

Cálculo del calor latente de vaporización del nitrógeno en Bogotá

Jorge A. Chávez

Resumen

Se calculó el calor latente de vaporización del nitrógeno para las condiciones ambientales de Bogotá obteniéndose resultando $L_{V\text{exp}} = 266,77 \pm 1,61$ kJ/kg, utilizando técnicas de termogravimetría, contrastando este resultado con un valor teórico obtenido mediante la ecuación de Clausius-Clapeyron, se obtuvo un error experimental de 3,42%.

1 Introducción

Termogravimetría

La Termogravimetría (TG) está basada en la medida de la variación de la masa de una muestra cuando se la somete a un cambio de temperatura en una atmósfera controlada. Esta variación puede ser una pérdida o una ganancia de masa. El registro de estos cambios nos dará información sobre si la muestra se descompone o reacciona con otros componentes.[1]

Calor latente de vaporización

Para pasar de la fase líquida a la fase de vapor se necesita una absorción de energía por parte de las moléculas líquidas, ya que la energía total de éstas últimas es menor que la de las moléculas gaseosas. En el caso contrario, en la condensación, se produce un desprendimiento energético en forma de calor. El calor absorbido por un líquido para pasar a vapor sin variar su temperatura se denomina calor de vaporización. Se suele denominar *calor latente de vaporización* cuando nos referimos a un mol.[2]

En un proceso de ebullición a presión constante el calor absorbido por la sustancia que cambia de fase viene dado por

$$Q = mL_v \quad (1)$$

Ecuación de Clausius Clapeyron

Para analizar la frontera líquido gas se toma como punto de partida la ecuación de Clapeyron:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta S}{\Delta V} \quad (2)$$

La ebullición de un material puro acontecerá a una temperatura T_{eb} e ira acompañada de una entalpía molar de evaporación ΔH_{eb} , que en este caso viene a ser el calor molar de vaporización L_v , por lo que la ecuación anterior toma la siguiente forma

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L_v}{T_{\text{eb}}V_{\text{eb}}} \quad (3)$$

como $V = V_V - V_L$, tenemos:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L_v}{T_{\text{eb}}(V_V - V_L)} \quad (4)$$

tanto L_v , V_V como V_L están referidas a un mol.

Si la temperatura no está próxima al valor crítico el volúmen $V_L \gg V_V$ y se puede despreciar V_L frente a V_V . Por tanto,

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L_v}{T_{\text{eb}}V_V} \quad (5)$$

Si nos movemos lejos del punto crítico se puede muy bien introducir la ecuación de los gases ideales $pV = RT$, quedando[3]:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L_v}{RT_{\text{eb}}^2} \quad (6)$$

Si se supone que el calor latente de vaporización no depende de la temperatura, la ecuación anterior se puede integrar obteniendo:

$$\ln\left(\frac{p_{\text{atm}}}{p_{\text{n.m.}}}\right) = -\frac{L_v}{R}\left(\frac{1}{T_{\text{atm}}} - \frac{1}{T_{\text{n.m.}}}\right) \quad (7)$$

donde p_{atm} y T_{atm} son la presión y temperatura atmosféricas en el lugar en donde se encuentre la sustancia cambiando de fase, y $p_{\text{n.m.}}$ y $T_{\text{n.m.}}$ son las condiciones de referencia tomadas a nivel del mar, luego despejando el calor latente de la ecuación anterior se tiene:

$$L_v = R \ln\left(\frac{p_{\text{atm}}}{p_{\text{n.m.}}}\right) \cdot \left(\frac{T_{\text{atm}}T_{\text{n.m.}}}{T_{\text{atm}} - T_{\text{n.m.}}}\right) \quad (8)$$

donde $R = 8,314472 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ [12] que si se desea expresar en unidades de $\text{J.K}^{-1}.\text{g}^{-1}$ bastará dividir por la masa molar de la sustancia en cuestión.

