



Universidad de Sevilla
Doble Grado en Física y Matemáticas
Termodinámica

Práctica 4
Determinación del incremento de entalpía de
vaporización del nitrógeno

Ángel Ruiz Campos
Grupo E2

24 de febrero de 2026

Índice

1	Introducción	3
2	Dispositivos experimentales	3
3	Resultados	6
4	Discusión	12
5	Conclusiones	13
6	Referencias	14

1. Introducción

El nitrógeno (N_2) líquido es estable, a presión atmosférica, hasta una temperatura de 77,35 K ($-195,8^{\circ}C$) [1], [2]. En contacto con el ambiente —que se encuentra a una temperatura superior—, el nitrógeno líquido absorbe calor del medio y comienza a hervir de forma estacionaria. La tasa de evaporación del nitrógeno líquido —masa de N_2 evaporado por unidad de tiempo— depende de las condiciones del contacto con el medio, por lo que se almacena en recintos aislados térmicamente. La no existencia de paredes adiabáticas perfectas implica que, en contacto con el ambiente, siempre existirá evaporación.

Existe diversa bibliografía sobre el cálculo experimental de la entalpía de vaporización del N_2 mediante experiencias académicas. Esto se debe a la bondad de sus resultados y a la simplicidad de sus montajes y la facilidad de obtener comercialmente nitrógeno líquido [3].

Precisamente, el objeto de la presente memoria es describir la experiencia presentada en [1], presentar y analizar sus resultados. Este documento se enmarca en el trabajo académico desarrollado en la asignatura «Termodinámica» del Doble Grado en Física y Matemáticas de la Universidad de Sevilla.

Una forma de poder medir el incremento de entalpía de vaporización del N_2 se basa en emplear la técnica de termogravimetría, que consiste en medir el cambio de masa por evaporación para deducir las energías que intervienen en un proceso mediante los balances adecuados [1].

El principio de conservación de la energía relaciona la cantidad de calor necesario para evaporar una masa de nitrógeno líquido con las pérdidas del recipiente que lo contiene. Para ser capaz de determinar ambas magnitudes, es necesario generar distintas condiciones experimentales introduciendo un trabajo disipativo. De esta forma, el balance de energías por unidad de tiempo vendría dado por la ecuación:

$$\dot{m}\Delta h = \dot{Q} - \dot{W}, \quad (1)$$

donde \dot{W} es la potencia disipada, \dot{Q} son las pérdidas por unidad de tiempo, \dot{m} es la tasa de evaporación y Δh es el incremento de entalpía de vaporización del N_2 [1].

La bondad del resultado experimental obtenido se puede determinar tomando como referencia el valor del incremento de entalpía de vaporización del N_2 igual a $199,176\text{ J g}^{-1}$ [2].

2. Dispositivos experimentales

El montaje experimental de la siguiente experiencia se ha realizado en el Laboratorio de Termodinámica de la Facultad de Física de la Universidad de Sevilla. Se ha dispuesto de un vaso Dewar con nitrógeno líquido, de un resistor conectado a una fuente de tensión y de un granatario, un cronómetro, un amperímetro y un voltímetro como instrumentos de medida. La figura 1 muestra el montaje empleado.



Figura 1: Fotografías del montaje experimental tomadas el 19 de noviembre de 2025 por el autor. A la izquierda se aprecia el vaso Dewar sobre el granatario para la medición de la disminución de la masa debida a la evaporación del N₂ y su escape del recinto –se puede apreciar por la escarcha formada en los tubos que salen del vaso Dewar–. A la derecha puede observarse el cronómetro y la fuente de tensión, el amperímetro y el voltímetro conectados a un circuito que alimenta el resistor. La figura 2 detalla el esquema del circuito.

