

Notas de estudio para Examen Privado  
Licenciatura en Física

Diego Sarceño

18 de mayo de 2024

# Índice general

<b>I</b>	<b>Termodinámica</b>	<b>3</b>
<b>1.</b>	<b>Conceptos Básicos</b>	<b>5</b>
1.1.	Sistemas Termodinámicos y Cantidades de Estado . . . . .	6
1.2.	Equilibrio y Temperatura (Ley Cero de la Termodinámica): . . . . .	6
1.3.	Presión, Ecuación de Estado . . . . .	7
<b>2.</b>	<b>Primera Ley de la Termodinámica</b>	<b>9</b>
2.1.	Trabajo y Calor . . . . .	9
2.1.1.	Naturaleza del Calor . . . . .	10
2.2.	Energía Interna y Primera Ley . . . . .	10
2.3.	Implicaciones de la Primera Ley . . . . .	11
2.4.	Capacidad Calorífica . . . . .	11
2.5.	Procesos Adiabáticos . . . . .	12
2.5.1.	Trabajo Adiabático . . . . .	12
<b>3.</b>	<b>Procesos Cíclicos</b>	<b>13</b>
3.1.	Tipos de Procesos . . . . .	13
3.1.1.	Procesos Reversibles e Irreversibles . . . . .	13
3.2.	Ciclo de Carnot . . . . .	13
3.2.1.	Teoremas de Carnot . . . . .	14
<b>4.</b>	<b>Segunda Ley de la Termodinámica</b>	<b>15</b>
4.1.	Kelvin-Planck . . . . .	15
4.2.	Claiius . . . . .	15
4.3.	La que te venden los divulgadores . . . . .	15
4.4.	Reversibilidad e Irreversibilidad . . . . .	15
<b>5.</b>	<b>Entropía</b>	<b>16</b>
5.1.	Definición de Entropía . . . . .	16
5.2.	Cambios Irreversibles . . . . .	16
5.3.	Regresando a la Primera Ley . . . . .	17
5.4.	Expansión de Joule (Expansión Libre) . . . . .	17

<b>II</b>	<b>Mecánica Estadística</b>	<b>19</b>
<b>III</b>	<b>Electromagnetismo</b>	<b>20</b>
<b>IV</b>	<b>Mecánica Clásica</b>	<b>21</b>
<b>V</b>	<b>Mecánica Cuántica</b>	<b>22</b>
<b>VI</b>	<b>Reducción de Datos</b>	<b>23</b>
<b>VII</b>	<b>Materia Condensada</b>	<b>24</b>

Parte I

Termodinámica

*La termodinámica es el estudio de las restricciones a las posibles propiedades de la materia que se derivan de las propiedades de simetría de las leyes fundamentales de la física.*

# Capítulo 1

## Conceptos Básicos

**Propósito:** La termodinámica busca describir sistemas de muchas partículas ( $10^{23}$  típicamente). Gases, líquidos, cristales, estrellas, universo,  $\dots$ , sistemas macroscópicos y en particular, estudiar los procesos de transferencia de energía (trabajo y calor) entre cuerpos macroscópicos<sup>1</sup>.

- Definir cantidades físicas, "variables de estado" que caracterizan un sistema macroscópico:  $V, T, N, U, \dots$
- Relacionar estas cantidades entre sí:
  1. Válidas para cualquier sistema en equilibrio:
    - a) Leyes axiomáticas de la termodinámica, como Ley de la Energía, Ley de la Entropía, etc.
  2. Específicas
    - a) Por ecuaciones de estado como: fenomenológicas, empíricas, experimentales en la mayoría de los casos.

Es importante mencionar que la termodinámica clásica macroscópica no puede explicar porqué una ecuación de estado describe un sistema particular.

---

<sup>1</sup>Más adelante se tratará la parte microscópica con la Mecánica Estadística, poder explicativo y predictivo sobre propiedades macroscópicas de la materia, partiendo de una descripción microscópica.

## 1.1. Sistemas Termodinámicos y Cantidades de Estado

### 1. Sistema Termodinámico:

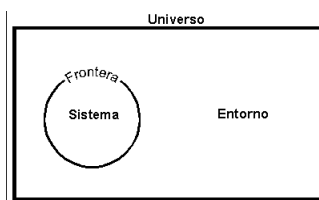


Figura 1.1: Representación gráfica de las partes de un sistema termodinámico.

