text{carga}} = Mgr.$$

En régimen de giro uniforme:

$$\boxed{T_i = T_0 + \frac{Mgr}{j}}.$$

- j es un parámetro del modelo; r es el radio efectivo del mecanismo que levanta la pesa.
- La proporcionalidad entre par y diferencia de temperatura es una hipótesis aproximada, no una ley universal.

Referencia: De Vos (1992).

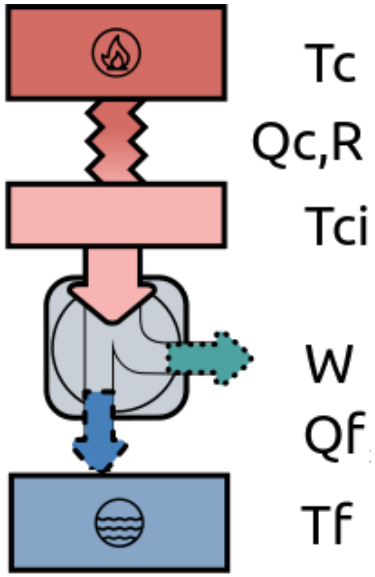


Figura 55

La carga selecciona el punto de funcionamiento. Notación de la figura: $T_{ci} = T_i$, $T_f = T_0$.

100.- Carga y funcionamiento

- Más carga requiere más par: en el modelo aumenta T_i y disminuye el salto térmico en la resistencia.
- Más carga, giro más lento: el gas se acerca más a T_c en cada ciclo. La constante j solo fija el punto de operación del modelo.
- Menor salto en la resistencia implica menor flujo de calor para R fija.
- Con carga pequeña el par es pequeño; con carga muy grande la velocidad y el flujo pueden ser pequeños.
- Entre ambos límites puede existir una carga que maximice el producto $\dot{W} = \tau\omega$.

$$0 < Mgr < j(T_c - T_0).$$

Comparamos estados de funcionamiento de la misma máquina; no máquinas con parámetros arbitrariamente distintos.

Referencia: De Vos (1992).

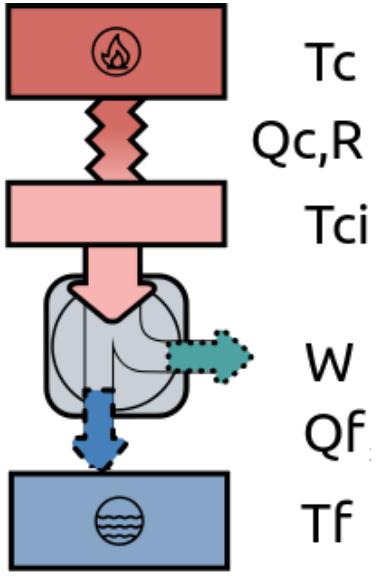


Figura 56

Al variar la carga cambia la temperatura intermedia y el salto en la resistencia. $T_{ci} = T_i$, $T_f = T_0$.

101.- Trabajo máximo

- El trabajo máximo se define para recursos, estados inicial y final, ambiente y restricciones especificados.
- Se compara el proceso real con una alternativa reversible admisible bajo esas mismas condiciones.
- No se puede mejorar la comparación cambiando silenciosamente la cantidad de calor disponible o la temperatura del ambiente.
- Máximo trabajo total y máxima potencia son objetivos diferentes: la potencia incorpora el tiempo.

Referencia: De Vos (1992).

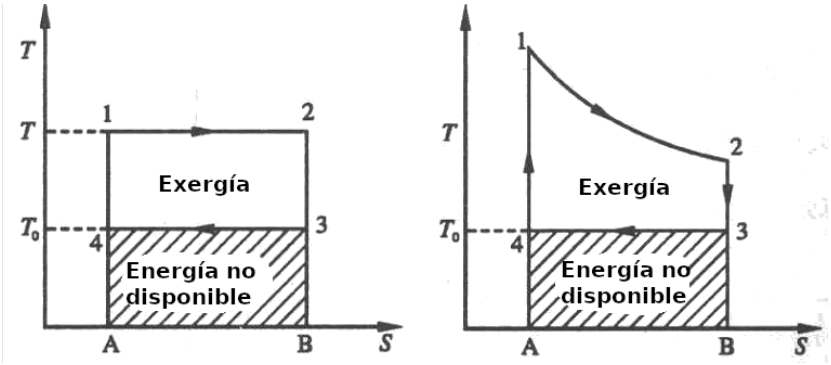


Figura 57

Áreas en el plano T–S: trabajo reversible disponible respecto de T_0, para los intercambios representados.

102.- Trabajo perdido

Con una comparación reversible consistente:

$$W_{\text{perdido}} = W_{\text{útil,rev}} - W_{\text{útil,real}}.$$

- El ambiente y los recursos usados deben ser los mismos.
- Bajo las condiciones del teorema de Gouy–Stodola: $W_{\text{perdido}} = T_0 S_{\text{gen}}$.
- Condiciones: la referencia reversible une los mismos estados y recibe el mismo calor de las mismas fuentes; todo otro intercambio de calor es con un único ambiente a T_0.
- A 450 K: energía 150 kW = exergía 75 + anergía 75. De la exergía, 50 kW útiles y 25 destruidos. Anergía (75) no es trabajo perdido (25).
- No se identifica universalmente el trabajo perdido con «anergía»: parte de la energía puede no ser convertible aun en el proceso reversible respecto de ese ambiente.

Referencia: De Vos (1992).

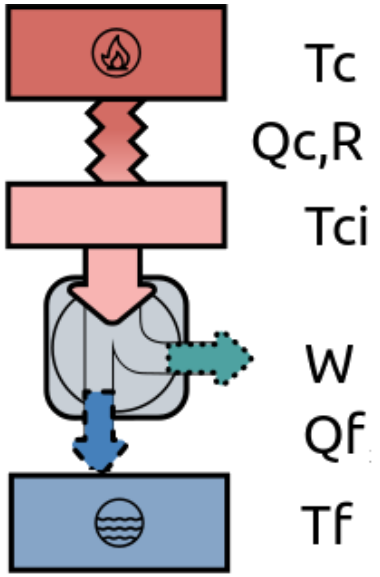


Figura 58

La resistencia introduce irreversibilidad: parte del trabajo potencialmente obtenible se pierde. $T_{ci} = T_i$, $T_f = T_0$.

103.- [E] Exergía

La generación de entropía destruye disponibilidad para producir trabajo.

La exergía es el máximo trabajo útil obtenible respecto de un ambiente especificado. En nuestro motor con resistencia caliente, tomamos el foco frío T_0 como ambiente:

$$\dot{W}_{\text{ref}} = \left(1 - \frac{T_0}{T_c}\right) \dot{Q}_c, \qquad \dot{W}_{\text{perdida}} = T_0 \dot{S}_g.$$

$$\boxed{\dot{W}_{\text{ref}} = \dot{W} + \dot{W}_{\text{perdida}}.}$$

- $\dot{W}_{\text{ref}}$ es la potencia reversible de referencia para el mismo calor suministrado y el mismo ambiente. No es otro punto de operación del equipo con R fija.
- $\dot{W}_{\text{perdida}}$ es trabajo perdido por unidad de tiempo, igual a la exergía destruida. El núcleo es reversible; la resistencia genera $\dot{S}_g$.
- A $T_i = 450$ K: $75 = 50 + 25$ kW. En una hora: 75 kWh disponibles, 50 kWh útiles y 25 kWh perdidos.
- La energía se conserva. Para un intervalo estacionario, $W_{\text{perdido}} = T_0 S_g$; al usar kWh y kJ hay que convertir unidades.

Referencia: De Vos (1992).

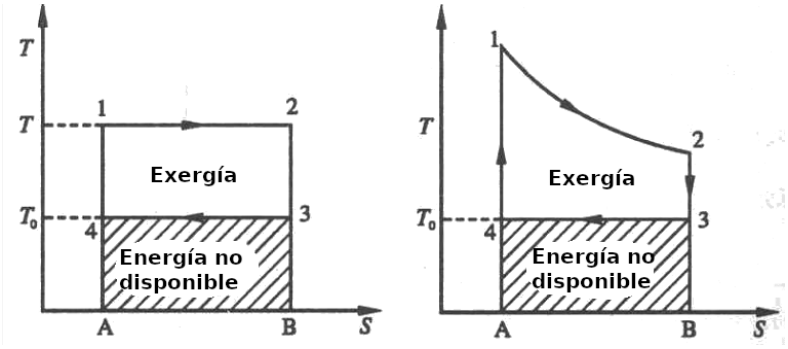


Figura 59

Disponibilidad respecto de T_0: fuente constante a la izquierda y fuente que se enfría a la derecha. No atribuimos exergía total finita a un foco ideal infinito.

104.- Resumen: Gouy–Stodola

En el modelo, tomando el foco frío como ambiente a T_0:

$$\dot{S}_{\text{gen}} = \dot{Q}_c \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_c} \right), \qquad \dot{X}_{\text{destruida}} = T_0 \dot{S}_{\text{gen}}.$$

$$\boxed{\dot{Q}_c \left(1 - \frac{T_0}{T_c} \right) = \dot{W} + T_0 \dot{S}_{\text{gen}}}.$$

La exergía que llega con el calor se divide entre potencia útil y exergía destruida. El núcleo reversible no genera entropía; la resistencia caliente sí.

Referencia: De Vos (1992).

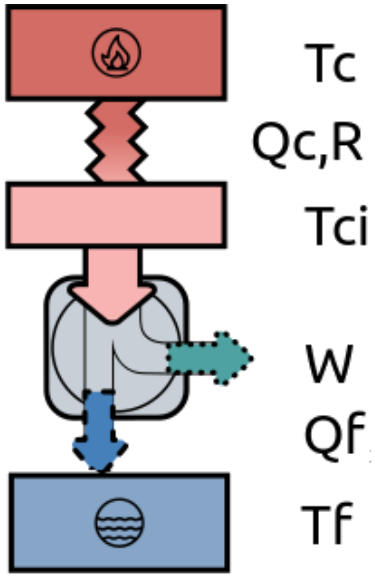


Figura 60

La resistencia caliente genera entropía y destruye exergía. $T_{ci} = T_i$, $T_f = T_0$.

105.- La energía se conserva; la exergía puede destruirse

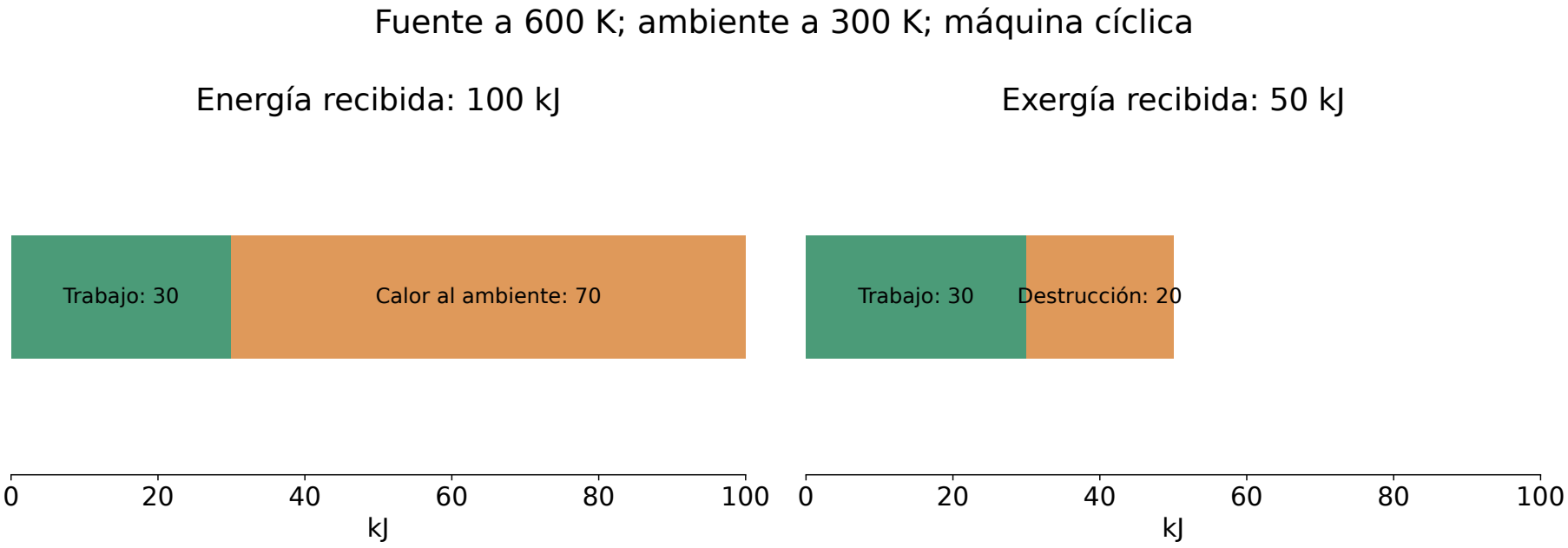


Figura 61

- Ejemplo cíclico: $Q_h = 100$ kJ desde 600 K; $W = 30$ kJ y $Q_0 = 70$ kJ al ambiente a 300 K.
- $B_{\text{entrada}} = Q_h(1 - T_0/T_h) = 50$ kJ; $T_0 S_{\text{gen}} = 20$ kJ. La destrucción de exergía no es desaparición de energía.

Diagrama propio con datos ilustrativos y balances consistentes; Cengel and Boles (2006).

106.- Máxima potencia: concepto

Objetivo	Pregunta
Máximo trabajo	¿Cuánto trabajo útil obtenemos de un recurso dado?
Máximo rendimiento	¿Qué fracción del calor recibido se convierte en trabajo?
Máxima potencia	¿Cuánto trabajo se entrega por unidad de tiempo?

- Un máximo interior de potencia es un comportamiento muy general, casi universal en los modelos que combinan mayor rendimiento con menor rapidez de transferencia.
- Si $\dot{W}$ es continua, positiva entre los extremos y se anula en ambos, necesariamente alcanza un máximo interior. Esta conclusión no exige una resistencia lineal, ni garantiza un máximo único.
- La posición y el valor del máximo sí dependen de la ley de transferencia y de las restricciones. Aquí usamos una resistencia **lineal y constante**: $\dot{Q}_c = (T_c - T_i)/R$.

Referencia: De Vos (1992).

107.- Comparación de casos y cargas

Carga	Temperatura y flujo	Resultado
Muy pequeña	$T_i \to T_0$; flujo finito	Rendimiento y potencia tienden a cero.
Intermedia	$T_0 < T_i < T_c$	Par y velocidad permiten potencia positiva.
Cerca del límite	$T_i \to T_c$; flujo tiende a cero	Rendimiento tiende a Carnot; potencia tiende a cero.

Mantener R fija no mantiene fija $\dot{S}_{\mathrm{gen}}$: al variar la carga cambian tanto T_i como $\dot{Q}_c$. El límite de potencia nula aquí procede de la resistencia finita del modelo, no de una ley universal sobre dispositivos reversibles.

Referencia: De Vos (1992).

108.- Máxima potencia extraída

$$\dot{W}(T_i) = \frac{T_c - T_i}{R}\left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right).$$

- Buscamos la carga que haga máximo este producto para R, T_c, T_0 dados.
- Ejemplo con $T_c = 600\,\mathrm{K}$, $T_0 = 300\,\mathrm{K}$, $R = 1\,\mathrm{K/kW}$:

T_i (K)	$\dot{Q}_c$ (kW)	η	$\dot{W}$ (kW)
350	250	0.143	35.7
425	175	0.294	51.5
550	50	0.455	22.7

La mayor eficiencia de estas tres cargas no produce la mayor potencia. Variar la carga también modifica la irreversibilidad.

Referencia: De Vos (1992).

109.- Mismos focos y resistencia: potencia frente a rendimiento

Con este equipo, la máxima potencia ocurre antes del máximo rendimiento.

Se conservan $T_c = 600$ K, $T_0 = 300$ K y $R = 1$ K/kW; cambia la carga y, con ella, T_i:

$$\dot{W} = \frac{600 - T_i}{R}\left(1 - \frac{300}{T_i}\right), \qquad T_i^* = \sqrt{600 \cdot 300} = 424{,}264 \text{ K}.$$

T_i (K)	η	$\dot{Q}_c$ (kW)	$\dot{W}$ (kW)	$\dot{S}_g$ (kW/K)	$\dot{W}_{\text{perdida}}$ (kW)
350.000	14.29 %	250.000	35.714	0.29762	89.286
424.264	**29.29 %**	**175.736**	**51.472**	**0.12132**	**36.396**
450.000	33.33 %	150.000	50.000	0.08333	25.000
550.000	45.45 %	50.000	22.727	0.00758	2.273

- Máxima potencia: $\dot{W}^* = 51{,}472$ kW, con $\eta^* = 1 - \sqrt{300/600} = 29{,}29\,\%$. El límite de Carnot entre los focos es 50 %.
- Al acercarse al 50 %, el flujo y la potencia tienden a cero con esta resistencia finita. $\dot{W}_{\text{perdida}} = T_0 \dot{S}_g$: menos trabajo perdido por segundo no implica mayor potencia.
- Los focos y el equipo son los mismos; el calor extraído por segundo no es el mismo. El máximo de potencia tampoco determina por sí solo el óptimo económico.

Cálculo propio; modelo de De Vos (1992).

110.- [E] Máxima potencia: curvas del modelo

Más rendimiento puede significar menos potencia.

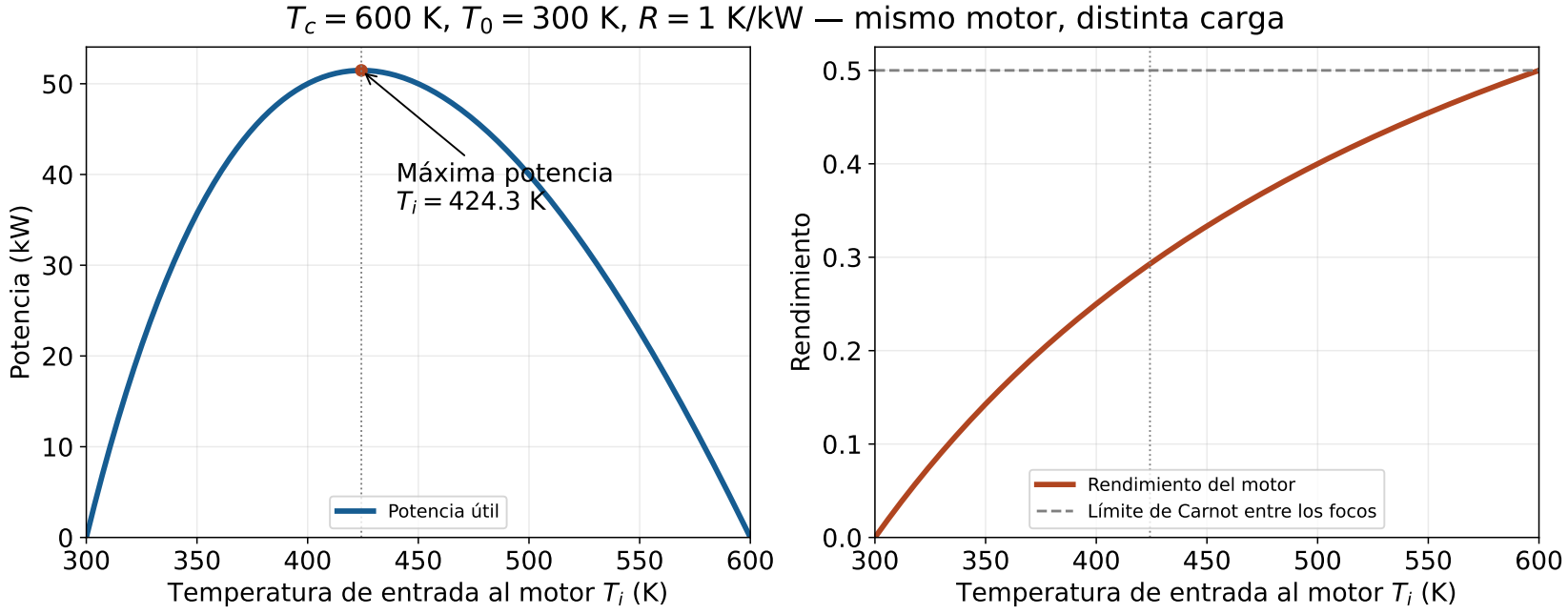


Figura 62

- La potencia alcanza un máximo interior, en $T_i = \sqrt{T_c T_0}$ (se deduce más adelante), mientras el rendimiento sigue creciendo con T_i.
- Cuando $T_i \to T_c$, la diferencia térmica en la resistencia y el flujo de calor tienden a cero: también la potencia. Este resultado depende del modelo con R finita.

Referencia del modelo: De Vos (1992).

111.- [E] Novikov y Curzon–Ahlborn: potencia frente al rendimiento

Usamos el mismo motor con resistencia caliente R y focos constantes $T_c > T_0$. El núcleo es reversible; la resistencia genera entropía. Con $K = 1/R$:

$$\eta = 1 - \frac{T_0}{T_i}, \qquad \dot{Q}_c = K(T_c - T_i), \qquad \dot{W} = \eta \dot{Q}_c.$$

Eliminando T_i:

$$\boxed{\dot{Q}_c(\eta) = K\left(T_c - \frac{T_0}{1-\eta}\right)}, \qquad \boxed{\dot{W}(\eta) = K\eta\left(T_c - \frac{T_0}{1-\eta}\right)}.$$

- La zona motora es $0 < \eta < \eta_C = 1 - T_0/T_c$. En los dos extremos la potencia tiende a cero.
- La gráfica es de **potencia** extraída, $\dot{W}$, frente al rendimiento. Para un mismo intervalo Δt en régimen estacionario, $W = \dot{W}\Delta t$ tiene la misma forma de dependencia.
- Si se comparan procesos con tiempos distintos, maximizar trabajo y maximizar potencia dejan de ser el mismo problema.

Referencia: Novikov (1958); Chambadal (1957); Curzon and Ahlborn (1975); De Vos (1992).