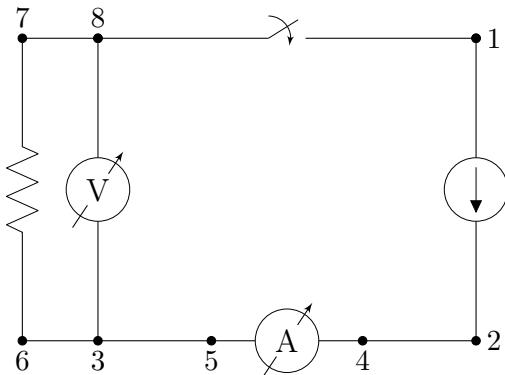


Figura 2: Esquema del circuito empleado en la práctica de laboratorio –reproducido de [1]–. El montaje está conformado por una fuente de tensión conectada con un resistor, de un interruptor para abrir o cerrar el circuito y de un amperímetro conectado en serie y un voltímetro en paralelo.

La experiencia comienza encendiendo el granatario y configurando el amperímetro y el voltímetro para medir en corriente alterna. A continuación, se enciende la fuente de tensión y se commuta el interruptor del circuito.

Preparado el instrumental, se hace circular una corriente de 0,45 A por el circuito. En ese instante, se anota la lectura del granatario –que será la masa inicial de nitrógeno líquido–

y se pone en marcha el cronómetro. Durante 15 min se anotan las lecturas del granatario, del voltímetro y del amperímetro cada 30 s.

La experiencia se repite para valores de intensidad de 0,4 A, 0,3 A y 0,25 A. Finalmente se desconecta el circuito y se mide el comportamiento libre del sistema. Entre cada una de las experiencias se deja pasar un tiempo para que la evaporación del nitrógeno líquido alcance un ritmo estacionario. La figura 3 resume el procedimiento mediante un diagrama de flujo.

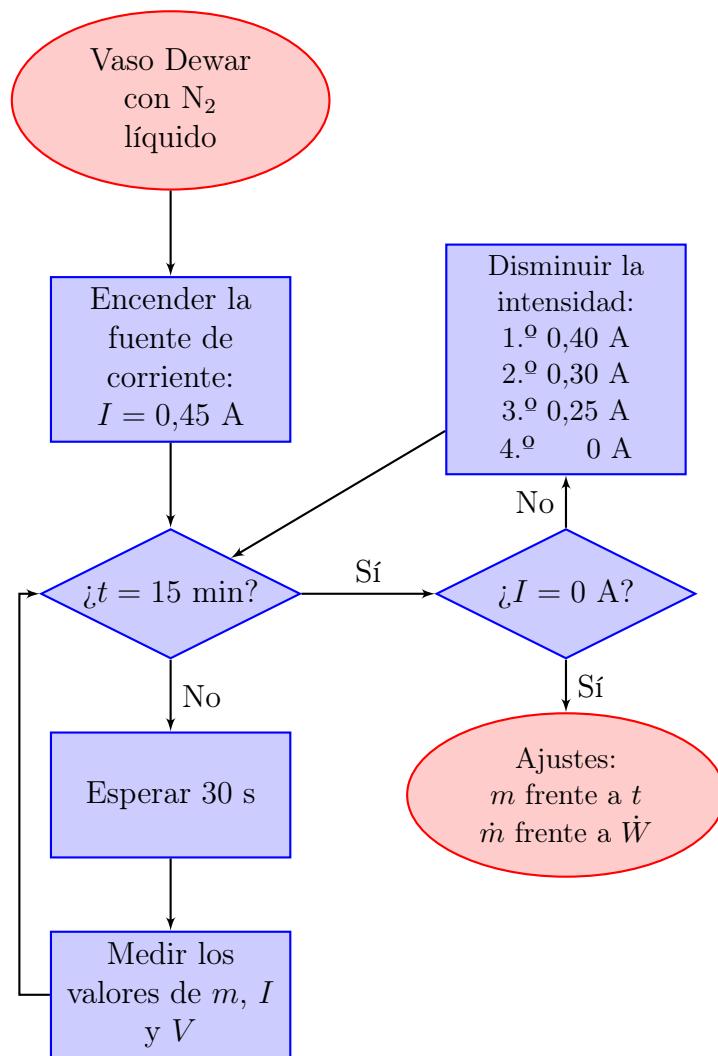


Figura 3: Diagrama de flujo que esquematiza el procedimiento de la experiencia. En rojo se representan el sistema objeto de estudio y los resultados a analizar. Los rombos simbolizan decisiones y los cuadrados acciones.