Variación de la presión atmosférica con la altura

En la atmósfera la presión disminuye rápidamente con la altura debido a que la cantidad de aire es menor al alejarnos de la superficie terrestre. Por lo tanto, al ir ascendiendo los valores medidos con un barómetro serán cada vez más pequeños. Este hecho es la base del funcionamiento de los altímetros usados para medir alturas en las ascensiones de montañas.[4]

Usando el principio fundamental de la hidrostática podremos calcular la altura a la que nos encontramos:

$$p_{\text{atm}} = p_{\text{n.m.}} \exp(-\alpha h) \quad (9)$$

donde $\alpha = 0,116 \text{ km}^{-1}$ [5] y h la altura a la que se desea calcular la presión atmosférica.

Corrección de la temperatura de ebullición

En el caso de los líquidos, la temperatura de ebullición se ve afectada por los cambios en la presión atmosférica debidos a las variaciones en la altura. A medida que un sitio se encuentra más elevado sobre el nivel del mar, la temperatura de ebullición se hace menor.

Con el propósito de realizar comparaciones con los valores aportados por la literatura, se hace necesario corregir la temperatura normal de ebullición en un factor proporcional a las diferencias de presiones. Los factores de corrección se muestran en la tabla 1 y dependen de la polaridad del líquido.[8]

T_{eb} normal(K)	Variación en T por $\Delta P = 10\text{mmHg}$	
	f [Líquidos no polares (K)]	f [Líquidos polares (K)]
323,15	0,380	0,320
333,15	0,392	0,330
343,15	0,404	0,340
353,15	0,416	0,350
363,15	0,428	0,360
373,15	0,440	0,370
383,15	0,452	0,380
393,15	0,464	0,390
403,15	0,476	0,400

Tabla 1: Factores de corrección del punto de ebullición por cambios en la presión

Conservación de la energía por unidad de tiempo en un proceso de ebullición

Como ya se indicó anteriormente cuando una sustancia se encuentra en proceso de ebullición por conservación de la energía, la energía (E_{ext}) por unidad de tiempo que recibe del exterior es igual al calor por unidad de tiempo [ver ecuación (1)] que necesita para cambiar de fase, es decir:

$$E_{\text{ext}} = mL_v \quad (10)$$

donde para obtener el calor por unidad de tiempo se deriva respecto al tiempo la ecuación, obteniendo

$$P_{\text{ext}} = \dot{m}L_v \quad (11)$$

donde $P_{\text{ext}} = dE_{\text{ext}}/dt$ y $\dot{m} = dm/dt$ son las tasas de variación de energía y masa respecto al tiempo respectivamente.

2 Procedimiento Experimental

Se utilizaron los siguientes implementos:

- 2000 g de Nitrógeno líquido.
- Un generador de voltaje (DC)
- Un multímetro.
- Una resistencia, disipadora de potencia de 4,7 Ω y 10 watts
- Una balanza de tres brazos.
- Un cronómetro.
- Un recipiente de icopor.

En el recipiente de icopor se encontraba el nitrógeno líquido de manera que la tapa no cerraba completamente para permitir que el vapor de nitrógeno fluyera casi libremente al exterior. El conjunto anterior se pesaba en la balanza para determinar la tasa de pérdida de masa del nitrógeno por unidad de tiempo, para ello se utilizó un cronómetro y se midió el tiempo cada 3 g y 5 g en los casos con y sin resistencia inmersa en el nitrógeno.

3 Resultados Experimentales

Se midió la resistencia en el interior del nitrógeno y la diferencia de potencial de salida de la fuente para así determinar la potencia disipada por la resistencia, los resultados de estas mediciones se muestran en la tabla 3.

Resistencia (R):	$(5,50 \pm 0,01) \Omega$
Voltaje (V):	$(5,90 \pm 0,01) V$
Potencia (P):	$(4,79 \pm 0,39) \text{ watts}$

Tabla 2: Resistencia, diferencia de potencial y potencia utilizadas

Luego se procedió a medir los datos de masa y tiempo como se indicó en la sección anterior estos resultados de muestran en la tabla 3.

Luego a partir de estos datos se hizo una gráfica como se muestra en la figura 1 observándose que los puntos experimentales tenían una tendencia lineal, de donde se realizó un ajuste de mínimos cuadrados [6] encontrando que las tasas de pérdida de masa (\dot{m}_1 y \dot{m}_2) para cuando había disipación únicamente por efectos del medio ambiente y para cuando se tenía la resistencia inmersa en el nitrógeno respectivamente son las que se muestran en la tabla 4 con sus respectivos coeficientes de correlación. A partir de esos datos, considerando la potencia entregada por la resistencia, se calculó el calor latente de ebullición¹, mostrándose ese resultado también en la tabla 4.