112.- [E] La fórmula de raíces y su significado. Rendimiento de Curzon–Ahlborn

Con resistencia caliente **lineal**, $\dot{Q}_c = (T_c - T_i)/R$, núcleo reversible y R, T_c, T_0 fijos, el máximo satisface:

$$\frac{d\dot{W}}{dT_i} = \frac{1}{R}\left(-1 + \frac{T_c T_0}{T_i^2}\right) = 0, \qquad T_i^* = \sqrt{T_c T_0}.$$

$$\boxed{\eta_{\dot{W},\text{máx}} = 1 - \sqrt{\frac{T_0}{T_c}}}, \qquad \boxed{\dot{W}_{\text{máx}} = \frac{1}{R}\left(\sqrt{T_c} - \sqrt{T_0}\right)^2}.$$

- Es el rendimiento a máxima potencia de Novikov–Curzon–Ahlborn en este modelo de transferencia lineal; es menor que el de Carnot.
- Con $600\,\mathrm{K}$, $300\,\mathrm{K}$ y $R = 1\,\mathrm{K/kW}$: $T_i^* = 424{,}3\,\mathrm{K}$, $\eta_{\dot{W},\text{máx}} = 0{,}2929$ y $\dot{W}_{\text{máx}} = 51{,}47\,\mathrm{kW}$; Carnot da $\eta_C = 0{,}50$.
- La existencia del máximo es mucho más general que esta fórmula. Las raíces corresponden a las hipótesis anteriores; otra ley de transferencia puede conservar el máximo y cambiar su posición y rendimiento.

Referencia: Novikov (1958); Chambadal (1957); Curzon and Ahlborn (1975); De Vos (1992).

113.- Carnot y Curzon–Ahlborn: dos preguntas distintas

- Carnot responde por la fracción máxima de conversión de calor en trabajo entre dos focos.
- Curzon–Ahlborn responde por el rendimiento en el punto de máxima potencia bajo las restricciones del modelo endorreversible.
- La curva superior representa $1 - T_0/T_c$; la inferior, $1 - \sqrt{T_0/T_c}$.
- La diferencia no viola ninguna ley: $\eta_{CA} < \eta_C$ porque parte de la disponibilidad se destruye en el transporte irreversible de calor.

Referencia: De Vos (1992).

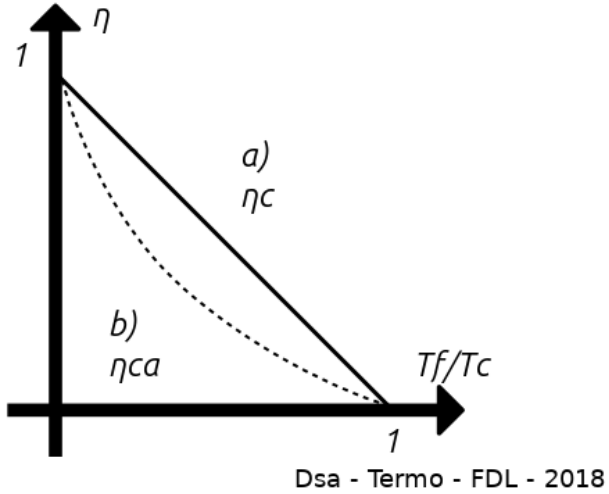


Figura 63

Gráfico del apunte B00f06: rendimiento de Carnot y rendimiento a máxima potencia, frente a T_0/T_c.

114.- Carnot, Curzon–Ahlborn y diez centrales

$\eta_{\mathrm{C}} = 1 - T_f/T_c$, $\eta_{\mathrm{CA}} = 1 - \sqrt{T_f/T_c}$, con $T = t + 273{,}15$ K. Los dos rendimientos teóricos se **recalcularon** a partir de las temperaturas aproximadas de la tabla; el observado procede de las fuentes históricas.

Central / caso	t_f (°C)	t_c (°C)	Carnot	Curzon	Observado
West Thurrock, Reino Unido; vapor de carbón	25	565	64,4 %	40,4 %	36 %
CANDU, Canadá; reactor de agua pesada	25	300	48,0 %	27,9 %	30 %
Larderello, Italia; vapor geotérmico	80	250	32,5 %	17,8 %	16 %
Reino Unido; central de potencia (1936–1940)	25	425	57,3 %	34,7 %	28 %
Calder Hall, Reino Unido; nuclear (1956)	25	310	48,9 %	28,5 %	19 %
Dungeness A, Reino Unido; nuclear (1965)	25	390	55,0 %	32,9 %	33 %
Estados Unidos; vapor (1956)	25	650	67,7 %	43,2 %	40 %
Estados Unidos; vapor y mercurio (1949)	25	510	61,9 %	38,3 %	34 %
Suiza; turbina de gas, ciclo cerrado (1944)	25	690	69,0 %	44,4 %	32 %
Francia; turbina de gas, ciclo cerrado (1950)	25	680	68,7 %	44,1 %	34 %

- Curzon–Ahlborn da el rendimiento a máxima potencia **del modelo endorreversible con transferencia lineal de calor**; no es una cota universal. CANDU supera el valor calculado.
- Las temperaturas y los rendimientos observados son históricos; las cifras calculadas pueden diferir de los redondeos de las fuentes.

Fuentes: los tres primeros casos, tabla I de Curzon and Ahlborn (1975); los diez, recopilación de Bejan Bejan (2006, 1996a), reproducida en Espinosa Sosa (2003).

115.- [E] Potencia, entropía y trabajo perdido

Máxima potencia y mínimas pérdidas son objetivos distintos.

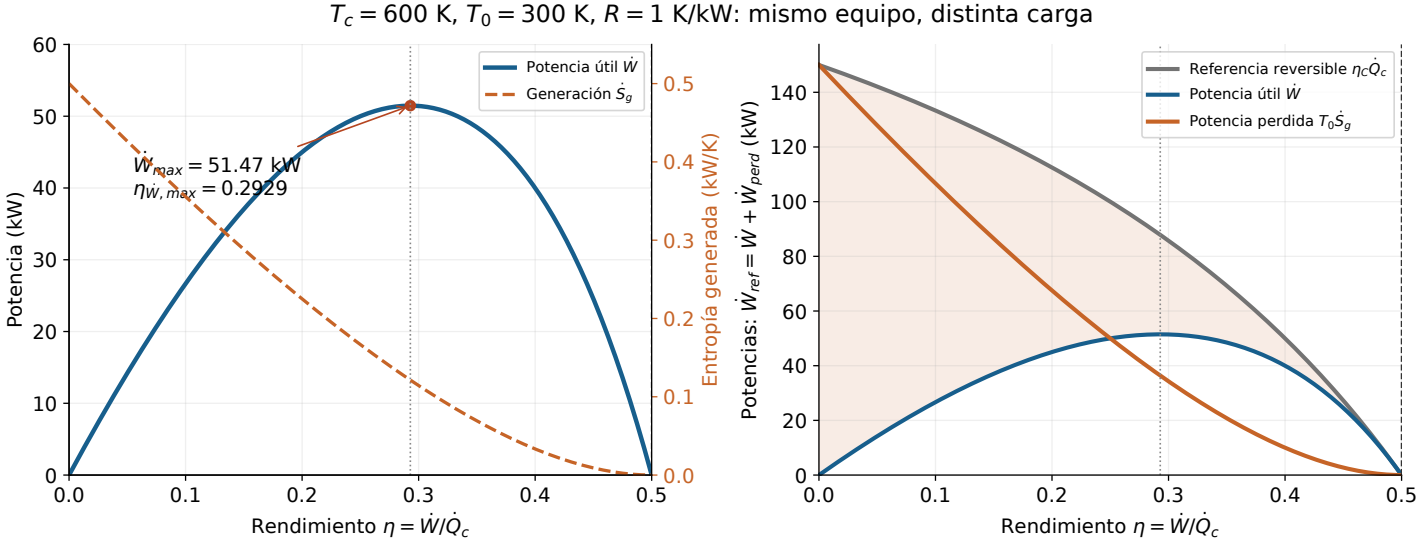


Figura 64

- En el máximo: $\eta^* = 29{,}29\,\%$, $\dot{W} = 51{,}47$ kW, $\dot{S}_g = 0{,}12132$ kW/K y $\dot{W}_{\text{perdida}} = T_0 \dot{S}_g = 36{,}40$ kW. Balance: $87{,}87 = 51{,}47 + 36{,}40$ kW.
- Por cada hora en ese punto: $W = 51{,}47$ kWh, $W_{\text{perdido}} = 36{,}40$ kWh y $S_g = 436{,}75$ kJ/K. La planilla permite cambiar el tiempo y comparar cargas.
- Con T_c, T_0, R fijos, variar η cambia también $\dot{Q}_c$ y $\dot{W}_{\text{ref}}$. Cerca de Carnot se anulan las pérdidas por segundo, pero también la potencia: no entra calor en ese límite del modelo.

Modelo: resistencia caliente lineal constante y núcleo reversible. De Vos (1992); Curzon and Ahlborn (1975).

116.- Dónde opera una central cuando el combustible tiene costo

- El máximo de potencia es una propiedad física del equipo con parámetros fijados; no determina por sí solo la máxima ganancia.
- Por debajo del máximo puede haber dos cargas con igual potencia: una en cada lado del máximo, con rendimientos diferentes. Con combustible costoso interesa la que requiere menos calor de entrada.
- En el modelo estudiado, el óptimo económico se desplaza desde el máximo de potencia hacia rendimientos mayores, según precios y restricciones.
- Llegar al extremo de Carnot tampoco resuelve el problema: con este equipo allí se anula la potencia y no hay producción que vender.

Referencia: De Vos (1992, 1995).

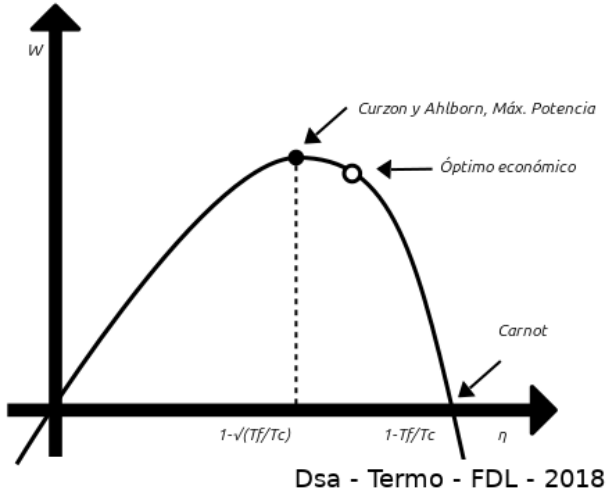


Figura 65

Esquema original del libro B00f07: máxima potencia y un óptimo económico desplazado hacia mayor rendimiento.

117.- [E] Un criterio económico explícito para la misma máquina

Máximo margen económico no implica máxima potencia.

Fijados el equipo y los focos, supongamos que se vende la energía producida a precio c_e por unidad de energía y que el calor suministrado cuesta c_Q por unidad de energía. El costo c_Q incorpora la conversión del combustible en calor de entrada.

$$\dot{\Pi} = c_e P - c_Q \dot{Q}_c = (c_e \eta - c_Q)\dot{Q}_c, \qquad \beta = \frac{c_Q}{c_e}.$$

- $\dot{\Pi}$ es margen monetario por unidad de tiempo, no exergía; para este ejercicio se omiten costos variables adicionales y restricciones de despacho.
- Con la ley lineal anterior, $d\dot{\Pi}/d\eta = 0$ lleva a:

$$\boxed{\eta_\Pi = 1 - \sqrt{\frac{T_0}{T_c}(1-\beta)}} \qquad (0 \le \beta < \eta_C).$$

Si $\beta = 0$, se maximiza la potencia. Si aumenta el costo relativo del combustible, aumenta el rendimiento elegido y disminuye la potencia. Si $\beta \ge \eta_C$, este modelo no tiene operación con margen positivo: hay que considerar también la posibilidad de no operar.

El óptimo maximiza solo el margen definido aquí, con estos precios y restricciones. No determina por sí solo el bienestar ni la conveniencia social: deben explicitarse el servicio buscado, los impactos y quién recibe los beneficios y asume los costos.

Referencia: De Vos (1995).

118.- El precio del combustible desplaza el punto de operación

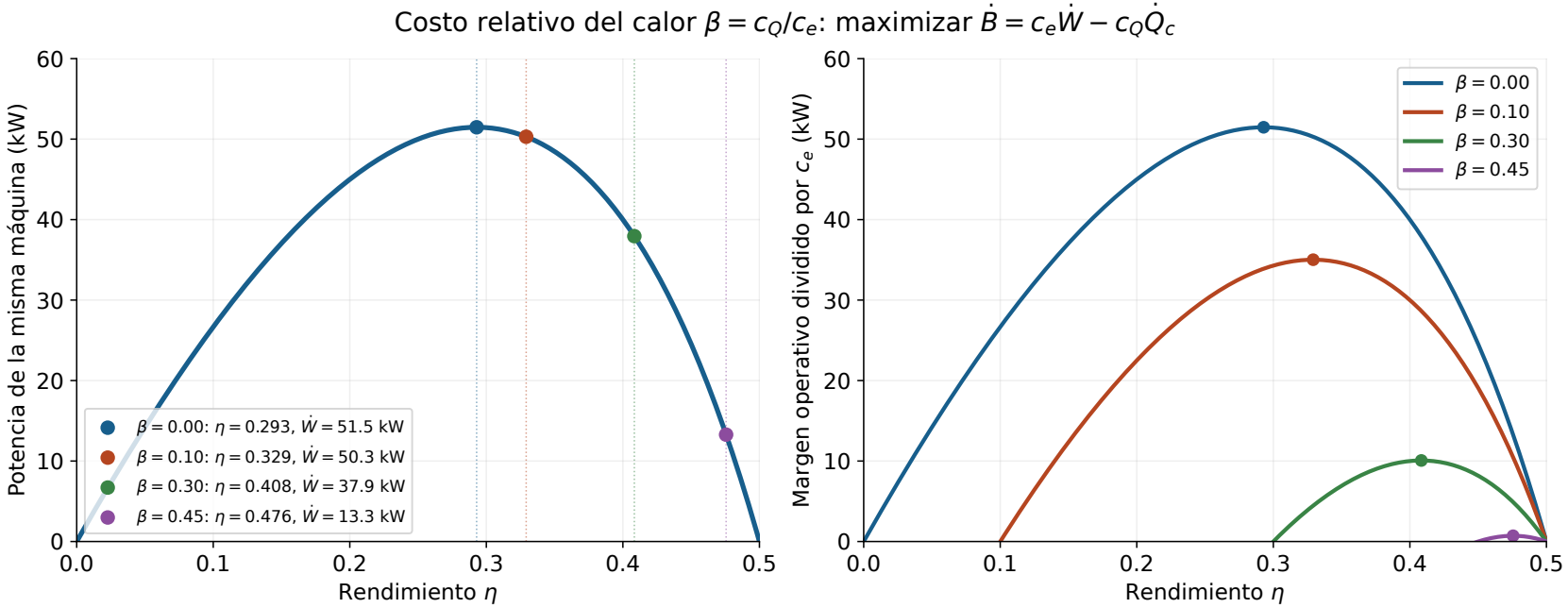


Figura 66

- Se mantiene la misma máquina del ejemplo: $T_c = 600\,\mathrm{K}$, $T_0 = 300\,\mathrm{K}$, $R = 1\,\mathrm{K/kW}$. Solo cambia el cociente de precios $\beta = c_Q/c_e$.
- Los puntos económicos se ubican sobre la misma curva física. Los costos no cambian la primera ni la segunda ley: cambian cuál de los puntos físicamente posibles se elige.

Referencia: De Vos (1995).

119.- Operar la central e invertir en ella son decisiones distintas

Decisión	Qué se mantiene fijo	Qué se compara
Variar la carga	Equipo y resistencias	Combustible consumido, potencia vendida y margen de cada punto de operación.
Cambiar el diseño	Servicio o potencia requerida	Ahorro de combustible frente a inversión, materiales, mantenimiento y amortización.
Elegir una política	Frontera social y horizonte temporal	Servicios, agotamiento de recursos, infraestructura, impactos y distribución de costos y beneficios.

Para una potencia requerida $\dot{W}$, un balance económico elemental de diseño es:

$$\dot{C} = c_Q \frac{\dot{W}}{\eta} + aI + \dot{C}_{\mathrm{op}},$$

donde I es inversión y a su factor de anualización en unidades de tiempo consistentes. Mejorar intercambios y reducir resistencias puede ahorrar combustible, pero requiere inversión. No se obtiene un precio único de la energía solo a partir de una eficiencia termodinámica.

Referencia: De Vos (1995); Kummel (2011).

120.- Invertir para obtener más potencia de la misma fuente

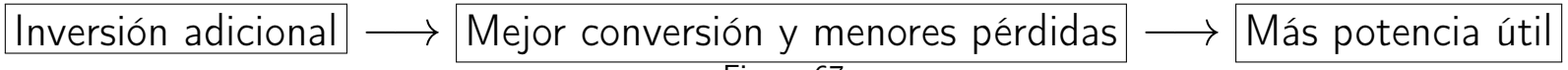


Figura 67

- **La misma fuente:** a igual suministro energético y condiciones de la fuente, una inversión adecuada puede aumentar la potencia útil: $\dot{W} = \eta \dot{E}_{\text{entrada}}$. No crea energía; permite aprovechar mejor su disponibilidad, dentro de los límites físicos.
- **Dónde invertir:** comparar mejoras en intercambiadores, turbinas, aislamiento y redes por la potencia o energía útil adicional obtenida frente a su costo. Importa la mejora marginal; la mayor destrucción de exergía no siempre es la más barata de evitar.
- **Tasa de referencia:** valorar ese beneficio permite estimar qué rentabilidad puede sostener la inversión y compararla con otras oportunidades y con el costo del capital.

Para un beneficio neto anual adicional constante ΔB, inversión ΔI y vida de N años, sin valor residual:

$$\Delta B \geq a(i, N)\, \Delta I, \qquad a(i, N) = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1}.$$

- i es la tasa anual de comparación; a recupera capital e interés. ΔB descuenta los costos operativos adicionales e incorpora las horas de utilización y el valor de la energía útil.
- La igualdad define una tasa de equilibrio i^* para este flujo de fondos. Puede servir como referencia de rentabilidad, pero no es una tasa universal deducida solo de la termodinámica: depende de precios, vida útil y riesgos.

Referencias: De Vos (1995); National Renewable Energy Laboratory (2024).

121.- Matriz de la planilla: tasas

$T_c = 600$ K, $T_0 = 300$ K, $R = 1$ K/kW; núcleo reversible y resistencia caliente lineal. $\dot{W}$ es la potencia útil, positiva cuando la máquina entrega trabajo; la hoja la llama P.

Estado		Tasas instantáneas					
T_i	η	$\dot{Q}_c$	$\dot{Q}_f$	$\dot{W}$	$\dot{S}_g$	$\dot{W}_{\text{perd}}$	$\dot{W}_{\text{ref}}$
K	fracción	kW	kW	kW	kW/K	kW	kW
300,00	0,0000	300,00	300,00	0,00	0,50000	150,00	150,00
324,85	0,0765	275,15	254,10	21,05	0,38841	116,52	137,57
349,71	0,1421	250,29	214,72	35,58	0,29857	89,57	125,15
374,56	0,1991	225,44	180,57	44,88	0,22615	67,85	112,72
399,41	0,2489	200,59	150,66	49,93	0,16790	50,37	100,29
424,26*	0,2929	175,74	124,26	51,47	0,12132	36,40	87,87
449,37	0,3324	150,63	100,56	50,07	0,08415	25,25	75,32
474,47	0,3677	125,53	79,37	46,16	0,05535	16,60	62,76
499,58	0,3995	100,42	60,30	40,12	0,03364	10,09	50,21
524,68	0,4282	75,32	43,06	32,25	0,01802	5,41	37,66
549,79	0,4543	50,21	27,40	22,81	0,00764	2,29	25,11
574,89	0,4782	25,11	13,10	12,00	0,00183	0,55	12,55
600,00	0,5000	0,00	0,00	0,00	0,00000	0,00	0,00

Totales en una hora. Para $\Delta t = 1$ h, $Q_{c,f} = \dot{Q}_{c,f}\Delta t$, $W = \dot{W}\Delta t$, $W_{\text{perd}} = \dot{W}_{\text{perd}}\Delta t$ y $W_{\text{ref}} = \dot{W}_{\text{ref}}\Delta t$: los valores numéricos en kWh coinciden con las tasas en kW. Para la entropía, $S_g\,[\text{kJ/K}] = 3600\,\dot{S}_g\,[\text{kW/K}]\,\Delta t\,[\text{h}]$.

* Máxima potencia. Fuente: hoja `Potencia`, celdas A69:O82, de MaquinaResistenciaYPiletas.ods.

122.- Cómo leer la matriz de potencia y entropía

- **Tasas:** la fila marcada con * maximiza $\dot{W} = 51{,}47$ kW, pero no minimiza $\dot{S}_g$ ni $\dot{W}_{\mathrm{perd}}$. Al aumentar T_i, sube η y baja el calor recibido. ¿Por qué la potencia primero crece y luego cae?
- **Balance instantáneo:** $\dot{W}_{\mathrm{ref}} = \dot{W} + T_0 \dot{S}_g$. La referencia reversible utiliza el calor de cada fila: $\dot{W}_{\mathrm{ref}}$ cambia al cambiar la carga.
- **En el máximo:** $\dot{W}_{\mathrm{ref}} = \dot{W} + \dot{W}_{\mathrm{perd}}$; $87{,}87 = 51{,}47 + 36{,}40$ kW. La exergía destruida disminuye al elevar T_i, aunque también puede disminuir la potencia útil.
- **Interpretación:** ¿conviene producir menos para destruir menos exergía? Depende del servicio y de las restricciones. La primera y la última fila son extremos de carga; el asterisco señala el máximo interior.

La tabla conserva las 13 filas de tasas de A69:O82. Los totales y la identificación de los extremos están en la planilla; entradas editables en `Parametros`.