### 2. Tipos de Sistemas: (depende de la frontera)

- Sistemas aislados: No intercambian energía con el entorno. Los sistemas rígidos no pueden intercambiar trabajo y los adiabáticos no pueden intercambiar calor.
  - Sistemas cerrados: Aquel que intercambia energía y trabajo con su entorno pero la masa permanece constante. Este intercambio de energía puede ser fluctuante aunque la caracterización de estas fluctuaciones no es de interés para la termodinámica.
  - Sistemas abiertos: Aquel que intercambia tanto energía como materia con su entorno.
3. Variables de estado: Cualquier cantidad macroscópica que pueda describir el sistema.  $E, V, N, T, P, S$ , viscosidad  $\mu$ , composición química, etc. **no**  $\{\vec{r}_i, \vec{p}_i\}$ .
- Cantidades de estado extensivas: estas son aditivas (dependen de la cantidad de sustancia/moles o masa). Ejemplo: volumen, energía o entropía.
  - Cantidades de estado intensivas: son independientes de la cantidad de sustancia del sistema, como la densidad, índice de refracción, presión o temperatura.

## 1.2. Equilibrio y Temperatura (Ley Cero de la Termodinámica):

1. Estado de un sistema: Se define por un conjunto particular de valores de sus variables termodinámicas.
- Como cada variable describe el sistema como un todo, en general son constantes en el espacio.
  - Las variables pueden variar (lentamente en el tiempo).
2. Estado de equilibrio: cada variable tiene un único valor y este valor no cambia en el tiempo.
3. Procesos cuasi-estáticos y no cuasi-estáticos: un proceso  $\equiv$  un cambio de estado. (normalmente un proceso cuasi-estático se toma como un proceso reversible, aquí haremos una distinción). Un proceso no cuasi-estático puede ser una expansión muy rápida de un gas. Mientras que un proceso cuasi-estático puede ser reversible o irreversible como la expansión muy lenta de un gas con un pistón ( $\delta V$  es muy pequeña).

**Temperatura y Ley Cero:** La temperatura es una cantidad "desconocida" para la mecánica y electrodinámica, es una cantidad de estado especial para la termodinámica. Esta se define clásicamente mediante un proceso ( **DS: no hay definición matemática...aún, se verá en la parte de mecánica estadística**).

La Ley Cero es una definición de la temperatura: Variable intensiva que es igual en dos sistemas en contacto, en equilibrio sin importar la forma y ubicación de este contacto.

Otra definición de la Ley Cero: Cuando el contacto térmico entre A y B produce que B se caliente y A se enfríe, sin importar donde está este contacto, entonces no hay proceso que pueda calentar A y enfriar B que no induce un trabajo".

ESTADO DE EQUILIBRIO"  $\neq$  ESTADO ESTACIONARIO", estar en equilibrio implica ser estado estacionario, pero no al contrario.

### 1.3. Presión, Ecuación de Estado

1. Presión: En términos mecánicos es lo que ya se conoce  $F/A$  y en términos microscópicos es la suma de las fuerzas que realizan todas las partículas del sistema sobre  $A$ .
2. Ecuación de Estado: Relación entre variables independientes y la temperatura:

$$F(X, Y, T) = 0$$

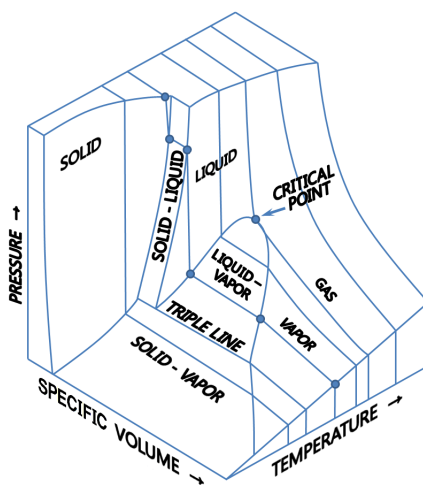


Figura 1.2: Diagrama PVT.

