

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA QUÍMICA AMBIENTAL ALIMENTOS Y
PETROQUÍMICA



PROYECTO DE GRADO

**IMPLEMENTACIÓN PARA LA PLATAFORMA ANDROID DEL
DIAGRAMA PSICROMÉTRICO PARA MEZCLAS BINARIAS
DE VAPOR Y GAS SECO**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERO AMBIENTAL

POR: Univ. HECTOR RAUL BONIFACIO CONDORI

TUTOR: MSc. Ing. OMAR SALINAS PRUDENCIO

LA PAZ-BOLIVIA

2023

--

Índice General	
-----------------------	--

Agradecimientos	V
Resumen	VIII
Abstract	X
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1. ESTADOS DE LA MATERIA	2
1.1.1. ESTADO TERMODINÁMICO	2
1.1.2. FUNCIONES DE ESTADO	3
1.1.3. VARIABLES DE ESTADO	3
1.1.4. EQUILIBRIO	3
1.1.5. EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	3
1.1.6. CAMBIOS DE FASE	4
1.1.7. Estructura Cristalina	5
1.1.8. Equilibrio Líquido-Vapor	5
1.1.9. Presión de vapor	6
1.1.10. Mezclas Gas-Vapor	6
1.1.11. Propiedades de los Fluidos	6
1.2. ECUACIONES DE ESTADO	9
1.2.1. ECUACIÓN DE GAS IDEAL	10
1.2.2. ECUACIÓN VIRIAL GENERAL	10
1.2.3. Convergencia de la serie virial	14
1.2.4. Teoría del Sonido	16
1.2.5. Correlación, predicción y estimación de los coeficientes viriales	16
1.2.6. VOLUMEN MOLAR PARA UNA MEZCLA	16
1.2.7. ENERGÍA INTERNA	18
1.2.8. ENTALPÍA PARA LA MEZCLA	18
1.2.9. ENTROPÍA PARA LA MEZCLA	19
1.3. PSICROMETRÍA	19
1.3.1. Humedad Absoluta o Relación de Humedad	20
1.3.2. Mezcla Saturada Vapor-Gas	20

III	III
1.3.3. Mezcla Insaturada Vapor-Gas 20 1.3.4. Humedad Relativa 20 1.3.5. Punto de Rocío 21 1.3.6. Temperatura de Bulbo Húmedo 21 1.3.7. Temperatura de Bulbo Seco 21 1.3.8. Retos y desventajas 21 1.3.9. Otras ecuaciones 21 2. MARCO PRÁCTICO 22	

--

--

--

DEDICATORIA

*Con enorme amor y agradecimiento, dedico este trabajo a todas las personas
que contribuyeron en la formación académica, sobre todo a mis padres
Gerónimo y Saturnina
y a mis hermanos Nelson, Jhonsson y Yesica.*

Agradecimientos

A todos los que la presente vieron y entendieron.

Inicio de las Leyes Orgánicas. Juan Carlos I

Groucho Marx decía que encontraba a la televisión muy educativa porque cada vez que alguien la encendía, él se iba a otra habitación a leer un libro. Utilizando un esquema similar, nosotros queremos agradecer al Word de Microsoft el habernos forzado a utilizar \LaTeX . Cualquiera que haya intentado escribir un documento de más de 150 páginas con esta aplicación entenderá a qué nos referimos. Y lo decimos porque nuestra andadura con \LaTeX comenzó, precisamente, después de escribir un documento de algo más de 200 páginas. Una vez terminado decidimos que nunca más pasaríamos por ahí. Y entonces caímos en \LaTeX .

Es muy posible que hubiéramos llegado al mismo sitio de todas formas, ya que en el mundo académico a la hora de escribir artículos y contribuciones a congresos lo más extendido es \LaTeX . Sin embargo, también es cierto que cuando intentas escribir un documento grande en \LaTeX por tu cuenta y riesgo sin un enlace del tipo “*Author instructions*”, se hace cuesta arriba, pues uno no sabe por donde empezar.

Y ahí es donde debemos agradecer tanto a Pablo Gervás como a Miguel Palomino su ayuda. El primero nos ofreció el código fuente de una programación docente que había hecho unos años atrás y que nos sirvió de inspiración (por ejemplo, el fichero `guionado.tex` de \TeX IS tiene una estructura casi exacta a la suya e incluso puede que el nombre sea el mismo). El segundo nos dejó husmear en el código fuente de su propia tesis donde, además de otras cosas más interesantes pero menos curiosas, descubrimos que aún hay gente que escribe los acentos españoles con el `\'{\i}`.

No podemos tampoco olvidar a los numerosos autores de los libros y tutoriales de \LaTeX que no sólo permiten descargar esos manuales sin coste adicional, sino que también dejan disponible el código fuente. Estamos pensando en Tobias Oetiker, Hubert Partl, Irene Hyna y Elisabeth Schlegl, autores del famoso “*The Not So Short Introduction to \LaTeX 2 ϵ* ” y en Tomás Bautista, autor de la traducción al español. De ellos es, entre otras muchas cosas, el entorno `example` utilizado en algunos momentos en este manual.

