

# Ley de Boyle-Mariotte

Juan Sebastián Gómez Díaz, Juan José Sánchez Ortíz

Grupo 1.

juan.s.gomez@correounivalle.edu.co, juan.sanchez.o@correounivalle.edu.co

Laboratorio de física fundamental II, Departamento de Física, Universidad del Valle.

7 de marzo de 2022.

**Resumen:** Durante esta práctica se realizó una aplicabilidad de la ley de Boyle-Mariotte con ayuda de un capilar de vidrio abierto de un extremo y cerrado del otro conteniendo mercurio, donde se realizó un proceso isotérmico para verificar la relación inversamente proporcional del volumen y la presión.

**Palabras claves:** *Ley Boyle-Mariotte, mercurio, presión, volumen, proceso isotérmico, baño térmico, gases.*

## 1. Introducción

El objetivo principal de este laboratorio fue hallar la relación que existe entre el volumen ( $V$ ) y la presión absoluta ( $P$ ) de una columna de aire durante un proceso isotérmico. El fundamento teórico que se utilizó durante la práctica fue una simplificación de la *Ley de los gases ideales* [1], la cual se denomina como *Ley de Boyle-Mariotte*.

La ley de los gases ideales afirma que los moles ( $n$ ) de un gas ideal son conocidos por la interacción de tres variables, la temperatura ( $T$ ), la presión ( $P$ ) y el volumen ( $V$ ), que es descrita por la ecuación 1, donde  $R$  corresponde a la constante universal de los gases ( $8.134 \frac{J}{molK}$ ).

$$PV = RTn \quad (1)$$

Con alguna de las tres variables permaneciendo constantes. La *Ley de Boyle-Mariotte* es aquella donde la temperatura ( $T$ ) es la variable que se conserva constante durante todo el proceso, por lo tanto, el producto del volumen y la presión ( $PV$ ) es igual a una constante. Este comportamiento de los gases es la razón por la cual los globos meteorológicos se expanden a medida que se elevan en la atmósfera. Adicionalmente, otra aplicación de la *Ley de Boyle-Mariotte* está dentro de nosotros, los pulmones. El volumen en los pulmones es controlado por la caja torácica y el diafragma, los cuales son responsables del proceso de inhalación y exhalación.

Donde la primera es provocada por la expansión de la caja torácica y el movimiento hacia abajo del diafragma, que aumenta el volumen de los pulmones, lo que reduce la presión del gas dentro de ellos. Entonces la presión atmosférica fuerza la entrada de aire en los pulmones hasta que la presión adentro y afuera de los pulmones sea la misma. Para la exhalación es el proceso inverso [1].

Es decir, se puede concluir sin dificultad que el volumen y la presión son inversamente proporcionales cuando un gas no está compartiendo materia con el universo y su temperatura permanece constante. Matemáticamente se expresa la manera escrita en las ecuaciones 2 y 3, donde  $c$  corresponde a la constante de proporcionalidad.

$$PV = c \quad (2)$$

$$V = \frac{c}{P}$$

$$V \propto \frac{1}{P} \quad (3)$$

A partir de ahí se deduce que la presión y el volumen siguen una relación tal que  $y(x) = Ax^b$ . La manera que se aplicó la teoría fue mediante un termómetro de gas, el cual permanece a temperatura constante en un ambiente el cual imita un baño térmico, para que éste permanezca a una temperatura constante. El termómetro de gas es un capilar de vidrio con un extremo cerrado y otro abierto, éste

contiene cierta cantidad de aire entre el extremo cerrado y una gota de mercurio. Al momento en que el extremo abierto se encuentre con presión atmosférica ( $P_0$ ), la presión que experimenta la muestra será [3]:

$$P_{Aplicada} = P_0 + P_{Hg} + \Delta P \quad (4)$$

El volumen del aire confinado corresponde a  $V_0$ . Al momento de cerrar el contacto con la atmósfera y bombear aire mediante la bomba manual de vacío que produce un cambio de presión ( $\Delta P$ ) negativo. Por lo tanto, el volumen, que es la variable dependiente, será determinado por la altura ( $h$ ) de la columna de mercurio y el área de la sección interna del capilar.

## 2. Metodología

Durante este laboratorio se hizo uso de ciertas herramientas para verificar el efecto de la presión sobre el volumen, entre ellos están un *termómetro de gas y uno digital*, una *bomba manual de vacío con manómetro incorporado*, un *soporte universal* y, por último, un *barómetro de mercurio*.

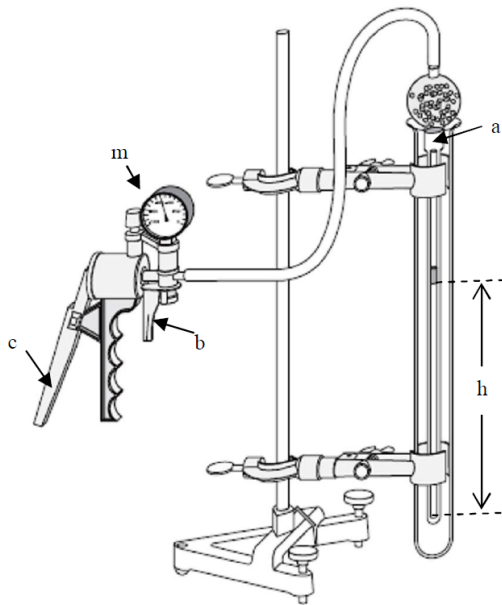


Figura 1: Montaje experimental [3].

Primero, se equilibró la gota de mercurio (Sin estar subdividida) encontrada adentro del termómetro de gas con ayuda de la bomba, generando vacío, para que iniciara a una altura de 10 cm ( $h_0$ ), que corresponde a 1/4 de la longitud del capilar de vidrio. El volumen inicial está intrínsecamente relacionado

con la altura inicial del mercurio. Ya habiendo posicionado el mercurio, se procede a realizar el montaje experimental como se aprecia en la figura 1.