3. Resultados

Para la presentación de los datos y su tratamiento se han seguido los criterios expuestos en [4] y [5]. El ajuste de los datos y su representación gráfica se ha realizado empleando el *software* libre *gnuplot* [6], mientras que para la redacción de la presente memoria se ha hecho uso del modo de edición *org mode* del editor de texto *Emacs* [7]. La generación de las figuras 2 y 3 ha sido realizada mediante la librería *TikZ* de *LATEX*. Para el caso del circuito, en particular, se ha hecho uso de la librería *CircuiTikZ*. Todos los archivos empleados para la compilación de esta memoria se encuentran accesibles en el repositorio de GitHub con enlace <https://github.com/angruicam/Termodinamica>. En particular, puede accederse al fichero con los datos obtenidos en el laboratorio.

La toma en el laboratorio de los datos recogidos en esta memoria fue realizada el día 19 de noviembre de 2025. Siguiendo el procedimiento descrito, se obtuvieron cinco series de datos, correspondientes a las corrientes de 0,45 A, 0,4 A, 0,3 A, 0,25 A y al comportamiento libre del sistema. Las tablas 1 y 2 muestran los resultados medidos. En la cabecera de cada columna se indica la incertidumbre de los datos, que a su vez se corresponde con una unidad del último dígito de la lectura del aparato de medida. En el caso del tiempo, aunque el cronómetro mide hasta las centésimas de segundo se toma como incertidumbre ± 1 s debido al tiempo de reacción.

A partir de las medidas realizadas se obtiene el valor de la tasa de evaporación del nitrógeno líquido, \dot{m} , para cada serie de datos. En primer lugar, la tabla 3 presenta los valores calculados para la masa total de N₂ evaporado en cada medición, que se obtiene como la diferencia entre la medida inicial marcada en el granatario (1520,8 g) y cada una de las ulteriores medidas. Su incertidumbre se obtiene, por tanto, como la suma de las incertidumbres de ambas magnitudes. En la figura 4 se representa la masa de N₂ evaporada frente al tiempo para cada una de las series de datos. Del ajuste lineal de cada conjunto de medidas se deriva el valor de la tasa de evaporación correspondiente a cada condición experimental. Pueden extraerse directamente del archivo *fit.log* generado por *gnuplot*.

Final set of parameters		Asymptotic Standard Error
m45	= 0.0270726	+/- 0.000169 (0.6243%)
m45i	= 1.0625	+/- 0.08855 (8.334%)
m40	= 0.0220524	+/- 2.923e-05 (0.1325%)
m40i	= 26.128	+/- 0.01531 (0.0586%)
m30	= 0.0169382	+/- 3.109e-05 (0.1835%)
m30i	= 47.3875	+/- 0.01629 (0.03437%)
m25	= 0.0153871	+/- 2.29e-05 (0.1488%)
m25i	= 63.3565	+/- 0.012 (0.01893%)
m0	= 0.0106801	+/- 5.118e-05 (0.4792%)
m0i	= 77.4101	+/- 0.02681 (0.03464%)