También estamos en deuda con Joaquín Ataz López, autor del libro “Creación de ficheros \LaTeX con GNU Emacs”. Gracias a él dejamos de lado a WinEdt y a Kile, los editores que por entonces utilizábamos en entornos Windows y Linux respectivamente, y nos pasamos a emacs. El tiempo de escritura que nos ahorramos por no mover las manos del teclado para desplazar el cursor o por no tener que escribir `\emph` una y otra vez se lo debemos a él; nuestro ocio y vida social se lo agradecen.

Por último, gracias a toda esa gente creadora de manuales, tutoriales, documentación de paquetes o respuestas en foros que hemos utilizado y seguiremos utilizando en nuestro quehacer como usuarios de \LaTeX . Sabéis un montón.

Y para terminar, a Donal Knuth, Leslie Lamport y todos los que hacen y han hecho posible que hoy puedas estar leyendo estas líneas.

Resumen

\TeX IS es un conjunto de ficheros \LaTeX que pueden servir para escribir tesis doctorales, trabajos de fin de master, de fin de carrera y otros documentos del mismo estilo. El documento que tienes en tus manos es un manual que explica las distintas características de la plantilla. En los distintos capítulos iremos explicando los ficheros existentes en \TeX IS así como su función. También se explican algunas de las características, como por ejemplo ciertos comandos que facilitan la escritura de los documentos.

Aunque el código \LaTeX utilizado en \TeX IS está muy comentado para su uso fácil, creemos que las explicaciones que aquí se proporcionan pueden ser útiles.

Abstract

Psychrometry is a large environmental science...

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

La mejor estructura no garantizará los resultados ni el rendimiento. Pero la estructura equivocada es una garantía de fracaso.

Peter Drucker

RESUMEN: Este capítulo explica la estructura de directorios de extendido posteriormente en el

1.1. ESTADOS DE LA MATERIA

La termodinámica clásica se encarga de estudiar los estados de agregación: sólido, líquido y gaseoso. La fase gaseosa, donde las moléculas están bastante apartadas y sin orden aparente, adopta la forma del recipiente que los contiene (Y. A. Çengel, 2015, p. 111); en la fase líquida, las fuerzas intermoleculares son más débiles y también adopta la forma del recipiente que los contiene. Para (Chumacero, 2012), las principales diferencias de los distintos estados de la materia están en el arreglo dinámico de sus partículas (posición, distancia y movimiento).

1.1.1. ESTADO TERMODINÁMICO

Un estado termodinámico queda definido por las *propiedades termodinámicas* (Smith, 2007, p. 26). Son propiedades termodinámicas la presión, temperatura y el volumen; estas propiedades depende unos de otros.

Las propiedades pueden clasificarse en extensivas e intensivas.

Las *propiedades extensivas* son todas aquellas que depende de la cantidad de sustancia; es decir, su valor cambia con la cantidad de sustancia. Las *propiedades intensivas*, independiente de la cantidad de sustancia, este es invariante.

1.1.2. FUNCIONES DE ESTADO

Las propiedades termodinámicas

1.1.3. VARIABLES DE ESTADO

Las variables de estado definen el estado de un sistema termodinámico. Para (Castellan, 1998), el estado se define mediante las siguientes propiedades: masa, volumen, presión y temperatura. Mediante una *ecuación de estado*, puede determinarse la cuarta propiedad, el cual se conoce a partir del comportamiento del sistema.

1.1.4. EQUILIBRIO

Según (Smith, 2007, p. 29), el equilibrio es la ausencia de cambio, lo cual denota una condición estática; bajo esta condición no puede ocurrir ningún cambio de estado en ausencia de fuerzas que pueden promover un cambio de estado.

FASE

De acuerdo a (Smith, 2007, p. 30), una fase es una región homogénea de la materia; por ejemplo: una mezcla de gases, una solución líquida y un sólido cristalino son algunos ejemplos de fases. Para (Chang, 2010, p. 461), una fase es una parte homogénea de un sistema, y aunque está en contacto con otras partes del sistema, está separada de esas partes por un límite bien definido.

Pueden coexistir varias fases con la condición de que deben estar en equilibrio. A los líquidos y sólidos también se les conoce como fases condensadas o (estados condensados) (Silberberg, 2002, p. 430).

1.1.5. EQUILIBRIO TERMODINÁMICO

Para (Reisel, 2021) y (Y. A. Çengel, 2015), el equilibrio termodinámico sucede cuando un sistema alcanza el equilibrio mecánico, térmico, químico y el equilibrio de fases. Un sistema en equilibrio termodinámico es incapaz de realizar un

cambio espontáneo de su estado; cualquier cambio de estado recibe el nombre de proceso (Y. A. Çengel, 2015, p. 39).

El equilibrio termodinámico es el estado de balance donde todas las fuerzas del sistema termodinámico se cancelan mutuamente.