Por ejemplo: Ecuación del gas ideal  $pV = nRT$ , la ecuación de gas real (expansión del Virial)  $pV = Nk_B T + B(T)p + C(T)p^2 + \dots$ , donde  $B(T), C(T), \dots$  son los coeficientes del Virial o la de Van der Waals.

3. Diferenciales Exactos (e Inexactos): Suponemos una ecuación de estado  $z = f(x, y)$ . Diferenciación  $df(\vec{r}) = \vec{\nabla} f(\vec{r}) \cdot d\vec{r}$ .  $df$  es un diferencial total si su integral no depende del contorno



y solo de los extremos. Y este es exacto si  $f$  es totalmente diferenciable, es decir, se pueden intercambiar las derivadas cruzadas ( **DS: Básicamente, el teorema de Clairaut**). La implicación que esta tiene en termodinámica son las transformaciones reversibles (que pasan por estados de equilibrio), en estas la ecuación de estado el valor de las variables de estado es independiente del proceso que sigue para llegar a otro estado y esto es válido para cualquier variable de estado.

## Capítulo 2

# Primera Ley de la Termodinámica

### 2.1. Trabajo y Calor

La energía total de un sistema puede variar si recibe (cede) trabajo o calor.

1. Trabajo: Sistema sujeto a fuerzas externas. El sistema recibe energía durante una compresión. Con esta idea se tiene la convención general ( **DS: Bastante lógico**)  $\delta W > 0$  si el sistema recibe trabajo y  $\delta W < 0$  si el sistema realiza trabajo.

Caso particular<sup>1</sup> procesos cuasi-estáticos,  $d\vec{l}$  es infinitesimal, es decir muy lento, entonces la aceleración del pistón es despreciable  $\vec{F}_e + \vec{F}_i = 0$ , donde  $F_i$  es la fuerza ejercida por el sistema (fuerza interna) entonces  $\delta W = -\vec{F}_i \cdot d\vec{l}$ . Como el proceso es cuasi-estático, el sistema está en equilibrio  $\leftarrow \exists$  presión en el sistema  $\vec{F}_i = PA\hat{z}$ . Reemplazando en la definición de trabajo  $\delta W = -P dV$  ( $P$  cantidad intensiva,  $dV$  cantidad extensiva). **⚠** Durante el trabajo infinitesimal la presión es aproximadamente constante en el intervalo  $[V, V + dV]$ , pero si  $\Delta V$  es grande, entonces

$$\Delta W = - \int_{V_1}^{V_2} P(V) dV .$$

2. Calor: Es una forma particular de energía distinta al trabajo, por ejemplo en el calentamiento por entrega de calor no hay un trabajo visible.

**Experimento de Joule:** Este fue crucial para demostrar la equivalencia entre trabajo mecánico y calor, sentando las bases de la primera Ley de la Termodinámica.

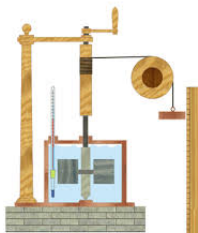


Figura 2.1: Este consiste en un contenedor de agua aislado térmicamente, un sistema de paletas y un peso y una cuerda los cuales pasan por una polea.

---

<sup>1</sup>Para más ejemplos ver p9 de [Notas Boyer](#)

El procedimiento es:

- a) Elevación del peso: El peso se levanta a una cierta altura almacenando energía potencial gravitacional.
- b) Al liberar el peso, este desciende, la cuerda hace girar el eje el cual, a su vez, hace girar las paletas.
- c) Las paletas agitan el agua, creando fricción y generando calor.

Joule encontró que el aumento de la temperatura del agua estaba directamente relacionado con la cantidad de trabajo mecánico realizado. Específicamente, pudo determinar la equivalencia entre unidades de trabajo (joules) y unidades de calor (calorías). La relación que encontró es aproximadamente 4.184 joules por caloría.

Joule demostró que el calor podía generarse mediante trabajo mecánico y viceversa, consolidando el concepto moderno de energía.

Además podemos concluir que  $\delta Q$  y  $\delta W$  no son cantidades de estado, dependen del proceso, del camino ( $Q$  y  $W$  no son diferenciales exactos).

