

Introducción




Termodinámica de Procesos Minerales

TEMA 1

**Introducción
y
Conceptos Básicos**


Introducción



Objetivos Docentes

- Conocer las bases de la teoría de la termodinámica clásica y diferenciarla de otras ramas de la termodinámica. Bosquejo histórico.
- Interés, y limitaciones, de la termodinámica clásica para el estudio de procesos geológicos.
- Dominar la terminología. Conceptos básicos en termodinámica: tipos de sistemas, tipos de procesos, etc.
- Habituar a los diferentes tipos de magnitudes termodinámicas y sus unidades.


Introducción



Termodinámica Clásica

- Seguiremos la aproximación según la termodinámica clásica, derivada por Gibbs, Maxwell, Helmholtz, Kelvin, Clausius, etc...
- Partiremos de las propiedades de los gases, estudiaremos la ecuación de estado y desarrollaremos el concepto de equilibrio químico.
- Estudiaremos las propiedades de la materia, los cambios de energía y la espontaneidad de las transformaciones minerales.

Introducción



Teoría de la Termodinámica


Estudio de las transformaciones de energía y las relaciones entre las propiedades globales de la materia.

TERMODINÁMICA CLÁSICA: Rama de la física que se dedica al estudio de las propiedades de los sistemas macroscópicos en equilibrio.

A theory is the more impressive the greater the simplicity of its premises, the more different are the kinds of things it relates, and the more extended is its range of applicability. Therefore, the deep impression which classical thermodynamics made upon me. It is the only physical theory of universal content which I am convinced, that within the framework of applicability of its basic concepts, will never be overthrown.

Albert Einstein

Termodinámica Clásica y Termodinámica Estadística



Termodinámica Clásica y Estadística

Termodinámica Clásica: Aproximación Macroscópica.

Se interesa en las magnitudes globales que caracterizan el sistema, tales como la temperatura, la densidad, volumen, capacidad calorífica, etc.


No se interesa en cómo estas propiedades están relacionadas con la estructura atómica o molecular de la materia.

En sus inicios se nutría de datos experimentales. Actualmente utiliza también datos aportados por la Termodinámica Estadística.

Termodinámica Estadística: Aproximación Microscópica.

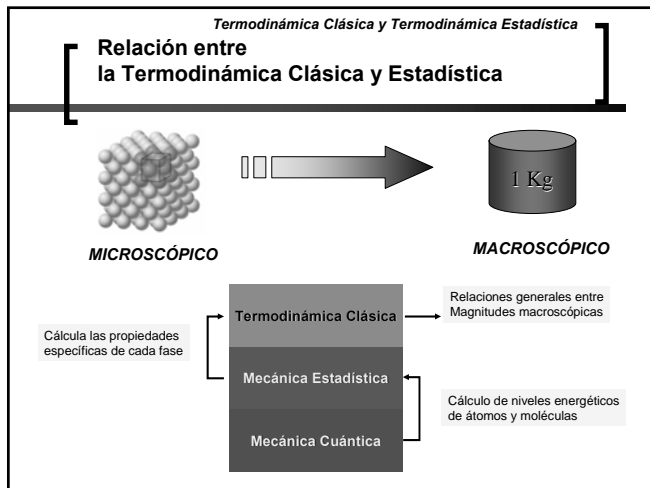
Necesita conocer los niveles energéticos del sistema.

Termodinámica Clásica y Termodinámica Estadística



Ventajas de la Aproximación Macroscópica

- $1 \text{ mol de H}_2\text{O} = 6.023 \cdot 10^{23} \text{ partículas}$
602,300,000,000,000,000,000
- Para describir el estado de 1 mol de agua desde el punto de vista microscópico se necesitaría especificar la energía de cada partícula (velocidad, posición, etc - 6 coordenadas por partícula).
- Para describir el estado de 1 mol de agua en equilibrio necesitamos especificar simplemente dos magnitudes macroscópicas: Presión y Temperatura.



Evolución histórica de la Termodinámica

Concepto de Calor a finales del Siglo XVIII

- Los físicos del s. XVIII y de la primera mitad del s. XIX consideraban que el calor era una materia imponderable contenida en los cuerpos.
- Esta sustancia la denominaban “calórico”.
- Se consideraba que su cantidad total se mantenía invariable (cantidad de calor): no se podía crear ni aniquilar.
- El calentamiento y enfriamiento era una propiedad de los cuerpos que se explicaba por el aumento y disminución del calórico.
- Aunque la teoría resultó ser inconsistente, el concepto de “cantidad de calor” se conservó.

Evolución histórica de la Termodinámica

Nacimiento de la Termodinámica Clásica

Benjamin Thompson, 1792

Durante la fabricación de los cañones se necesitaba refrigerar con agua debido al aumento de la temperatura durante la perforación de los cañones.

De acuerdo con la teoría del calórico al perforar los tubos en pequeñas chirlas metálicas, y al ser el calórico una cantidad invariable, la habilidad para retener calórico debería de ser menor.

El calor no es una sustancia que se conserva, sino que se podía producir a través de trabajo.

Evolución histórica de la Termodinámica

Termodinámica Clásica

B. Thompson 1782 J. Joule 1830

Benjamin Thompson. Deduce de que el “calórico” no se conservaba. Creación de calor durante el rozamiento. El calor no es una sustancia que se conserva, sino que se podía producir a través de trabajo.