Existen diferentes tipos de fuerzas, de los cuales se mencionan a continuación:

- Equilibrio mecánico,
- equilibrio térmico,
- equilibrio químico,
- equilibrio de fases,
- equilibrio termodinámico.

Equilibrio mecánico

Equilibrio térmico

Equilibrio químico

Equilibrio de fases

Equilibrio termodinámico

1.1.6. CAMBIOS DE FASE

También conocido como transformaciones de fase, ocurre cuando se agrega o quita energía, generalmente en forma de calor. Los cambios de fase son cambios físicos que se distinguen porque cambia el orden molecular, y en la fase gaseosa las moléculas presentan un mayor desorden (Chang, 2010, p. 489). Los cambios entre los diferentes estados de agregación, según (Chumacero, 2012), se debe a las interacciones a nivel atómico y molecular de las sustancias y se manifiestan a nivel macroscópico como fuerza de *cohesión*, el cual sucede entre moléculas idénticas y las fuerzas de *adhesión* que se dan entre moléculas diferentes.

De la figura ??, la temperatura de equilibrio para la coexistencia de la fase Sólida-Líquida a una presión dada se llama, temperatura de fusión normal o

temperatura de congelación normal; para la temperatura de equilibrio a una determinada presión entre la fase Líquido-Gas se llama *Temperatura de ebullición normal*. "Si el punto triple está a una presión superior a 1 , la sustancia no tiene una temperatura de congelación normal o una temperatura de ebullición normal, pero tiene una temperatura de sublimación normal a la que el sólido y el gas coexisten a una presión igual a 1 atmósfera", (Mortimer, 2008, pp. 28)

1.1.7. Estructura Cristalina

La fase sólida se divide en dos categorías:

Tipos de cristales

- cristales iónicos (formado por cationes y aniones que suelen ser de distinto tamaño)
- cristales covalentes (se mantienen en una red tridimensional. Ej: diamante y grafito)
- cristales metálicos (los electrones están deslocalizado en todo el cristal)

1.1.8. Equilibrio Líquido-Vapor

Tipos de sólidos amorfos

Se forma cuando los átomos y moléculas del fluido no tienen tiempo de alinearse por sí mismos y pueden quedar fijas en posiciones distintas a uno de cristal ordenado

- cristales iónicos (formado por cationes y aniones que suelen ser de distinto tamaño)
- cristales covalentes (se mantienen en una red tridimensional. Ej: diamante y grafito)
- cristales metálicos (los electrones están deslocalizado en todo el cristal)

Cuando las moléculas de un líquido tienen suficiente energía para escapar de la superficie, sucede un cambio de fase

1.1.9. Presión de vapor

Cuando algunas moléculas de un líquido tienen energía suficiente para vencer las fuerzas atractivas, y pasar al estado gaseoso, el proceso se llama evaporación o vaporización (Universidad de Alcalá, cap 8)

1.1.10. Mezclas Gas-Vapor

Las mezclas debajo de la temperatura crítica

1.1.11. Propiedades de los Fluidos

Naturaleza de las mezclas Gas-Vapor

el

Naturaleza del Equilibrio

Equilibrio Dinámico

Sistema Termodinámico

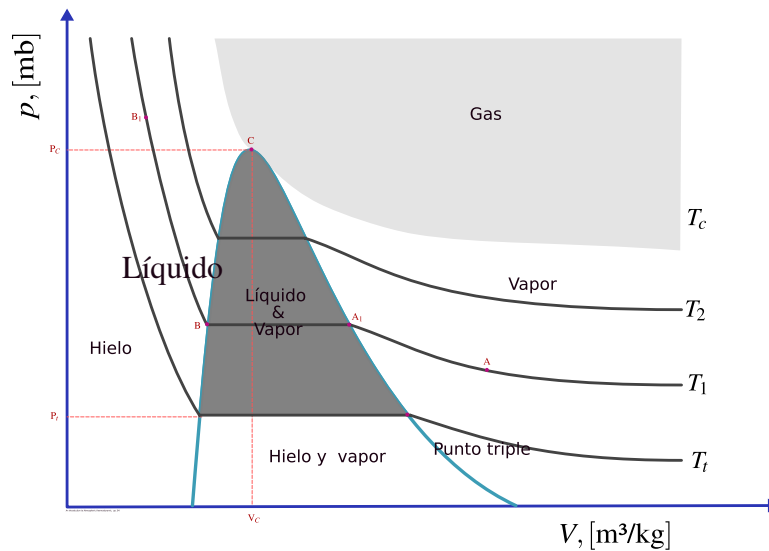
Modelo para el Equilibrio Líquido-Vapor

Variables Macroscópicas Volumen, Presión, Temperatura

Temperatura

En la actualidad se define en función a la constante de Boltzmann¹ k , $1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ en

¹Generado mediante cipy y pythontex

Figura 1.1.1*Diagrama de Amagat-Andrews*

Nota: Realizado con el editor de gráficos Vectoriales **inkscape**. Fuente: An introduction to Atmospheric Thermodynamics, Tsonis.