Observaciones importantes

- Los errores para $L_{V_{\text{exp}}}$ y para P_{elec} se calcularon siguiendo los procedimientos para el cálculo de incertidumbres experimentales como se muestra en [7] y los errores para los parámetros del ajuste lineal se calcularon del método de mínimos cuadrados [6].
- En la figura 1 las barras de error no son apreciables debido a que son muy pequeñas en comparación con la escala de gráfica.

¹Para calcular el calor latente de ebullición se toma en cuenta los dos casos:

- Cuando hay disipación por efectos del medio ambiente ($P_{\text{ext}} = P_{\text{amb}}$) únicamente, por la ecuación (11) se tiene que:

$$P_{\text{amb}} = \dot{m}_1 L$$

- Cuando se tiene la resistencia inmersa hay disipación de calor por causa de esta P_{elec} y del medio ambiente ($P_{\text{ext}} = P_{\text{amb}} + P_{\text{elec}}$), usando nuevamente la ecuación (11):

$$P_{\text{amb}} + P_{\text{elec}} = \dot{m}_2 L$$

Finalmente de las dos ecuaciones anteriores

$$L_{\text{exp}} = \frac{P_{\text{elec}}}{\dot{m}_2 - \dot{m}_1}$$

Sin resistencia		Con resistencia	
Tiempo (s) [$\pm 0,01$ s]	Masa (g) [$\pm 0,1$ g]	Tiempo (s) [$\pm 0,01$ s]	Masa (g) [$\pm 0,1$ g]
0,00	1727,0	0,00	1450,0
26,41	1724,0	39,42	1445,0
52,87	1721,0	76,68	1440,0
79,60	1718,0	113,49	1435,0
106,20	1715,0	151,24	1430,0
132,39	1712,0	183,01	1425,0
160,24	1709,0	221,80	1420,0
187,69	1706,0	259,60	1415,0
214,11	1703,0	297,49	1410,0
241,51	1700,0	332,50	1405,0
268,51	1697,0	368,68	1400,0
296,05	1694,0	406,53	1395,0
322,96	1691,0	443,65	1390,0
363,87	1688,0	482,58	1385,0
390,42	1685,0	515,34	1380,0
420,97	1682,0	553,54	1375,0
438,21	1679,0	592,74	1370,0
461,92	1676,0	629,73	1365,0
492,30	1673,0	666,31	1360,0
516,42	1670,0	702,76	1355,0
543,60	1667,0	743,31	1350,0
565,60	1664,0	794,91	1345,0
594,27	1661,0	824,27	1340,0
629,50	1658,0	852,84	1335,0
655,65	1655,0	891,45	1330,0
683,01	1652,0	927,99	1325,0
716,98	1649,0	965,07	1320,0
732,60	1646,0	1006,42	1315,0
756,58	1643,0	1040,35	1310,0
787,23	1640,0	1077,21	1305,0
814,54	1637,0	1118,34	1300,0
841,72	1634,0	1153,17	1295,0
869,44	1631,0	1191,15	1290,0
894,24	1628,0	1228,54	1285,0
921,24	1625,0	1268,19	1280,0
948,69	1622,0	1304,41	1275,0
977,71	1619,0	1343,56	1270,0
1004,80	1616,0	1381,32	1265,0
1033,29	1613,0	1419,25	1260,0
1061,91	1610,0	1456,47	1255,0