James Joule realizó un experimento preciso demostrando que una cantidad determinada de calor podía convertirse en una cantidad determinada de trabajo. Conservación de la Energía. Bases para la primera ley de la Termodinámica. Unidad de Energía: Julio (Joule).

Evolución histórica de la Termodinámica

Termodinámica Clásica

B. Thompson 1782 Carnot 1820's J. Joule 1830

Cuando en 1824 cuando no estaba aún establecida la primera ley de la termodinámica, el médico Francés Léonard Carnot, en un tratado sobre la eficiencia de maquinas de vapor, expone la que actualmente se considera la primera demostración cuantitativa de la segunda ley de la termodinámica.

Evolución histórica de la Termodinámica

Termodinámica Clásica

B. Thompson 1782 Carnot 1820's J. Joule 1830 Kelvin, Clausius 1840's-60's

Lord Kelvin (William Thomson) (1854). Introduce el término de “Termodinámica”, sustituyendo por el término inicial que era “Mecánica del Calor”. Junto a Clausius (1876) introduce el término de energía y energía interna de un sistema. (Así mismo, establece la escala absoluta de temperatura.)

Clausius (1876) Propone, a partir del trabajo de Carnot, el término de entropía del término griego “giro” y “transformación”, contemporáneamente con Kelvin. Establecieron el segundo principio de la termodinámica.

Evolución histórica de la Termodinámica

Termodinámica Clásica

B. Thompson

J. Joule

Kelvin, Clausius

Helmholtz Mayer

1782

1820's

1830

1840's-60's

60's-80s

Ludwig Helmholtz, Julius von Mayer (y J. Joule). von Mayer formula la ley general de conservación de la energía, que es denominada así por L. Helmholtz. Formulación formal del primer principio de la Termodinámica.

Evolución histórica de la Termodinámica

Termodinámica Clásica

B. Thompson

J. Joule

Kelvin, Clausius

Helmholtz Mayer

1782

1820's

1830


1840's-60's

60's-80s

Gibbs

1880's-90's

J. Gibbs (1880-90) Establece la relación de Gibbs: $dU = TdS - dW$ que unifica el Primer y Segundo principio de la Termodinámica, estableciendo la termodinámica en equilibrio (o de procesos reversibles.)



Evolución histórica de la Termodinámica

Termodinámica Clásica

B. Thompson

J. Joule

Kelvin, Clausius

Helmholtz Mayer

1782

1820's

1830


1840's-60's

60's-80s

Gibbs

1880's-90's

J. Gibbs (1880-90) Desarrolla la regla de la fases y desarrolla la metodología para la representación geométrica del equilibrio entre fases.



Evolución histórica de la Termodinámica Clásica

Termodinámica Clásica

B. Thompson

J. Joule

Kelvin, Clausius

Helmholtz Mayer

1782

1820's

1830

1840's-60's

60's-80s

Gibbs

1880's-90's

Establecidos los principios de la Termodinámica Clásica (o de Procesos Reversibles)

Evolución histórica de la Termodinámica

Termodinámica de Procesos Irreversibles

B. Thompson

J. Joule

Kelvin, Clausius

Helmholtz Mayer

1782

1820's

1830

1840's-60's

60's-80s

Gibbs

1880's-90's

Caratheodory

1909

Nace la Termodinámica de los Procesos Irreversibles (Introducción del Tiempo, Equilibrio Local, etc)

Evolución histórica de la Termodinámica

Termodinámica de Procesos Irreversibles

B. Thompson

J. Joule

Kelvin, Clausius

Helmholtz Mayer

1782

1820's

1830

1840's-60's

60's-80s

Gibbs

1880's-90's

Caratheodory

1909

Onsager

1930's

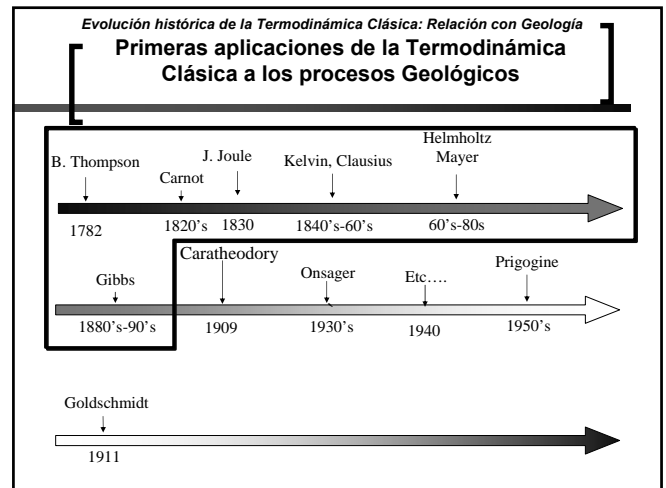
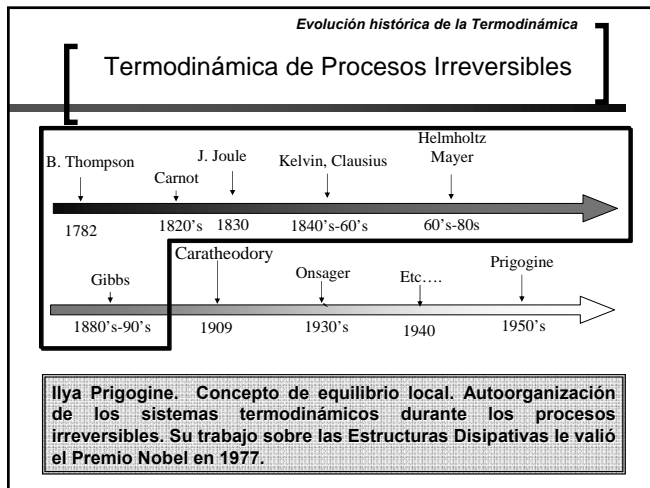
Termodinámica de los Procesos Irreversibles