Presión

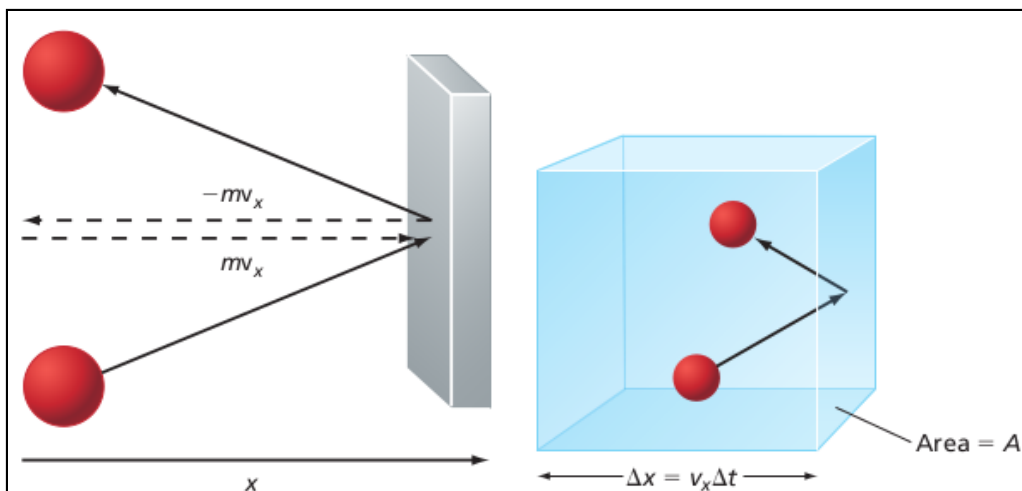
En general, la presión se define como la fuerza normal ejercida sobre una unidad de área. Se habla de presión cuando el sistema consiste de fluidos (gas o líquido); pero cuando este es sólido, se usa el término *esfuerzo normal* Y. A. Çengel (2015)

$$P = \frac{F}{A} \quad (1.1)$$

de un sistema en fase gaseosa, es la presión que aporta uno de los componentes

Fugacidad

La fugacidad de un componente en una mezcla depende de la temperatura, presión y la composición de la mezcla (Poling, 1987, p. 248)

**Figura 1.1.2**

Antes y después de la colisión de la partícula con la pared, muestra la conservación de la cantidad de movimiento.

Figura 1.1.3

Elemento de volumen que permite determinar el número total de colisiones con la pared. *Nota* Tomado de Chemistry

Presión Parcial

Presión Parcial

como la fracción de uno de los componentes respecto a la suma de cada una de ellas, denominado presión total.

$y_i = \frac{P_i}{\sum P_i}$ Donde y_i es la composición molar, P_i es la presión del componente i .

la expresión (1.1.11), también puede expresarse de la siguiente forma:

$y_i = \frac{P_i}{P_t}$ Donde

Ley de Raoult

Se requiere hacer las siguientes suposiciones para las consideraciones para la ley de Raoult (Smith, 2007)

- La fase de vapor es un **gas ideal**; significa que la aplicación se aplica solo a presiones bajas y moderadas.

- la fase líquida es una **solución ideal**; implica que la validez aproximada se da cuando las especies que constituyen el sistema, sean químicamente semejantes²

En base a las suposiciones mencionadas se deduce la siguiente expresión matemática

$$y_i P = x_i P_i^\circ \quad (1.2)$$

Donde y_i es la composición molar de la fase vapor, P es la presión total de la mezcla, x_i representa a la composición molar de la fase líquida del sistema y

De la ecuación (1.2), la expresión del lado izquierdo se conoce como, presión parcial del componente i

$$f_i^{\circ, \text{fase vap}} = \hat{\phi}_i y_i P \quad (1.3)$$

$$f_i^{\circ, \text{fase liq}} = \hat{\phi}_i x_i p_i \quad (1.4)$$

$$f_i^{\circ, \text{fase vap}} = \hat{\phi}_i y_i P \quad (1.5)$$

$$f_i^{\circ, \text{fase liq}} = \hat{\phi}_i x_i p_i \quad (1.6)$$

Ley De Henry

Según (Engel, 2019), una limitación de la ley de los gases ideales es que no predice bajo las condiciones apropiadas la licuefacción³ de gases.

1.2. ECUACIONES DE ESTADO

Los estudios realizados por R. Boyle(1662), Charles () y Gay Lussac, a partir de sus estudios independientes, permitieron la generalización del comportamiento los gases mediante una relación matemática conocida como *ley de gas ideal*.

²Especies moleculares de similar tamaño y de la misma naturaleza química.