t/s	m_{45}^v/g $\pm 0,2$	m_{40}^v/g $\pm 0,2$	m_{30}^v/g $\pm 0,2$	m_{25}^v/g $\pm 0,2$	m_0^v/g $\pm 0,2$
0	0	26,1	47,5	63,4	77,6
30	1,6	26,8	47,9	63,8	77,9
60	2,6	27,5	48,4	64,3	78,1
90	3,5	28,0	48,9	64,7	78,4
120	4,3	28,7	49,4	65,2	78,7
150	5,3	29,5	49,9	65,6	79,0
180	6,0	30,1	50,4	66,1	79,3
210	6,9	30,8	50,9	66,6	79,6
240	7,7	31,4	51,4	67,0	79,9
270	8,6	32,1	51,9	67,5	80,3
300	9,4	32,7	52,5	68,0	80,6
330	10,2	33,4	52,9	68,5	80,9
360	11,0	34,1	53,5	68,9	81,2
390	11,8	34,7	54,0	69,4	81,5
420	12,6	35,4	54,5	69,8	81,8
450	13,4	36,1	55,0	70,3	82,1
480	14,2	36,7	55,6	70,8	82,5
510	15,0	37,4	56,1	71,2	82,8
540	15,8	38,1	56,6	71,7	83,1
570	16,6	38,7	57,1	72,1	83,4
600	17,4	39,4	57,5	72,6	83,8
630	18,2	40,0	58,1	73,0	84,1
660	18,9	40,7	58,5	73,5	84,5
690	19,7	41,4	59,1	74,0	84,8
720	20,5	42,0	59,6	74,4	85,1
750	21,3	42,7	60,1	74,9	85,4
780	22,1	43,3	60,6	75,4	85,8
810	22,9	44,0	61,1	75,8	86,1
840	23,6	44,6	61,6	76,3	86,5
870	24,4	45,3	62,1	76,7	86,8
900	25,1	45,9	62,6	77,2	87,1

Tabla 3: Valores de la masa de nitrógeno líquido evaporado para cada intervalo de tiempo. El subíndice se relaciona con las centésimas de amperio de la serie correspondiente y el superíndice indica que es la masa de N₂ que se ha evaporado.