### 2.1.1. Naturaleza del Calor

Ènergá distribuída de manera desordenada entre partículas. Ès mucho más fácil convertir trabajo en calor que al revés.

Convención: Misma que para el trabajo:  $\delta Q = \delta Q_{\text{entorno} \leftarrow \text{sistema}}$

- $\delta Q > 0$  para un sistema que recibe calor del entorno.
- $\delta Q < 0$  para un sistema que cede calor al entorno.

## 2.2. Energía Interna y Primera Ley

1. Energía interna: (definición microscópica)  $U$  esta es la energía total del sistema, en el sentido mecánico-newtoniano, con  $N$  partículas

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m_i v_i^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{j>i}^N V(\vec{r}_i, \vec{r}_j) + \sum_{i=1}^N \vec{F}_e^i \cdot \vec{r}_i.$$

Donde se tiene la energía cinética, la potencial y las fuerzas externas. En general es imposible calcular esta energía y tampoco es el propósito de este curso. **DS: como siempre, a esperar a mecánica estadística**

(definición macroscópica): Es equivalente a la definición de microscópica si  $N \rightarrow \infty$ . Cantidad de estado que varía cuando el sistema recibe trabajo o calor y que tiene dimensión de energía.

2. Primera Ley de la Termodinámica: Conservación de la energía  $U$  (**DS: Es básicamente una conservación de la energía, como se ve en física 1, pero con esteroides**)

$$dU = \delta Q + \delta W.$$

Formas estándares de la primera ley:

- Sistemas aislados:  $dU = 0$
- Sistemas cerrados:  $dU = \delta Q - P dV$
- Sistemas abiertos:  $dU = \delta Q - P dV + \mu dN$ <sup>2</sup>.

## 2.3. Implicaciones de la Primera Ley

1. La energía interna es una variable de estado y un diferencial exacto:

$$dU = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_{V,N} dT + \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_{T,N} dV + \left( \frac{\partial U}{\partial N} \right)_{V,T} dN.$$

Y  $f(V, T, N)$  se conoce como la ecuación de estado.

2. Procesos Cíclicos: Son procesos de particular interés. En estos procesos  $U_f = U_o$  o, en otras palabras

$$\oint dU = 0,$$

esto implica  $\Delta W + \Delta Q = 0$   $\Delta W = -\Delta Q \neq 0$ , en esto se tienen dos casos importantes

- Caso  $\Delta W < 0$ : motor, fuente de calor en el entorno, pero necesitamos  $\Delta Q > 0$ .
- Caso  $\Delta Q < 0$ : refrigerador, trabajo sobre el sistema, pero se necesita  $\Delta W > 0$ .

## 2.4. Capacidad Calorífica

Se define como  $\delta Q = c dT$ , un incremento o decremento de temperatura, donde la constante  $c$  es la capacidad calorífica. Recordemos que  $dU = \delta Q - P dV$  para un sistema cerrado sin fuerzas externas.

$$C_V = \left( \frac{\delta Q}{\delta T} \right)_V, \quad \text{Volumen constante,}$$

$$C_P = \left( \frac{\delta Q}{\delta T} \right)_P, \quad \text{presión constante,}$$

y como consecuencia de la primera ley:  $V = \text{cte}$  entonces  $dU = \delta Q$  por ende  $C_V = \left( \frac{dU}{dT} \right)_V$ .  $C_V$  y  $C_P$  son cantidades extensivas, en algunos libros  $C_v = \frac{1}{N} \left( \frac{dU}{dT} \right)_V$  capacidad por partícula o por mol (en este caso sería una cantidad intensiva).