L. Osanger (1931). Proporcionó un desarrollo definitivo a la termodinámica de procesos irreversibles al establecer que para sistemas con pequeñas desviaciones del equilibrio existía una relación entre los flujos (calor, masa, etc) y las "fuerzas" termodinámicas.

Termodinámica Procesos Minerales.


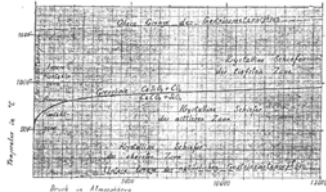
Lic. Geologicas. Universidad de Granada

3



Evolución histórica de la Termodinámica Clásica: Relación con Geología

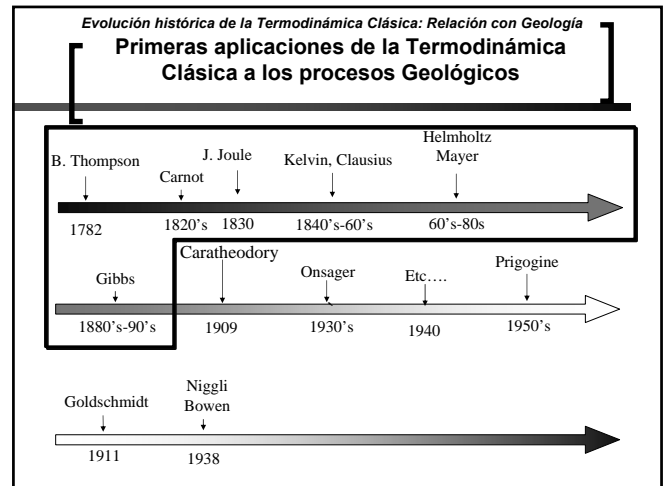
Primeras aplicaciones de la termodinámica clásica a procesos geológicos: Reacciones metamórficas

Victor Moritz Goldschmidt (1888-1947)



Goldschmidt V.M., 1911. Die Kontaktmetamorphose im Kristiania-gebiet. Oslo Vidensk. Skr., I, Math.- Nat. Kl., 11.

En este artículo el mineralogista Suizo utiliza el equilibrio $Cal + Qtz = Wo + CO_2$ en función de la presión y la temperatura para explicar la existencia de wollastonita en rocas metamórficas de alto grado de los alrededores de Oslo.



Evolución histórica de la termodinámica en geología

Primeras aplicaciones de la termodinámica a procesos geológicos: Aplicación de la regla de las fases


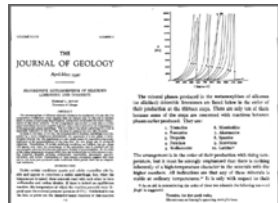



Paolo Niggli

Niggli, P., 1938. La loi des phases en minéralogie et pétrographie: I - Généralités. and: II - Applications minéralogiques et pétrographiques de la loi des phases. Hermann et Cie Éditeurs, Paris, 1th and 2nd Vol., 180 pp.

Evolución histórica de la termodinámica en geología

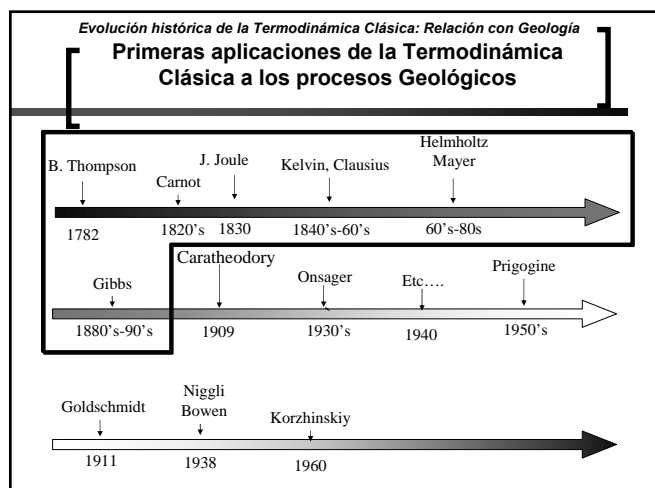
Generalización con aplicaciones a metamorfismo y petrología ígnea

Bowen, Norman Levi Kingston (CAN), 1887 - New York, 1956

Bowen N.L., 1940. Progressive metamorphism of siliceous limestone and dolomite. Journal of Geology, 58, 225- 274.

Este trabajo sobre la aparición/desaparición de minerales durante el aumento de temperatura se convirtió en la referencia para la descripción físico-química de las reacciones metamórficas.