123.- Inversión: comparar beneficios y costos marginales

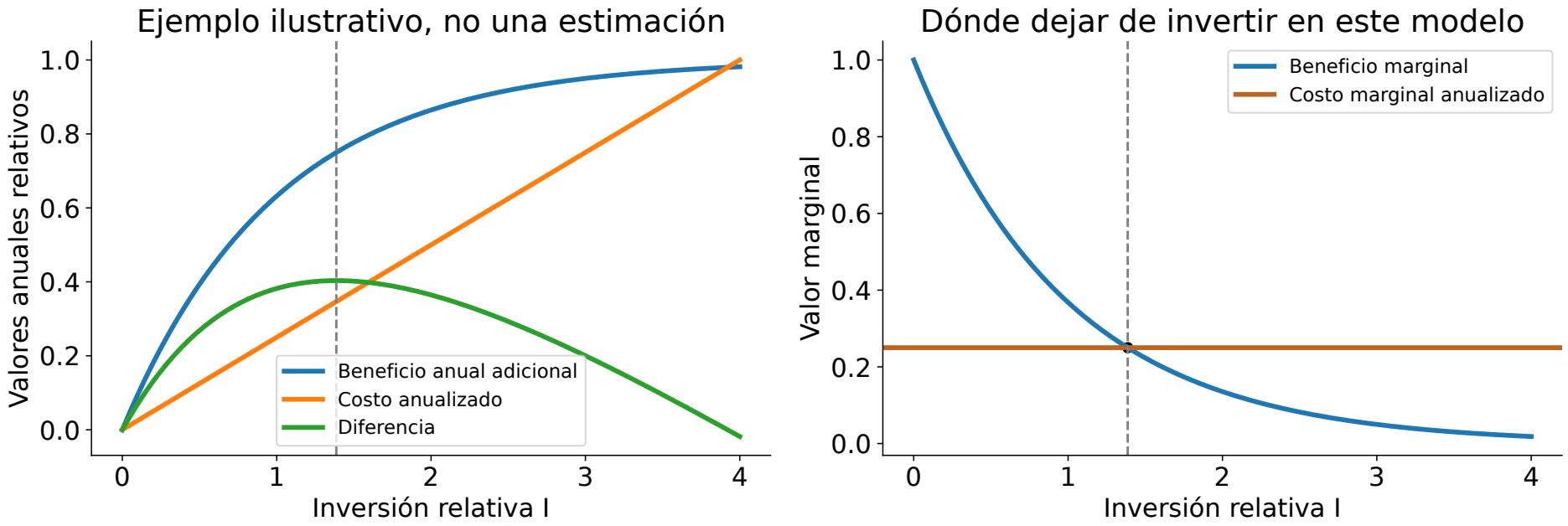


Figura 68

Ejemplo sin unidades monetarias: $B(I) = 1 - e^{-I}$ y costo anualizado $C(I) = I/4$. La diferencia es máxima cuando $B'(I) = C'(I)$: $I^* = \ln 4$. La tasa de comparación y la vida útil influyen en la anualización; la termodinámica restringe las mejoras posibles.

Gráfico propio ilustrativo, sin pretensión de estimar un proyecto real; National Renewable Energy Laboratory (2024).

124.- [E] Dos piletas: mezcla directa y generación de entropía

Mezclar da 50 °C: conserva energía y genera entropía.

Dos piletas iguales contienen cada una $m = 1000$ kg de agua, aproximadamente 1 m^3: una a 10 °C y otra a 90 °C. Suponemos agua incompresible, $c = 4{,}18$ kJ/(kg K) constante, recipientes de capacidad térmica despreciable y conjunto aislado del exterior.

$$\boxed{\text{Agua fría: } T_f = 283{,}15\ \text{K}} + \boxed{\text{Agua caliente: } T_c = 363{,}15\ \text{K}} \longrightarrow \boxed{\text{Mezcla: } 2m,\ T_m}$$

Figura 69

$$W = 0, \qquad mc(T_c - T_m) = mc(T_m - T_f),$$

$$T_m = \frac{T_c + T_f}{2} = 323{,}15\ \text{K} = \boxed{50\ ^\circ\text{C}},$$

$$S_{\text{gen}} = \Delta S_{\text{total}} = mc \ln \frac{T_m}{T_c} + mc \ln \frac{T_m}{T_f} = \boxed{64{,}54\ \text{kJ/K}}.$$

- Es la misma sustancia: no se añade una entropía de mezcla de especies distintas. La irreversibilidad proviene de equilibrar temperaturas diferentes.
- «Mismo tamaño» se modela como igual masa y capacidad térmica; se desprecia la variación de densidad del agua. Todas las temperaturas de los logaritmos están en kelvin.

Cálculo propio con el modelo de líquido incompresible; Cengel and Boles (2006); Callen (1985).

125.- [E] Dos piletas: extraer trabajo antes de equilibrarlas

Extraer trabajo deja las piletas a 47.515 °C, con menor energía interna.

Las mismas piletas intercambian energía mediante una máquina reversible. Sus temperaturas cambian: no son focos constantes. El conjunto no recibe calor exterior y entrega trabajo hasta que ambas temperaturas se igualan.

$$\boxed{\text{Pileta caliente}} \xrightarrow{\delta Q_c} \boxed{\text{Máquina reversible}} \xrightarrow{\delta Q_f} \boxed{\text{Pileta fría}}$$

La máquina entrega $\delta W = \delta Q_c - \delta Q_f$ al exterior.

Figura 70

$$\Delta S_{\text{total}} = mc \ln \frac{T_r}{T_c} + mc \ln \frac{T_r}{T_f} = 0,$$

$$T_r = \sqrt{T_c T_f} = 320{,}665\ \text{K} = \boxed{47{,}515\ ^\circ\text{C}},$$

$$W_{\text{máx}} = mc(T_c + T_f - 2T_r) = \boxed{20{,}776\ \text{MJ} = 5{,}771\ \text{kWh}}.$$

- La temperatura final la determina el balance de entropía reversible, no el ambiente. Es menor que 50 °C porque parte de la energía salió como trabajo. No se perdió energía ni se generó entropía en el proceso ideal.
- El trabajo es máximo bajo estas restricciones: solo intercambiar entre las dos piletas y terminar a igual temperatura. Los resultados escalan con la masa de cada pileta.

Cálculo propio; $m = 1000$ kg por pileta, $c = 4{,}18$ kJ/(kg K); Cengel and Boles (2006); Callen (1985).

126.- Dos piletas: máquina, compuerta y ambiente

Máquina reversible

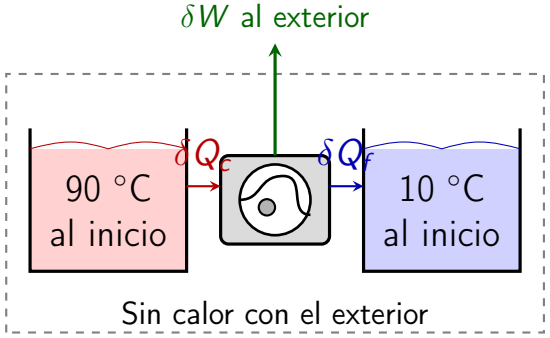


Figura 71

Ambas terminan a 47.515 °C. Se extraen 20.776 MJ de trabajo y no se genera entropía en el proceso ideal. El conjunto es adiabático, pero entrega trabajo: no está aislado en sentido estricto.

Abrir la compuerta

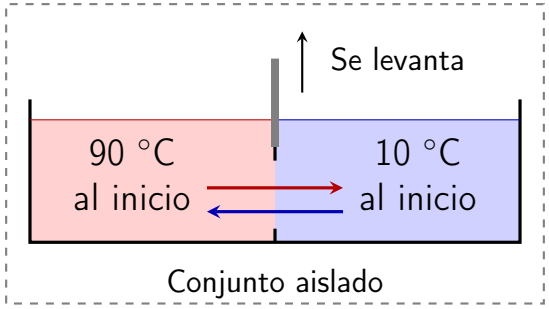


Figura 72

El agua se comunica y mezcla hasta 50 °C. No sale trabajo: $W = 0$. Se generan 64.54 kJ/K de entropía. Se desprecia el trabajo necesario para abrir la compuerta.

Referencia externa: 25 °C

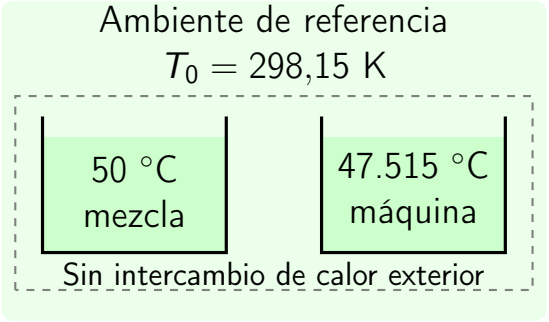


Figura 73

Dos resultados comparados con el mismo ambiente de referencia a 25 °C. Este ambiente no fija los estados finales ni intercambia calor durante los procesos. Permite calcular la exergía remanente y la destruida en cada caso.

Dos masas iguales de 1000 kg de agua, con $c = 4{,}18$ kJ/(kg K). Los recipientes y la máquina no acumulan energía apreciable.

Dibujos y cálculos propios; modelo de líquido incompresible; Cengel and Boles (2006); Callen (1985).

127.- Las piletas: trabajo extraído y exergía destruida

Comparar trabajos exige contabilizar también la exergía que queda.

Primero calculamos los estados finales sin intercambio de calor exterior. Después elegimos, para ambos casos, un ambiente de referencia a $T_0 = 298{,}15$ K (25 °C): no impone la temperatura final. Despreciando cambios de volumen, la exergía térmica de una pileta es:

$$B(T) = mc\left[(T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0}\right].$$

	Mezcla directa	**Máquina reversible**
Temperatura final (°C)	50.000	47.515
Trabajo entregado (MJ)	0	20.776
Entropía generada (kJ/K)	64.541	0
Exergía inicial total (MJ)	27.544	27.544
Exergía final del agua (MJ)	8.301	6.768
Exergía destruida $T_0 S_{\text{gen}}$ (MJ)	19.243	0

$$B_{\text{inicial}} = W + B_{\text{final}} + T_0 S_{\text{gen}}.$$

- La entropía generada se obtiene del balance de entropía, sin elegir T_0. La exergía destruida sí depende de esa referencia. No debemos identificar 20.776 MJ con 19.243 MJ: los dos procesos dejan al agua en estados finales distintos, con distinta exergía remanente.
- La pileta fría, bajo T_0, también tiene exergía: 1,63 MJ.
- Si además se permite intercambiar reversiblemente con el ambiente hasta llegar a 25 °C, el trabajo total máximo desde el estado inicial sería 27.544 MJ. Esa es otra condición final.

Valores calculados para 1000 kg en cada pileta; Cengel and Boles (2006).

128.- Cierre del tema: Exergía y máxima potencia

1. **En el motor de 600 K y 300 K, ¿por qué el máximo de potencia no coincide con la mínima generación de entropía ni con el mínimo trabajo perdido?**
2. ¿Por qué las dos piletas quedan más frías cuando extraemos trabajo reversiblemente?

La pregunta destacada se analiza en clase; la otra queda para revisión y consulta.

129.- Preguntas de cierre de la clase 2

1. **En la máquina de 600 K y 300 K, ¿dónde se genera entropía y dónde se convierte energía en trabajo?**
2. ¿Qué cambia al pasar del punto de máxima potencia a otro de mayor rendimiento?
3. En las piletas, ¿qué conserva la máquina reversible y por qué no termina a 50 °C?

La pregunta destacada guía el cierre de clase; las otras quedan como alternativas de consulta.

130.- Clase 3: Generación de Potencia Útil (1/2)

Clase 3 de 3

Martes 27 de octubre, 8:30–10:30

- **Sección 6:** entalpía, balances en sistemas abiertos y atmósfera.
  3 láminas [E]: $3 \times 120/11 \simeq 32{,}7$ min.
- **Sección 7:** fases y propiedades de la mezcla agua–vapor.
  2 láminas [E]: $2 \times 120/11 \simeq 21{,}8$ min.
- **Sección 8:** componentes de una central termoeléctrica.
  1 lámina [E]: $120/11 \simeq 10{,}9$ min.

131.- Clase 3: Generación de Potencia Útil (2/2)

- **Sección 9:** ciclo Rankine y mejoras.
  2 láminas [E]: $2 \times 120/11 \simeq 21{,}8$ min.
- **Sección 10:** generación alternativa.
  1 lámina [E]: $120/11 \simeq 10{,}9$ min.
- **Sección 11:** potencia, economía y sociedades.
  2 láminas [E]: $2 \times 120/11 \simeq 21{,}8$ min.

Clase 3 completa: 120 min / 11 láminas [E] $\simeq$ 10,91 min por lámina; aperturas, apoyos y cierres incluidos.

132.- **Sección 6:** Entalpía. Balances de energía y entropía en sistemas abiertos

Contenidos del programa asignados a esta sección

- (6a) Entalpía.
- Balance de energía en sistemas abiertos.
- (6b) Sistemas Abiertos.

Enfoque: Masa y volumen de control, papel de la entalpía en el flujo y balances de energía y entropía en sistemas abiertos; atmósfera como ampliación.

T3: aproximadamente 32,7 minutos, incluida esta apertura.

133.- Volumen de control

Sin acumulación puede haber flujos permanentes de masa y energía.

- Un volumen de control es una región delimitada por una superficie de control.
- La materia puede entrar y salir transportando masa, energía y otras propiedades.
- Usaremos un volumen fijo en el espacio y distinguiremos acumulación de flujo.
- En régimen estacionario la acumulación de masa y energía es nula, aunque los flujos no lo sean.

Referencia: Cengel and Boles (2006).

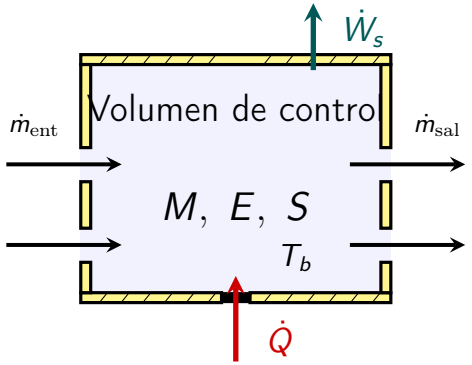


Figura 74

La frontera permite distinguir acumulación, entradas y salidas de materia y energía.

134.- [E] Entalpía H

La entalpía $h = u + pv$ incorpora el trabajo de flujo.

$$\boxed{H = U + pV}, \qquad h = u + pv.$$

- H es entalpía; h y u son entalpía y energía interna por unidad de masa. $v = V/m$ es volumen específico; p es presión.
- pV incorpora un término que resulta útil al contabilizar trabajo de desplazamiento o de flujo.
- La entalpía es una propiedad de estado, no «calor almacenado».

Referencia: Cengel and Boles (2006).

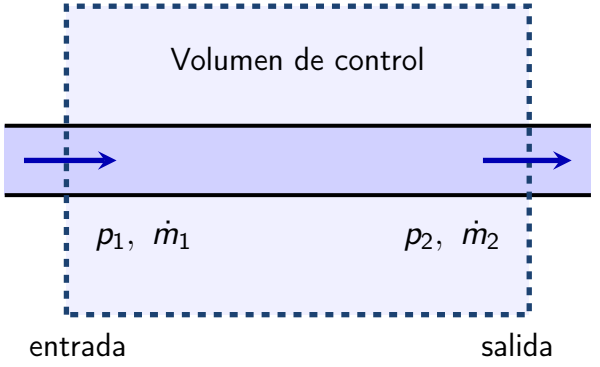


Figura 75

Un caño atraviesa la caja de control. El trabajo de flujo en cada boca se contabiliza con pv; por eso el balance usa $h = u + pv$.

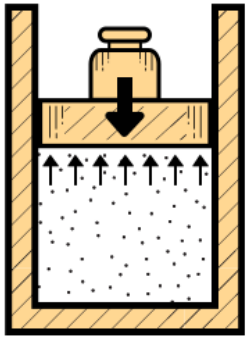
135.- Entalpía y calor a presión constante

Para un sistema cerrado a presión constante, con solo trabajo de expansión contra esa presión y cambios despreciables de energía cinética y potencial:

$$Q = \Delta U + p\Delta V = \Delta(U + pV) = \boxed{\Delta H}.$$

- Si hay trabajo eléctrico o de eje, el calor no es, en general, igual a ΔH.
- La igualdad expresa condiciones de un proceso; no redefine la entalpía como calor.

Referencia: Cengel and Boles (2006).



Dsa - Termo - FDL - 2018

Figura 76

Pistón con carga constante: ejemplo del trabajo de expansión a presión externa constante.

136.- Entalpía en sistemas abiertos

Al entrar materia, el flujo lleva energía interna y requiere trabajo para desplazar la materia en la frontera:

$$u + pv = h.$$

Para una entrada y una salida en régimen estacionario:

$$\dot{Q} - \dot{W}_s = \dot{m}\left[h_2 - h_1 + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)\right].$$

$\dot{W}_s > 0$ es potencia de eje entregada. El trabajo de flujo ya está incluido en h; no se suma otra vez. Aquí c es velocidad (m/s); v en $h = u + pv$ es volumen específico (m^3/kg).

Referencia: Cengel and Boles (2006).

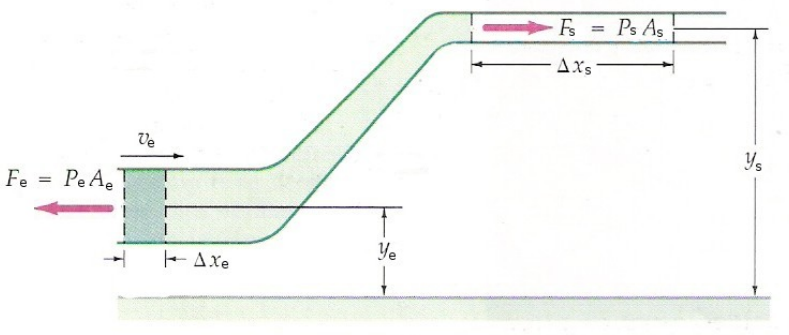


Figura 77

El trabajo de flujo se incorpora a la energía transportada mediante la entalpía.

137.- [E] Resumen: balances

Contar acumulación, entradas y salidas antes de simplificar el balance.

$$\frac{dm_{VC}}{dt} = \sum_{\text{ent}} \dot{m} - \sum_{\text{sal}} \dot{m}.$$

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}_s + \sum_{\text{ent}} \dot{m}\left(h + \frac{c^2}{2} + gz\right) - \sum_{\text{sal}} \dot{m}\left(h + \frac{c^2}{2} + gz\right).$$

- c: velocidad; h: entalpía por unidad de masa; $\dot{m}$: caudal másico. $\dot{Q} > 0$ entra y $\dot{W}_s > 0$ sale. En régimen estacionario las acumulaciones son cero.
- Turbina adiabática, una entrada y una salida, cambios cinéticos y potenciales pequeños: $\dot{W}_s = \dot{m}(h_1 - h_2)$.
- Ejemplo: $\dot{m} = 2\,\mathrm{kg/s}$ y $h_1 - h_2 = 300\,\mathrm{kJ/kg}$ dan $\dot{W}_s = 600\,\mathrm{kW}$.

Referencia: Cengel and Boles (2006).

138.- Cierre del tema: Entalpía y sistemas abiertos

1. **¿Por qué en una corriente aparece h=u+pv y no solamente u?**

2. En régimen estacionario, ¿qué debe conocerse además del caudal para calcular la potencia de una turbina?

La pregunta destacada se analiza en clase; la otra queda para revisión y consulta.

139.- [E] Creación de entropía en sistemas abiertos

Acumulación nula no significa generación de entropía nula.

$$\frac{dS_{VC}}{dt} = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_{b,j}} + \sum_{\text{ent}} \dot{m}s - \sum_{\text{sal}} \dot{m}s + \dot{S}_{\text{gen}}.$$

- En estado estacionario la acumulación es cero; la generación puede ser positiva.
- Para una turbina adiabática con una entrada y una salida: $\dot{S}_{\text{gen}} = \dot{m}(s_2 - s_1) \geq 0$.
- Solo si además es internamente reversible se cumple $s_2 = s_1$.
- s es entropía por unidad de masa; $\dot{m}s$ es su transporte por unidad de tiempo. No debe confundirse con la generación $\dot{S}_{\text{gen}}$.

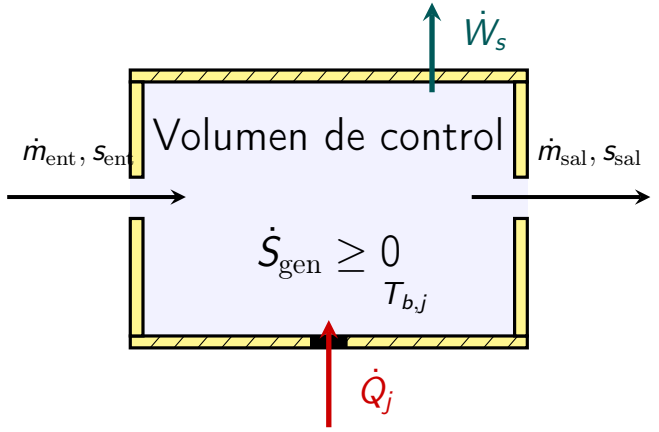


Figura 78

En régimen estacionario, la entropía que sale puede superar la que entra: la diferencia se genera dentro.

Referencia: Cengel and Boles (2006); Bejan (2006).

Video para discutir: Veritasium: ¿qué recibimos del Sol? ¿Cómo se relaciona con la entropía de la radiación que entra y sale del planeta? Muller (2023).

140.- Balance energético de la atmósfera y la superficie

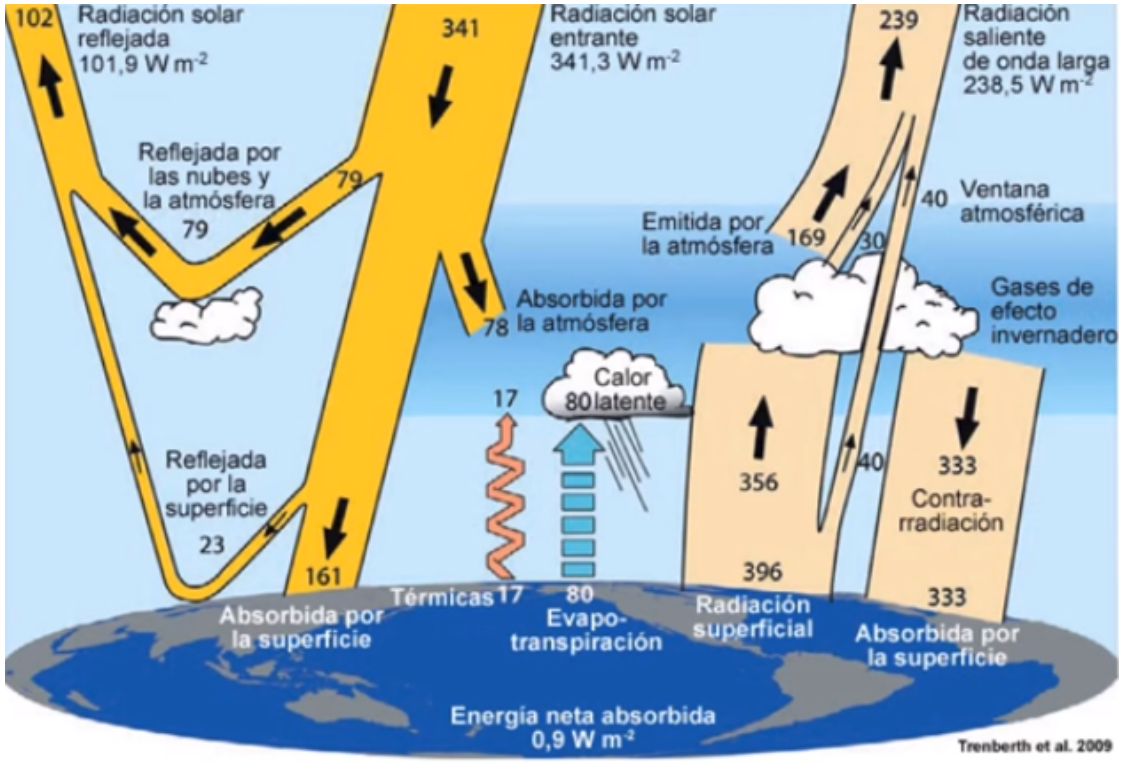


Figura 79

Flujos medios globales en W/m^2: distinguir radiación solar, radiación infrarroja, calor sensible y transporte asociado a la evaporación. Los intercambios internos no se suman como entradas nuevas al planeta.