**Gas Ideal** se tienen dos casos, para un gas monoatómico y diatómico

$$\text{Monoatómico} \quad U = \frac{3}{2} N k_B T,$$

$$\text{Diatómico} \quad U = \frac{5}{2} N k_B T.$$

---

<sup>2</sup>En transformaciones cuasi-estáticas

Para todo material en equilibrio se tiene la siguiente relación entre  $C_V$  y  $C_P$ . Para ello se considerará  $N = cte$  (sistema cerrado), como variables se tienen  $P, V, T$ ; sin embargo,  $f(P, V, T) = 0$  es la ecuación de estado de equilibrio. Por ello se toman dos variables independientes  $U = U(P, V) = U(P, T) = U(V, T)$ . Además se tienen dos maneras de escribir el diferencial de energía interna: la primera ley y el diferencial total. Con esto:

$$\delta Q - p dV = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT + \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV$$

$$\delta Q = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT + \left[ p + \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T \right] dV$$

dividiendo entre  $dT$  se tiene

$$C_P = \underbrace{\left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V}_{C_V} + \left[ p + \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T \right] \left( \frac{\delta Q}{\delta T} \right)_P$$

$$\boxed{C_P - C_V = \left[ p + \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T \right] \left( \frac{\delta Q}{\delta T} \right)_P.}$$

Esta siempre es positiva. Para un gas ideal  $\left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T = 0$ ,  $p = \frac{Nk_B T}{V}$ ,  $\left( \frac{\delta Q}{\delta T} \right)_P = \frac{V}{T}$ .

$$\boxed{C_P - C_V = Nk_B}$$

## 2.5. Procesos Adiabáticos

Es aquel proceso reversible en un sistema térmicamente aislado, por lo que no existe un intercambio de calor entre él y el entorno  $\delta Q = 0$ . Por lo que  $dU = -p dV$ , y en un gas ideal  $dU = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT = C_V dT$ . Lo que implica que

$$\frac{dT}{T} = \frac{C_P - C_V}{C_V} \frac{dV}{V}.$$

Donde  $\frac{C_P}{C_V} = \gamma$ , número adimensional. Integrando **DS: Y haciendo calculito del kinder, como diría Damián** se tienen las siguientes equivalencias

$$\boxed{TV^{\gamma-1} = PV^\gamma = T^\gamma P^{1-\gamma} = cte.}$$

### 2.5.1. Trabajo Adiabático

Teniendo  $\delta W = -p dV$ , las equivalencias anteriores y nuevamente calculito del kinder y se llegamos a lo siguiente

$$\boxed{\Delta W = \frac{1}{\gamma - 1} [P_1 V_1 - P_o V_o] = \frac{Nk_B}{\gamma - 1} [T_1 - T_o] = C_v [T_1 - T_o].}$$

Es claro que se puede llegar a este resultado directamente desde la primera ley.

## Capítulo 3

# Procesos Cíclicos

### 3.1. Tipos de Procesos

El primer tipo es aquel que tiene una variable de estado constante: isotérmicos, isocóricos, isobáricos y adiabáticos **DS: el nombre es bastante claro con lo que implica cada proceso.**

#### 3.1.1. Procesos Reversibles e Irreversibles

Un proceso se dice reversible cuando estados sucesivos del mismo procesos difieren infinitesimalmente de estados de equilibrio. Dado esto, existen procesos reversibles termodinámicamente, los cuales cumplen con dos condiciones: ser cuasi-estático y un proceso no disipativo.

### 3.2. Ciclo de Carnot

El **ciclo de Carnot** se produce en un equipo o máquina cuando trabaja absorbiendo una cantidad de calor  $Q_1$  de una fuente de mayor temperatura y cediendo una cantidad de calor  $Q_2$  a la de menor temperatura produciendo un trabajo sobre el exterior.

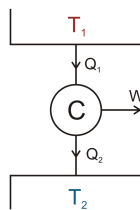


Figura 3.1: Esquema de una máquina de Carnot.

El rendimiento del ciclo está definido por

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}.$$

Y, como se verá más adelante, es el mayor producido por cualquier máquina que funcione cíclicamente entre las mismas fuentes de temperatura.

Como todos los procesos que tienen lugar en el ciclo ideal son reversibles, el ciclo puede invertirse y la máquina absorbería calor de la fuente fría y cedería calor a la fuente caliente, teniendo que suministrar trabajo a la máquina. Si el objetivo de esta máquina es extraer calor de la fuente fría (para mantenerla fría) se denomina máquina frigorífica, y si es ceder calor a la fuente caliente, bomba de calor.