Se inicia conectando el termómetro digital y revisando el barómetro del laboratorio, para tomar tanto la temperatura ambiente como la presión atmosférica que son datos fundamentales para la sección de cálculos y resultados, donde se hallará la presión absoluta que experimenta la muestra.

El capilar de vidrio donde se posiciona el termómetro de mercurio se llena de agua, para que sirva de baño térmico y que el proceso sea lo más cercano a ser isotérmico. Ya con el montaje realizado, se disminuye la presión con la bomba manual de vacío en 5 kPa, que es el equivalente a 50 mBares, por cada disminución se anota cuánto sube la gota de mercurio con su respectiva incertidumbre. Dicho proceso se reitera hasta que se encuentre en equilibrio mecánico, y no sea posible disminuir más la presión sin forzar la palanca de la bomba de vacío. Al culminar, se aumenta la presión en intervalos de 10 kPa, igual a 100 mBares, hasta llegar nuevamente a la presión atmosférica abriendo ligeramente la válvula.

## 3. Cálculos y resultados

En la tabla 2 se tabularon los resultados obtenidos a partir de quitar presión con la bomba manual de vacío, mientras que en la tabla 3 están los datos presurizando nuevamente la muestra.

Adicionalmente, en la tabla 6 está la presión atmosférica el día que se realizó el experimento, al igual que la temperatura ambiental. Con los datos de las tablas 2 y 3 y con la ecuación 4 se realizó el cálculo de la presión absoluta con sus respectivas unidades en el sistema internacional. Como la unidad de medida del manómetro incorporado en la bomba de vacío es el milibar, entonces se ha de realizar una conversión tal que:

$$1 \text{ mBar} = 100 \text{ Pa} \quad (5)$$

Con el fin de facilitar la lectura de éste informe, tanto el paso de milibares a pascales, el cálculo de la presión absoluta y la determinación de las incertidumbres mediante el uso de derivadas parciales se encuentra al final del documento.

Por otro lado, como el aire estaba confinado entre el extremo cerrado del capilar de vidrio y la gota

de mercurio, entonces el volumen de la muestra corresponde al volumen de un cilindro con la altura definida por la ubicación de la gota de mercurio ( $h$ ), como se aprecia en la ecuación 2.4:

$$V_{muestra} = \pi r^2 h \quad (6)$$

Es valioso recordar que en la ecuación 4 hay un término  $P_{Hg}$ , el cual es la presión de la gota de mercurio, que depende de la densidad del mercurio, la gravedad y la longitud del mercurio. Matemáticamente corresponde a:

$$P_{Hg} = \rho_{Hg} g h_{Hg}$$

Presión ( $\pm 10$ mmHg)	Temperatura ambiente ( $\pm 0.1$ °C)
688	24.8

Tabla 1: Presión atmosférica y temperatura ambiental 1/03/22

Presión ( $\pm 20$ mBar)	Altura ( $\pm 0.1$ cm)
-100	10.3
-120	10.5
-140	10.7
-160	10.9
-180	11.2
-200	11.5
-220	11.8
-240	12.2
-260	12.5
-280	12.8
-300	13.3
-320	13.6
-340	14.1
-360	14.5
-380	15.0
-400	15.7
-430	16.4
-460	17.5
-480	18.3
-500	19.0
-520	20.0
-540	20.6

Tabla 2: Altura del mercurio por milibares (Ascendiendo)

Presión ( $\pm 20$ mBar)	Altura ( $\pm 0.1$ cm)
-450	17.6
-400	16.0
-380	15.3
-360	14.8
-320	14.1
-300	13.6
-280	13.1
-260	12.8
-230	12.3
-200	11.5
-180	11.4
-160	11.0
-140	10.8
-120	10.7
-100	10.4
0	9.6

Tabla 3: Altura del mercurio por milibares (Descendiendo)

Considerando la densidad del mercurio como  $13579,04 \text{ Kg/m}^3$  [3], la aceleración de la gravedad como  $9.79908 \pm 0.00042 \text{ m/s}^2$  [3], y la longitud del mercurio corresponde a  $0.012 \text{ m}$ :

$$P_{Hg} = (13579,04 \text{ Kg/m}^3)(9.79908 \text{ m/s}^2)(0.012 \text{ m})$$

$$P_{Hg} = 1596.75 \text{ Pa} \pm 133.25 \text{ Pa}$$

Con la ecuación 4 y la presión atmosférica de ese día reportada en la tabla 6 se puede expresar la presión que experimenta la muestra como se aprecia en la ecuación 7. Hay que tener en cuenta que la presión fue medida en milímetros de mercurio, y se tiene que pasar a pascales.

$$688 \text{ mmHg} \pm 10 \text{ mmHg} \times \frac{133 \text{ Pa}}{1 \text{ mmHg}} = 91504 \text{ Pa} \pm 1330 \text{ Pa}$$

Ahora bien, ya se determina la presión absoluta como:

$$P_{Aplicada} = P_0 + P_{Hg} + \Delta P$$

$$P_{Abs} = (91504 \text{ Pa} \pm 1330 \text{ Pa}) + (1596.75 \text{ Pa} \pm 133.25 \text{ Pa}) + \Delta P \quad (7)$$

$$P_{Abs} = [(91504 + 1596.75) \pm (1330 + 133.25) \text{ Pa}] + \Delta P$$

$$P_{Abs} = (93100.75 \pm 1463.25 \text{ Pa}) + \Delta P$$

Donde  $\Delta P$  corresponde a la presión removida por la bomba de vacío, los datos de la tabla 2, pero en pascuales no en milibares. El cálculo de las incertidumbres y todas las presiones absolutas son anexados al final del documento. Por lo pronto, el volumen inicial se halla mediante la ecuación 2.4, donde el radio es el del capilar de vidrio ( $0.0027m \pm 0.0002m$ ) y la altura es aquella que varía según se extrae presión.

$$V_0 = \pi(0.0027m \pm 0.0002m)^2(0.103m \pm 0.001m)$$

$$V_0 = 236 \times 10^{-8} m^3 \pm 37.3 \times 10^{-8} m^3$$

Los demás volúmenes siguen un proceso análogo, de igual manera se encuentran al final del documento, tanto el cálculo de los volúmenes como las incertidumbres. Con el cálculo de los volúmenes y la presión absoluta, se forman las tablas 4 y 5.