³cambio de estado de una sustancia cuando pasa del estado gaseoso al líquido

Tabla 1.1*prueba*

Variable	En la Ley de Raoult	En la Ley de Raoult modificada
$\hat{\phi}_i$	1.00	1.00
y_i	y_i	y_i
f_i° , fase vap	P	P
γ_i	1.00	γ_i
f_i° , fase liq	p_i	p_i
Ec. resultante	$y_i = \frac{x_i P_i}{P}$	$y_i = \frac{\gamma_i x_i P_i}{P}$

1.2.1. ECUACIÓN DE GAS IDEAL

El comportamiento ideal de un gas, se expresa mediante la siguiente ecuación de estado:

$$z = \frac{PV_m}{RT} = 1 \quad (1.7)$$

Donde z es el coeficiente de compresibilidad, P es la presión absoluta, V_m es el volumen molar, T temperatura y R es la constante universal de los gases.

1.2.2. ECUACIÓN VIRIAL GENERAL

Según (Dymond et al., 2002), muchas ecuaciones de estado han sido propuestas para representar el comportamiento $P - V - T$ de los gases reales desde el punto de vista teórico; de los cuales, la ecuación virial es el más satisfactorio.

Para (Sengers et al., 1987, p. 37), la ecuación virial de estado de los gases, es una de las ecuaciones que intenta describir de manera exacta y precisa el comportamiento de los fluidos reales.

Una ventaja del uso de la ecuación virial es la existencia amplia de información experimental (Sengers et al., 1987, p. 38),

La ecuación virial puede ser apreciada como una serie de Maclaurin, de

³También llamado serie de Taylor

P/RT ; en vista de su naturaleza polinomial, puede escribirse como serie de potencias de $1/V_m$, el cual se muestra a continuación:

$$\frac{PV_m}{RT} = 1 + \frac{B}{V_m} + \frac{C}{V_m^2} + \dots \quad (1.8)$$

Donde,

P : es la presión total,

V_m : es el volumen molar,

R : es la constante universal de los gases,

T : corresponde a la temperatura absoluta,

B , C : son el 2do y 3er coeficiente virial que dependen de la temperatura, y para las mezclas también de su composición.

El 2do y el 3er coeficiente virial ha sido estudiado por más de 100 años, todos ellos muestran que no existe correlación (Chen-Hanson Ting, 2017)

Regla de Fase

La regla de fases fue desarrollada por

$$F = C + 2 - P \quad (1.9)$$

Donde,

F : es el número de grados de libertad o las variables que se tienen que especificar,

C : representa al número de componentes y

P : es el número de fases (sólido, líquido o gaseoso) en el sistema.

Dependencia de los coeficientes viriales de la temperatura

$$a = \sum_{i=1}^n B_i T^{-1} \quad (1.10)$$

$$C = \sum_{i=1}^n C_i T^{-1} \quad (1.11)$$

Dependencia de los coeficientes viriales de la composición

Para un gas puro, de acuerdo a la ecuación (1.9) se necesita, dos grados de libertad (F),

Donde, $x = 1$

Métodos para la estimación de los coeficientes viriales

Diversos autores señalan que los coeficientes viriales pueden derivarse de (Poling, s.f., p. 4.13) de la teoría molecular Para (Martin Trusler, 2014), los métodos para la medición de los coeficientes viriales pueden clasificarse en:

(a) Métodos directos

- Aparato de Burnet
- Densímetro de doble plomada acoplados magnéticamente

(b) Métodos indirectos

- Flujo calorimétrico
- Velocidad del sonido

para (Dymond et al., 2002), los métodos para la determinación de los coeficientes viriales pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Medidas de P - V_m - T ,
- Medidas de la velocidad del sonido
- Medidas de Joule-Thomson
- Medidas de índice de refractividad y permitividad relativa
- Medición de la entalpía de vaporización y la presión de vapor.

Estimación del Segundo Coeficiente Virial

El segundo coeficiente virial representa a la interacción entre pares de moléculas

Son diversos los trabajos que se han realizado para determinar el segundo coeficiente virial. (Woolley, 1969, postnote) trabajó para la formulación analítica del segundo coeficiente virial para una función esféricamente simétrica al cual denominó, *potencial de par realista*. (Pitzer, 1990) también trabajó para estimar el segundo coeficientes virial para compuestos no polares y de baja polaridad. Para compuestos polares se han realizado diversos estudios para estimar el segundo coeficiente virial, entre los cuales destacan los estudios de (Maris & Stiel, 1985), (Tarakad & Danner, 1977), y entre otros estudios se han realizado. (Vetere, 2007) propuso una modificación a método de Pitzer para predecir el segundo coeficiente virial para compuestos puros.

(Klotz, 1985) presenta una mejora para el cálculo del 2do coeficiente virial

Para la temperatura T y composición molar y , ambos constantes; de la ecuación (1.8), cuando $1/V_m \rightarrow 0$, el segundo coeficiente virial B , puede escribirse como:

$$B = \lim_{\frac{1}{V_m} \rightarrow 0} V_m \left(\frac{PV_m}{RT} - 1 \right) \quad (1.12)$$

Para (Beattie & Stockmayer, 1942, p. 473), la expresión $V_m(PV_m/RT - 1)$, puede ser calculado a partir de las mediciones de la compresibilidad isotérmica de la sustancia pura para su fase gaseosa; en caso de una mezcla, debe ser de composición molar constante; la compresibilidad isotérmica debe establecerse frente a $1/V_m$. El valor de la constante queda establecido en la intersección de la función con el eje $1/V_m$.