El ciclo de Carnot<sup>1</sup> consta de cuatro etapas: dos procesos isotermos y dos adiabáticos, como se muestra en el siguiente diagrama P-V

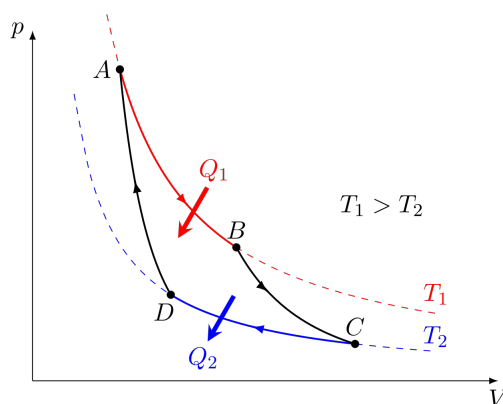


Figura 3.2: Ciclo de carnot en el diagrama de Clapeyron.

- AB: Expansión isoterma;
- BC: Expansión adiabática;
- CD: Compresión isoterma;
- DA: Compresión adiabática.

### 3.2.1. Teoremas de Carnot

1. No puede existir una máquina térmica que funcionando entre dos fuentes térmicas dadas tenga mayor rendimiento que una de Carnot que funcione entre esas mismas fuentes térmicas.
2. Dos máquinas reversibles operando entre las mismas fuentes térmicas tienen el mismo rendimiento.

<sup>1</sup>Ver [wikipееediaaa](#) para la explicación detallada de cada paso.

## Capítulo 4

# Segunda Ley de la Termodinámica

### 4.1. Kelvin-Planck

Es imposible construir un motor que opere en ciclos y extraiga calor de una fuente que convierta el calor extraído exclusivamente en trabajo.

### 4.2. Claiius

Es imposible construir un frigorífico que, operando en un ciclo, transfiera completamente el calor de una fuente de menor temperatura a una fuente de temperatura mayor.

DS: Raras tus formulaciones pue.

### 4.3. La que te venden los divulgadores

*La cantidad de entropía del universo tiende a incrementarse en el tiempo.* Este principio establece la irreversibilidad de los procesos físicos, especialmente durante el intercambio de calor.

### 4.4. Reversibilidad e Irreversibilidad

Un proceso reversible es un proceso que realiza de tal forma que el sistema y su entorno pueden regresar a sus estados iniciales sin producir ningún cambio en el resto del universo. ( DS: Si, es otra forma de redactar la reversibilidad.)



## Capítulo 5

# Entropía

La entropía es posiblemente el más importante e insuficientemente conocido concepto en fisiología. Es una magnitud física que permite determinar la parte de la energía que no puede utilizarse para producir trabajo y está ligada con el grado de desorden de un sistema.

### 5.1. Definición de Entropía

Ya se introdujo la integral  $\oint dQ/T = 0$ . Esto implica que la integral

$$\int_A^B \frac{dQ}{T}$$

es independiente del camino; por ende, se define entropía como el diferencial exacto

$$\boxed{dS = \frac{dQ}{T}},$$

tal que

$$S(B) - S(A) = \int_A^B \frac{dQ}{T},$$

y  $S$  es una función de estado. Para un proceso adiabático se tiene que  $dQ = 0$ . Por eso un proceso adiabático no presenta cambios en la entropía (los procesos adiabáticos también son llamados isoentrópicos).

### 5.2. Cambios Irreversibles

Ya se tiene la definición de entropía en términos de cambios reversibles. Dado que  $S$  es una función de estado

$$\oint \frac{dQ_{rev}}{T} = 0.$$

Entonces

$$dS = \frac{dQ_{rev}}{T} \geq \frac{dQ}{T}.$$

Consideremos un sistema térmicamente aislado  $\dot{d}Q = 0$ ; por lo tanto  $\dot{d}S \geq 0$ .

La entropía solo puede mantenerse igual (cambios reversibles) o aumentar (cambios irreversibles). Tomando al universo como un sistema térmicamente aislado.

### 5.3. Regresando a la Primera Ley

Ahora podremos mostrar una forma más elegante y útil de la 1ra ley

$$dU = \dot{d}Q + \dot{d}W,$$

pero  $\dot{d}Q = T dS$  y  $\dot{d}W = -p dV$ .

$$dU = T dS - p dV$$

en esto se asume un proceso reversible. Pero para uno irreversible se tiene que  $\dot{d}Q \leq T dS$  y  $\dot{d}W \geq -p dV$ . Lo que se nivela y siempre se llega a lo visto para procesos reversibles.