Tabla 3: Datos medidos de masa vs. tiempo con y sin la resistencia inmersa

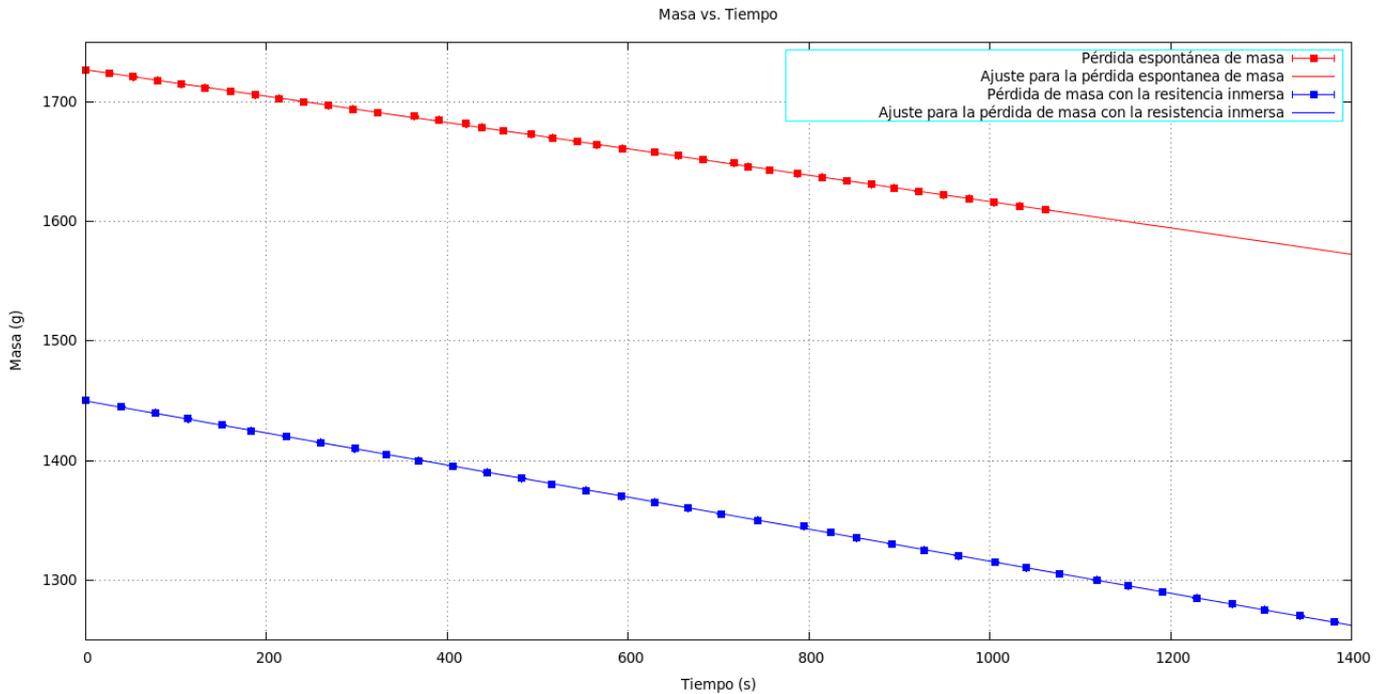


Figura 1: Gráfica de masa vs tiempo para los datos de la tabla 3

Ecuación de la recta para evaporación sin resistencia:	$m_1(t) = (-0,1103 \pm 2 \times 10^{-4})g/s t + (1796,26 \pm 0,15)g$
Coeficiente de correlación (r_1^2):	0,999
Tasa de pérdida de masa (\dot{m}_1):	$(0,1103 \pm 2 \times 10^{-4})g/s$
Ecuación de la recta para evaporación con resistencia:	$m_2(t) = (-0,1340 \pm 2 \times 10^{-4})g/s t + (1449,74 \pm 0,15)g$
Coeficiente de correlación (r_2^2):	0,999
Tasa de pérdida de masa (\dot{m}_2):	$(0,1340 \pm 2 \times 10^{-4})g/s$
Calor latente de ebullición del Nitrógeno (L_{Vexp}):	$(266,77 \pm 1,61) kJ/kg$

Tabla 4: Resultados experimentales

4 Análisis de resultados

Se procederá a calcular el calor latente de ebullición del nitrógeno líquido a la presión atmosférica y temperatura de ebullición determinadas por las condiciones ambientales de Bogotá, de la siguiente manera:

Cálculo de la presión atmosférica en Bogotá

Sabiendo que Bogotá está a una altura de $h = 2640$ msnm[9] y que la presión atmosférica al nivel del mar es $p_{n.m.} = 101325$ Pa[10]; siguiendo la ecuación (9), tenemos que la presión atmosférica de Bogotá es $p_{atm} = 74596$ Pa