Para una mezcla binaria, B está relacionado con los coeficientes viriales de los componentes puros y sus composiciones, de la siguiente manera:

$$\bar{B} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j C_{ij} \quad (1.13)$$

Para un sistema de dos componentes ($n = 2$),

$$\bar{B} = y_g^2 B_{gg} + 2y_g y_v B_{gv} + y_v^2 B_{vv} \quad (1.14)$$

Donde:

B_{gg} : es el coeficiente virial para el componente puro de g y

B_{vv} : para v

B_{gv} : es la constante de interacción que depende de la temperatura, pero no de la composición molar.

Conociendo los coeficientes viriales para los componentes puros, hace falta establecer las relaciones matemáticas para B_{gv} .

Estimación del Tercer Coeficiente Virial

Para (Dymond et al., 2002), los valores son preferentemente determinados mediante la información de compresibilidad de gases

$$C = \lim_{\frac{1}{V_m} \rightarrow 0} \left[V_m \left(\frac{PV_m}{RT} - 1 \right) - B \right] V_m \quad (1.15)$$

$$\bar{C} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n x_i x_j x_k C_{ijk} \quad (1.16)$$

Desarrollando para un sistema de dos componentes:

$$\bar{C} = y_g^3 C_{ggg} + 3y_g^2 y_v C_{ggv} + 3y_g y_v^2 C_{gvv} + y_v^3 C_{vvv} \quad (1.17)$$

Donde:

y_v : denota la composición molar del componente V

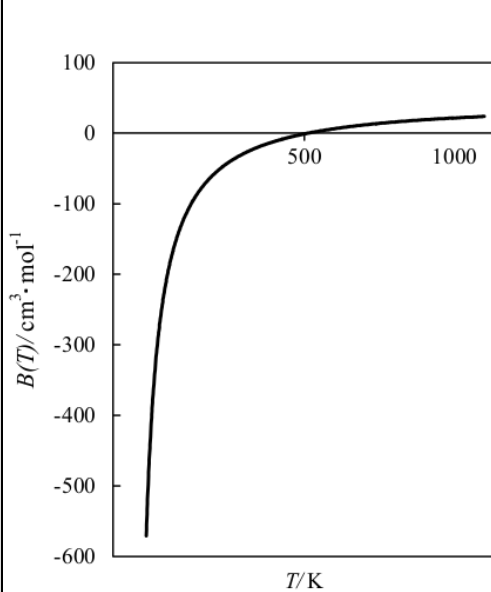
y_g : es la composición molar del componente G

C_{ggg} y C_{vvv} : son los coeficientes viriales para la sustancia pura de la mezcla y

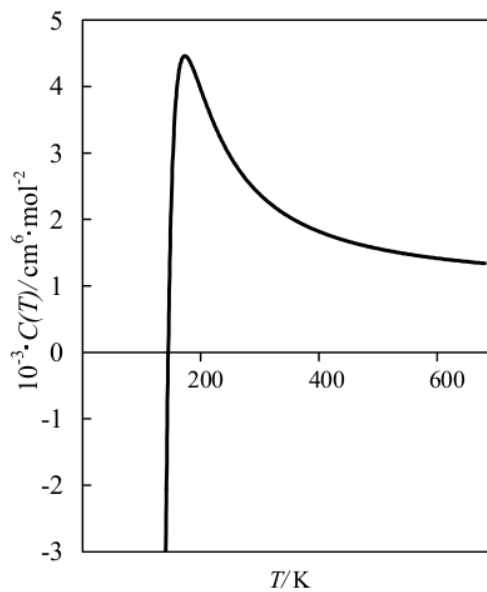
C_{ggv} y C_{gvv} : son los parámetros de interacción virial. Todos los coeficientes viriales que dependen de la temperatura.

1.2.3. Convergencia de la serie virial

1.2.4. Teoría del Sonido

**Figura 1.2.1**

Comportamiento del segundo coeficiente Virial para el metano.

**Figura 1.2.2**

Comportamiento del tercer coeficiente virial. *Nota* Tomado de (Dymond et al., 2002)

Velocidad del Sonido en los Gases

(Emmerich Wilhelm and Trevor Letcher, 2010, p. 186), define la velocidad del sonido como:

$$u^2 = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_S \quad (1.18)$$

Donde P es la presión, ρ es la densidad, S es la entropía

1.2.5. Correlación, predicción y estimación de los coeficientes viriales

Según (Dymond et al., 2002, p. 12), el método basado en la teoría del sonido, es el método que mejor se acerca a los valores reales; de esta manera, el segundo coeficiente virial queda expresado de la siguiente forma:

$$B(T) = \frac{N_A}{2V\omega^2} \iint f_{12} d\tau_1 d\tau_2 \quad (1.19)$$

Donde $f_{12} = \exp\{-U(R, \omega_1, \omega_2)/kt\} - 1$. Para una molécula lineal:

Desarrollo de las ecuaciones para el cálculo de los coeficientes viriales fluidos polares y no polares

1.2.6. VOLUMEN MOLAR PARA UNA MEZCLA

Para una mezcla gaseosa el volumen molar

$$\frac{P\bar{V}}{RT} = 1 + \frac{B}{\bar{V}} + \frac{C}{\bar{V}^2} + \dots \quad (1.20)$$

Donde,

P : es la presión que ejerce la mezcla de gases sobre el recipiente que lo contiene,

\bar{V} : es el volumen molar para la mezcla gaseosa,

R : es la constante universal de los gases,

T : corresponde a la temperatura absoluta,

B , C : son el 2do y 3er coeficiente virial que dependen de la temperatura, y para las mezclas también de su composición.

$$\begin{aligned}
 \ln f = & \left[\frac{(1 + \kappa P_v)(P_t - P_v) - \frac{1}{2} \kappa (P_t^2 - P_v^2)}{RT} \right] \hat{v}_{Ve} \\
 & + \ln(1 - k_H y_{gs} P_t) - \frac{2 y_{gs}^3 (2 - 3 y_{gs}) P_t^2}{(RT)^2} B_{gg} B_{gv} \\
 & + \frac{y_{gs}^2}{RT} B_{gg} - \frac{2 y_{gs}^2 P_t}{RT} B_{gv} - \left[\frac{P_t - P_v}{RT} - \frac{y_{gs}^2 P_t}{RT} \right] B_{gg} \\
 & + \frac{3 y_{gs}^2}{2 (RT)^2} (1 + 2 y_{gs}) P_t^2 C_{ggv} - \frac{3 y_{gs}^2 (1 - y_{gs}) P_t^2}{(RT)^2} C_{gvv} \\
 & - \left[\frac{(1 + 2 y_{gs})(1 - y_{gs})^2 P_t^2 - P_v^2}{2 (RT)^2} \right] C_{vvv} - \frac{3 y_{gs}^4 P_t^2}{2 (RT)^2} B_{gg}^2 \\
 & - \frac{y_{gs}^2 (1 - 3 y_{gs})(1 - y_{gs}) P_t^2}{(RT)^2} B_{gg} B_{vv} \\
 & + \frac{6 y_{gs}^2 (1 - y_{gs})^2 P_t^2}{(RT)^2} B_{vv} B_{gv} \\
 & - \frac{2 y_{gs}^2 (1 - y_{gs})(1 - 3 y_{gs}) P_t^2}{(RT)^2} B_{gv}^2 + \frac{y_{gs}^3 P_t^2}{(RT)^2} C_{ggg} \\
 & - \left[\frac{P_v^2 - (1 + 3 y_{gs})(1 - y_{gs})^3 P_t^2}{2 (RT)^2} \right] B_{vv}^2
 \end{aligned} \tag{1.21}$$

Donde:

\hat{v}_{Ve} : Volumen molar del componente V condensado

κ : denota la compresibilidad isotérmica

k_H : es la constante de la ley de Henry

P_t : es la presión total

R : constante universal de los gases

T : es la temperatura absoluta

y_v : denota la composición molar del componente V

y_g : es la composición molar del componente G

C_{ggg} y C_{vvv} : son los coeficientes viriales para la sustancia pura de la mezcla y C_{ggv} y C_{gvv} : son los parámetros de interacción virial. Todos los coeficientes viriales que dependen de la temperatura.

1.2.7. ENERGÍA INTERNA

(Treybal, 1981) la energía interna U de una sustancia es la energía total que reside en la sustancia debido a su movimiento y a la posición relativa de los átomos y moléculas que constituyen la sustancia. Los valores absolutos de la energía interna no son conocidas; sin embargo, su valor puede ser calculado respecto a un estado standard definido para la sustancia.

1.2.8. ENTALPÍA PARA LA MEZCLA

$$\begin{aligned}\bar{H} = & y_g \left(\hat{h}_{oG} + \int_{T_o}^T C_{p_g} dT \right) \\ & + y_v \left(\hat{h}_{oV} + \int_{T_o}^T C_{p_v} dT \right) \\ & + RT \left[\left(T \frac{d\bar{B}}{dT} - \bar{B} \right) \frac{1}{\bar{V}} + \left(\frac{T}{2} \frac{d\bar{C}}{dT} - \bar{C} \right) \frac{1}{\bar{V}^2} \right]\end{aligned}\quad (1.22)$$

Donde:

C_{p_v} : Indica el calor específico para el componente vapor

C_{p_g} : denota el calor específico para el componente gas

\hat{h}_{oV} :

\hat{h}_{oG} :

R : constante universal de los gases

T : representa a la temperatura

y_v : denota la composición molar del componente v

y_g : es la composición molar del componente g

\bar{B} : representa al segundo coeficiente virial para la mezcla

\bar{C} : es el representación del tercer coeficiente virial de la mezcla

\bar{V} : representa al volumen de la mezcla.