$S, V$  son extensivas y  $T, p$  son intensivas<sup>1</sup>

$$dU = \underbrace{\left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_V}_T dS + \underbrace{\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_S}_{-p} dV.$$

DS: Ahora toca profanar la matemática.

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

### Resumen

- $dU = \dot{d}Q + \dot{d}W$  siempre es cierto
- $\dot{d}Q = T dS$  reversibles
- $\dot{d}W = -p dV$  reversibles
- $\dot{d}W \geq -p dV$  y  $\dot{d}Q \leq T dS$  irreversibles.

### 5.4. Expansión de Joule (Expansión Libre)

Es un proceso irreversible en el cual un gas se expande en un recipiente vacío y aislado. Los gases experimentan un cambio de temperatura durante la expansión libre.

---

<sup>1</sup>Esto funciona por el teorema recíproco y por el teorema de reciprocidad:  $\left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)_z \left(\frac{\partial y}{\partial z}\right)_x \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)_y = -1$ .

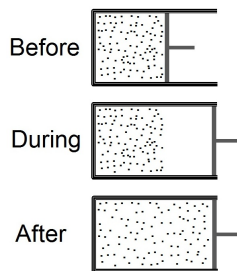
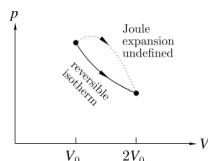


Figura 5.1: También se puede lograr moviendo el pistón hacia fuera más rápido que los átomos del gas.

Durante la expansión libre, ningún trabajo es realizado por el gas. El gas pasa a través de los estados que no están en equilibrio termodinámico antes de llegar a su estado final, lo que implica que no se pueden definir parámetros termodinámicos como valores del gas en su conjunto.

Una expansión libre se consigue típicamente mediante la apertura de una llave de paso que permite que el gas se expanda en un vacío. Aunque sería difícil de lograr en la realidad, es instructivo imaginar una expansión libre causada por un pistón en movimiento más rápido que prácticamente cualquier átomo. Ningún trabajo se hace porque no hay presión sobre el pistón. Sin energía térmica que sale o entra en el pistón. Sin embargo, hay un cambio de entropía.

$$\Delta S = \int_i^f dS = \int_{V_o}^{2V_o} \frac{p dV}{T} = \int_{V_o}^{2V_o} \frac{R dV}{V} = R \ln 2.$$



Luego de que suceda la expansión de Joule, solo se puede poner el gas a la izquierda comprimiéndolo. El método que involucra la menor cantidad de trabajo es una compresión isotérmica, cuyo trabajo para 1 mol de gas es

$$\Delta W = - \int_{2V_o}^{V_o} p dV = - \int_{2V_o}^{V_o} \frac{RT}{V} dV = RT \ln 2 = T \Delta S_{gas}.$$

El incremento de entropía en una expansión de Joule es  $\Delta W/T$ .

### Paradoja?

- En la expansión de Joule, el sistema es aislado térmicamente, por lo que no hay flujo/intercambio de calor:  $\Delta Q = 0$ .
- No hay trabajo realizado:  $\Delta W = 0$ .
- Por ello  $\Delta U = 0$  (para un gas ideal,  $\Delta T = 0$ ).

- Pero si  $\Delta Q = 0$ , esto implica que  $\Delta S = \Delta Q/T = 0$ ?

El razonamiento anterior es correcto hasta la última parte: la respuesta a la última pregunta es **NO!** La ecuación  $dQ = T dS$  es cierto solamente para procesos reversibles. En general  $dQ \leq T dS$ , y se tiene  $\Delta Q = 0$  y  $\Delta S = R \ln 2$ , entonces se tiene que  $\Delta Q \leq T dS$ .

Parte II

Mecánica Estadística

Parte III

**Electromagnetismo**

Parte IV

Mecánica Clásica

Parte V

Mecánica Cuántica



# Parte VI

## Reducción de Datos

## Parte VII

# Materia Condensada