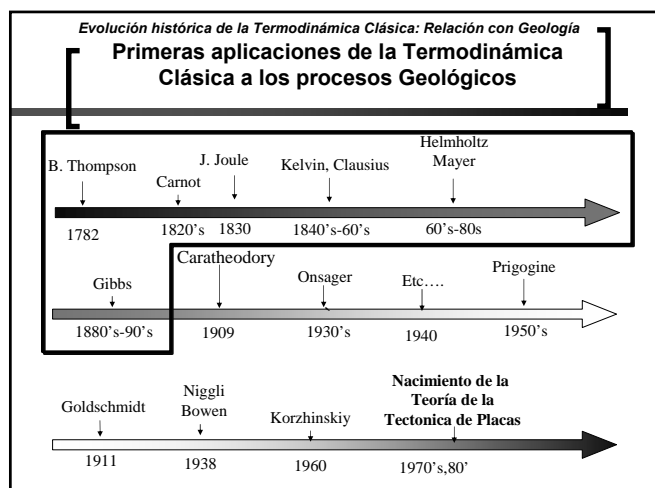


Evolución histórica de la termodinámica en geología

Tratamiento gráfico de equilibrios minerales y referencia a sistemas abiertos

Korzhinskiy (1899-1985)

Korzhinskiy D.S., 1959. Physicochemical basis of the analysis of the paragenesis of minerals. Consultant Bureau, Inc., New York, USA, 142 pp.



Aplicaciones y Limitaciones de la Termodinámica Clásica en Geología

Aproximación Directa: Capacidad de Predecir

- **APROXIMACIÓN DIRECTA:** Nos permite predecir el resultado de una reacción química o transformación de fases a unas condiciones dadas.
 - **INTERÉS FUNDAMENTAL:** Capacidad PREDICTIVA.
 - **PETROLOGÍA IGNEA:** Predecir la sucesión de minerales que cristalizarán en un magma de una determinada composición a unas determinadas condiciones de Presión y Temperatura.
 - **PETROLOGÍA METAMÓRFICA:** Predecir la asociación mineral estable para un determinado tipo de rocas (carbonatos, basaltos) a diferentes condiciones de Presión y Temperatura.
 - **HIDROGEOQUÍMICA:**
 - Predecir el resultado de la interacción de una solución contaminante con la rocas que componen un acuífero.
 - Solubilidad de contaminantes en diferentes tipos de soluciones acuosas.
 - Guías de actuación para eliminar residuos o mejorar la calidad del agua.

Aplicaciones y Limitaciones de la Termodinámica Clásica en Geología

Aproximación Indirecta: Inferencia de condiciones del pasado

- **APROXIMACIÓN INDIRECTA:** No obstante, muchas aplicaciones en geología implican el conocimiento de la historia y no predecir el futuro.
 - Ejemplo: Conociendo la asociación de minerales y su composición, determinar las condiciones P-T bajo las cuales se formaron, o determinar la composición de los fundidos o fluidos a partir de los cuales precipitaron.
 - Combinando con otras disciplinas que proporcionen información temporal (p. ej. Geocronología):
 - **Geodinámica:** Velocidades de exhumación de terrenos metamórficos. Tectónica de Placas.
 - **Yacimientos Minerales:** Temperaturas y condiciones de formación de yacimientos minerales. Guías para la prospección.
 - **Paleoclimatología:** composición de antiguos océanos. Relación con el Cambio Climático.

Aplicaciones y Limitaciones de la Termodinámica Clásica en Geología

Limitaciones de la Termodinámica Clásica

- Se aplica exclusivamente a sistemas en equilibrio. Si un equilibrio se perturba, puede predecir el nuevo estado de equilibrio, pero no si se alcanzará.
- La velocidad a la cual un sistema alcanza el equilibrio **aumenta exponencialmente con la temperatura**. Por tanto:
 - Más relevante para el estudio de procesos geológicos a altas temperaturas (ca. >500°C): procesos igneos y metamórficos. Ya que se aproximan más al equilibrio.
 - A bajas temperaturas muchos sistemas no están en equilibrio y están gobernados, en mayor o menor medida, por la cinética de reacciones.
- (La termodinámica irreversible, que no veremos en la asignatura, intenta aplicar los principios de la termodinámica al estudio de los sistemas en desequilibrio).

Conceptos Fundamentales de la Termodinámica: Sistemas

Sistema, pared, ambiente

Para estudiar un fenómeno se aísla la zona del espacio donde tiene lugar. Esta zona se denomina SISTEMA TERMODINÁMICO o simplemente SISTEMA.

SISTEMA : Parte del Universo que es objeto de investigación.

Se define a conveniencia del observador en función de la experiencia y objetivos del estudio.

Los sistemas Naturales (reales) no se comportan necesariamente como un sistema termodinámico.

UNIVERSO

Sistema

Conceptos Fundamentales de la Termodinámica: Sistemas

Sistema, pared, ambiente

SISTEMA: Parte del Universo que es objeto de investigación.

La idea de sistema termodinámico exige definir un contorno real o hipotético (pared) que lo separe del resto del objeto de interés.

PARED: Contorno real o hipotético que separa el sistema del resto del objeto de estudio.

UNIVERSO

Sistema

Contorno o Pared

Conceptos Fundamentales de la Termodinámica: Sistemas

Sistema, pared, ambiente

SISTEMA: Parte del Universo que es objeto de investigación.