Presión ( $x \pm 3463.25Pa$ )	Volumen ( $x \times 10^{-8} \pm x \times 10^{-8}m^3$ )
83 100.75	236.0 $\pm$ 37.3
81 100.75	240.0 $\pm$ 37.8
79 100.75	245.0 $\pm$ 38.6
77 100.75	249.6 $\pm$ 39.3
75 100.75	256.6 $\pm$ 40.3
73 100.75	263.4 $\pm$ 41.3
71 100.75	270.2 $\pm$ 42.3
69 100.75	279.2 $\pm$ 42.3
67 100.75	286.3 $\pm$ 44.7
65 100.75	293.1 $\pm$ 45.7
63 100.75	304.6 $\pm$ 47.4
61 100.75	311.5 $\pm$ 48.4
59 100.75	322.9 $\pm$ 50.1
57 100.75	332.1 $\pm$ 51.5
55 100.75	343.5 $\pm$ 53.2
53 100.75	359.6 $\pm$ 55.6
50 100.75	375.6 $\pm$ 57.9
47 100.75	400.8 $\pm$ 61.7
45 100.75	419.1 $\pm$ 64.4
43 100.75	435.1 $\pm$ 66.7
41 100.75	458.0 $\pm$ 70.1
39 100.75	471.8 $\pm$ 72.2

Tabla 4: Presión en pascuales contra volumen en metros cúbicos

Presión ( $x \pm 3463.25Pa$ )	Volumen ( $x \times 10^{-8} \pm x \times 10^{-8}m^3$ )
48100.75	403.0 $\pm$ 62.0
53100.75	366.4 $\pm$ 56.6
55100.75	350.4 $\pm$ 54.2
57100.75	339.0 $\pm$ 52.5
61100.75	322.9 $\pm$ 50.1
63100.75	311.5 $\pm$ 48.4
65100.75	300.0 $\pm$ 46.7
67100.75	293.1 $\pm$ 45.7
70100.75	281.7 $\pm$ 44.0
73100.75	263.3 $\pm$ 41.3
75100.75	261.1 $\pm$ 41.0
77100.75	251.9 $\pm$ 39.6
79100.75	247.3 $\pm$ 38.9
81100.75	245.1 $\pm$ 38.6
83100.75	238.2 $\pm$ 37.6
93100.75	220.0 $\pm$ 34.9

Tabla 5: Presión en pascuales contra volumen en metros cúbicos, despresurizando la muestra

Con los datos en la tabla 4 se procede a crear el gráfico para tener una mejor visión respecto al comportamiento que están teniendo los datos de presión contra volumen. Como fue mencionado en el marco teórico, el volumen sigue una relación con la presión igual a la ecuación 8.

$$V(P) = AP^B \quad (8)$$

donde A es la constante de proporcionalidad. Es fundamental tener presente lo siguiente:

$$V = AP^B$$

$$\ln(V) = \ln(AP^B)$$

$$\ln(V) = \ln(A) + B\ln(P)$$

Si se realiza un cambio de variable donde  $z = \ln(V)$  y  $t = \ln(P)$ , entonces con ayuda de los datos determinados experimentalmente y dicha relación se puede determinar el valor de la pendiente de esta recta y el intercepto, los cuales corresponden al exponente que acompaña la presión y la constante de proporcionalidad respectivamente. Para ésto se utilizó un Script en python el cuál permitió utilizar el método de regresión lineal para hallar dichos valores de  $\ln(A)$  y  $B$ . Los resultados de estos se aprecia en las figuras 2 y 3.

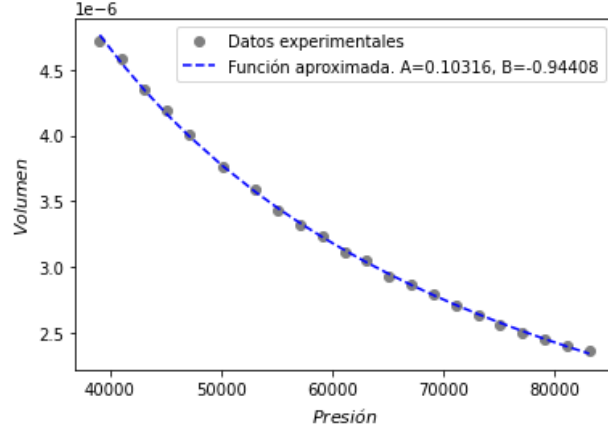


Figura 2: Presión contra Volumen, datos Tabla 4

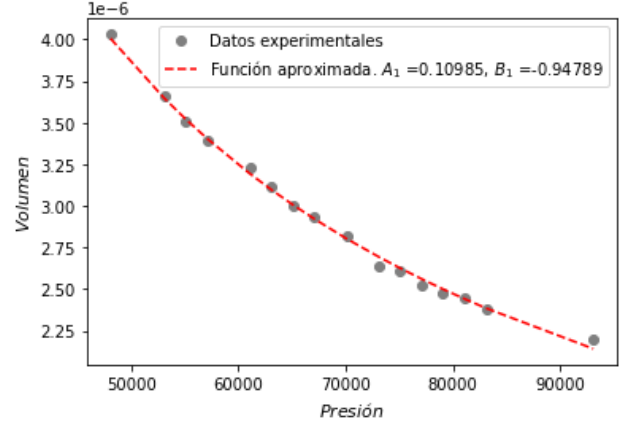


Figura 4: Presión contra Volumen, datos Tabla 5

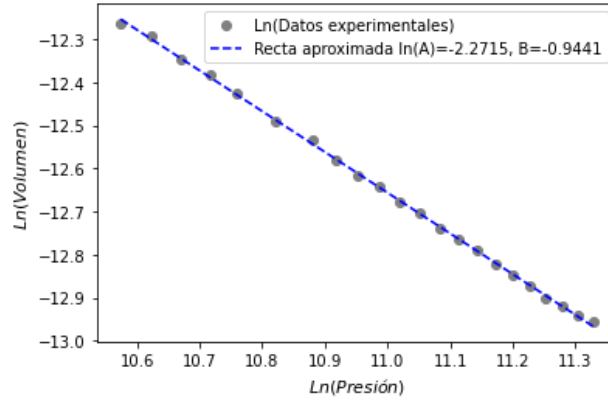


Figura 3: Logaritmo natural de la presión contra logaritmo natural del volumen, datos tabla 4