1.2.9. ENTROPÍA PARA LA MEZCLA

$$\begin{aligned} \bar{s}_m = & X_a \left(\sum_{i=0}^4 M_i T^i + M_5 \ln(T) + \bar{s}'_a \right) + X_w \left(\sum_{i=0}^5 N_i T^i + N_6 \ln(T) + \bar{s}'_w \right) \\ & - \mathbb{R} \ln \left(\frac{p}{101325} \right) + X_a \mathbb{R} \ln \left(\frac{p \bar{v}_m}{X_a \mathbb{R}_0 T} \right) + X_w \mathbb{R} \ln \left(\frac{p \bar{v}_m}{X_w \mathbb{R}_0 T} \right) \quad (1.23) \\ & - \mathbb{R} \left[\frac{B_m + T \frac{dB_m}{dT}}{\bar{v}_m} + \frac{C_m + T \frac{dC_m}{dT}}{\bar{v}_m^2} + 0,5 \right] \end{aligned}$$

1.3. PSICROMETRÍA

El grupo Europeo de Investigadores (GERG, por sus siglas en francés) Algorithms Psychrometry, Bell, Harvey

Para el estudio de la psicrometría mediante la ecuación de gases ideales, según (), se hacen las siguientes suposiciones ():

- La fase sólida o líquida no contiene gases disueltos,
- la fase gaseosa puede ser tratado como una mezcla de gases ideales,
- cuando la mezcla y la fase condensada están dadas a una presión y temperatura, el equilibrio entre la fase condensada y la mezcla gaseosa, no está influenciada por la presencia de otros componentes; significa que cuando se alcanza el equilibrio, la presión parcial del vapor será igual a la presión de saturación dada a la temperatura de la mezcla.

La relación psicrométrica viene dada por:

$$\frac{h_c}{k'_{cs}} = r \quad (1.24)$$

$$P = \frac{R\theta}{V_m - b} - \frac{a}{V_m^2}$$

1.3.1. Humedad Absoluta o Relación de Humedad

La humedad absoluta se define como la relación de la masa del vapor (v) y la masa del gas (g):

$$Y = \frac{m_v}{m_g} \quad (1.25)$$

Mediante el modelo de ecuación de estado del gas ideal ($m_i = \bar{M}_i \frac{P_i V_m}{RT}$):

$$Y = \frac{M_v}{M_g} \frac{x_v}{1 - x_v} \quad (1.26)$$

Si se conoce la humedad absoluta (Y), la composición de la cantidad de vapor puede calcularse a partir de la ecuación (1.26), quedando la expresión de la siguiente manera:

$$x_v = \frac{Y \frac{M_v}{M_g}}{1 + Y \frac{M_v}{M_g}} \quad (1.27)$$

1.3.2. Mezcla Saturada Vapor-Gas

Cuando un gas seco entra en contacto con un líquido de un vapor, el líquido se evaporará hacia el gas hasta alcanzar el equilibrio, la presión parcial del vapor (v) en la mezcla vapor-gas alcanza su valor de saturación. la presión de vapor P_v . El gas puede ser considerado como insoluble en el líquido la naturaleza de la presión de vapor en la mezcla saturada es independiente de la naturaleza del gas y la presión total (excepto a altas presiones) parenciteTreybal.Mass.Transfer.1981,

1.3.3. Mezcla Insaturada Vapor-Gas**1.3.4. Humedad Relativa**

Representado mediante (ϕ), algunas de las interpretaciones que se ha establecido; para (Cusi, 2010) es un indicador del grado de saturación de un gas seco

con un vapor, la definición termodinámica de acuerdo a (), es la relación de la fugacidad del vapor en la mezcla respecto a la fugacidad de la mezcla gaseosa.

Se define como la relación de la presión parcial de vapor del agua respecto a la presión saturada a una temperatura dada.

$$\phi = \frac{P_v}{P_v^\circ} \quad (1.28)$$

$$Y = \frac{\phi P_v^\circ}{P_t - \phi P_v^\circ} \frac{M_v}{M_g} \quad (1.29)$$

Donde:

ϕ : Representa a la humedad relativa

P_v° : Presión de vapor saturado a la temperatura de operación

M_v y M_g : Son el peso molecular de los componentes vapor y gas, respectivamente.

1.3.5. Punto de Rocío

1.3.6. Temperatura de Bulbo Húmedo

1.3.7. Temperatura de Bulbo Seco

1.3.8. Retos y desventajas

Para (Bell et al., 2017, p. 8), puede ocurrir la formación potencial de hidratos de gas seco; estos son, moléculas de gas atrapados en una red de moléculas de vapor; este fenómeno suele suceder a xxx presiones.

1.3.9. Otras ecuaciones

CAPÍTULO 2

MARCO PRÁCTICO

Tipo book, Cantó, ingresé, volá, on tesis umsa