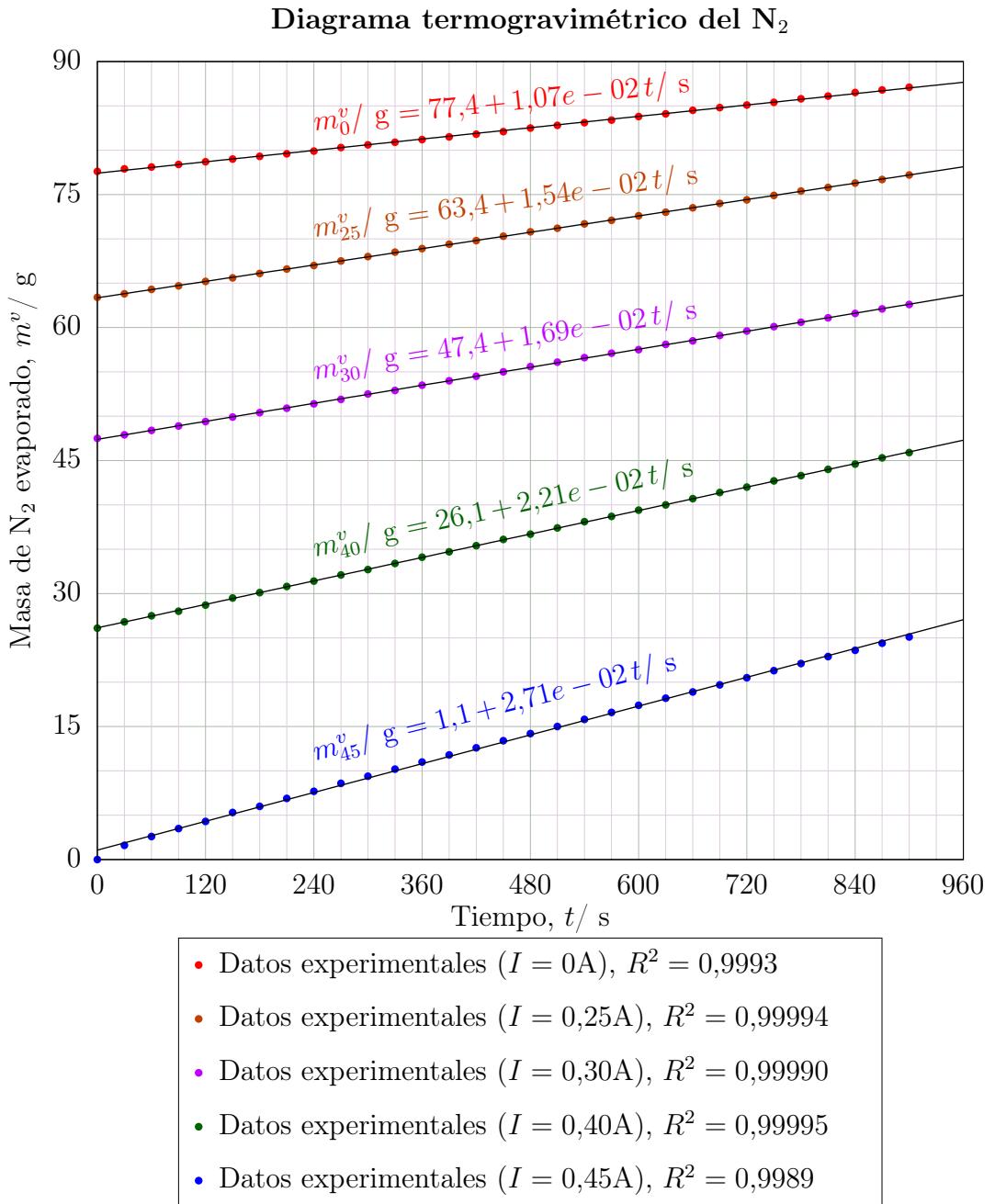


Figura 4: Diagrama termogravimétrico obtenido a partir de la evaporación del nitrógeno líquido bajo distintas condiciones experimentales. Sobre cada recta de ajuste se presenta su ecuación, cuya pendiente equivale a la tasa de evaporación del nitrógeno líquido al hacer circular por el circuito la corriente correspondiente a cada serie de datos.

Por su parte, conforme a la ley de Watt, la potencia disipada por el resistor viene dada por la expresión:

$$\dot{W} = -V I, \quad (2)$$

donde I y V se corresponden, para cada condición experimental generada, con la media de los valores tabulados en las tablas 1 y 2. Como todas las medidas del amperímetro y el voltímetro tienen la misma incertidumbre, también será la incertidumbre de su valor medio. Mediante propagación de incertidumbres se llega a:

$$\Delta \dot{W} = V \Delta I + I \Delta V.$$

La tabla 4 muestra los valores de la tasa de evaporación, \dot{m} , y la potencia disipada, \dot{W} , para cada experiencia.

Condición experimental	$\dot{m}/10^{-2} \text{ g s}^{-1}$	$\dot{W}/\text{ J s}^{-1}$
$I = 0,45 \text{ A}$	$2,707 \pm 0,017$	$-2,76 \pm 0,06$
$I = 0,40 \text{ A}$	$2,205 \pm 0,003$	$-2,16 \pm 0,05$
$I = 0,30 \text{ A}$	$1,694 \pm 0,003$	$-1,19 \pm 0,04$
$I = 0,25 \text{ A}$	$1,539 \pm 0,002$	$-0,85 \pm 0,03$
$I = 0 \text{ A}$	$1,068 \pm 0,005$	0

Tabla 4: Valores de la tasa de evaporación del N₂ y de la potencia disipada para cada una de las condiciones experimentales fijadas en la experiencia.

Para la obtención de la entalpía de vaporización del N₂ se tiene en cuenta en primer lugar, que la evaporación se produce a presión constante. Por tanto, como se expuso en la ecuación 1, en el balance energético solo es necesario considerar la tasa de evaporación, el incremento de entalpía, las pérdidas por unidad de tiempo y la potencia disipada. Respecto al término \dot{Q} —que representa el intercambio de calor por unidad de tiempo entre el medio y el nitrógeno líquido— puede considerarse constante durante todo el experimento puesto que las temperaturas del sistema y del ambiente no varían. Por tanto, los datos de la tabla 4 pueden ajustarse linealmente a la ecuación:

$$\dot{m} = -\frac{1}{\Delta h} \dot{W} + \frac{\dot{Q}}{\Delta h}. \quad (3)$$

De nuevo, pueden extraerse del archivo *fit.log* generado por *gnuplot* los parámetros del ajuste con su respectivas incertidumbres. La figura 5 representa los conjuntos de datos y su recta de regresión.