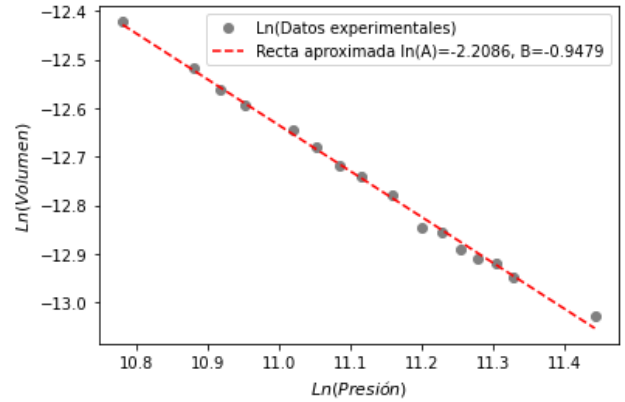


Figura 5: Logaritmo natural de la presión contra logaritmo natural del volumen, datos tabla 5

Los valores de A y B expresados por la figura 2 son comparables con unos nuevos valores de A y de B, los obtenidos a partir de realizar el proceso análogo de aplicar el logaritmo natural y hacer la regresión lineal con los datos de la tabla 5. Dichos  $A_1$  y  $B_1$  se encuentran en la figura 4, con la respectiva recta del logaritmo natural de los datos en la figura 5. Las rectas que mejor representan la función en las figuras 3 y 5 corresponden a las ecuaciones 9 y 10 respectivamente.

$$z = -2.2715 - 0.9441t \quad (9)$$

$$z = -2.2086 - 0.9479t \quad (10)$$

Para finalizar esta sección, las funciones exponenciales que mejor se acomodan a las mostradas en las figuras 2 y 4 son las presentadas en las ecuaciones 11 y 12:

$$V(P) = 0.10316P^{-0.94408} \quad (11)$$

$$V(P) = 0.10985P^{-0.94789} \quad (12)$$

## 4. Discusión de resultados

Existen muchos puntos fundamentales a discutir sobre los resultados obtenidos, el primero de ellos es acerca de las incertidumbres de las tablas 4 y 5, en las cuales se realizó una generalización para la incertidumbre de la presión, puesto que ésta es la misma

para cada una de las presiones absolutas, como se ve en el *Anexo*, por otro lado, las incertidumbres de los volúmenes no son descritos por una suma, contrario a la determinación de las incertidumbres de la presión absoluta, éstas incertidumbres se obtienen a partir de un producto, esto hace que depende en mayor parte por la medida de altura del cilindro, mientras más extensa es la medida, mayor corresponde a su incertidumbre.

Otra precisión que se ha de realizar es sobre la suposición al momento de calcular el volumen de la muestra confinada, puesto que se supone que el capilar de vidrio es un cilindro, por lo tanto, su volumen será el mismo de uno,  $V = \pi r^2 h$ , dicha suposición puede ser una de las razones de que el experimento no sea preciso un 100 %.

Adicionalmente, uno de los resultados que deben de ser realmente similares corresponde a las funciones de las figuras 2 y 4, ya que el comportamiento del volumen respecto a la presión ha de ser las mismas, entonces las funciones deberían ser iguales. En efecto, como se aprecia en la figura 6, las funciones son realmente similares, una de las razones para que estas no sean idénticas corresponde a un fallo experimental al momento de presurizar nuevamente la muestra. El generador de vacío es muy sensible para volver a presurizar el aire confinado, por lo que se tuvo que realizar dicho procedimiento un par de veces para obtener resultados satisfactorios. A pesar de ese error experimental, se considera que las funciones obtenidas se comportan de manera parecida, ambas comprobando la relación inversamente proporcional que existe entre el volumen y la presión.

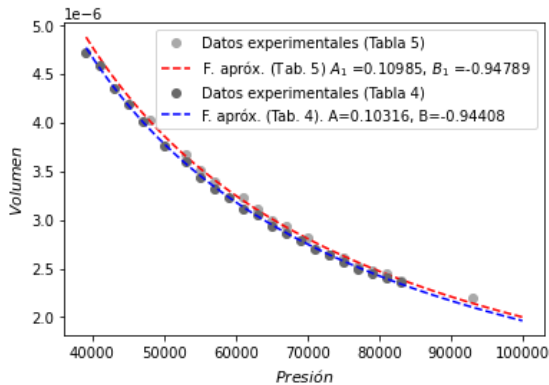


Figura 6: Comparación entre las funciones obtenidas a partir de las tablas 4 y 5

La desviación estándar de los valores de A y B

de éstas dos funciones son:

$$\begin{aligned}\vec{A} &= \frac{0.10316 + 0.10985}{2} = 0.10651 \\ S_A &= \sqrt{\frac{(0.10316 - 0.10651)^2 + (0.10985 - 0.10651)^2}{2}} \\ S_A &= 3.3 \times 10^{-3} \\ \vec{B} &= \frac{-0.94408 - 0.94789}{2} = -0.94599 \\ S_B &= \sqrt{\frac{(-0.94408 + 0.94599)^2 + (-0.94789 + 0.94599)^2}{2}} \\ S_B &= 1.9 \times 10^{-3}\end{aligned}\quad (13)$$

Tanto la desviación estándar de A como de B es minúscula, de un orden de  $10^{-3}$  cada uno.