Cálculo de la temperatura de ebullición del nitrógeno en Bogotá

Utilizando la tabla 1 se realizó una gráfica de los factores de corrección ² vs la temperatura normal de ebullición del nitrógeno como se muestra en la figura 2 y en base a ella se decidió hacer un ajuste lineal a los puntos, obteniendo la siguiente ecuación $f(T_{atm}) = 1,16 \times 10^{-3}T_{atm} + 6,08 \times 10^{-3}$ K de donde para la temperatura normal de ebullición del nitrógeno ($T_{n.m.} = 77,35$ K)[11] se tiene que el factor de corrección es $f(77,35 \text{ K}) = 0,0958$ K, luego se determinó la temperatura de ebullición en Bogota, considerando que la diferencia entre la presión atmosférica a nivel del mar y la presión atmosférica en Bogotá es de 200 mmHg, de la siguiente manera[8]:

$$T_{atm} = T_{n.m.} - \frac{200 \text{ mmHg}}{10 \text{ mmHg}} f(T_{n.m.}) \implies T_{atm} = 75,43 \text{ K}$$

²Se consideran los factores de corrección para sustancias polares pues la molécula del Nitrógeno es polar

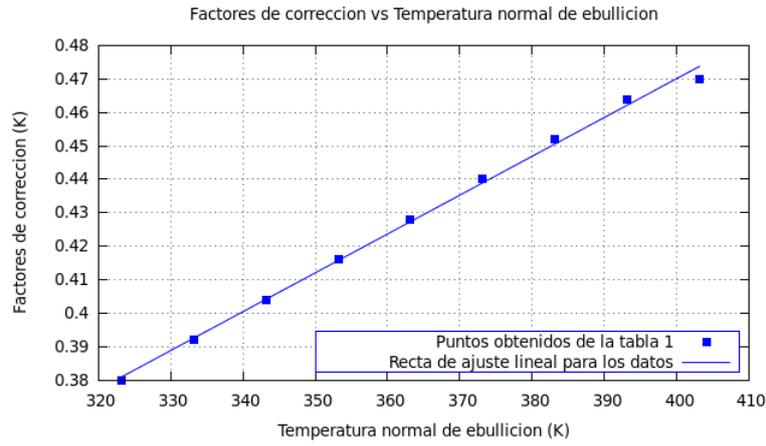


Figura 2: Gráfica de los factores de corrección para el punto de ebullición del nitrógeno

Estimación del calor latente de ebullición teórico

Para estimar el calor latente de ebullición del nitrógeno se consideraron los valores de $T_{atm} = 75,43 \text{ K}$, $p_{atm} = 74596 \text{ Pa}$ calculados anteriormente, además se tuvo en cuenta que para este caso $R = 296,803 \text{ J.K}^{-1}.\text{Kg}^{-1}$ valor que se obtuvo según lo tratado en el párrafo final correspondiente a la sección de la ecuación de Clapeyron, tomando como masa molar del nitrógeno (N_2) a $\bar{M}_{N_2} = 28,0134 \text{ g/mol}$ [13] y tomando en cuenta que la presión atmosférica a nivel del mar es $p_{n.m.} = 101325 \text{ Pa}$ [10] y que la temperatura de ebullición a nivel del mar es $T_{n.m.} = 77,35 \text{ K}$ y luego reemplazando todos esos valores en la ecuación (8) se tiene que:

$$L_{V_{teo}} = 296,803 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1} \ln \left(\frac{74596 \text{ Pa}}{101325 \text{ Pa}} \right) \cdot \left(\frac{75,43 \text{ K} \cdot 77,35 \text{ K}}{75,43 \text{ K} - 77,35 \text{ K}} \right)$$

obteniéndose que $L_{V_{teo}} = 276,212 \text{ kJ.kg}^{-1}$

Usando la ecuación $L_{V_{teo}} = 0,296803 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{Kg}^{-1} \ln \left(\frac{P_{atm}}{101325 \text{ Pa}} \right) \cdot \left(\frac{T_{atm} \cdot 77,35 \text{ K}}{T_{atm} - 77,35 \text{ K}} \right)$ se realizó una gráfica del calor latente de vaporización en función de la presión y temperatura como se muestra en la figura 3.