Imagen en castellano conservada de los apuntes, atribuida a Trenberth et al. (2009); estimaciones de esa publicación, no valores actuales.

141.- Cierre del tema: Entropía e irreversibilidad

1. Al mezclar las dos piletas a 10 y 90 °C, ¿por qué la temperatura final es 50 °C y se genera entropía?
2. **¿Puede disminuir la entropía de un sistema abierto sin violar la segunda ley?**

La pregunta destacada se analiza en clase; la otra queda para revisión y consulta.

142.- **Sección 7:** Propiedades de la mezcla agua-vapor

Contenidos del programa asignados a esta sección

- (7) Propiedades de la mezcla agua-vapor.

Enfoque: Entender las fases y realizar cálculos de propiedades del agua cuando coexisten dos fases.

T3: aproximadamente 21,8 minutos, incluida esta apertura.

143.- Fases de la materia y sus cambios

Fase: región material homogénea en su composición y propiedades intensivas, distinguible de otras regiones por una interfaz. Una sustancia puede presentar varias fases sólidas.

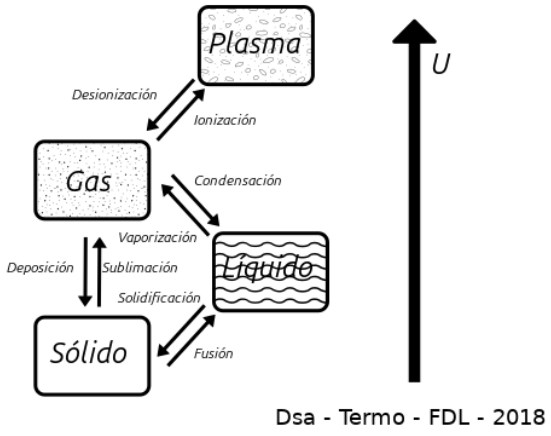


Figura 80

Esquema del apunte: nombres de las transformaciones. La flecha de energía es orientativa; no representa una escala universal.

Plasma Medio ionizado, con cargas libres y comportamiento electromagnético colectivo; puede estar parcialmente ionizado.

Gas Fluye, se expande para ocupar el volumen disponible y es mucho más compresible que un líquido.

Líquido Fluye y adopta la forma del recipiente; es poco compresible y puede presentar una superficie libre.

Sólido Resiste deformaciones de corte y conserva una forma propia en las condiciones y escalas de tiempo consideradas.

Vapor: fase gaseosa a temperatura inferior a la crítica; puede condensarse por compresión isotérmica. No es una fase adicional distinta del gas.

Fuentes: diagrama del apunte de la materia; Cengel and Boles (2006). En este curso nos concentraremos en sólido, líquido y vapor.

144.- Cómo leer el diagrama de fases del agua

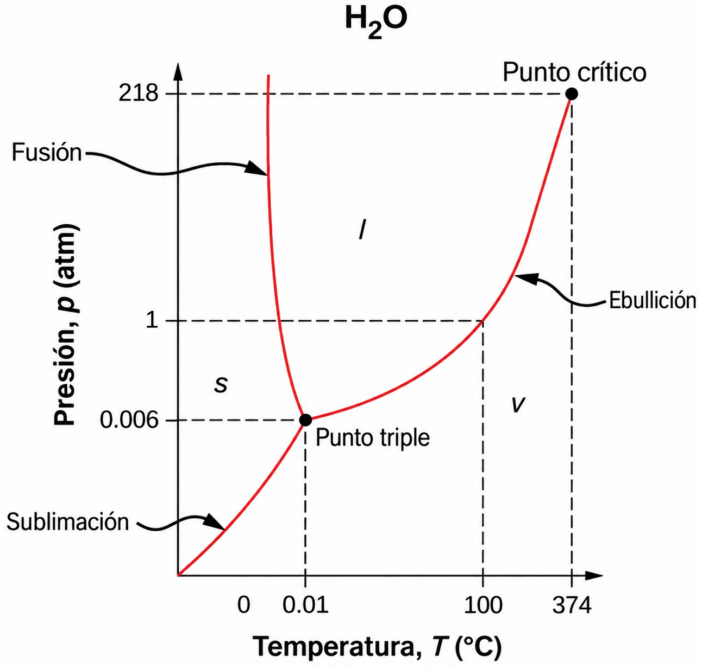


Figura 81

Regiones: sólido (*s*), líquido (*l*) y vapor (*v*). Fronteras: coexistencia de dos fases; punto triple: tres fases. La curva líquido–vapor termina en el punto crítico. Los ejes del esquema no son lineales ni están a escala.

OpenStax, figura 1.12, rótulos traducidos al castellano; CC BY-NC-SA 4.0. OpenStax (a).

145.- Agua: superficie tridimensional presión–volumen–temperatura

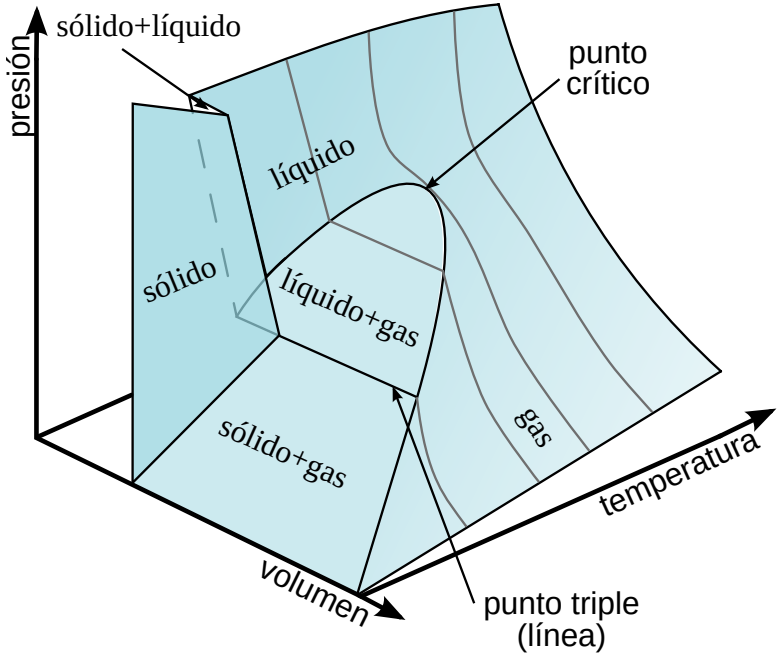


Figura 82

- Ejes: presión, temperatura y volumen. Para una masa fija, también podemos usar el volumen específico $v = V/m$.
- Las zonas de coexistencia contienen dos fases. A iguales p y T, cambiar sus proporciones cambia el volumen total.
- El punto triple del diagrama p–T corresponde aquí a una línea: p y T son fijos, pero el volumen puede variar con las proporciones de las fases.
- La región líquido–vapor termina en el punto crítico.

Esquema cualitativo, sin escala numérica; no representa las distintas fases del hielo a alta presión.

McZusatz, diagrama en español, 2013; CC BY-SA 3.0. SVG convertido a PDF vectorial sin cambiar su contenido. McZusatz (2013).

146.- Potencial químico: el equilibrio al intercambiar materia

Para una fase de una sustancia pura, simple y compresible, ampliamos la relación fundamental para permitir que cambie el número de partículas N:

$$dU = T\,dS - p\,dV + \mu\,dN, \qquad \boxed{\mu = \left(\frac{\partial U}{\partial N}\right)_{S,V}}.$$

- **Significado:** μ mide cuánto cambia U al variar N manteniendo S y V constantes. Aquí se expresa en J por partícula; si usamos moles, el potencial químico molar se expresa en J/mol.
- **A temperatura y presión constantes**, usamos la energía de Gibbs $G = U + pV - TS$. Para una fase homogénea extensiva de una sustancia pura, $G = \mu N$: μ es su energía de Gibbs por partícula.

Si pasan $dN > 0$ partículas del líquido al vapor, a iguales T y p:

$$dG_{\text{total}} = (\mu_v - \mu_l)\,dN.$$

- Si $\mu_l > \mu_v$, ese paso reduce G y favorece la vaporización; si $\mu_v > \mu_l$, favorece la condensación. El equilibrio de intercambio de materia exige $\mu_l = \mu_v$, además de iguales T y p.
- No hace falta una reacción química: el concepto también describe cambios de fase. Con varias especies, el término de materia se amplía a $\sum_i \mu_i\,dN_i$.

Despreciamos efectos de superficie y campos externos; describimos propiedades de equilibrio, no velocidades de transformación. Referencias: Callen (1985); Atkins and de Paula (2010).

147.- Por qué pueden coexistir fases

A iguales totales, separarse en fases puede aumentar la entropía.

Idea: con la misma energía, volumen y cantidad de materia, un sistema puede alcanzar mayor entropía separándose en fases que permaneciendo en una sola fase homogénea.

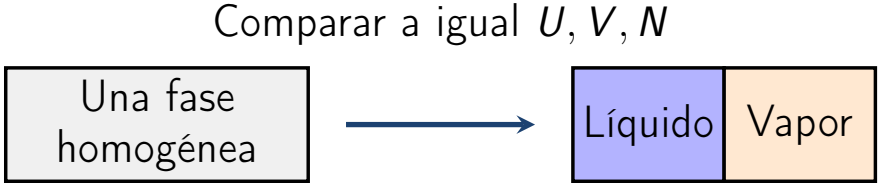


Figura 83

$$S_{\mathrm{eq}}(U,V,N) = \max_{\text{distribuciones admisibles}} \sum_{\alpha} S_{\alpha}(U_{\alpha},V_{\alpha},N_{\alpha}) \;\geq\; S_{\text{homogénea}}(U,V,N).$$

- La zona convexa pertenece a una **rama homogénea candidata**: una prolongación teórica que impone una sola fase. **No es la relación de equilibrio estable** del sistema cuando se permite separar fases.
- Conservando los totales U, V, N, una combinación admisible puede superar la entropía de esa rama. En el modelo aditivo, sin costo de interfaz, la relación de equilibrio ya incorpora la coexistencia y sigue la **envolvente cóncava**. Para $T > 0$, la curvatura inestable equivalente de $U(S)$ es cóncava; en general se analiza $S(U, V, N)$ conjuntamente.
- Al maximizar, las fases que pueden intercambiar energía, volumen y materia alcanzan $T_l = T_v$, $p_l = p_v$ y $\mu_l = \mu_v$. Aquí despreciamos efectos de superficie y campos externos.
- Si se fijan **temperatura y presión**, el criterio equivalente es minimizar $G = U + pV - TS$, incluyendo el efecto del entorno. No corresponde comparar solo la entropía del sistema bajo esas restricciones.

147.- Por qué pueden coexistir fases

- En agua–vapor, la región bifásica de las tablas expresa esta coexistencia. La proporción de líquido y vapor se describe mediante el título, que veremos a continuación.

Referencias: Callen (1985); Atkins and de Paula (2010).

148.- La coexistencia supera la rama homogénea

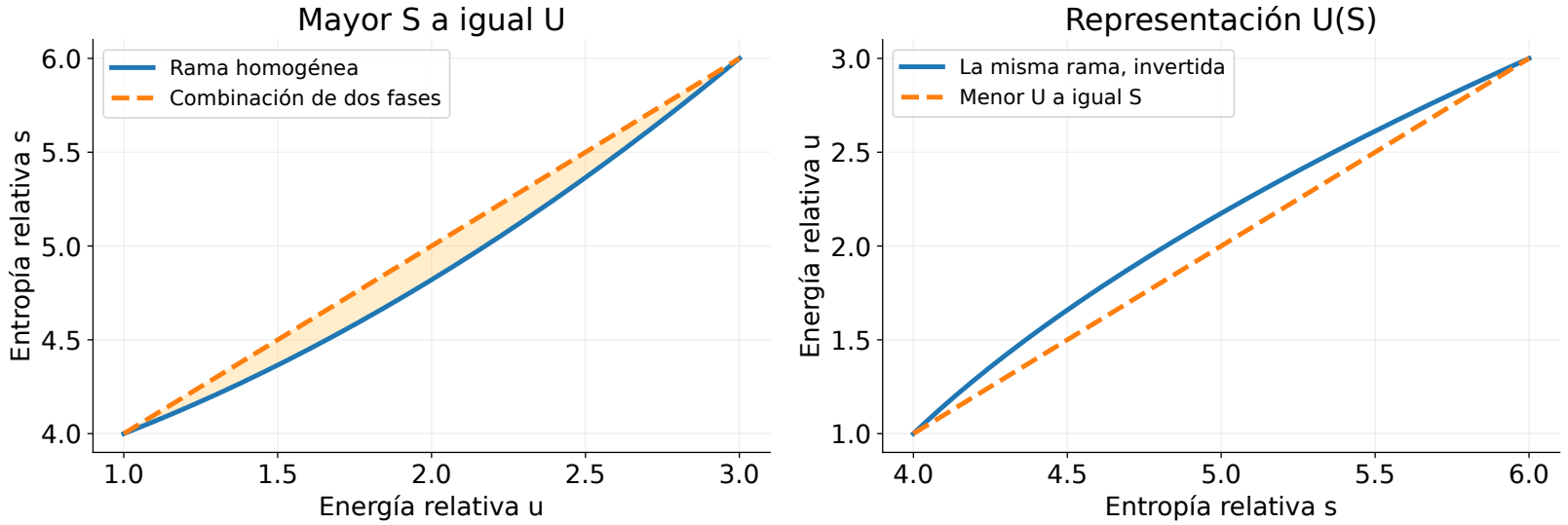


Figura 84

- En el panel $S(U)$, la curva azul prolonga una fase homogénea candidata. Se muestra solo el tramo inestable, convexo en todo el intervalo; la combinación de fases pasa por encima.
- La recta combina dos estados: $u = \lambda u_1 + (1-\lambda)u_2$ y $s = \lambda s_1 + (1-\lambda)s_2$. La zona sombreada muestra la ganancia de entropía.
- Izquierda: mayor S a igual U. Derecha: para estas ramas con $T > 0$, menor U a igual S. La curva derecha es cóncava en todo el tramo dibujado: representa una única zona de mezcla. Esquema del criterio de curvatura: no determina los extremos reales de coexistencia, que requieren las ramas estables y una tangente común. Modelo aditivo sin costo de interfaz; no una curva medida de agua.

Gráfico propio de la construcción de la envolvente; Callen (1985).

149.- [E] Calidad y título del vapor

El título es fracción de masa de vapor en una mezcla saturada.

En una mezcla líquido–vapor en equilibrio:

$$x = \frac{m_v}{m_l + m_v}, \qquad 0 \leq x \leq 1.$$

- $x = 0$: líquido saturado; $x = 1$: vapor saturado seco.
- El vapor sobrecalentado está fuera de la región bifásica: no se le asigna un título mayor que uno.
- Para una propiedad específica $y \in \{v, u, h, s\}$: $y = y_f + x(y_g - y_f)$; f indica líquido saturado y g, vapor saturado.
- Para agua pura, a presión fija, la temperatura queda determinada: $T = T_{\text{sat}}(p)$. Mientras quede materia en ambas fases y se mantenga el equilibrio, pueden cambiar sus proporciones, pero no la temperatura.

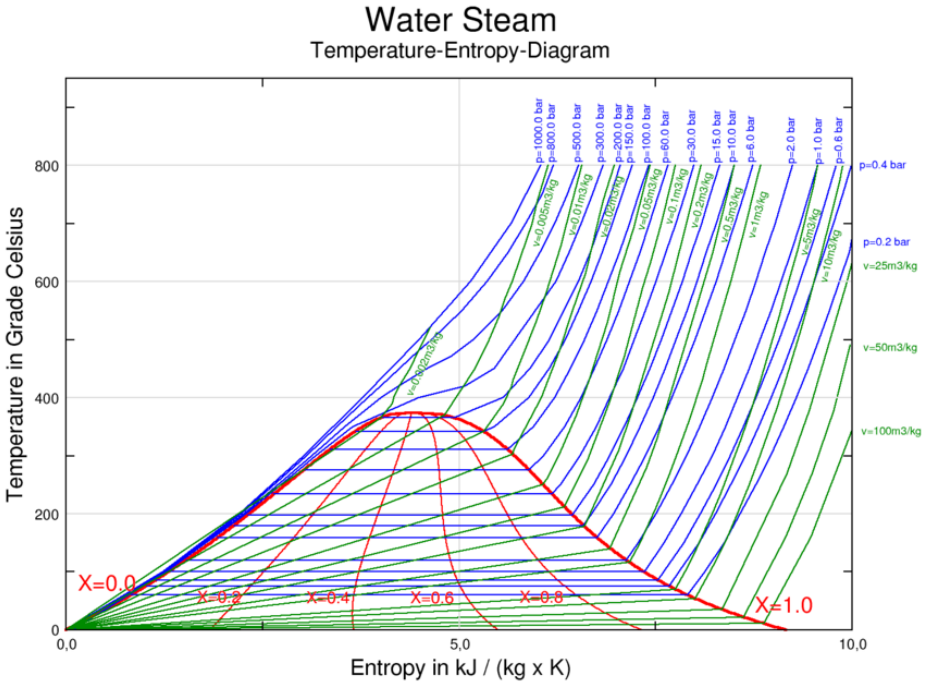


Figura 85

Diagrama T–s del agua: bajo la campana coexisten líquido y vapor; a la derecha, vapor sobrecalentado.

Figura: Wikimedia Commons, M. Schweiss, CC BY-SA 3.0. *Referencia:* Cengel and Boles (2006); tablasvapor.

150.- [E] Tabla de vapor saturado

En saturación, presión y temperatura no son datos independientes.

P (bar)	T (C)	v' (m^3/kg)	v'' (m^3/kg)	h' (kJ/kg)	h'' (kJ/kg)	s' (kJ/kgK)	s'' (kJ/kgK)
22.000	217.25	0.0011852	0.090698	930.87	2800.1	2.4921	6.3038
23.000	219.56	0.0011894	0.086815	941.53	2800.8	2.5136	6.2872
24.000	221.79	0.0011934	0.083244	951.87	2801.4	2.5343	6.2712
25.000	223.95	0.0011974	0.079949	961.91	2801.9	2.5543	6.2558
26.000	226.05	0.0012014	0.076899	971.67	2802.3	2.5736	6.2409
27.000	228.08	0.0012053	0.074066	981.18	2802.7	2.5924	6.2264

Figura 86

Se conservan los encabezados y valores del recorte. $'$ identifica líquido saturado y $''$, vapor saturado; la columna T está en grados Celsius.

Identificar la presión o temperatura de saturación y las columnas de líquido y vapor saturados. En la mezcla, usar el título para interpolar propiedades específicas.

Referencia: Universidad Nacional de Misiones, Facultad de Ingeniería (2012); Cengel and Boles (2006).

151.- Tabla de vapor sobrecalentado

VAPOR DE AGUA RECALENTADO (Continuación)

v: volumen específico (dm^3/kg); i: entalpía específica (kJ/kg); s: entropía específica (kJ/(kg K)).

T °C	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
p(bar) = 32; T_s = 237,4 °C															
v)	0,9985	1,0107	1,0418	1,0888	1,1549	65,9†	78,59	84,49	92,8	100,8	108,7	116,41	124	131,5	139
i)	3,2	212	421,4	633,8	853	2847	2989	3112	3227	3341	3454	3567	3680	3794	3910
s)	0	0,702	1,305	1,839	2,328	6,244†	6,503	6,709	6,887	7,05	7,201	7,343	7,476	7,603	7,725
p(bar) = 34; T_s = 240,9 °C															
v)	0,9984	1,0106	1,0417	1,0887	1,1547	60,84	70,67	79,18	87,08	94,69	102,1	109,4	116,6	123,7	130,7
i)	3,4	212,2	421,5	634	853,1	2836	2983	3108	3224	3328	3451	3565	3679	3793	3909
s)	0	0,702	1,304	1,838	2,328	6,198	6,466	6,675	6,855	7,019	7,171	7,313	7,447	7,574	7,696
p(bar) = 36; T_s = 244,2 °C															
v)	0,9983	1,0105	1,0416	1,0885	1,1545	56,73	66,3	74,46	81,99	89,23	96,27	103,2	110,1	116,7	123,4
i)	3,6	212,3	421,7	634,1	853,2	2825	2976	3103	3221	3335	3449	3563	3677	3792	3907
s)	0	0,702	1,304	1,838	2,327	6,154	6,431	6,644	6,825	6,99	7,142	7,285	7,419	7,547	7,669

Figura 87

† El recorte daba $v = 75{,}43$ y $s = 5{,}243$ a 32 bar y 250 °C, valores erróneos; se corrigieron por interpolación de tablas estándar.

Las columnas con $T < T_s$ corresponden a líquido comprimido. Conocer p y T, verificar que $T > T_{\text{sat}}(p)$ y leer o interpolar en la tabla de sobrecalentado. No extrapolar mediante un título de vapor.

Referencia: tablasvapor; Cengel and Boles (2006).

152.- Cierre del tema: Fases y propiedades del vapor

1. ¿Qué significa que una combinación de fases tenga más entropía que la rama homogénea a igual U,V,N?
2. **¿Cuándo puede utilizarse el título para obtener una propiedad y cuándo deja de estar definido?**

La pregunta destacada se analiza en clase; la otra queda para revisión y consulta.

153.- **Sección 8:** Componentes de una central termoeléctrica

Contenidos del programa asignados a esta sección

- (8) Centrales termoeléctricas convencionales.