Por otro lado, resta comprobar la veracidad de éste valor de A. Como bien ya se ha reiterado, el volumen se comporta respecto a la presión de manera inversamente proporcional:

$$\begin{aligned}V &= AP^B \\ PV &= A\end{aligned}$$

Ese valor de B debe ser aproximadamente -1, para que la proporcionalidad inversa se verdadera, que fue lo determinado experimentalmente, un valor medio de -0.94599, cercano a -1, con un porcentaje de error del 5.4 % como se calculó en 15.

$$E \% = \frac{|1 - 0.94599|}{1} \times 100 = 5.4 \% \quad (15)$$

Por otro lado, A debe ser igual al producto entre la temperatura, la constante de los gases y el número de moles ( $A = nRT$ ), por lo tanto, con los dos valores de A que se hallaron, es posible determinar el número de moles que poseía la muestra de la siguiente manera:

$$n = \frac{A}{RT} \quad (16)$$

Esto es posible puesto a que el tanto el número de moles como la temperatura se mantienen constantes durante todo el proceso, ya que la muestra permanece sellada sin intercambiar masa con el universo, interactuando con el baño térmico a temperatura ambiente. Recopilado apropiadamente, las constantes A y  $A_1$  corresponden a:

Constante	Valor e incertidumbre
A	$0.10316 \pm 0.0054$
$A_1$	$0.10985 \pm 0.021$

Tabla 6: Valores de A hallados mediante regresión lineal

Ahora se procede a determinar la cantidad de moles de la muestra confinada:

$$n_A = \frac{0.10316 \pm 0.0054}{(8.314472 \frac{J}{molK})(297.95K \pm 0.1K)}$$

$$n_A = \frac{0.10316 \pm 0.0054J}{2477.30 \frac{J}{mol} \pm 0.83 \frac{J}{mol}}$$

$$n_A = 41.6 \times 10^{-6} mol \pm 2.2 \times 10^{-6} mol$$

Ahora con el valor de  $A_1$ :

$$n_{A1} = \frac{0.10985 \pm 0.0054J}{2477.30 \frac{J}{mol} \pm 0.83 \frac{J}{mol}}$$

$$n_{A1} = 44.3 \times 10^{-6} mol \pm 8.5 \times 10^{-6} mol$$

Hallado a partir de	Valor moles ( $x \times 10^{-6} \pm x \times 10^{-6} mol$ )
$A$	$41.6 \pm 2.2$
$A_1$	$44.3 \pm 8.5$

Tabla 7: Valores de n hallados con  $A$  y  $A_1$

Como era de esperarse gracias a la poca desviación estándar que hay entre ambos valores de  $A$ , la cantidad de moles que había en la muestra calculado a partir de los dos  $A$  fueron muy similares. Como se puede visualizar en las figuras 7 y 8, donde se encuentran graficados el valor hallado de moles y el valor de moles hallado a partir de multiplicar  $P_i$  y  $V_i$ , y dividirlo entre  $RT$ .

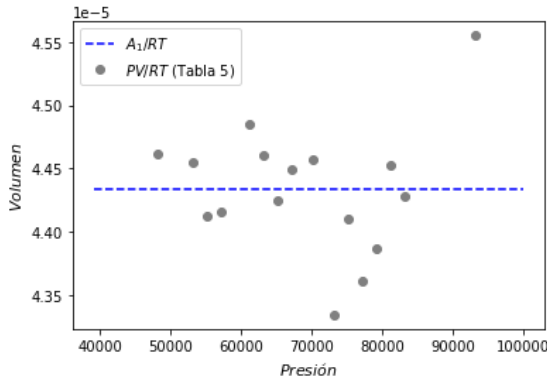


Figura 7: Comparación entre los moles obtenidos producto por producto y el calculado con  $A_1$

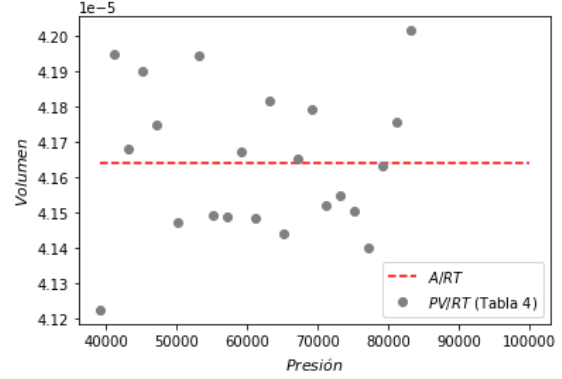


Figura 8: Comparación entre los moles obtenidos producto por producto y el calculado con  $A$

Ya con la cantidad de moles en la muestra se puede calcular la cantidad de moléculas y el peso de la muestra. Estos dos datos se hallan mediante las ecuaciones 4 y 18, donde  $NA$  corresponde al número de Avogadro y  $M$  es la masa molecular del aire ( $0.02896 kg/mol$ ).

$$N = \text{Moléculas} = nNA \quad (17)$$

$$m_{total} = nM \quad (18)$$

Primero se calcula el número total de moléculas

$$N_A = (41.6 \times 10^{-6} \pm 2.2 \times 10^{-6})(6.02 \times 10^{23})$$

$$\rightarrow N_A = 25.0 \times 10^{18} \pm 1.32 \times 10^{18} \text{moléculas}$$

$$N_{A1} = (44.3 \times 10^{-6} \pm 8.5 \times 10^{-6})(6.02 \times 10^{23})$$

$$\rightarrow N_{A1} = 26.7 \times 10^{18} \pm 5.1 \times 10^{18} \text{moléculas}$$