Final set of parameters	Asymptotic Standard Error
<hr/>	
dh	= 173.157
Q	= 1.79859
	+/- 9.45 (5.458%)
	+/- 0.1819 (10.11%)

Por tanto, los valores estimados para el incremento de entalpía de vaporización del nitrógeno, Δh , y las pérdidas por unidad de tiempo, \dot{Q} , son:

$$\Delta h = (173 \pm 9) \text{ J g}^{-1}. \quad (4)$$

$$\dot{Q} = (1,80 \pm 0,18) \text{ J s}^{-1}. \quad (5)$$

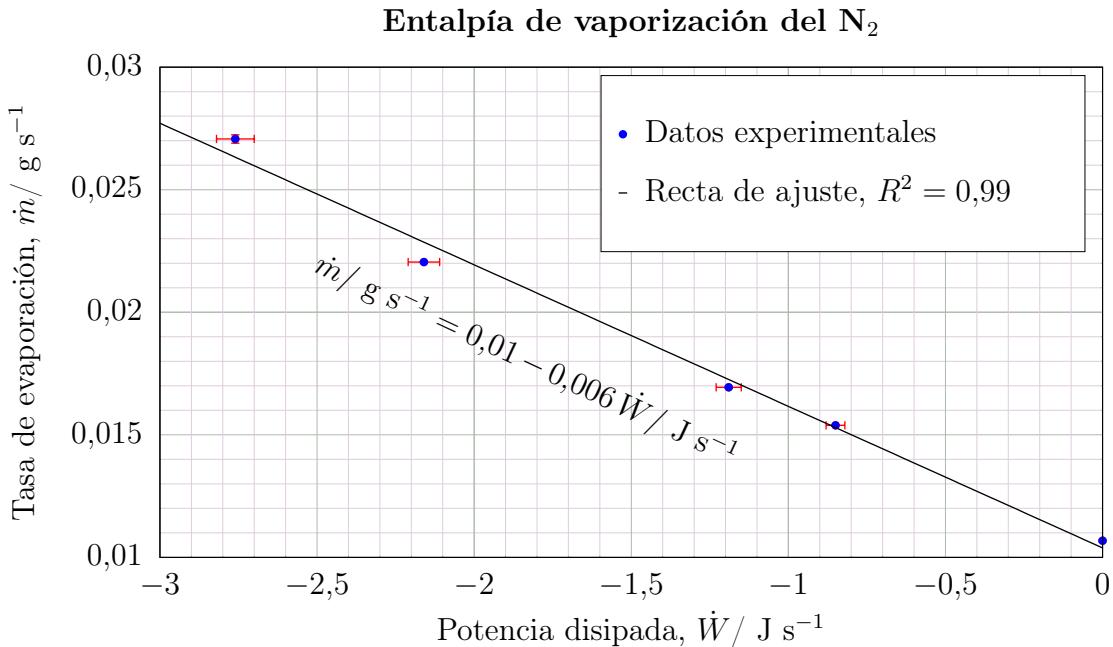


Figura 5: Representación de los valores obtenidos para las tasas de evaporación, \dot{m} , frente a la potencia disipada, \dot{W} . Ambas magnitudes pueden relacionarse linealmente mediante la ecuación 3 de conservación de la energía. A partir del ajuste pueden estimarse los valores del incremento de entalpía de vaporización del N₂ y de las pérdidas por unidad de tiempo. En rojo se representan las barras de error de los datos.