Enfoque: Reconocer caldera, turbina y condensador; situar la bomba en el circuito de una central.

T3: aproximadamente 10,9 minutos, incluida esta apertura.

154.- [E] Turbina de vapor

Una turbina de vapor transforma parte de la energía del flujo de vapor en trabajo mecánico de eje mediante la expansión y la interacción con sus álabes.

- El eje puede accionar un generador eléctrico.
- Modelo estacionario, adiabático, con cambios cinéticos y potenciales despreciables: $w_t = h_1 - h_2$.
- La turbina ideal es isentrópica; la real genera entropía y entrega menos trabajo para la misma entrada y presión de salida. Una válvula adiabática sin trabajo de eje, despreciando cambios cinéticos y potenciales, cumple $h_1 = h_2$: reducir presión no implica producir trabajo.

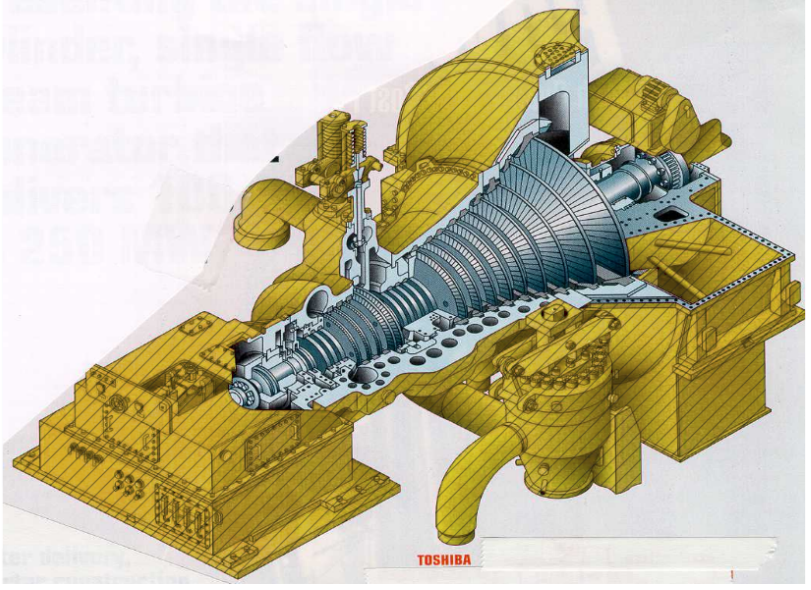


Figura 88

Rotor, estator y etapas de expansión de una turbina de vapor.

Referencia: Cengel and Boles (2006). *Video:* Introducción a una central termoeléctrica. Turbina de vapor, Comisión Federal de Electricidad (México) de Electricidad (1999).

155.- Condensador

El condensador rechaza calor hacia el medio de enfriamiento y transforma el vapor de escape en líquido; el ambiente o circuito de enfriamiento actúa como sumidero.



Figura 89



Figura 90

En el modelo estacionario sin trabajo de eje: $q_{\text{rechazado}} = h_{\text{entrada}} - h_{\text{salida}}$.

Referencia: Wikipedia (2013, 2011); Cengel and Boles (2006).

156.- Caldera acuotubular

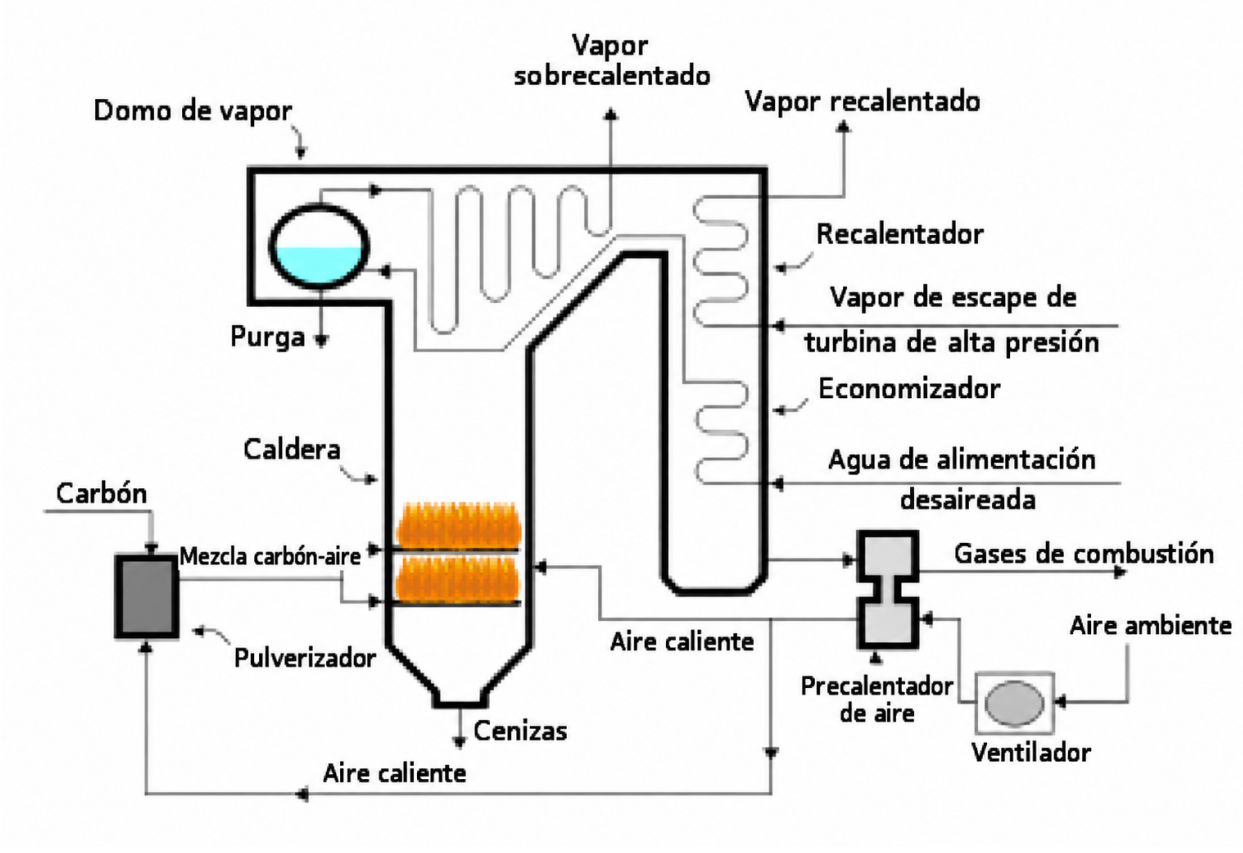


Figura 91

Referencia: Jaimovich (2008); Diez (2008); Cengel and Boles (2006).

En una caldera acuotubular el agua circula por tubos y recibe energía de los gases calientes.

El generador de vapor puede incorporar economizador, evaporador y sobrecalentador. En el modelo ideal, el calentamiento ocurre a presión constante.

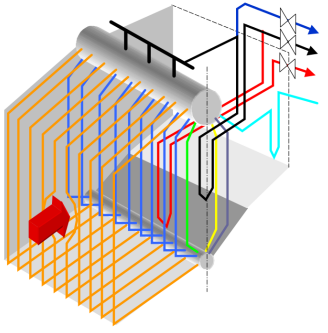


Figura 92

157.- Cierre del tema: Componentes de centrales

1. **¿Qué diferencia hay entre una turbina y una válvula de estrangulamiento aunque ambas reduzcan la presión?**
2. ¿En qué equipos del hogar encontramos válvulas de estrangulamiento o tubos capilares que cumplen esa función? ¿Por qué habitualmente no se usan turbinas para esa expansión?
3. ¿Por qué el condensador permite volver a comprimir el fluido mediante una bomba?

La pregunta destacada se analiza en clase; las otras quedan para revisión y consulta.

158.- **Sección 9:** Ciclo Rankine y central convencional

Contenidos del programa asignados a esta sección

- (9) Ciclo Rankine.

Enfoque: Calcular un ejemplo con tablas y discutir sobrecalentamiento y recalentamiento.

T3: aproximadamente 21,8 minutos, incluida esta apertura.

159.- [E] Proceso de una planta de vapor

La turbina produce trabajo; la bomba consume una parte.

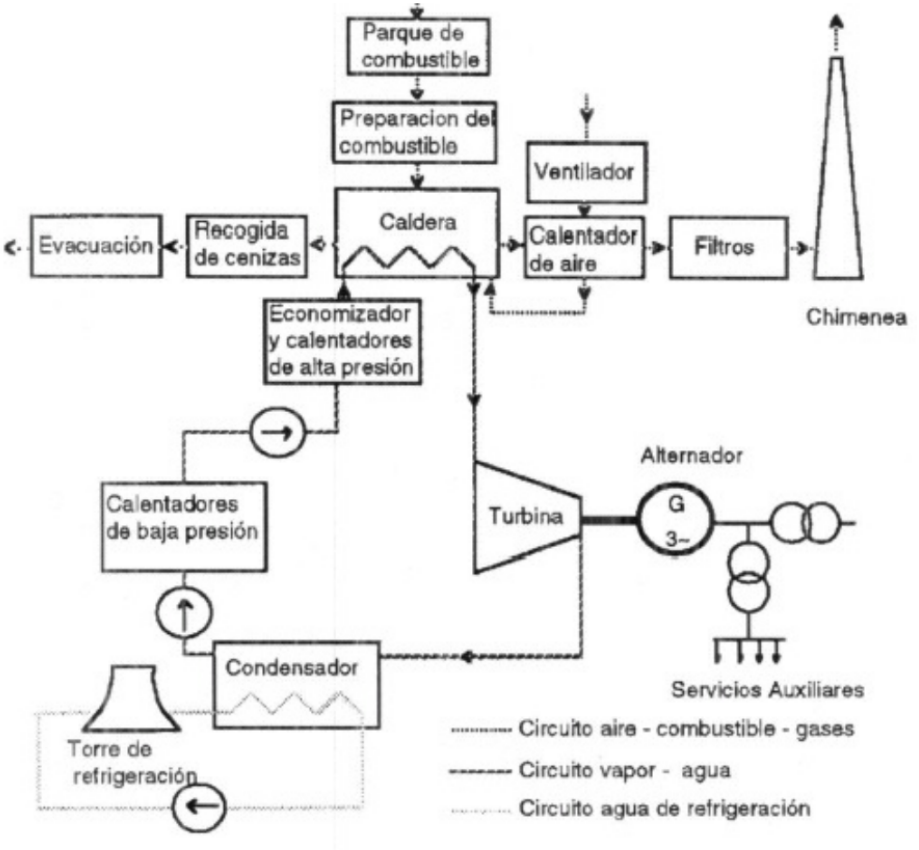


Figura 93

Referencia: Cengel and Boles (2006).

Circuito del fluido:

1. Bomba.
2. Caldera.
3. Turbina.
4. Condensador.
5. Retorno a la bomba.

El trabajo neto descuenta el consumo de la bomba.

160.- Central Térmica Güemes: un caso de Salta

General Güemes, Salta. Operador: Pampa Energía.
Combustible: gas natural. Potencia instalada total: **361 MW**.

Unidad	Tipo	MW	η	Inicio
GUEMTV11	Vapor	63	36 %	1983
GUEMTV12	Vapor	63	36 %	1983
GUEMTV13	Vapor	135	40 %	1992
GUEMTG01	Gas	100	44 %	2008
Total		361		

- Las tres unidades de vapor suman 261 MW: el gas se quema en calderas y el vapor mueve las turbinas.
- La unidad adicional es una turbina aeroderivada a gas de 100 MW, en ciclo abierto.
- Generación neta en 2025: 261 GWh. Distinguir potencia instalada (MW) de energía generada (GWh).



Figura 94

Vista de instalaciones. Fotografía: Pampa Energía.



Figura 95

Vista exterior. Fotografía: RAFA S.A.; ficha de trabajos 2008–2010.

Eficiencias informadas por el operador; no son rendimientos de Carnot ni de Curzon–Ahlborn. Datos consultados el 24/10/2026.

Datos: Pampa Energía, ficha técnica CTG. Fotos: Pampa Energía y RAFA S.A.. Pampa Energía (2026); RAFA S.A..

161.- Tablero de Termo Andes: valores de los circuitos

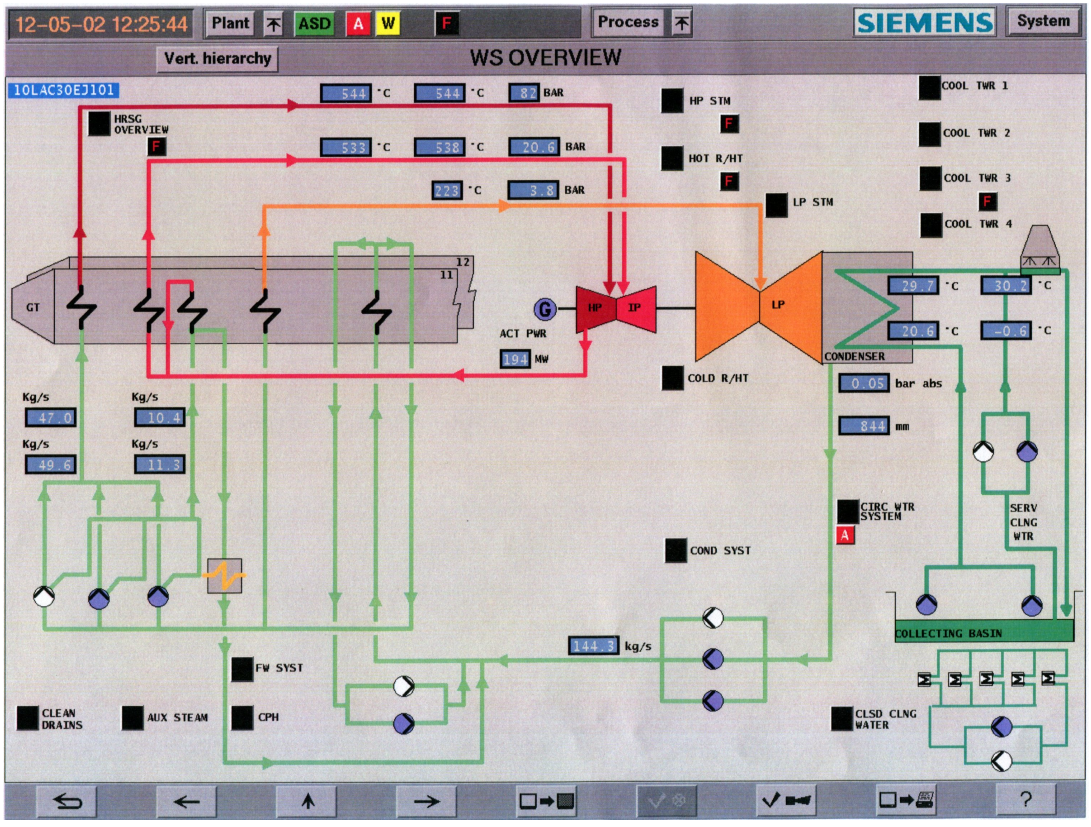


Figura 96

Leer en el tablero las temperaturas y presiones de las líneas de vapor, los caudales de agua y la potencia indicada. La imagen corresponde a **Termo Andes**, central distinta de Güemes; se incorpora como ejemplo de seguimiento de un ciclo en operación.

Fuente gráfica: material de la materia, `presemaestria/ciclocombinado.tex`, lámina «Termo Andes: tablero de comando global».

162.- Diagramas del ciclo Rankine

Rankine simple

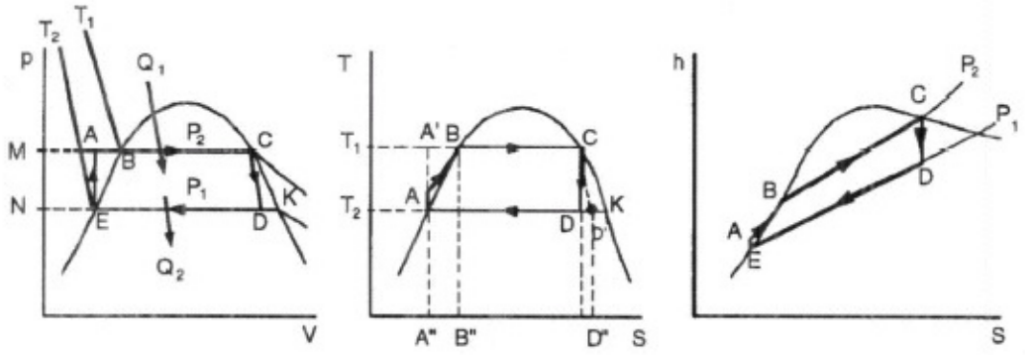


Figura 97

Con sobrecalentamiento

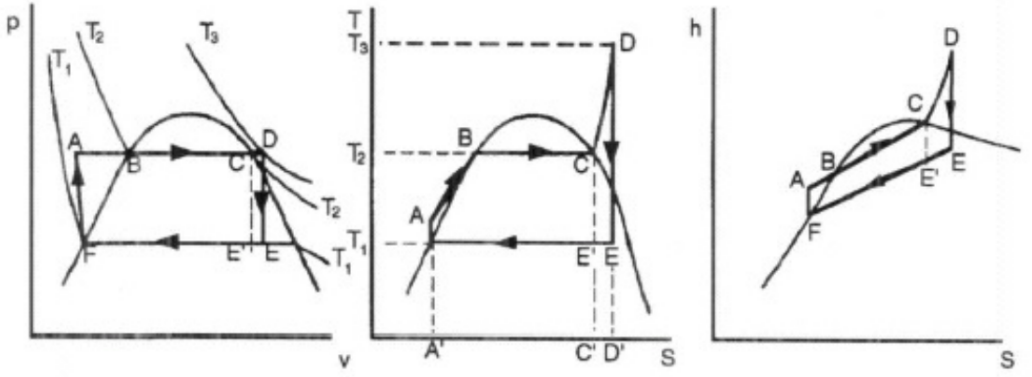


Figura 98

- Compresión del líquido, calentamiento, expansión del vapor y condensación.
- En el modelo ideal: bomba y turbina isentrópicas; caldera y condensador isóbaros.

Referencia: Cengel and Boles (2006).

163.- [E] Rankine simple: cálculos

El trabajo neto resta el consumo de la bomba al trabajo de la turbina.

Caso ideal con agua entre 10 kPa y 2 MPa; la caldera entrega vapor saturado.

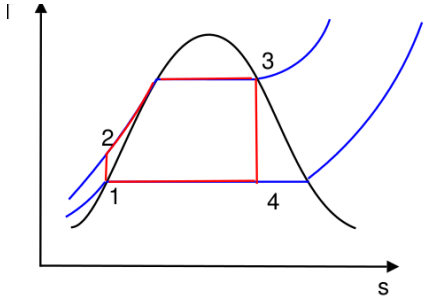


Figura 99

Cálculo por unidad de masa

Bomba: $w_b \simeq v_l(p_{\text{alta}} - p_{\text{baja}})$; turbina: $w_t = h_{\text{ent,t}} - h_{\text{sal,t}}$.
Caldera: $q_c = h_{\text{sal,cal}} - h_{\text{ent,cal}}$; $w_{\text{neto}} = w_t - w_b$; $\eta = w_{\text{neto}}/q_c$.
$w_b = 2{,}0$, $w_t = 792{,}0$, $q_c = 2605{,}7$ y
$\eta = 790{,}0/2605{,}7 \simeq 30{,}3\,\%$. Además,
$\overline{T}_H = q_c/(s_3 - s_2) = 457{,}8$ K (184,6 °C). Trabajos y calores en kJ/kg. Modelo estacionario e ideal; sin pérdidas de presión ni cambios cinéticos o potenciales.

Referencia: Cengel and Boles (2006).

Estado	p (MPa)	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	Condición
1	0,01	46	191,8	0,649	líquido saturado
2	2	–	193,8	0,649	después de bomba
3	2	212	2799,5	6,341	vapor saturado
4	0,01	46	2007,5	6,341	salida; $x_4 \simeq 0{,}759$

164.- Rankine con sobrecalentamiento: estados y cálculo

Caso ideal con agua: 10 kPa en el condensador; 4 MPa y 400 °C a la salida de la caldera.

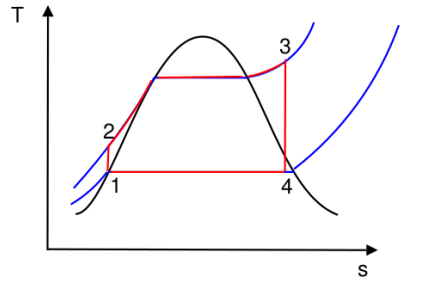


Figura 100

Estado	p (MPa)	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	Condición
1	0,01	46	191,8	0,6490	líquido saturado
2	4	–	195,8	0,6490	después de bomba
3	4	400	3213,6	6,7690	vapor sobrecalentado
4	0,01	46	2144,0	6,7690	salida; $x_4 \simeq 0{,}816$

Cálculo por unidad de masa

$w_b = h_2 - h_1 = 4{,}0$, $w_t = h_3 - h_4 = 1069{,}6$ y
$q_H = h_3 - h_2 = 3017{,}8$ kJ/kg.
$\eta = (w_t - w_b)/q_H \simeq 35{,}3\,\%$; $\overline{T}_H = q_H/(s_3 - s_2) \simeq 493$ K (220 °C). El caso simple anterior emplea otra presión de caldera.

Fuente gráfica y datos: `imagen/rankinesobrecalc.png`; propiedades tabuladas del agua.

165.- Rankine con recalentamiento: estados y cálculo

Caso ideal con agua: 4 MPa y 400 °C a la salida de la caldera; expansión hasta 400 kPa, recalentamiento a 400 °C y expansión hasta 10 kPa.

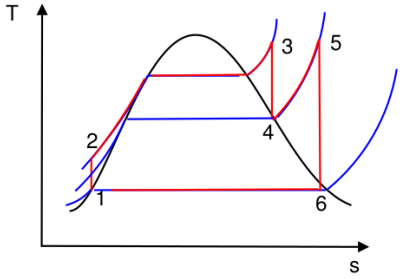


Figura 101

Estado	p (MPa)	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	Condición
1	0,01	46	191,8	0,6490	líquido saturado
2	4	–	195,8	0,6490	después de bomba
3	4	400	3213,6	6,7690	entrada a turbina alta
4	0,4	144	2685,6	6,7690	antes de recalentamiento
5	0,4	400	3273,4	7,8985	entrada a turbina baja
6	0,01	46	2504,7	7,8985	salida; $x_6 \simeq 0{,}967$

Cálculo por unidad de masa

$w_t = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6) = 1296{,}7$ y $w_b = h_2 - h_1 = 4{,}0$ kJ/kg.