Ahora la masa total:

$$m_{totalA} = (41.6 \times 10^{-6} \pm 2.2 \times 10^{-6} mol)(0.02896 kg/mol)$$

$$\rightarrow m_{totalA} = 120.4 \times 10^{-8} \pm 6.4 \times 10^{-8} kg$$

$$m_{totalA1} = (44.3 \times 10^{-6} \pm 8.5 \times 10^{-6})(0.02896 kg/mol)$$

$$\rightarrow m_{totalA1} = 128.3 \times 10^{-8} \pm 24.6 \times 10^{-8} kg$$

## 5. Conclusiones

- En efecto la ley de Boyle - Mariotte se cumple. A partir de la regresión lineal se logró determinar los coeficientes A y B, que corresponden a 0.10316 y -0.94408 respectivamente, que confirman la relación de proporcionalidad inversa entre la presión y el volumen cuando el gas se encuentra confinado y a temperatura constante.

$$V(P) = \frac{0.10316}{P^{0.94408}}$$

- Las suposiciones de tomar el volumen del capilar de vidrio como el de un cilindro y considerar el aire como un gas ideal para aplicar la ley de Boyle - Mariotte son válidas, ya que al final los resultados obtenidos se comportan con proximidad a la realidad, incertidumbres coherentes e incluso bajas. En el caso específico del volumen, la incertidumbre de éste aumentaba cada vez que la altura aumentaba.
- La cercanía entre la despresurización y presurización del gas (Tablas 4, 5) es satisfactoria, como se aprecia tanto en la figura 6 como en lo bajas que son las desviaciones estándar entre ellas (Ecuaciones 13 y 14). Las constantes de proporcionalidad halladas en la tabla ?? también tienen incertidumbres realmente bajas, lo que lleva a concluir el buen trabajo que se hizo al momento de recopilar los datos experimentales. Además de pulir algunas prácticas en el desarrollo del laboratorio, también se pudo utilizar la ecuación de Van Der Waals que se usa con gases reales, y de esa manera obviar la sim-

plificación de ser un gas ideal y obtener unas funciones mucho más fieles a la realidad.

- La precisión se puede mejorar aún más implementando una nueva bomba de vacío, ya que la usada durante el experimento presentó fallas en múltiples ocasiones. Debido a la sensibilidad al volver a presurizar, el experimento se tuvo que repetir un par de veces, esto puede que halla afectado los datos recopilados en la tabla 3 un poco distintos a la 2.
- Por último, el baño térmico proporcionado por el agua es fundamental, el agua tiene un calor específico realmente alto (4200 J/kg.C) lo que permite, incluso si hay cambios leves de temperatura en el ambiente, que el agua permanecerá por un buen tiempo a la misma temperatura, generando exitosamente el proceso de cambio Presión-Temperatura isotérmicamente.

## Referencias

- [1] BROWN, T. L., LEMAY, H. E., BURSTEN, B. E., BURDGE, J. R. (2004). Química: La Ciencia Central. (Novena edición). Pearson Education.
- [2] ZEMANSKY, S. (2022). FÍSICA UNIVERSITARIA DE SEARS (13th ed.). PEARSON EDUCACION DE MEXICO -75.
- [3] Universidad del Valle. LEY DE BOYLE-MARIOTTE . *Departamento de Física, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas.*  
<https://bit.ly/3twgkMQ>



## Anexo

### 1. Presiones

Se tomaran los valores de la tabla 2 para realizar tanto cálculos como la determinación de incertidumbres de esos primeros datos, para luego ya sumarlos con la presión atmosférica y la del mercurio con el fin de hallar la presión absoluta.

Resulta trivial el paso de las unidades, ya que corresponde a multiplicar el valor en milibares por cien, y análogamente a su respectiva incertidumbre.

#### 1.1. Cálculos valores

#### 1.2. Tabla 4

La formula que se utilizará corresponde a la ecuación 7:

$$P_{Abs} = (91504Pa \pm 1330Pa) + (1596.75Pa \pm 133.25Pa) + \Delta P$$

$$P_{Abs} = [(91504 + 1596.75) \pm (1330 + 133.25)Pa] + \Delta P$$

$$P_{Abs} = 93100.75 \pm 1463.25Pa + \Delta P$$

Con  $\Delta P$  extraído de la tabla 2.

$$P_{1Abs} = 93100.75 \pm 1463.25Pa + (-10000 \pm 2000Pa)$$

$$P_{1Abs} = (93100.75 - 10000) \pm (1463.25 + 2000)Pa$$

$$P_{1Abs} = 83100.75 \pm 3463.25Pa$$

Dicha incertidumbre permanece idéntica en los demás cálculos de presiones, por lo tanto solo se determinará el valor de la presión para los otros 21 valores:

$$P_{2Abs} = 93100.75Pa - 12000Pa = 81100.75Pa$$

$$P_{9Abs} = 93100.75Pa - 26000Pa = 67100.75Pa$$

$$P_{3Abs} = 93100.75Pa - 14000Pa = 79100.75Pa$$

$$P_{10Abs} = 93100.75Pa - 28000Pa = 65100.75Pa$$

$$P_{4Abs} = 93100.75Pa - 16000Pa = 77100.75Pa$$

$$P_{11Abs} = 93100.75Pa - 30000Pa = 63100.75Pa$$

$$P_{5Abs} = 93100.75Pa - 18000Pa = 75100.75Pa$$

$$P_{12Abs} = 93100.75Pa - 32000Pa = 61100.75Pa$$

$$P_{6Abs} = 93100.75Pa - 20000Pa = 73100.75Pa$$

$$P_{13Abs} = 93100.75Pa - 34000Pa = 59100.75Pa$$

$$P_{7Abs} = 93100.75Pa - 22000Pa = 71100.75Pa$$

$$P_{14Abs} = 93100.75Pa - 36000Pa = 57100.75Pa$$

$$P_{8Abs} = 93100.75Pa - 24000Pa = 69100.75Pa$$

$$P_{15Abs} = 93100.75Pa - 38000Pa = 55100.75Pa$$

$$P_{16Abs} = 93100.75Pa - 40000Pa = 53100.75Pa$$

$$P_{20Abs} = 93100.75Pa - 50000Pa = 43100.75Pa$$

$$P_{17Abs} = 93100.75Pa - 43000Pa = 50100.75Pa$$

$$P_{21Abs} = 93100.75Pa - 52000Pa = 41100.75Pa$$

$$P_{18Abs} = 93100.75Pa - 46000Pa = 47100.75Pa$$

$$P_{19Abs} = 93100.75Pa - 48000Pa = 45100.75Pa$$

$$P_{22Abs} = 93100.75Pa - 54000Pa = 39100.75Pa$$

### 1.3. Tabla 5

El proceso que se sigue es análogo a la sección anterior pero con los datos de vacío descendiente de la tabla 5.