4. Discusión

Conceptualmente, los resultados obtenidos concuerdan con lo esperado. La entalpía de vaporización del nitrógeno es positiva. El nitrógeno líquido absorbe energía para romper las fuerzas intermoleculares. La vaporización es un proceso endotérmico. Por otra parte, el nitrógeno líquido se encuentra a una temperatura inferior a la del ambiente, por lo que absorbe calor de este. Como ya se ha expuesto, el ritmo del intercambio de calor puede considerarse constante durante toda la experiencia, por lo que la cantidad de calor absorbido es cada vez mayor. Este último hecho respalda que las pérdidas por unidad de tiempo sean positivas.

Cuantitativamente, el valor obtenido para la entalpía de vaporización del nitrógeno presenta un error relativo del 13 % respecto del valor de referencia a presión atmosférica ($199,176 \text{ J g}^{-1}$) extraído de [2]. Si se analiza la figura 4 se observa que la serie de datos correspondiente a la intensidad de corriente de 0,45 A muestra la mayor dispersión –en particular, un R^2 menor–. Los puntos correspondientes a las primeras mediciones presentan un comportamiento más alejado del ajuste lineal. Probablemente esto sea debido a que la evaporación del N₂ no fuese aún estacionaria en el momento de comenzar la toma de datos.

Si se repite el ajuste de la figura 5 excluyendo el punto correspondiente a la intensidad de corriente de 0,45 A, se obtiene un nuevo valor para la entalpía de vaporización del nitrógeno:

$$\Delta\hat{h} = (190 \pm 3) \text{ J g}^{-1},$$

cuyo error relativo es del 5 %.

5. Conclusiones

La práctica de determinación de la entalpía de vaporización del nitrógeno constituye una experiencia con un alto valor académico gracias a la calidad de sus resultados y a que permite trabajar con sustancias a bajas temperaturas. Conviene considerar, a la hora de reproducir la experiencia, los tiempos de espera para que el nitrógeno líquido hierva estacionariamente y los resultados se ajusten mejor a las hipótesis formuladas.

Otro aspecto donde se han detectado una posibilidad mejora es en la toma de datos. La anotación cada 30 s de las medidas de tres instrumentos –granatario, amperímetro y voltímetro– introduce un factor de tiempo de reacción y la necesidad de tener que apuntar simultáneamente tres valores. La automatización de las lecturas de los instrumentos de medida podría minimizar los errores introducidos.

6. Referencias

- [1] J.-M. M. Olalla, F. J. Romero y R. C. Flores, «PRÁCTICAS del Laboratorio de Termodinámica,» oct. de 2025.
- [2] E. W. Lemmon, I. H. Bell, M. L. Huber y M. O. McLinden, «Thermophysical Properties of Fluid Systems,» en *NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69*, P. J. Linstrom y W. G. Mallard, eds., Obtenido 22 febrero 2026, Gaithersburg, MD: National Institute of Standards y Technology, 2026. DOI: 10.18434/T4D303. dirección: <https://doi.org/10.18434/T4D303>.
- [3] P. A. Knutson y G. L. Salinger, «TPT NOTES: A Simple Measurement of the Heat of Vaporization of Liquid Nitrogen,» *The Physics Teacher*, vol. 7, n.º 5, págs. 288-289, mayo de 1969, ISSN: 0031-921X. DOI: 10.1119/1.2351368. eprint: https://pubs.aip.org/aapt/pte/article-pdf/7/5/288/11375462/288_1_online.pdf. dirección: <https://doi.org/10.1119/1.2351368>.
- [4] J.-M. M. Olalla, «Cómo escribir textos científicos,» oct. de 2025.
- [5] L. M. E. Fedriani, A. R. de Arellano López, M. C. L. Fernández y col., «Nociones elementales del tratamiento de datos y de la presentación de resultados,» 2024-2025.
- [6] T. Williams, C. Kelley y col., *Gnuplot 5.4 patchlevel 2: an interactive plotting program*, <http://gnuplot.sourceforge.net/>, 2021.
- [7] The Org Mode Developers, *Org mode, version 9.5.2*, <https://orgmode.org>, 2021.