$q_H = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4) = 3605{,}6$ kJ/kg;

$\eta = (w_t - w_b)/q_H \simeq 35{,}8\,\%$. El título final mayor indica menos humedad que con solo sobrecalentamiento.

Fuente gráfica y datos: `imagen/rankinerecalcalc.png`; resultado en `imagen/rankinerecalcalc2.png`.

166.- Rankine con regeneración: estados y cálculo

Circuito **Diagrama T–s**

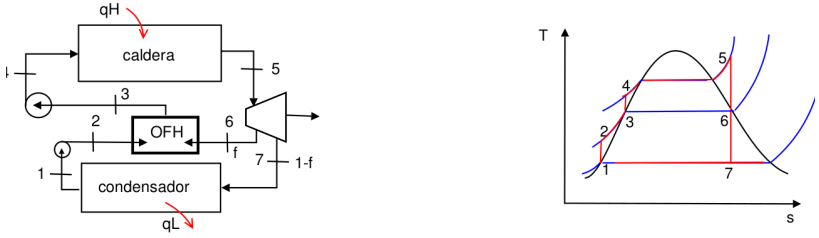


Figura 102

Cálculo por unidad de masa

Hay dos bombas; la turbina extrae $f = \dot{m}_6/\dot{m} \simeq 0{,}1654$. El calentador abierto ideal entrega líquido saturado en el estado 3. $w_t \simeq 980{,}1$, $q_H \simeq 2604{,}9$ kJ/kg y $\eta \simeq 37{,}5\,\%$.

La imagen original consignaba $h_7 = 2504{,}7$ por error; aquí se usa 2144,0, coherente con $s_7 = 6{,}7690$ y $x_7 \simeq 0{,}816$.

Estado	p (MPa)	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	Condición
1	0,01	46	191,8	0,6490	líquido saturado
2	0,4	–	192,2	0,6490	después de bomba 1
3	0,4	144	604,7	1,7766	líquido saturado
4	4	–	608,7	1,7766	después de bomba 2
5	4	400	3213,6	6,7690	vapor sobrecalentado
6	0,4	144	2685,6	6,7690	extracción; $x_6 \simeq 0{,}975$
7	0,01	46	2144,0	6,7690	salida; $x_7 \simeq 0{,}816$

167.- Mejoras del Rankine: interpretación y límites

Una mejora se evalúa con el balance completo y los límites del equipo.

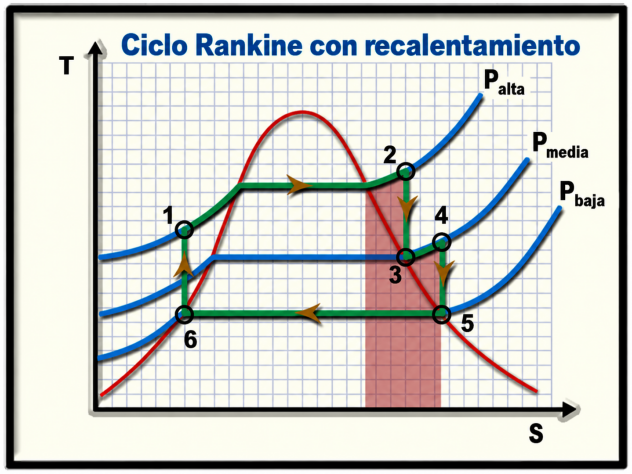


Figura 103

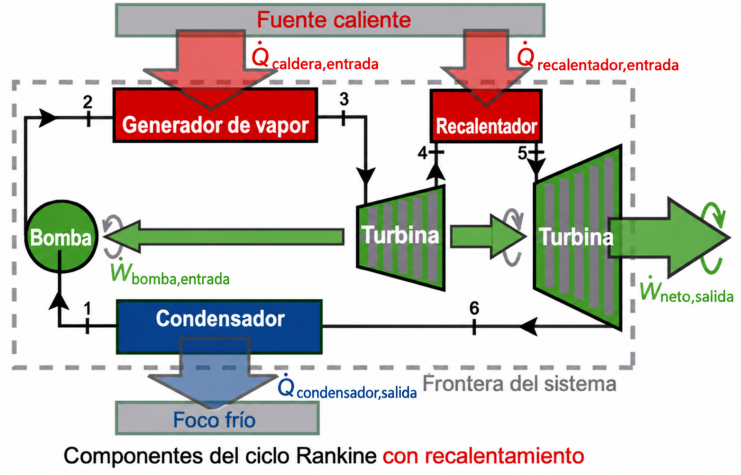


Figura 104

Mejora	Qué cambia	Límite que debe comprobarse
Sobrecalentamiento	Eleva la temperatura de entrada a la turbina.	Materiales, presión y humedad final.
Recalentamiento	Divide la expansión y vuelve a calentar el vapor.	Calor adicional y trabajo neto del ciclo.
Regeneración	Precalienta el agua con vapor extraído de la turbina.	Menor caudal en etapas posteriores.

Los dibujos muestran el recalentamiento. Comparar cada configuración con el balance completo: más trabajo de turbina no garantiza por sí solo mayor rendimiento. Referencia: Cengel and Boles (2006).

168.- Mejoras del Rankine: comparación de casos

Caso	Condiciones principales	η	x a la salida
Simple	2 MPa; vapor saturado a la entrada	30,3 %	0,759
Sobrecalentado	4 MPa y 400 °C a la entrada	35,3 %	0,816
Sobrecalentado con pérdidas	Caso anterior; $\eta_{s,b} = 0{,}80$, $\eta_{s,t} = 0{,}86$	30,3 %	0,878
Recalentado	4 MPa y 400 °C; segundo calentamiento entre turbinas	35,8 %	0,967
Regenerado	4 MPa y 400 °C; extracción hacia calentador abierto	37,5 %	0,816
Recalentado y regenerado	Ambas mejoras sobre el caso de 4 MPa y 400 °C	37,6 %	0,97

- El primer caso usa 2 MPa y los demás 4 MPa: la diferencia con el segundo **no aísla** el efecto del sobrecalentamiento. El caso con pérdidas incluye irreversibilidades internas.
- x es el título del vapor al final de la expansión; cuanto menor, más humedad. Los rendimientos son de estos casos ideales o modelados, no valores universales de cada mejora.

Fuente: resumen de ciclos del apunte `presemaestria/center.tex` y `imagen/rankinecalcresumen.png`; el caso con regeneración usa la entalpía de salida corregida en la lámina precedente.

169.- Rankine con recalentamiento y regeneración

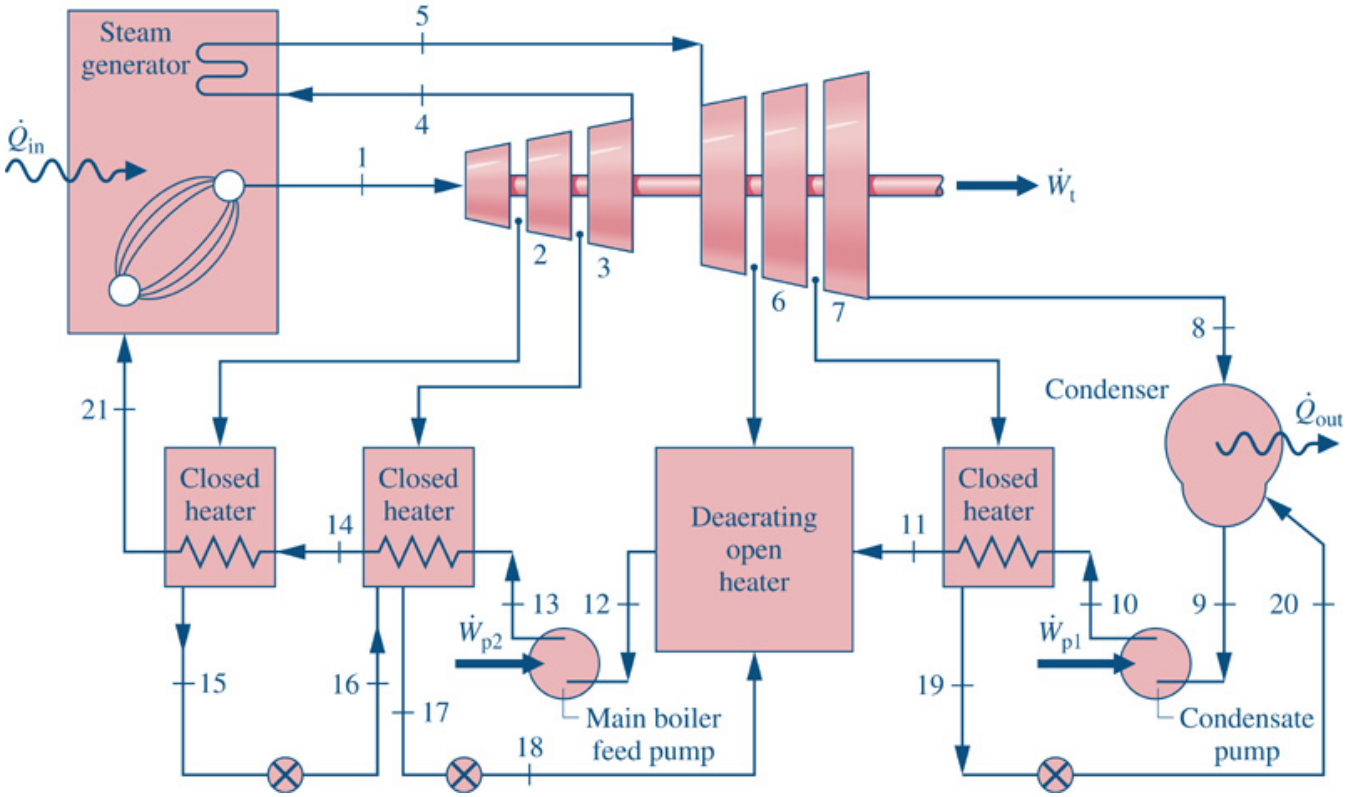


Figura 105

El vapor se **recalienta** entre etapas de expansión. Las extracciones alimentan calentadores **cerrados** y uno **abierto** (desaireador), elevando la temperatura del agua de alimentación. El trabajo y el calor externo se calculan con los caudales propios de cada tramo.

Figura: Çengel y Boles, fig. 10-15 Cengel and Boles (2006); tomada de la lámina «mejoras: central compuesta» de `presemaestria/center.tex`.

170.- Mejoras del Rankine: esquema completo de una central

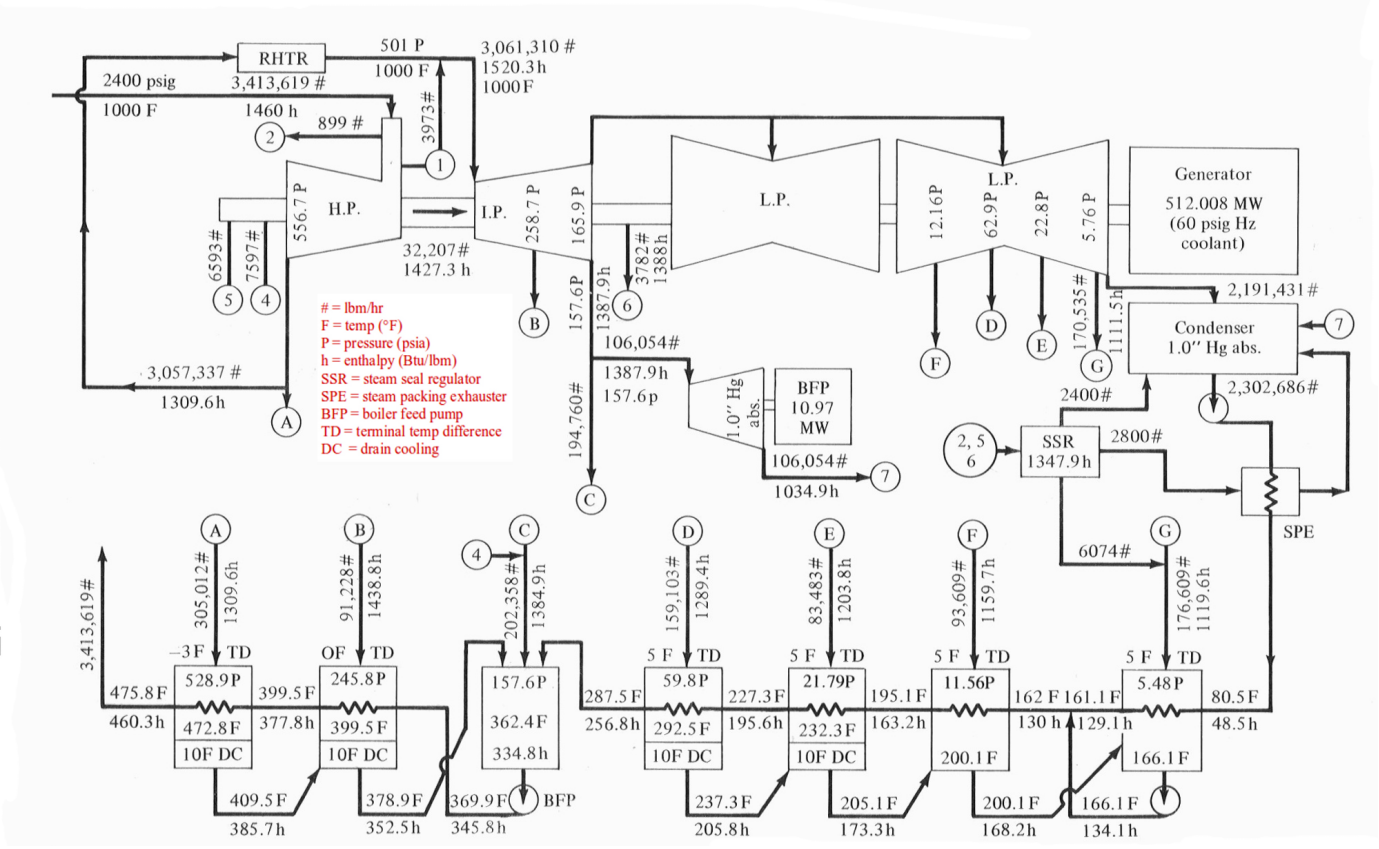


Figura 106

1. **Sobrecalentar** antes de la turbina de alta presión (HP).
2. **Recalentar** (RHTR) antes de continuar la expansión en etapas IP y LP.
3. **Regenerar**: extracciones A–G alimentan siete calentadores; C es abierto.
4. **Auxiliares**: bombas de alimentación (BFP), drenajes, sellos y condensador.

Cada extracción reduce el caudal que sigue expandiéndose, pero disminuye el calor externo requerido. Evaluar trabajo neto, calor aportado, humedad final, irreversibilidades y costo; más equipos no garantizan una mejora económica.

Figura: El-Wakil, *Powerplant Technology*, 1984; lámina «Mejoras: central real», `realplant2.png`; explicación: Cengel and Boles (2006).

Se conservan los datos y unidades originales (°*F*, psi, Btu/lbm); se usa para reconocer la arquitectura, no como ejemplo numérico verificado.

171.- Cierre del tema: Ciclo Rankine

1. **¿Qué aportan las cuatro diferencias de entalpía al balance de un Rankine simple?**
2. ¿Por qué el trabajo neto es menor que el trabajo de la turbina?
3. ¿Qué beneficios y qué costos tiene hacer una central cada vez más compleja? ¿En qué condiciones conviene agregar otra mejora?

La pregunta destacada se analiza en clase; las otras quedan para revisión y consulta.

172.- **Sección 10:** Generación alternativa

Contenidos del programa asignados a esta sección

- (10) Generación en medias y bajas temperaturas.

Enfoque: Aplicar los límites termodinámicos a fuentes solares y geotérmicas y al ORC.

T3: aproximadamente 10,9 minutos, incluida esta apertura.

173.- Reemplazar combustibles por energía solar



Figura 107



Figura 108

Concentrador solar cilindro – parabólico y Fresnel lineal, Martínez Plaza (2012); Gea (2011).

La fuente solar suministra calor al ciclo. La temperatura alcanzable y la del sumidero limitan la fracción convertible en trabajo.

Referencia: Martínez Plaza (2012); Gea (2011).

174.- [E] Ciclo orgánico de Rankine, ORC

Cambiar el fluido permite adaptar el ciclo al recurso térmico.

- El ciclo orgánico de Rankine utiliza un fluido orgánico para aprovechar fuentes de temperatura moderada o baja.
- Conserva los procesos básicos: bombeo, calentamiento/evaporación, expansión y condensación.
- La selección del fluido depende de las temperaturas, presiones y restricciones del equipo.
- No todos los fluidos ni todas las condiciones evitan humedad en la expansión; debe comprobarse la trayectoria real.
- Al bajar la temperatura de la fuente con el mismo ambiente, disminuye el límite reversible de conversión.

Referencia: Cengel and Boles (2006); Bejan (2006).

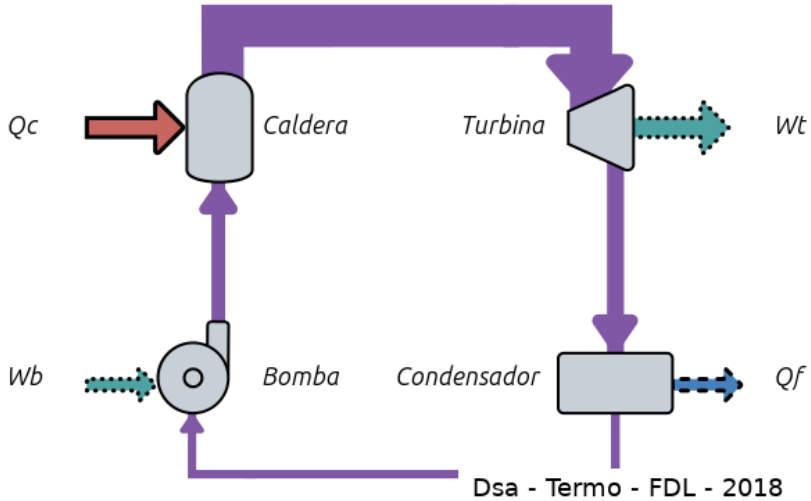


Figura 109

Se conserva esta topología del ciclo: en el ORC el calentador/evaporador trabaja con un fluido orgánico.

175.- Aplicación geotérmica: criterios

Temperatura, caudal y sumidero condicionan el aprovechamiento.

- Una fuente geotérmica entrega calor que puede usarse directamente o alimentar un ciclo de generación.
- Para temperaturas moderadas puede emplearse un circuito binario: el fluido geotérmico calienta un segundo fluido de trabajo.
- Aplicar los mismos balances de energía y entropía y comparar la exergía disponible con la potencia útil.
- Elegir una aplicación exige conocer temperatura, caudal y sumidero: «renovable» no elimina los límites termodinámicos.

Referencia: Bejan (2006).

176. Usos de la energía geotérmica



Figura 110

Gráfico completo de usos geotérmicos desde temperaturas altas hasta bajas. Rangos y cifras originales, con rótulos traducidos.

Fuente gráfica: Geothermal Education Office (2004), indicada en la imagen.

177.- Tres formas de aprovechar una fuente geotérmica

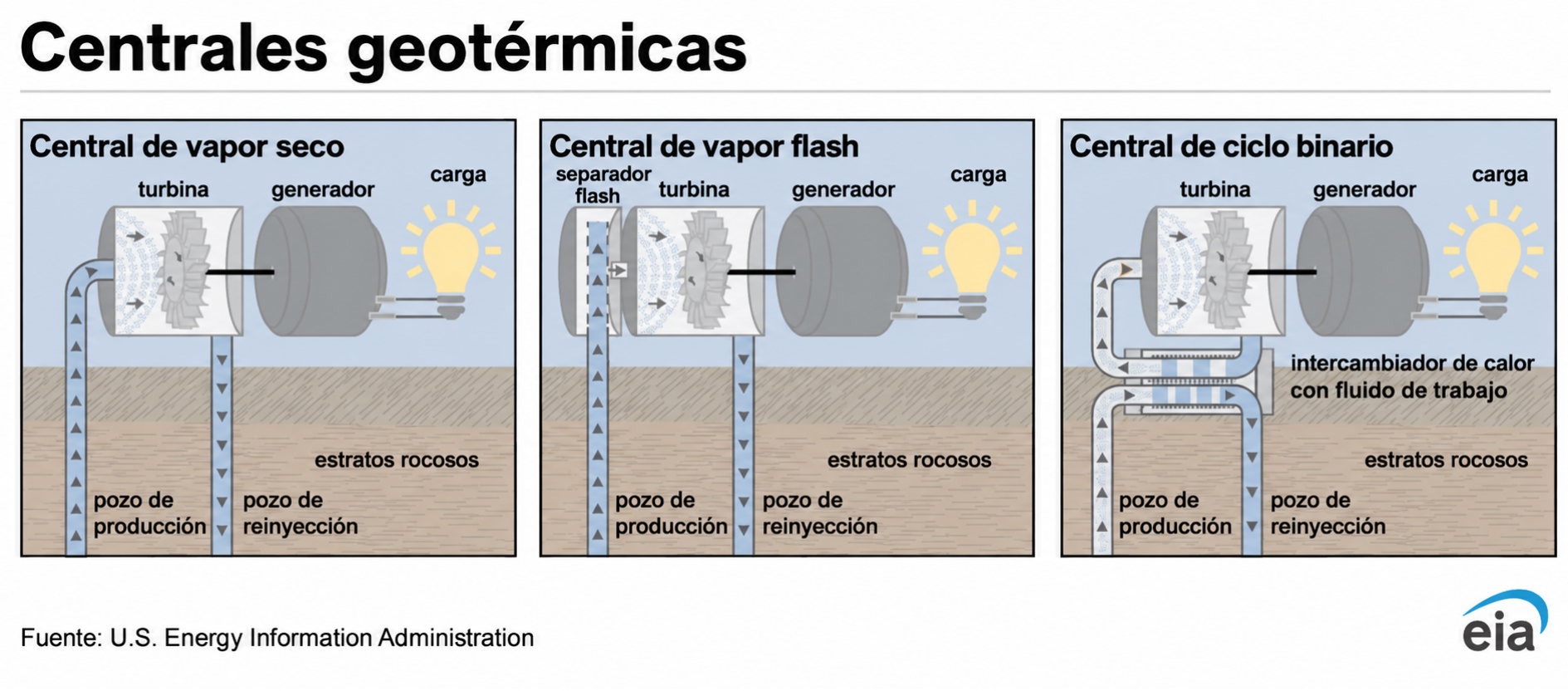


Figura 111

Izquierda: vapor directo. Centro: despresurización y separación de vapor (*flash*). Derecha: ciclo binario; un intercambiador transfiere energía a otro fluido, que recorre la turbina. El fluido geotérmico y el de trabajo permanecen separados en el ciclo binario.