$$P_{1Abs} = 93100.75Pa - 45000Pa = 48100.75Pa$$

$$P_{9Abs} = 93100.75Pa - 23000Pa = 70100.75Pa$$

$$P_{2Abs} = 93100.75Pa - 40000Pa = 53100.75Pa$$

$$P_{10Abs} = 93100.75Pa - 20000Pa = 73100.75Pa$$

$$P_{3Abs} = 93100.75Pa - 38000Pa = 55100.75Pa$$

$$P_{11Abs} = 93100.75Pa - 18000Pa = 75100.75Pa$$

$$P_{4Abs} = 93100.75Pa - 36000Pa = 57100.75Pa$$

$$P_{12Abs} = 93100.75Pa - 16000Pa = 77100.75Pa$$

$$P_{5Abs} = 93100.75Pa - 32000Pa = 61100.75Pa$$

$$P_{13Abs} = 93100.75Pa - 14000Pa = 79100.75Pa$$

$$P_{6Abs} = 93100.75Pa - 30000Pa = 63100.75Pa$$

$$P_{14Abs} = 93100.75Pa - 12000Pa = 81100.75Pa$$

$$P_{7Abs} = 93100.75Pa - 28000Pa = 65100.75Pa$$

$$P_{15Abs} = 93100.75Pa - 10000Pa = 83100.75Pa$$

$$P_{8Abs} = 93100.75Pa - 26000Pa = 67100.75Pa$$

$$P_{16Abs} = 93100.75Pa - 0Pa = 93100.75Pa$$

## 2. Volúmenes

Para el volumen de la muestra confinada entre el extremo cerrado del capilar de vidrio y el mercurio, se utiliza la ecuación 4 y las alturas extraídas de la tabla 2.

$$V_{muestra} = \pi r^2 h$$

## 2.1. Cálculos valores

## 2.2. Tabla 4

Empezando con el segundo dato de altura,

$$V_0 = \pi(0.0027m)^2(0.105m) = 240 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_{11} = \pi(0.0027m)^2(0.141m) = 322.9 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_1 = \pi(0.0027m)^2(0.107m) = 245 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_{12} = \pi(0.0027m)^2(0.145m) = 332.1 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_2 = \pi(0.0027m)^2(0.109m) = 249.6 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_{13} = \pi(0.0027m)^2(0.150m) = 343.5 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_3 = \pi(0.0027m)^2(0.112m) = 256.5 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_{14} = \pi(0.0027m)^2(0.157m) = 359.6 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_4 = \pi(0.0027m)^2(0.115m) = 263.4 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_{15} = \pi(0.0027m)^2(0.164m) = 375.6 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_5 = \pi(0.0027m)^2(0.118m) = 270.2 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_{16} = \pi(0.0027m)^2(0.175m) = 400.8 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_6 = \pi(0.0027m)^2(0.122m) = 279.4 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_{17} = \pi(0.0027m)^2(0.183m) = 419.1 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_7 = \pi(0.0027m)^2(0.125m) = 286.3 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_{18} = \pi(0.0027m)^2(0.190m) = 435.1 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_8 = \pi(0.0027m)^2(0.128m) = 293.1 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_{19} = \pi(0.0027m)^2(0.200m) = 458.0 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_9 = \pi(0.0027m)^2(0.133m) = 304.6 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_{10} = \pi(0.0027m)^2(0.136m) = 311.5 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_{20} = \pi(0.0027m)^2(0.206m) = 471.8 \times 10^{-8}m^3$$

## 2.3. Tabla 5

El procedimiento que se lleva a cabo es análogo a la sección anterior, pero utilizando los datos de altura extraídos de la tabla 5:

$$V_0 = \pi(0.0027m)^2(0.176m) = 403 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_2 = \pi(0.0027m)^2(0.153m) = 350.4 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_1 = \pi(0.0027m)^2(0.160m) = 366.4 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_3 = \pi(0.0027m)^2(0.148m) = 339.0 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_4 = \pi(0.0027m)^2(0.141m) = 322.9 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_{10} = \pi(0.0027m)^2(0.114m) = 261.1 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_5 = \pi(0.0027m)^2(0.136m) = 311.5 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_{11} = \pi(0.0027m)^2(0.110m) = 251.9 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_6 = \pi(0.0027m)^2(0.131m) = 300.0 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_{12} = \pi(0.0027m)^2(0.108m) = 247.3 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_7 = \pi(0.0027m)^2(0.128m) = 293.1 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_{13} = \pi(0.0027m)^2(0.107m) = 245.1 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_8 = \pi(0.0027m)^2(0.123m) = 281.7 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_{14} = \pi(0.0027m)^2(0.104m) = 238.2 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_9 = \pi(0.0027m)^2(0.115m) = 263.3 \times 10^{-8}m^3$$

$$V_{15} = \pi(0.0027m)^2(0.096m) = 220.0 \times 10^{-8}m^3$$

## 2.4. Incertidumbres

En esta sección lo aritmético se cedió a un **Documento de Excel**. Se tomará como ejemplo la  $V_0$  hallada en cálculos y resultados

$$V_0 = \pi(0.0027m \pm 0.0002m)^2(0.103m \pm 0.001m)$$

Donde se pasan las incertidumbres a porcentajes:

$$V_0 = \pi \left( 0.0027m \pm \frac{0.0002}{0.0027}m \right)^2 \left( 0.103m \pm \frac{0.001}{0.103}m \right)$$

aplicamos el cuadrado que acompaña el radio, multiplicando por el exponente (2) la incertidumbre:

$$V_0 = \pi \left( (0.0027m)^2 \pm \frac{2(0.0002)}{0.0027}m \right) \left( 0.103m \pm \frac{0.001}{0.103}m \right)$$