PARED: Contorno real o hipotético que separa el sistema del resto del objeto de estudio.

El sistema, a través de la pared, interacciona con el medio o ambiente que le rodea.

AMBIENTE O MEDIO: Parte del Universo que rodea al sistema y con el que interacciona a través de la pared

UNIVERSO

Ambiente

Sistema

Pared

Conceptos Fundamentales de la Termodinámica: Sistemas

Sistema, pared, ambiente: Ejemplos

SISTEMA	AMBIENTE	PARED
Mineral	Roca Laboratorio	Borde de Grano Cápsula Experimental
Roca	Unidad geológica Laboratorio	Contacto (o Contacto Hipotético) Cápsula Experimental
Cámara Magmática	Roca encajante	Paredes de la cámara magmática
Hidrosfera	Litosfera y Atmósfera	Superficie del mar, fondos oceánicos, márgenes oceánicos.
Atmósfera	Tierra, Espacio	Superficie terrestre, Hidrosfera, Troposfera
Economía Española	Economía del resto del mundo	Definición de Economía Española

Conceptos Fundamentales de la Termodinámica: Tipos de sistemas

Sistemas: Clasificación según el tipo de Pared o Limite con el ambiente

SISTEMAS ABIERTOS: Sistema que poseen paredes permeables que permiten el intercambio de materia y energía con el ambiente.

Surroundings
System
Matter
Energy

(a) Open

Conceptos Fundamentales de la Termodinámica: Tipos de sistemas

Sistemas: Clasificación según el tipo de pared con el ambiente

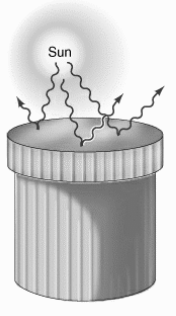
SISTEMAS CERRADOS: Sistema que poseen paredes impermeables que sólo permiten el intercambio de energía con el ambiente.

Matter
Energy

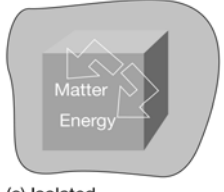
(b) Closed

Conceptos Fundamentales de la Termodinámica: Tipos de sistemas

Sistemas: Clasificación según el tipo de pared con el ambiente






SISTEMAS AISLADOS: Sistema que poseen paredes aislantes que no permiten el intercambio de materia y energía con el ambiente.



(c) Isolated

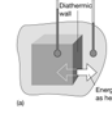

Conceptos Fundamentales de la Termodinámica: tipos de sistemas

Sistemas: Clasificación según el tipo de Pared con el ambiente

Tipo	Materia	Energía	
ABIERTO	Abierto	Abierto	
CERRADO	Cerrado	Abierto	
AISLADO	Cerrado	Cerrado	

Conceptos Fundamentales de la Termodinámica: Tipos de Sistemas

Sistemas: Clasificación según la Trasmisión de energía en forma de CALOR

TIPO	¿Transmite el CALOR?	
DIATÉRMICO	SI	
ADIABÁTICO	NO	

Conceptos Fundamentales de la Termodinámica: Tipos de Sistemas

Sistemas: Clasificación según el número de fases y componentes

N	FASES	COMPONENTES
1	HOMOGÉNEO	MONOCOMPONENTE
> 1	HETEROGÉNEO	MULTICOMPONENTE

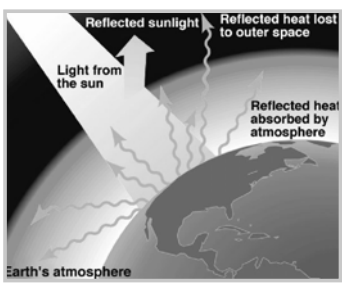
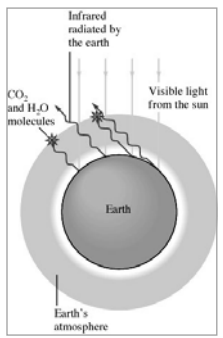
Ejemplos

O ₂ (gas):	HOMOGÉNEO*	MONOCOMPONENTE
OLIVINO:	HOMOGÉNEO*	MULTICOMPONENTE
GRANITO:	HETEROGÉNEO	MULTICOMPONENTE

* (en sus estados de referencia)

Conceptos Fundamentales de la Termodinámica: Tipos de Sistemas

Pared diatérmica y adiabática: Efecto Invernadero



Magnitudes Termodinámicas: Magnitudes de Especial Interés en Geología

Magnitudes Termodinámicas

- Masa
- Volumen
- Densidad
- Temperatura
- Presión
- Composición

Magnitudes Termodinámicas: Magnitudes - Presión

PRESIÓN : Definción y Unidades

$$\text{Presión} = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Area}} = \frac{F}{a}$$

■ Unidad del SI : Pascal (Pa)

$$\text{Pascal} = 1\text{Pa} = \frac{N}{m^2} = \frac{kg \cdot m \cdot s^{-2}}{m^2} = 1kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$$

Nombre	Símbolo	Valor
GigaPascal	1 GPa	10^9 Pa
MegaPascal	1 MPa	10^6 Pa
kiloPascal	1 kPa	10^3 Pa