U.S. Energy Information Administration (EIA), rótulos traducidos al castellano. U.S. Energy Information Administration.

178.- Cierre del tema: Generación a media y baja temperatura

1. **Con el mismo calor disponible y el mismo ambiente, ¿qué cambia si baja la temperatura de la fuente?**
2. ¿Por qué un ciclo binario puede ser útil aunque su rendimiento sea menor que el de una central de alta temperatura?

La pregunta destacada se analiza en clase; la otra queda para revisión y consulta.

179.- **Sección 11:** Potencia, economía y sociedades

Integración de las secciones anteriores: no se asigna aquí un tema nuevo del programa.

1. El motor produce potencia generando entropía y destruyendo parte de la disponibilidad que recibe.
2. El costo del combustible y de la inversión hace que el óptimo económico deba distinguirse del máximo de potencia física.
3. Las sociedades encadenan muchas de estas transformaciones: recursos, conversión, distribución, servicios y disipación.

Los casos siguientes completan el argumento del curso y quedan como material de estudio aunque no se expongan todas las láminas durante las seis horas de clase.

Tiempo de la sección: aproximadamente 21,8 minutos, incluidos síntesis y cierre.

180.- Del motor a la sociedad: conservar energía y perder disponibilidad

- Una sociedad no es una sola máquina: es una red de captación, almacenamiento, transformación, transporte y utilización de recursos.
- La energía consumida no desaparece. En el proceso se degradan recursos capaces de producir trabajo y se transfieren calor y materia al entorno.
- Importan a la vez la potencia disponible y los servicios obtenidos: electricidad, calor a distintos niveles térmicos, movimiento, alimentos, materiales e información.
- Las inversiones en máquinas, redes y conocimiento cambian qué transformaciones son posibles. Las decisiones económicas seleccionan dentro de esas posibilidades físicas.
- Los diagramas siguientes amplían la frontera: de un motor a un ecosistema y de una central al metabolismo de una sociedad.

Referencia: Wall (1986); de Rosnay (1977); Odum (1980).

181.- Odum: el ecosistema como red de transformaciones

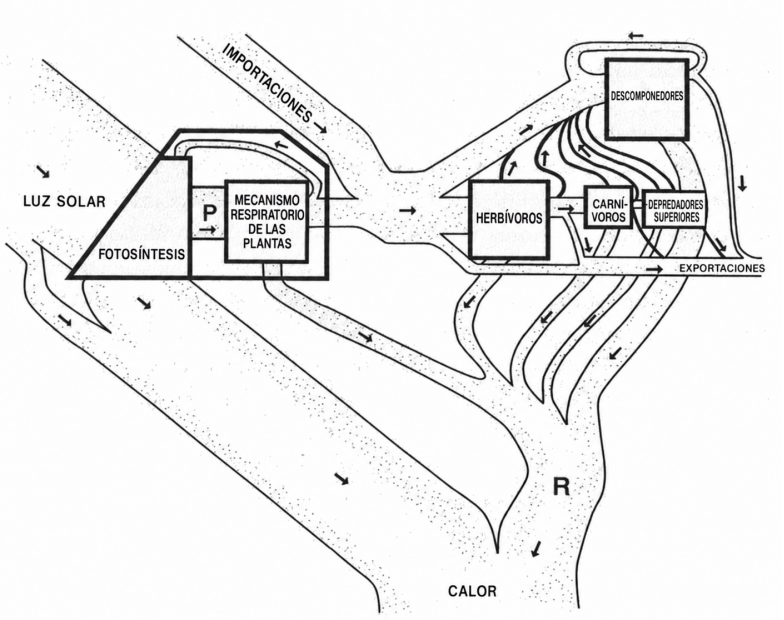


Figura 112

La radiación solar alimenta la producción primaria; productores, consumidores y descomponedores sostienen flujos e intercambios. La materia puede recircular, mientras la utilización de energía implica disipación hacia el entorno. Un ciclo de materia no es una recuperación completa de exergía.

Seguir las flechas permite distinguir captación, mantenimiento, transferencias y salidas. Los organismos mantienen su organización mediante flujos: que una parte conserve su estructura no significa que no genere entropía ni que esté aislada.

Lotka: la selección tiende a favorecer sistemas que aprovechan mayor flujo de energía disponible, dentro de sus restricciones. Odum desarrolló esta idea como *principio de máxima potencia* ecológica; no es una ley termodinámica universal.

Referencias: Lotka (1925, 1922); Odum (1980).

182.- [E] El Macroscopio: fuentes, transformaciones y usos sociales

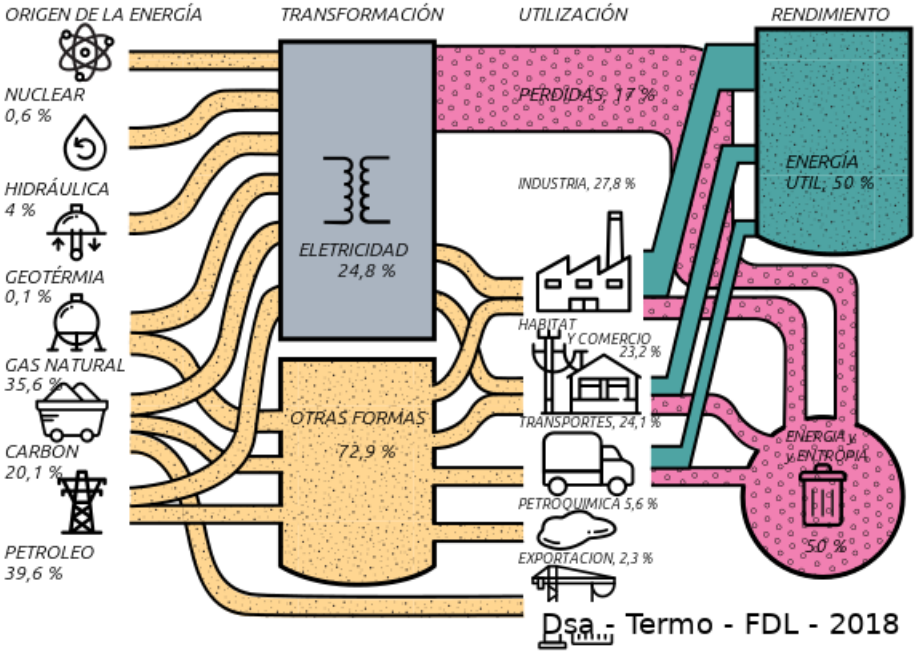


Figura 113

Esquema histórico de flujos de energía de EE.UU., 1972, según la atribución del apunte a *El Macroscopio*. Sus porcentajes describen ese caso: no son el balance actual ni una regla universal de rendimiento. El rótulo gráfico «energía y entropía» se lee como disipación; energía y entropía tienen unidades distintas y no se suman.

Referencia: de Rosnay (1977).

183.- El Macroscopio: flujos físicos y circulación monetaria

- El esquema conecta producción, consumo, trabajo, bienes, servicios y reservas de capital y conocimiento.
- Las flechas blancas representan flujos físicos y trabajo; las negras, pagos en sentido contrario.
- El dinero puede circular; la energía utilizada termina transfiriéndose al entorno con menor disponibilidad para producir trabajo.
- No hay conversión universal entre dinero, energía y exergía. El diagrama muestra flujos físicos y monetarios; para evaluar bienestar y decisiones se necesitan además precios, instituciones, servicios y distribución de beneficios y costos.

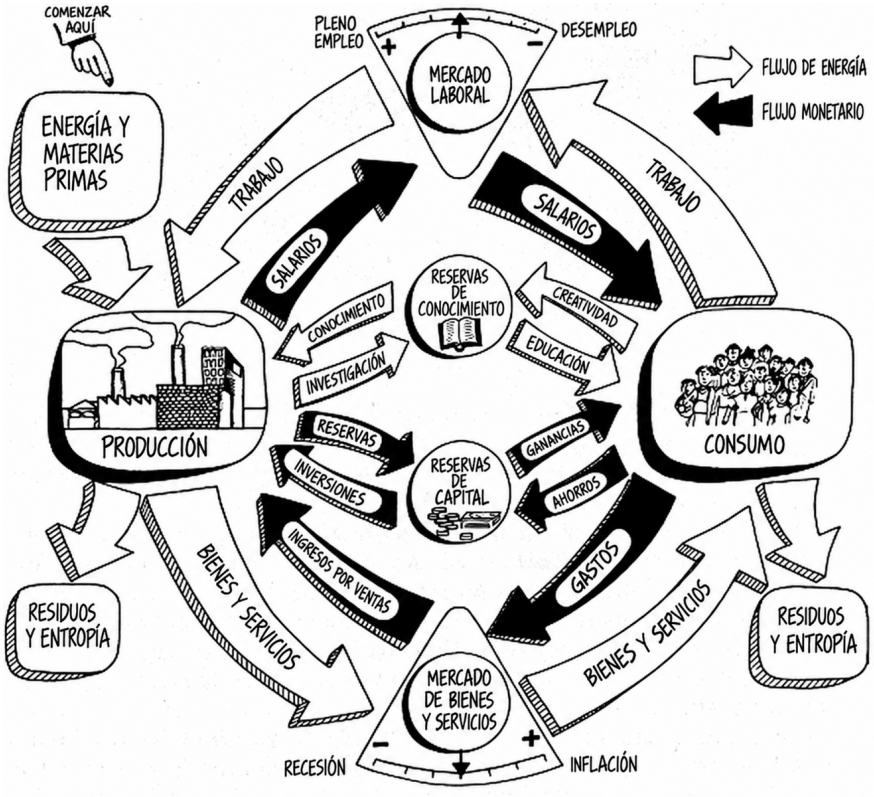


Figura 114

Joël de Rosnay, *The Macroscope*, capítulo 1, figura 16. Dibujo de la edición digital de Principia Cybernetica, con rótulos traducidos al castellano de Rosnay (1979).

184.- Cómo leer los diagramas del Macroscopio

1. A la izquierda se identifican fuentes o recursos, no todavía los servicios recibidos por la población.
2. La transformación y las redes cambian la forma y la disponibilidad de la energía: electricidad, combustibles y calor.
3. Industria, transporte y edificios la utilizan para servicios diferentes. Debe definirse qué se llama «útil» en cada uno.
4. La disipación no es desaparición de energía: es parte de la degradación de disponibilidad y de las transferencias al ambiente.

Pregunta económica: ¿conviene aumentar suministro, mejorar conversión, reducir pérdidas o cambiar el servicio y su demanda?

Referencia: de Rosnay (1977).

185.- Exergía y sociedad: Suecia en 1920

- Caso histórico utilizado por Wall: recursos a la izquierda y usos finales a la derecha.
- Se reconocen bosques, cultivos, fuerza hidráulica, minerales y combustibles, junto a calefacción, alimentos, electricidad, transporte y producción industrial.
- No es una sociedad «sin máquinas» ni un estado natural: ya combina flujos renovables con reservas y equipos de conversión.
- La comparación con 1975 permite preguntar qué recursos y qué cadenas de transformación cambian, además de cuánto aumenta la utilización.

Referencia: Wall (1986).

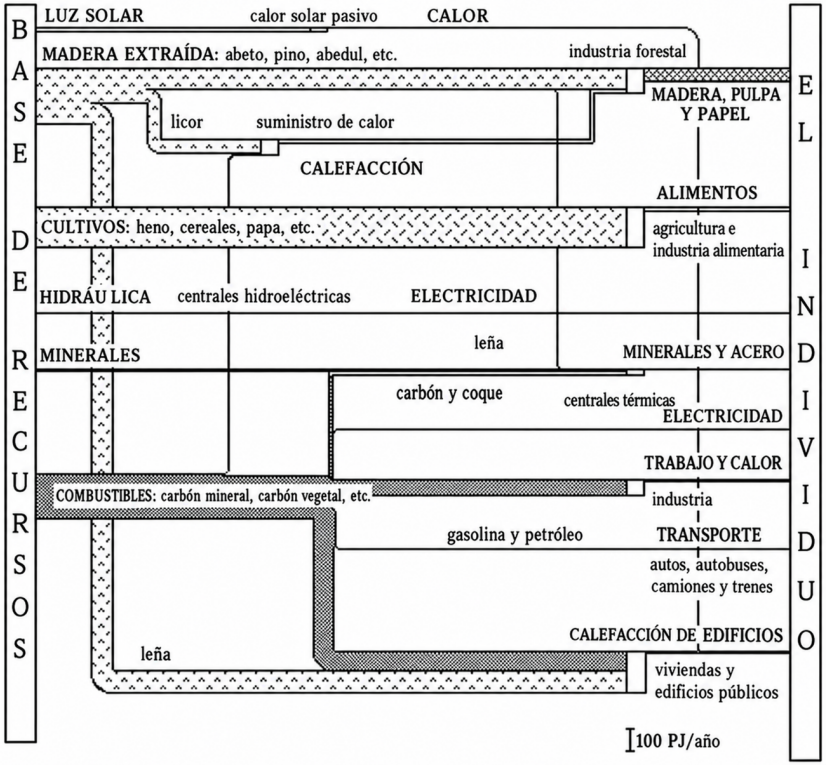


Figura 115

Diagrama de exergía de Suecia, 1920. Escala gráfica: 100 PJ/año. Rótulos traducidos al castellano a partir de la figura de los apuntes.

186.- Exergía y sociedad: Suecia en 1975

- En esta comparación histórica aumentan el papel de combustibles, refinerías, redes eléctricas y conversiones intermedias.
- Una cadena más extensa permite nuevos servicios, pero también introduce transformaciones donde se destruye disponibilidad.
- Hay que distinguir recursos primarios, conversiones y usos finales para no contar dos veces la misma exergía.
- «Más moderna» se refiere aquí a 1975 respecto de 1920; el gráfico no representa el sistema energético de 2026.

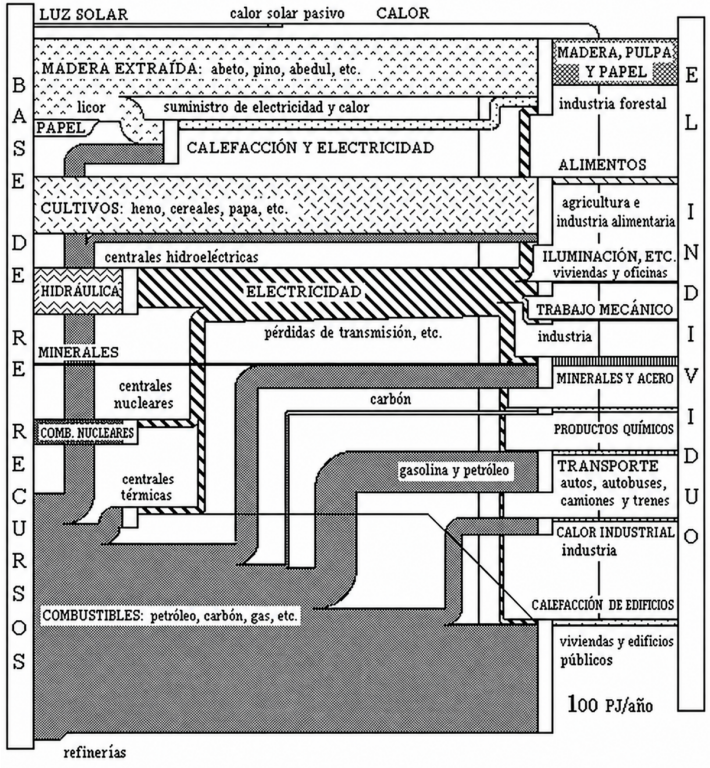


Figura 116

Diagrama de exergía de Suecia, 1975. Rótulos traducidos; escala gráfica: 100 PJ/año. Comparar recorridos y destinos.

Referencia: Wall (1986).

187.- Comparar sociedades: qué nos dicen los diagramas

Mirada	Lo que permite seguir	Pregunta que deja abierta
Odum	Captación, redes tróficas, mantenimiento y disipación del ecosistema.	¿Qué flujos sostienen la organización y la reproducción?
Macroscopio	Fuentes, conversiones y usos de energía en una sociedad.	¿Qué servicios obtenemos y dónde conviene intervenir?
Wall	Recorridos de exergía entre recursos y usos finales.	¿Dónde se destruye disponibilidad y qué recursos se degradan?
Economía	Costos, ingresos, inversión y horizonte temporal.	¿Qué punto de operación y qué infraestructura se eligen?

Un mayor consumo total no demuestra por sí solo mayor bienestar ni menor eficiencia. Los diagramas delimitan posibilidades físicas, pero no fijan prioridades sociales. Comparar exige explicitar población, servicios, distribución de beneficios y costos, impactos ambientales, ambiente de referencia, fronteras y fechas.

Referencia: Odum (1980); de Rosnay (1977); Wall (1986).

188.- [E] La cuestión central del curso

La termodinámica fija restricciones; los objetivos deben explicitarse.

1. La primera ley permite contabilizar la energía y construir operativamente energía interna y calor.
2. La segunda distingue conservar energía de conservar su capacidad de producir trabajo. Fijado el ambiente de referencia, la destrucción de exergía y la generación de entropía cuantifican la misma irreversibilidad: $E_{\text{destruida}} = T_0 S_g$. No son la misma magnitud, pero expresan el mismo contenido físico en este análisis. Hablar de exergía como capacidad de producir trabajo puede ser más fácil de explicar a responsables políticos y a la sociedad.
3. En el modelo térmico estudiado, la transferencia con diferencia finita de temperaturas genera entropía mientras se produce potencia. El máximo rendimiento, el máximo trabajo y la máxima potencia responden a preguntas distintas.
4. El costo del combustible, la inversión y los servicios requeridos influyen en dónde se opera y qué máquinas se construyen.
5. Las sociedades modernas organizan redes de esas transformaciones. Estudiar solo el balance de una máquina deja fuera una parte central del problema.

Para discutir: ¿qué debe maximizarse o minimizarse, para quién, con qué recursos y en qué horizonte temporal? La termodinámica establece restricciones físicas; no elige por sí sola los objetivos económicos ni las prioridades sociales. Debemos explicitar los servicios buscados y quién recibe los beneficios y asume los costos.

Referencia: De Vos (1992, 1995); Wall (1986).

189.- Cierre del tema: Potencia, economía y sociedad

1. **¿Por qué la máxima potencia, el máximo rendimiento y el mayor margen económico pueden seleccionar puntos distintos?**

2. ¿Qué servicio final y qué frontera habría que fijar antes de comparar dos sistemas energéticos?

La pregunta destacada se analiza en clase; la otra queda para revisión y consulta.

190.- Preguntas de cierre de la clase 3

1. **Seguí el agua por bomba, caldera, turbina y condensador: ¿dónde recibe calor y dónde entrega trabajo?**
2. ¿Cómo distinguirías una limitación termodinámica de una limitación de transferencia o de costo?
3. Para una necesidad energética concreta, ¿qué compararías antes de elegir generación eléctrica, calor directo o bomba de calor?

La pregunta destacada guía el cierre de clase; las otras quedan como alternativas de consulta.

191.- Cinco preguntas para cerrar el curso

Al terminar, ¿podemos explicar con nuestras palabras... ?

1. **¿Por qué conservar energía no garantiza poder aprovecharla?**
2. ¿Por qué una máquina de mayor rendimiento puede entregar menos potencia?
3. ¿Por qué las piletas quedan más frías cuando producen trabajo?
4. ¿Qué condiciones deben fijarse antes de hablar de un «óptimo»?
5. ¿Por qué en algunos sistemas de energía solar térmica puede convenir trabajar a menor temperatura, aunque eso reduzca el rendimiento de Carnot?

Anexo B: Referencias

- W. Ross Ashby. *Introducción a la Cibernética*. Chapman & Hall, London, 1956. http://pespmc1.vub.ac.be/books/IntroCyb.pdf http://ccc.inaoep.mx/Reportes/CCC-05-003.pdf.
- Peter Atkins and Julio de Paula. *Physical Chemistry*. Oxford University Press, 9 edition, 2010.
- A. Bejan. Entropy generation minimization: The new thermodynamics of finite-size devices and finite-time processes. *Physics Journal of Applied Physics*, 1996a. DOI:10.1063/1.362674CorpusID:121555598.
- Adrian Bejan. *Entropy Generation Minimization*. CRC Press, 1996b. ISBN 0849396514.
- Adrian Bejan. *Advanced Engineering Thermodynamics*. John Wiley & Sons, 3 edition, 2006. ISBN 9780471677635.
- Ugo Besson. The distinction between heat and work: an approach based on a classical mechanical model. *Eur. J. Phys.*, 24(245), 2003. http://iopscience.iop.org/0143-0807/24/3/303.
- BGH. Split inverter frío/calor bsi37wcnx, 2026. Precio publicado en octubre de 2026 y capacidad nominal en calor. https://www.bgh.com.ar/aire-acondicionado-frio-calor-bgh-split-inverter-3139f-bsi37wcnx-1/p?idsku=873.
- Herbert B. Callen. *Thermodynamics, an introduction to the physical theories of equilibrium thermostatistics and irreversible thermodynamics*. Wiley, 1963.
- Herbert B. Callen. *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics*. Wiley, 2 edition, 1985.
- S. Carnot. Reflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres a developper cette puissance., 1824. Fox, R. (ed.), Libraire Philosophique J. Vrin, Paris 1978, también en On the Motive Power of Heat, American Society of Mechanical Engineers, 1943.