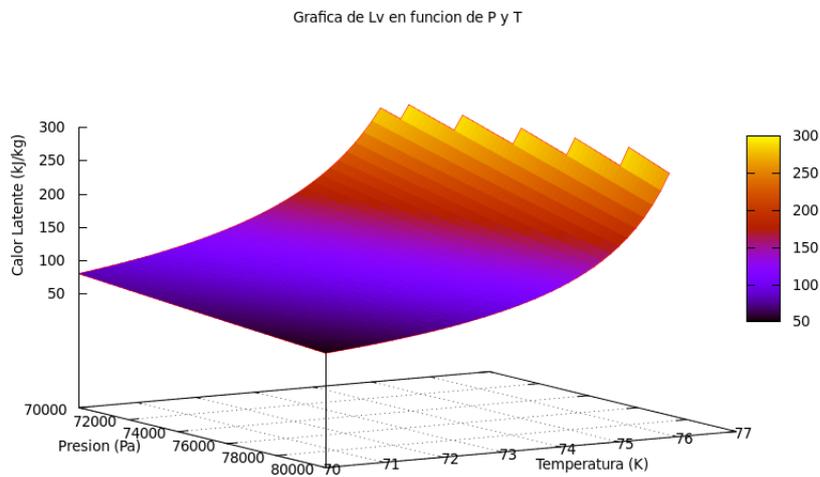


Figura 3: Gráfica del calor latente de vaporización en función de la presión y la temperatura

Comparación del calor latente de ebullición teórico y experimental

Finalmente comparando el calor latente de ebullición experimental del nitrógeno que se muestra en la tabla 4, con el calor latente teórico obtenido en la sección anterior se tiene que el error experimental es:

$$\%Error = \left| \frac{L_{V\text{teo}} - L_{V\text{exp}}}{L_{V\text{teo}}} \right| \times 100\%$$

de lo cual reemplazando los valores correspondientes resulta que $\%Error = 3,42\%$, en la table 5 se muestra un resumen de los resultados obtenidos en la presente experiencia.

$L_{V\text{teo}}$ (kJ.kg ⁻¹)	$L_{V\text{exp}}$ (kJ.kg ⁻¹)	Error experimental
276,212	266,77 ± 1,61	3,42%

Tabla 5: Comparación de resultados experimentales y teóricos

5 Conclusiones

- El valor del calor latente de vaporización del nitrógeno estimado para las condiciones ambientales de Bogotá es $L_{V\text{exp}} = 266,77 \pm 1,61$ kJ/kg, valor que dista en un 3,42% del valor estimado teóricamente.
- A pesar de que la diferencia entre las tasas de variación de masa es de apenas unas centésimas, el resultado obtenido muestra la efectividad del método termogravimetrico usado.
- Se muestra que el calor latente de los materiales depende de las condiciones ambientales del lugar; así pues las variables termodinámicas se comportan cuantitativamente de manera diferente dependiendo del marco de referencia, sin cumplirse el análogo para los comportamientos cualitativos de las mismas.

Referencias

- [1] www.ehu.es/imacris/PIE06/web/AT.htm
- [2] <http://www.uclm.es/profesorado/mssalgado/Laboratorio%20de%20Qu%C3%ADmica%20II/calorlat.pdf>
- [3] C.J. Adkins, *Equilibrium Thermodynamics*, thrid edition, paginas 184 y 185
- [4] <http://perso.gratisweb.com/grupopascal/FLUIDOS%20Profe/FLUIDOS%20Profe/Carpeta%20unidad/Patmosferica/patmos.htm>
- [5] Humberto Leyva Naveros, *Física II, Teoría y Problemas Resueltos*, Cap. 3
- [6] Ángel Miguel Ardila, *Física Experimental*, Cap 7 - Pag 127 - 130
- [7] Ángel Miguel Ardila, *Física Experimental*, Cap 3 - Pag 63
- [8] <http://docencia.udea.edu.co/cen/tecnicaslabquimico/02practicass/practica06.htm>
- [9] <http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/ayudadetareas/geografia/geo106.htm>
- [10] http://es.wikipedia.org/wiki/Presi%C3%B3n_atmosf%C3%A9rica
- [11] <http://es.wikipedia.org/wiki/Nitr%C3%B3geno>
- [12] http://es.wikipedia.org/wiki/Constante_universal_de_los_gases_ideales
- [13] <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/n.htm>