Magnitudes Termodinámicas: Magnitudes - Presión

Factores de Conversión entre Unidades Frecuentemente Utilizadas en Geología

Nombre	Símbolo	Valor
pascal	1 Pa	$1 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$
bar	1 bar	10^5 Pa Presión Estándar (p^0)
atmósfera	1 atm	101 325 Pa

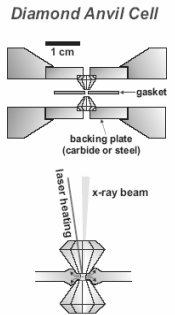
¿Cuántos GPa es 1 kbar?

$$1 \cdot kbar = 10^3 \cancel{bar} \times 10^5 \frac{Pa}{\cancel{bar}} = 10^8 \text{ Pa} = 0.1 \cdot GPa$$

Magnitudes Termodinámicas: Magnitudes - Presión

PROBLEMA 1.1

PRENSA DE DIAMANTE



Muchos equipos de petrología y geoquímica experimental consisten en prensas que aplican una presión sobre la cápsula donde se realiza el experimento.

Calcula la presión que ejerce una masa de 65 kg sobre: a) una cápsula con un de área 250 cm^2 ; b) y una con un área de 2.0 cm^2 .

Magnitudes Termodinámicas: Magnitudes - Presión

PROBLEMA 1.1: Solución

■ Calcular la fuerza (peso) que ejerce una masa de 65 kg:

$$\text{Fuerza} \rightarrow \text{Peso} = m \cdot g \quad (g = 9.81 \cdot m \cdot s^{-2})$$

$$F = (65 \cdot kg) \times (9.81 \cdot m \cdot s^{-2}) = 6.4 \cdot 10^2 \cdot kgm \cdot s^{-2} = 6.4 \cdot 10^2 \cdot N$$

■ Coherencia de unidades: $250 \cdot cm^2 = 2.50 \times 10^{-2} \cdot m^2$ $2.0 \cdot cm^2 = 2.0 \times 10^{-4} \cdot m^2$

(a) $p = \frac{F}{A} = \frac{6.4 \times 10^2 N}{2.5 \times 10^{-2} m^2} = 2.6 \times 10^4 \cdot Pa \rightarrow 26 \cdot kPa$

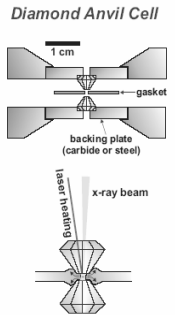
(b) $p = \frac{F}{A} = \frac{6.4 \times 10^2 N}{2.0 \times 10^{-4} m^2} = 3.2 \times 10^6 \cdot Pa \rightarrow 3.2 \cdot MPa$

Disminuyendo el Área hemos incrementado la Presión en dos órdenes de magnitud (potencias de diez)

Magnitudes Termodinámicas: Magnitudes - Presión

PROBLEMA 1.1: Solución

PRENSA DE DIAMANTE

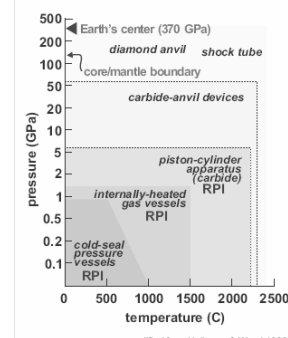


A la luz del resultado del ejercicio anterior y teniendo en cuenta en el límite del manto inferior de la Tierra se alcanza presiones de 370 GPa.

¿Cuál crees que es el factor clave para diseñar un equipo de experimentación a altas presiones ?

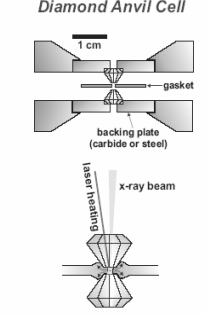
Magnitudes Termodinámicas: Magnitudes - Presión

Aparatos de Experimentación



modified from Hollway & Wood 1988

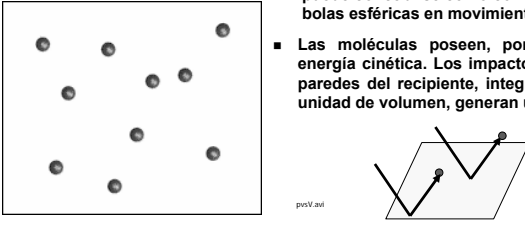
PRENSA DE DIAMANTE



Magnitudes Termodinámicas: Magnitudes - Presión

Presión de un Gas: Interpretación Microscópica

GAS EN UN RECIPIENTE



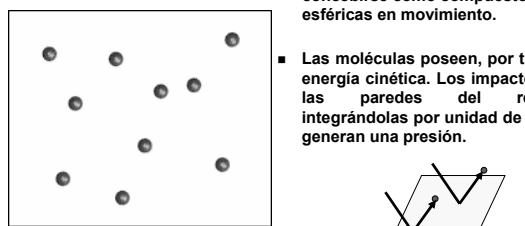
- A nivel microscópico un gas "ideal" puede concebirse como compuesto por bolas esféricas en movimiento.
- Las moléculas poseen, por tanto, una energía cinética. Los impactos contra las paredes del recipiente, integrándolas por unidad de volumen, generan una presión.

$$\text{Energía} \rightarrow \text{Julio} = N \times m = \frac{N \times m}{m^3} = \frac{N}{m^2} = Pa \leftarrow \text{Presión}$$

Magnitudes Termodinámicas: Magnitudes - Presión

Presión en un Gas: Interpretación Microscópica

GAS EN UN RECIPIENTE

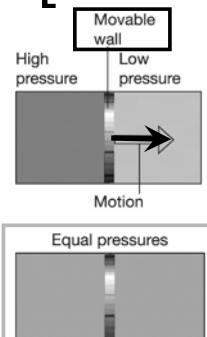


- A nivel microscópico un gas "ideal" puede concebirse como compuesto por bolas esféricas en movimiento.
- Las moléculas poseen, por tanto, una energía cinética. Los impactos contra las paredes del recipiente, integrándolas por unidad de volumen, generan una presión.