Referencias

- Yunus A. Çengel and Michael A. Boles. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill, 7 edition, 2011. ISBN 9780073529325.
- Yunus A. Cengel and Michel A. Boles. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill, New York, 5^{th} edition, 2006.
- P. Chambadal. Les centrales nucléaires, 1957.
- Clickie. Precios estimativos de gasista matriculado, 2026. Referencia general, no presupuesto para Salta. `https://clickie.com.ar/precios/gasista`.
- Cronograma. Cronograma tentativo: semana del 26 al 30 de octubre de 2026. Imagen proporcionada para estos apuntes, 2026. Referencia de los colores y la distribución de las clases. Imagen local.
- F. L. Curzon and B. Ahlborn. Efficiency of a Carnot engine at maximum power output. *American Journal of Physics*, 43:22–24, 1975. `http://ajp.aapt.org/resource/1/ajpias/v43/i1/p22_s1`.
- Comisión Federal de Electricidad. Introducción a una central Termoeléctrica. Turbina de vapor, 1999. `http://www.youtube.com/watch?v=VbFFxtdLdxk`.
- S. R. de Groot and P. Mazur. *Non-Equilibrium Thermodynamics*. Dover, 1962.
- Joel de Rosnay. *El Macroscopio*. AC, 1977.
- Joël de Rosnay. *The Macroscope: A New World Scientific System*. Harper & Row, 1979. ISBN 0060110295. Edición inglesa de *Le Macroscope* (1975). Edición digital autorizada de Principia Cybernetica: `https://pespmc1.vub.ac.be/macroscope/`. Capítulo 1, figura 16: la máquina económica.
- Alexis De Vos. *Endoreversible thermodynamics of solar energy conversion*. Oxford Science Publications, U.K., 1992.

Referencias

- Alexis De Vos. Endoreversible Thermoeconomics. *Energy Convers. Mgmt.*, 36(1):1–5, 1995. doi: 10.1016/0196-8904(94)00040-7.
- Howard DeVoe. *Thermodynamics and Chemistry*. Devoe, Howard, 2 edition, 2020. URL https://www2.chem.umd.edu/thermobook/v10-screen.pdf.
- Pedro Fernández Diez. XII. Ciclos de las máquinas térmicas, 2008. http://libros.redsauce.net/, http://es.libros.redsauce.net/index.php?folderID=3, http://es.libros.redsauce.net/AppController/commands_RSHandBook/utilities/getScaledPicture.php?imageID=3&w=48&h=48&adj=d.
- ENARGAS. Régimen de zona fría, 2026. Condiciones y alcance del beneficio. https://www.enargas.gob.ar/secciones/regimenes-de-beneficios/regimen-zona-fria.php.
- Ignacio Alberto Espinosa Sosa. Minimización de la entropía generada y la exergía destruida en ciclos termodinámicos. Master's thesis, Departamento de Ingeniería Química y Alimentos, Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas Puebla., Cholula, Mexico, 2003. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/espinosa_s_ia/capitulo6.pdf.
- Enrico Fermi. *Thermodynamics*. Dover Publications, 1956. ISBN 9780486603612. https://store.doverpublications.com/products/9780486603612.
- M. Gea. Modelo Termodinámico de un acumulador térmico de agua presurizada para amortiguación de transitorios en un concentrador solar Fresnel lineal, 2011. http://www.asades.org.ar/modulos/averma/trabajos/2011/2011-t008-a014.pdf.

Referencias

- Herbert Goldstein, Charles Poole, and John Safko. *Classical Mechanics*. Addison-Wesley, 3 edition, 2002. ISBN 978-0201657029.
- Elias P. Gyftopoulos and Gian Paolo Beretta. *Thermodynamics Foundations and applications*. Dover, 2005.
- Katsumoto Ikeda. Background theory and concepts of illumination design. Ansys Optics, Zemax OpticStudio. Sección sobre étendue. `https://optics.ansys.com/hc/en-us/articles/42661769138451-Background-theory-and-concepts-of-illumination-design`.
- Instituto de Física Teórica IFT. ¿qué es la energía? | de la vis viva a la vis tenebris, 2018. Charla de César Gómez en la Residencia de Estudiantes, ciclo del IFT, 8 de noviembre de 2017. `https://www.youtube.com/watch?v=96XkoB4v_dE`.
- Oscar Jaimovich. Máquinas Energéticas, Cap. 18: Generadores de vapor, 2008. `http://materias.fi.uba.ar/6737/pdf/Cap18.pdf`.
- Reiner Kummel. *The Second Law of Economics*. Springer, 2011.
- L. D. Landau and E. M. Lifshitz. *Statistical Physics, Part 1*. Butterworth-Heinemann, 3 edition, 1980. ISBN 978-0750626397.
- Elliott H. Lieb and Jakob Yngvason. The physics and mathematics of the second law of thermodynamics. *Physics Reports*, 310(1):1–96, 1999. doi: 10.1016/S0370-1573(98)00082-9.
- Liliana S.R.L. Verticalefactor infrarrojo cv026: manual de instrucciones. Potencia 600/1200 W. Manual del fabricante conservado por un distribuidor. Consulta: 2026-10-24. `https://belgranohogar.com.ar/uploads/products/documents/CV026_MI-Garantia_v7-web.pdf`.
- Alfred J. Lotka. Contribution to the energetics of evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 8(6):147–151, 1922. doi: 10.1073/pnas.8.6.147. `https://doi.org/10.1073/pnas.8.6.147`.

Referencias

- Alfred J. Lotka. *Elements of Physical Biology*. Williams & Wilkins, Baltimore, 1925. https://wellcomecollection.org/works/ck36g9y8.
- Keith Lovegrove and Wes Stein, editors. *Concentrating Solar Power Technology: Principles, Developments and Applications*. Woodhead Publishing, 2012. Sección 2.3.1: límite de concentración impuesto por la segunda ley.
- Diego Martínez Plaza. Energía solar concentrada: el Sol desde otro punto de vista, 2012. http://www.ciccp.es/revistaIT/textos/articulo_frm.asp?id=545.
- Massachusetts Institute of Technology. Combined first and second law expressions; muddiest points on chapter 5. Unified Engineering, Thermodynamics. https://web.mit.edu/16.unified/www/SPRING/propulsion/notes/node38.html; https://web.mit.edu/16.unified/OldFiles/www/SPRING/thermodynamics/notes/node41.html.
- James Clerk Maxwell. Theory of heat, 1871. http://www.ebooksread.com/authors-eng/james-clerk-maxwell/theory-of-heat-hci/page-24-theory-of-heat-hci.shtml.
- McZusatz. P-v-t diagram (water), versión española. Wikimedia Commons. Diagrama vectorial, 2013. Licencia CC BY-SA 3.0. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:P-V-T_Diagram_(Water).es.svg.
- Mercado Libre. Calefactor de tiro balanceado calden tb 5.0, 2026a. Precio publicado al consultar en octubre de 2026. https://www.mercadolibre.com.ar/calefactor-tiro-balanceado-calden-tb-50-5000kcalh-negro-gas-natural/p/MLA23966014.
- Mercado Libre. Estufa eléctrica herbi de cuarzo de 1200 w, 2026b. Precio unitario publicado al consultar en octubre de 2026. https://www.mercadolibre.com.ar/estufa-electrica-herbi-horizontal-cuarzo-1200w-con-soporte-pared/p/MLA21232997.

Referencias

- Mercado Libre. Servicio de instalación de aire acondicionado, 2026c. Referencia de precio fuera de Salta, no presupuesto local. https://servicio.mercadolibre.com.ar/MLA-1856038311-instalacion-reparacion-aire-acondicionado-tenemos-matricula-_JM.
- Derek Muller. Pocos entienden esto de la física moderna. . . . Veritasium en español. Video, 3 de septiembre de 2023, 2023. https://www.youtube.com/watch?v=hRLMIFZWqnw. Original: *The Most Misunderstood Concept in Physics*, https://www.youtube.com/watch?v=DxL2HoqLbyA.
- National Renewable Energy Laboratory. Annual technology baseline: Equations and variables. Electricity, edición 2024b, 2024. Factor de recuperación del capital y costo de la energía. https://atb.nrel.gov/electricity/2024b/equations_%26_variables.
- I. I. Novikov. The Efficiency of Atomic Power Stations. *Journal Nuclear Energy II*, 7:125–128, 1958. Translated from Atomnaya Energiya, 3 (1957), 409.
- Howard T. Odum. *Ambiente Energía y Sociedad*. Blume Ecologia, 1980. ISBN 84-7031-237-5.
- OpenStax. Phase changes. University Physics, Volume 2, sección 1.5, figura 1.12, a. Figura adaptada con rótulos traducidos al castellano. CC BY-NC-SA 4.0. https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/1-5-phase-changes.
- OpenStax. Plane electromagnetic waves. University Physics, Volume 2, sección 16.2, figura 16.8, b. Imagen sin modificaciones. CC BY-NC-SA 4.0. https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/16-2-plane-electromagnetic-waves.
- OpenStax. Energy carried by electromagnetic waves. University Physics, Volume 2, sección 16.3, c. https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/16-3-energy-carried-by-electromagnetic-waves.

Referencias

- Pampa Energía. Central térmica güemes: datos técnicos y generación. Relación con inversores; consulta del 24 de octubre de 2026, 2026. Generación anual informada: 2025. https://ri.pampa.com/termica/central-termica-guemes-s-a-guemes-o-ctg/.
- RAFA S.A. Central térmica güemes: ampliación 2008–2010. Galería de proyectos completados; consulta del 24 de octubre de 2026. Fuente de la fotografía exterior. https://www.rafasa.com/es/proyectos/completados/central-termica-guemes.
- Norman F. Ramsey. Thermodynamics and statistical mechanics at negative absolute temperatures. *Physical Review*, 103:20–28, 1956. doi: 10.1103/PhysRev.103.20. https://doi.org/10.1103/PhysRev.103.20.
- Rinnai Australia. Energysaver 309ft gas flued: specifications. Gas máximo 13 MJ/h; salida térmica 2,9 kW; auxiliar eléctrico a máxima carga 42 W. Consulta: 2026-10-24. https://www.rinnai.com.au/trade/catalogue/products/energysaver-gas-flued/309ft.
- D. Saravia. *TERMODINÁMICA Vol a. Construyendo ecuaciones desde conceptos. PRELIMINAR*. UNSa, 2020. http://termo.red/libro.
- Diego Saravia and ChatGPT 5.3. Choques moleculares y distribución de maxwell. Simulación interactiva, versión 9, 2026. https://termo.red/Maxwell9.html.
- Diego Saravia Alía. Transformaciones energéticas: Presentación, programa y bibliografía. Apuntes del dictado teórico de Termodinámica. Libro 01. Universidad Nacional de Salta, 2026a. PDF local.
- Diego Saravia Alía. Transformaciones energéticas: Sistemas materiales. Apuntes del dictado teórico de Termodinámica. Libro 02. Universidad Nacional de Salta, 2026b. PDF local.
- Diego Saravia Alía. Transformaciones energéticas: Definiciones y postulados. Apuntes del dictado teórico de Termodinámica. Libro 02B. Universidad Nacional de Salta, 2026c. PDF local.

Referencias

- Diego Saravia Alía. Transformaciones energéticas: Energía. Apuntes del dictado teórico de Termodinámica. Libro 03. Universidad Nacional de Salta, 2026d. PDF local.
- Diego Saravia Alía. Transformaciones energéticas: Entropía, equilibrio y estabilidad. Apuntes del dictado teórico de Termodinámica. Libro 04. Universidad Nacional de Salta, 2026e. PDF local.
- Diego Saravia Alía. Transformaciones energéticas: Sistemas típicos, sustancias reales y fases. Apuntes del dictado teórico de Termodinámica. Libro 05. Universidad Nacional de Salta, 2026f. PDF local.
- Diego Saravia Alía. Transformaciones energéticas: Máquinas térmicas, exergía y máxima potencia. Apuntes del dictado teórico de Termodinámica. Libro 06. Universidad Nacional de Salta, 2026g. PDF local.
- Diego Saravia Alía. Transformaciones energéticas: Sistemas abiertos, entalpía y balances. Apuntes del dictado teórico de Termodinámica. Libro 08. Universidad Nacional de Salta, 2026h. PDF local.
- Diego Saravia Alía. Transformaciones energéticas: Componentes de centrales térmicas. Apuntes del dictado teórico de Termodinámica. Libro 09. Universidad Nacional de Salta, 2026i. PDF local.
- Diego Saravia Alía. Transformaciones energéticas: Centrales térmicas y ciclos. Apuntes del dictado teórico de Termodinámica. Libro 10. Universidad Nacional de Salta, 2026j. PDF local.
- Diego Saravia Alía. Material del curso de termodinámica. termo.red. Acceso para estudiantes y docentes, s. f.a. `https://termo.red/private`.
- Diego Saravia Alía. Termodinámica: Pdf de los videos de apoyo. termo.red, s. f.b. `https://termo.red/libro/pdfvideo`. Consulta: 23 de octubre de 2026.
- Diego Saravia Alía. Termodinámica. volumen a: Construyendo ecuaciones desde conceptos. presentación. termo.red, s. f.c. `https://termo.red/libro/SaraviaTermoPrese.pdf`. Consulta: 23 de octubre de 2026.

Referencias

- Diego Saravia Alía. Curso de termodinámica a. Serie de videos en YouTube, s. f.d. https://www.youtube.com/playlist?list=PLpuRdfTDjEEop1LKvdJXdK3QE0I_0Wzbq. Consulta: 23 de octubre de 2026.
- Ricardo Siri. Física Térmica, 2012. http://www.fing.edu.uy/if/cursos/fister/modulos/ciclos/clases/Rankine.pdf.
- Surrey. Split surrey inverter smart: especificaciones del conjunto 553icq0901f. Capacidad de calefacción 2,65 kW; consumo eléctrico en calor 0,77 kW. Consulta: 2026-10-24. https://www.surrey.com.ar/miniwebs/inverter_smart/.
- tablasvapor. Propiedades termodinámicas de: vapor de agua húmedo, vapor de agua recalentado, refrigerantes freon 12 y 22, SO, vapor de mercurio y vapor de amoníaco., 2009. http://termo.red/private/TablasYDiagramasTermodinamicos.pdf, http://www.indubel.com.ar/pdf/gases/refrigerantes.pdf.
- Kevin E. Trenberth, John T. Fasullo, and Jeffrey Kiehl. Earth's global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(3):311–324, 2009. doi: 10.1175/2008BAMS2634.1. https://doi.org/10.1175/2008BAMS2634.1.
- Universidad Nacional de Misiones, Facultad de Ingeniería. Tablas y gráficos: Máquinas e instalaciones térmicas 1. Versión 2.0, tabla de vapor y agua saturados según la presión, 2012. Filas de 22 a 27 bar. https://aulavirtual.fio.unam.edu.ar/pluginfile.php/165416/mod_resource/content/1/Tablas%20y%20diagramas%20V2_2012.pdf.
- Universidad Nacional de Salta. Transformaciones energéticas: programa y cronograma de clases. Facultad de Ciencias Exactas. Especialización y Maestría en Energías Renovables, 2026. Documento presentado el 28 de septiembre de 2026. Cronograma tentativo, p. 4. Documento local.

Referencias

- U.S. Energy Information Administration. Geothermal power plants. Diagrama de centrales de vapor directo, flash y ciclo binario, con rótulos traducidos al castellano. https://www.eia.gov/energyexplained/geothermal/geothermal-power-plants.php.
- Göran Wall. *Exergy. A useful concept*. Göteborg, 1986. ISBN 91-7032-269-4. ISBN 91-7032-269-4. Göteborg. Physical Resource Theory Group, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden. http://www.exergy.se/goran/thesis/.
- Wikipedia. Condensador, 2011. http://es.wikipedia.org/wiki/Condensador_%28termodin%C3%A1mica%29.
- Wikipedia. Condensador de superficie, 2013. http://pt.wikipedia.org/wiki/Condensador_de_superf%C3%ADcie.
- Mark Zemansky and Richard Dittman. *Calor y Termodinámica*. McGraw - Hill, 1981. ISBN 968-451-631-2.

Anexo C: Índice de palabras

adiabático, 59
agitador, 59
agua
  depósitos finitos, 139
  superficie PVT, 160
aislamiento, 34
  efectos a distancia, 34
amortización, 134
atmósfera
  balance energético, 155

balance de energía, 152
balance de entropía, 77, 79, 154
balance de masa, 152
bienestar, 203
bomba, 179
bomba de alimentación, 175
bomba de calor, 98, 102–104

caldera, 172
caldera acuotubular, 172
calefacción
  comparación, 104
  comparación económica, 106
  costo a cinco años, 105
  incertidumbre económica, 107
calentadores de alimentación, 186
calor, 56, 74, 150
  definición, 55
  dependencia del proceso, 57
capacidad calorífica, 83
capital, 199
carga, 114, 115, 122
Carnot, 128
Carnot, 91
Carnot, ciclo, 91
Carnot, máquina, 91
central termoeléctrica, 171, 175
central térmica, 131
Central Térmica Güemes, 176
centrales térmicas
  Salta, 176
cibernética, 27
ciclo, 40, 93
ciclo de Carnot, 91, 94
  diagramas, 92
ciclo orgánico de Rankine, 190

Índice de palabras

ciclo Rankine, 175, 178, 179, 183
  comparación de mejoras, 184
  mejoras, 186
  recalentamiento, 181
  recalentamiento y regeneración, 185
  regeneración, 182
  sobrecalentamiento, 180
combustible, 189
  costo, 131–133
concentración solar, 87
condensador, 171
conservación de energía, 103
conservación de la energía, 55
convención de signos, 53
conversión electromecánica, 50
COP, 101, 103
Curzon–Ahlborn, 126, 128
  centrales reales, 129
  fórmula de raíces, 127
de Rosnay, 198
demanda, 200
demonio de Maxwell, 37
derivadas parciales, 73
diagrama temperatura-entropía, 178
disipación, 197
economía, 134
ecosistema, 197
ecuación de Gibbs, 74
eficiencia, 134
energía, 44, 46, 61, 62, 65–69, 80
energía
  conservación, 45
  conservación local, 44
  formas, 49
  usos sociales, 198
energía cinética, 47
energía cuántica, 49
energía de Gibbs, 161, 162
energía electromagnética, 50
energía en reposo, 49
energía interna, 52, 56, 58
  construcción, 53, 57
  estado de referencia, 54
  representación, 73

Índice de palabras

energía mecánica, 48
energía oscura, 49
energía potencial, 48
energía química, 50
energía solar, 189
entalpía, 149–151
entorno, 28, 30
entropía, 44, 61, 62, 65–69, 80
entropía
  aditividad, 61
  calor reversible, 66
  construcción, 64
  mezcla térmica, 139
  máximo, 162
  representación, 73
  reversibilidad, 61
entropía transferida, 94
equilibrio, 36, 39
  entre fases, 161
  estabilidad, 38
equilibrio de fases, 162
equilibrio local, 39
equilibrio térmico, 36
equivalencia adiabática, 64
estabilidad, 38
estado de equilibrio, 31
estado estacionario, 39, 148, 154, 197
étendue, 87
exergía, 118, 196, 203
  calefacción, 104
  depósitos de agua, 140
  destrucción, 120
  Suecia 1920, 201
  Suecia 1975, 202
exergía destruida, 117, 119, 128
expansión cosmológica, 45
fases, 158
  coexistencia, 162
  diagrama tridimensional, 160
  envolvente cóncava, 164
flujo, 148
flujos monetarios, 199
foco caliente, 102, 112
foco frío, 102
frontera, 28

Índice de palabras

frontera del sistema, 203
función de estado, 54

gas, 158
gas ideal, 83, 91, 93
generación de entropía, 77, 78, 119, 130
  tabla, 136
generación en bajas temperaturas, 190, 191
generación en medias temperaturas, 189
generador, 98, 100
generador de vapor, 172
generador eléctrico, 170
geotermia, 191
  usos según temperatura, 192
Gouy–Stodola, 118, 119

heladera, 98, 101

información, 37
inversión, 134, 135
  criterio marginal, 138
irreversibilidad, 40, 59, 78, 122

Joule, 57, 58, 74

Lotka, 197
líquido, 158

macroestado, 67
Macroscopio, 198–200
magnitud de camino, 31
marco de referencia inercial, 34
masa
  conservación, 43
  energía, 45
masa de control, 29
mecánica de fluidos, 39
media geométrica, 127
medios continuos, 39
mezcla agua-vapor, 165
microestado, 67
modelo, 114
motor, 100
máquina de Carnot, 91
máquina endorreversible, 110
máquina térmica, 91, 95, 98, 111
máxima potencia, 121–123

Odum, 197
optimización, 110, 115, 121, 123, 204

Índice de palabras

ORC, 190
par, 111, 114
pared activa, 37
pared adiabática, 32
pared aislante, 32
pared diatérmica, 32
pared móvil, 32
permeabilidad, 32
pistón, 91
  reflectante, 86
plasma, 158
potencia, 111, 112
  rendimiento, 126
potencia máxima, 22, 130, 133
  tabla de estados, 136
potencia útil, 135
potencial químico, 75, 161
Poynting, vector de, 50
precio de la energía, 132
presión de radiación, 86
primera ley, 46, 52, 55, 79
principio de máxima potencia, 197
proceso, 31
proceso adiabático, 84
proceso cuasiestático, 31
proceso isobárico, 84, 150
proceso isotermo, 84
proceso isócoro, 84
producción primaria, 197
punto crítico, 160
punto triple, 160
radiación, 29
  entropía, 87
  sistema termodinámico, 86
radiación terrestre, 155
radiancia, 87
reacciones químicas, 43, 50
recalentamiento, 183, 186
refrigerador, 101
regeneración, 183, 186
relación fundamental, 73, 74, 76
  generalización, 75
rendimiento, 95, 100, 121, 179
  calefacción, 104
  comparación histórica, 129

Índice de palabras

rendimiento de Carnot, 96, 127
rentabilidad marginal, 135
resistencia térmica, 110, 112
  ejemplo numérico, 113
reversibilidad, 40, 59
rozamiento, 48

saturación, 165
segunda ley, 78, 79
servicios energéticos, 200
sistema, 27, 28
sistema abierto, 34, 151, 154
sistema aislado, 30, 34
sistema cerrado, 34
sistema material, 29
sobrecalentamiento, 183
sociedad, 22, 196, 199, 203, 204
  historia, 201, 202
sólido, 158

tablas de vapor, 166, 167
tablero de control, 177
tarifas de energía, 105
tasa de interés, 135
temperatura, 44, 61, 62, 65–69, 80
  equilibrio térmico, 62
  escala termodinámica, 64
  negativa, 71
temperatura absoluta, 96
Termo Andes, 177
termodinámica de tiempo finito, 110
trabajo, 46, 47, 56, 74
trabajo adiabático, 53, 54, 58
trabajo de flujo, 151
trabajo extraído, 126
trabajo máximo, 116
  depósitos finitos, 140
trabajo perdido, 117, 118, 130
trabajo útil, 116
transformaciones energéticas, 22, 196, 204
turbina, 152
turbina de vapor, 170
título de vapor, 165

vacío, 29
vapor, 158
vapor saturado, 166
vapor sobrecalentado, 167

Índice de palabras

variable de estado, 31
variables conjugadas, 75
vector de Poynting, 51
velocidad angular, 111
volumen de control, 29, 148

óptimo económico, 131–133