Multiplicamos el radio cuadrado por pi

$$V_0 = (\pi(0.0027m)^2 \pm 14.81 \%) (0.103m \pm 0.97 \%)$$

Ahora multiplicamos la altura y sumamos los porcentajes.

$$V_0 = [(\pi(0.0027m)^2)(0.103m) \pm (14.81 \% + 0.97 \%)]$$

Ahora multiplicamos el valor del volumen y sumamos los porcentajes

$$V_0 = [235.9 \times 10^{-8} \pm 15.78 \%]$$

Y por último se multiplica el porcentaje de error por el valor obtenido de volumen

$$\delta V_0 = (235.9 \times 10^{-8}) \times 15.78 \% = \pm 37.2 \times 10^{-8}$$

Por lo tanto:

$$V_0 = 236 \times 10^{-8} m^3 \pm 37.2 \times 10^{-8} m^3$$

La formula general que se utilizará corresponde a:

$$\delta V_n = [V_n][2(\delta r) + \delta h]$$

donde  $\delta r$  y  $\delta h$  son las incertidumbres de la altura y el radio en forma de porcentaje. Mientras que  $V_n$  es el volumen que se calculó en la sección anterior, el cual es de un orden de  $10^{-8}$ , se opta por obviarlo en la escritura de la formulas para facilitar la organización.

## 2.5. Tabla 4

$\delta V_1 = [240] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.105} \right] = \pm 37.3 \times 10^{-8}$	$\delta V_{12} = [322.9] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.141} \right] = \pm 50.1 \times 10^{-8}$
$\delta V_2 = [245] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.107} \right] = \pm 38.6 \times 10^{-8}$	$\delta V_{13} = [332.1] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.145} \right] = \pm 51.5 \times 10^{-8}$
$\delta V_3 = [249.6] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.109} \right] = \pm 39.3 \times 10^{-8}$	$\delta V_{14} = [343.5] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.150} \right] = \pm 53.2 \times 10^{-8}$
$\delta V_4 = [256.5] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.112} \right] = \pm 40.3 \times 10^{-8}$	$\delta V_{15} = [359.6] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.157} \right] = \pm 55.6 \times 10^{-8}$
$\delta V_5 = [263.4] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.115} \right] = \pm 41.3 \times 10^{-8}$	$\delta V_{16} = [375.6] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.164} \right] = \pm 57.9 \times 10^{-8}$
$\delta V_6 = [270.2] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.118} \right] = \pm 42.3 \times 10^{-8}$	$\delta V_{17} = [400.8] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.175} \right] = \pm 61.7 \times 10^{-8}$
$\delta V_7 = [279.4] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.122} \right] = \pm 43.7 \times 10^{-8}$	$\delta V_{18} = [419.1] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.183} \right] = \pm 64.4 \times 10^{-8}$
$\delta V_8 = [286.3] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.124} \right] = \pm 44.7 \times 10^{-8}$	$\delta V_{19} = [435.1] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.190} \right] = \pm 66.7 \times 10^{-8}$
$\delta V_9 = [293.1] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.128} \right] = \pm 45.7 \times 10^{-8}$	$\delta V_{20} = [458] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.200} \right] = \pm 70.1 \times 10^{-8}$
$\delta V_{10} = [304.6] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.133} \right] = \pm 47.4 \times 10^{-8}$	$\delta V_{21} = [471.8] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.206} \right] = \pm 72.2 \times 10^{-8}$
$\delta V_{11} = [311.5] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.136} \right] = \pm 48.4 \times 10^{-8}$	

## 2.6. Tabla 5

Análogamente a la sección anterior, los valores del volumen están en un orden de  $10^{-8}$ , el cual no se escribe para facilitar el orden. Todos los datos fueron extraídos de la tabla 5 y la sección de volúmenes de la tabla 5 en el presente *Anexo*

$$\begin{aligned}
\delta V_0 &= [403] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.176} \right] = \pm 62.0 \times 10^{-8} & \delta V_8 &= [281.7] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.123} \right] = \pm 44.0 \times 10^{-8} \\
\delta V_1 &= [366.4] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.160} \right] = \pm 56.6 \times 10^{-8} & \delta V_9 &= [261.3] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.115} \right] = \pm 41.3 \times 10^{-8} \\
\delta V_2 &= [350.4] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.153} \right] = \pm 54.2 \times 10^{-8} & \delta V_{10} &= [261.1] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.114} \right] = \pm 41.0 \times 10^{-8} \\
\delta V_3 &= [339] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.148} \right] = \pm 52.5 \times 10^{-8} & \delta V_{11} &= [251.9] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.110} \right] = \pm 39.6 \times 10^{-8} \\
\delta V_4 &= [322.9] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.141} \right] = \pm 50.1 \times 10^{-8} & \delta V_{12} &= [247.3] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.108} \right] = \pm 38.9 \times 10^{-8} \\
\delta V_5 &= [311.5] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.136} \right] = \pm 48.4 \times 10^{-8} & \delta V_{13} &= [245.1] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.107} \right] = \pm 38.6 \times 10^{-8} \\
\delta V_6 &= [300] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.131} \right] = \pm 46.7 \times 10^{-8} & \delta V_{14} &= [238.2] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.104} \right] = \pm 37.6 \times 10^{-8} \\
\delta V_7 &= [293.1] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.128} \right] = \pm 45.7 \times 10^{-8} & \delta V_{15} &= [220.0] \left[ 2 \left( \frac{0.0002}{0.0027} \right) + \frac{0.001}{0.096} \right] = \pm 34.6 \times 10^{-8}
\end{aligned}$$