¿Aumentará la presión si disminuimos el volumen del recipiente? ¿Por qué?

Magnitudes Termodinámicas: Presión

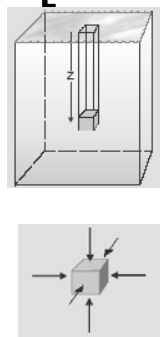
Equilibrio Mecánico entre dos Gases



- Consideremos dos gases a diferentes presiones que se encuentra separados en un recipiente por una pared móvil
- El gas que está a mayor presión tenderá a empujar la pared reduciendo el volumen (comprimiendo) el gas que se encuentra a menos presión, aumentando su presión.
- El gas que está a mayor presión se expande aumentando su volumen y reduciendo su presión.
- Finalmente, se alcanza un estado en que la presión de ambos gases se iguala y la pared deja de moverse. Este estado se denomina "Equilibrio Mecánico" entre dos gases.

Conceptos Fundamentales de la Termodinámica: Magnitudes - Presión

Presión Litostática



- La presión litostática que ejerce una columna de roca de densidad constante ρ a una profundidad, z , puede calcularse de la siguiente forma:

$$p = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Area}} = \frac{\text{Peso}}{A} = \frac{M \cdot g}{A}$$

$$\text{Volumen} = A \cdot z = \frac{M}{\rho} \quad \xrightarrow{\text{sustituyendo}} \quad M = A z \rho$$

Profundidad:

$$z = \frac{\rho g}{p}$$

Presión Litostática:

$$p = \frac{A z \rho g}{A} = z \rho g$$

Conceptos Fundamentales de la Termodinámica: Magnitudes - Presión

Problema 1.2 (a) : Solución

- A) Calcular la presión litostática (expresada en GPa) que soporta una roca en la base de la corteza continental terrestre ($z = 40 \text{ km}$) considerando una densidad constante de 2800 kg m^{-3}

$$p = z \rho g$$

$$p = (4 \cdot 10^4 \text{ m}) \times (2800 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) \times (9.81 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2})$$

$$p = 1098720000 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \text{s}^{-2} = 1.1 \cdot \text{GPa}$$

Conceptos Fundamentales de la Termodinámica: Magnitudes - Presión

Problema 1.2 (b)

- B) La densidad incrementa con la profundidad debido a la diferenciación química de la Corteza Continental. Calcular la presión litostática (en GPa) considerando que, entre la superficie ($z_1 = 0 \text{ km}$) y la Moho ($z_2 = 40 \text{ km}$), la densidad varía con la profundidad (z) según la ecuación:

$$\rho = a + b \cdot z$$

$a = 2800 \cdot \text{kg} \times \text{m}^{-3}$

$b = 0.01 \cdot \text{kg} \times \text{m}^{-4}$

~~$p = z \rho g$~~

$$p = g \int_{z_1}^{z_2} \rho \cdot dz$$

Conceptos Fundamentales de la Termodinámica: Magnitudes - Presión

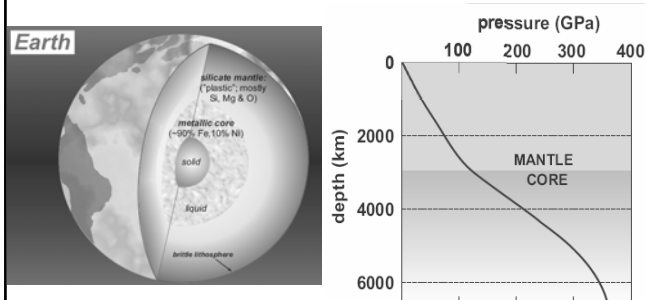
Problema 1.2 (b). Solución

$$\begin{aligned} \rho &= a + bz \\ p &= g \left(\int_{z_1}^{z_2} \rho \, dz \right) \\ \Delta p &= g \left(\int_{z_1}^{z_2} [a + bz] \, dz \right) \\ \Delta p &= g \left([az + \frac{1}{2}bz^2]_{z_1}^{z_2} \right) \\ \Delta p &= g \left(\left[\frac{1}{2}bz_2^2 + az_2 \right] - \left[\frac{1}{2}bz_1^2 + az_1 \right] \right) \\ \Delta p &= g \left(\frac{1}{2}bz_2^2 + az_2 - \frac{1}{2}bz_1^2 - az_1 \right) \\ p &= \left(112000000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} + 8000000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) g \quad \Delta p = 1.18 \times 10^9 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \end{aligned}$$

$$\rho \text{ constante} \rightarrow p = 1098720000 \cdot \text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2} = 1.10 \cdot \text{GPa}$$

Conceptos Fundamentales de la Termodinámica: Magnitudes - Presión

Distribución de la Presión en el Interior de la Tierra

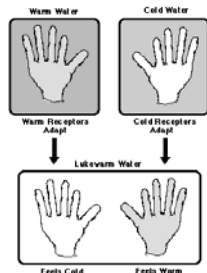


Conceptos Fundamentales de la Termodinámica: Magnitudes - Temperatura

Temperatura

- La temperatura es la propiedad que indica la dirección del flujo de la energía a través de una pared que trasmite el calor (i.e., diatérmica).

- Los seres humanos tenemos una buena percepción relativa del cambio de temperatura (ΔT). Esta percepción depende de la conductividad térmica de los objetos.



Conceptos Fundamentales de la Termodinámica: Magnitudes - Temperatura

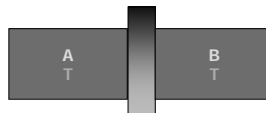
Equilibrio Térmico

- Consideramos dos sistemas aislados, A y B, separados por una pared adiabática y caracterizados por dos temperaturas diferentes T_1 y T_2 .

PARED ADIABÁTICA



- Si se sustituye la pared adiabática por una diatérmica la temperatura en los dos sistemas se iguala, SE DICE QUE SE HA ESTABLECIDO UN EQUILIBRIO TÉRMICO entre A y B.

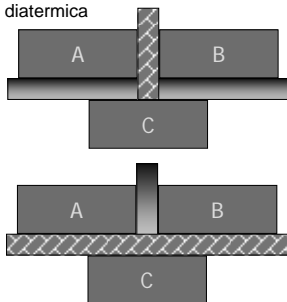


PARED DIATÉRMICA

Conceptos Fundamentales de la Termodinámica: Magnitudes - Temperatura

Equilibrio Térmico

- Consideremos ahora dos sistemas, A y B, separados mutuamente por una pared adiabática, y separados de un tercer sistema C por una pared diatérmica



- Se establece un equilibrio térmico de los dos sistemas, A y B, con C.
- Si ponemos en contacto A con B con una pared diatérmica y los separamos de C por una pared adiabática....

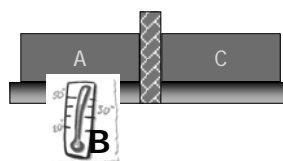
- La experiencia muestra que no se produce ningún cambio de temperatura. A y B están en equilibrio térmico.

Conceptos Fundamentales de la Termodinámica: Magnitudes - Temperatura

Principio Cero de la Termodinámica

- ¿Para que necesitamos este Principio?

- Justifica el concepto de Temperatura.
- Base para el uso de un termómetro como dispositivo para medir la Temperatura.



- Supón que el termómetro es el sistema B. Al equilibrarse con A, la columna de mercurio se expande una determinada longitud.
- Si al ponerlo en contacto con C, la columna se mantiene a la misma longitud, podemos predecir que A y C están en equilibrio térmico.

- Además, podemos utilizar la longitud como una medida de la Temperatura de los sistemas A y C.

Conceptos Fundamentales de la Termodinámica: Magnitudes - Temperatura

Escalas de Temperatura

AGUA

EBULLICIÓN

Fahrenheit

212

Celsius

100

Kelvin

373.15

180°

100°

100°

CONGELACIÓN

32

0

273.15

En la escala termodinámica la temperatura se mide en grados Kelvin (K)

$T(K) = T(^{\circ}C) + 273.15$

Como veremos más adelante, está basada en la escala de temperatura de los gases perfectos, que es independiente del tipo del gas.

Conceptos Fundamentales de la Termodinámica: Tipos de Magnitudes

Magnitudes Intensivas y Extensivas

SISTEMA

Masa: m

Volumen: V

Temperatura: T

Presión: p

Energía: E

SISTEMA / 2

m/2

V/2

T

p

E/2

m/2

V/2

T

p

E/2

SISTEMA / 4

m/4

V/4

T

p

E/4

m/4

V/4

T

p

E/4

m/4

V/4

T

p

E/4

m/4

V/4

T

p

E/4

■ Magnitudes Extensivas: Magnitudes dependientes de la cantidad de materia (m, V, E, etc...).

○ El valor de la magnitud del sistema puede expresarse como la suma del valor de las magnitudes de los subsistemas (m = 1/2 m + 1/2 m)

■ Magnitudes Intensivas: Magnitudes independientes de la cantidad de materia (T, p, ρ, etc...).

○ El valor de la magnitud del sistema es igual al de los subsistemas (T = T)

Conceptos Fundamentales de la Termodinámica: Tipos de Magnitudes

Magnitudes Molares y Específicas

Magnitudes Extensivas referidas a la cantidad de materia presente en el sistema

Molares = Extensiva / Número Moles

Volumen molar → V_m = V / n

m³/mol

Específica = Extensiva / masa

densidad = masa / Volumen

Kg / m³

■ Tienen el mismo valor en todo el sistema, así como en los subsistemas en los que se pueda dividir el sistema.

■ Por lo tanto, se les suelen considerar como Magnitudes INTENSIVAS.

Termodinámica de Procesos Minerales

TEMA 1

Introducción y Conceptos Básicos

Fin

Termodinámica Procesos Minerales.
Lic. Geologicas. Universidad de Granada

11