

Estudio de la precisión del número de Avogadro obtenido mediante la electrólisis

1. INTRODUCCIÓN

El número de Avogadro o Constante de Avogadro denomina al número de partículas constituyentes de una sustancia (normalmente átomos o moléculas) que se pueden encontrar en la cantidad de un mol de la sustancia, es decir, el número de átomos contenidos en 12 gramos del carbono-12. Es un factor de proporción que pone en relación la masa molar (magnitud física que define la masa de una sustancia por unidad de cantidad de sustancia y se expresa en kg/mol) de una sustancia y la masa presente en una muestra. El valor aceptado de esta constante es de $6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

Una unidad de masa atómica (uma o u) se define como exactamente 1/12 de la masa de un solo átomo de C12. Dado que 1 mol de C12 tiene una masa de exactamente 12 g, un átomo de C12 tiene una masa de $12 / N_0$ g. Por lo tanto, 1 u es numéricamente igual al inverso del número de Avogadro. Esto significa que la masa atómica o molecular de una sustancia tiene el mismo valor numérico, tanto en u como en g / mol.

Mi curiosidad sobre la constante de Avogadro empezó cuando estaba estudiando el tema de estequiometría, donde dicho número aparece en muchas ocasiones para realizar cálculos. Me informé sobre la obtención de la mencionada constante, y averigüé que se pueden realizar distintos procedimientos para conseguir el valor, lo cual me pareció interesante para realizar un trabajo. El que más me interesó fue el método de la electrólisis del agua, ya que me parece una forma simple y clara para obtener resultados. Hay otros métodos para determinar el número de Avogadro. Un método implica dividir la carga en un mol de electrones por la carga en un solo electrón para obtener un valor del número de Avogadro de $6.02214154 \times 10^{23}$ partículas por mol. Otro enfoque implica mediciones cuidadosas de la densidad de una muestra ultrapura de un material a escala macroscópica. Los científicos también han encontrado formas nuevas y más precisas de estimar el número de Avogadro, utilizando técnicas avanzadas como el uso de rayos X para examinar la geometría de una esfera de silicio de 1 kilogramo y extrapolar el número de átomos que contenía a partir de esos datos.

Una vez que tenía clara mi intención de informarme sobre el número de Avogadro y su obtención, me surgió esta pregunta de investigación que motivó mi trabajo:

¿Cómo de preciso es el método de la electrólisis del agua para obtener el valor del número de Avogadro?

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

a. El número de Avogadro

El número de Avogadro es una constante que representa la cantidad de átomos existentes en doce gramos de carbono 12-puro. Esta cifra permite contabilizar entes microscópicos. Éste comprende el número de entidades elementales (es decir, de átomos, electrones, iones, moléculas) que existen en un mol de cualquier sustancia. La constante de Avogadro es igual a $6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

b. Procedimientos electrolíticos

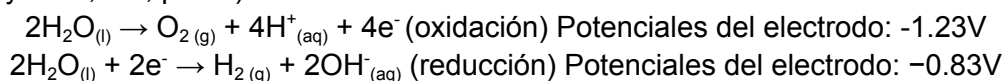
Los procedimientos electrolíticos se basan en usar la electricidad en forma de corriente continua para así producir una reacción química en el agua, o en otra disolución acuosa u otro líquido, mediante el uso de dos electrodos, para así descomponer el agua, la sal que está disuelta en ella o el líquido que se está utilizando.

En el cátodo se encuentra el polo negativo de la electrólisis, y en él sucede el proceso de reducción que causará que se depositen los cationes, y en el ánodo se encuentra el polo positivo de la electrólisis, y en él ocurre el proceso de oxidación que causará la deposición de los aniones.

c. Electrólisis del agua

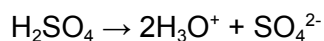
Para realizar este trabajo se usará y estudiará la **electrólisis del agua**.

La **electrólisis del agua** se realiza usando la corriente eléctrica para descomponer la molécula del agua $\text{O}_2(\text{g})$ $\text{H}_2(\text{g})$, lo cual provoca un proceso de redox (Brown y Ford, n.d, p.448):

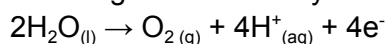


La ecuación ajustada sería la siguiente: $2\text{H}_2\text{O}_{(\text{l})} \rightarrow 2\text{H}_{2(\text{g})} + \text{O}_{2(\text{g})}$

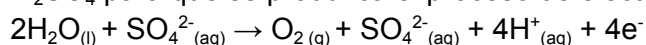
Pero para este caso se usará ácido sulfúrico diluido, formado en un 90% de agua. La ionización del ácido sulfúrico es (2023.Ddd.Uab.Cat. <https://ddd.uab.cat/pub/edlc/02124521v7n3/02124521v7n3p306.pdf>):



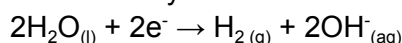
En el electrodo ánodo tiene lugar la reacción ya mencionada de oxidación:



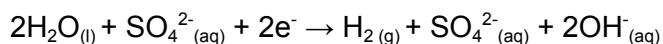
y al añadir H_2SO_4 para que se produzca el proceso de electrólisis más rápido:



En el cátodo tiene lugar la reacción ya mencionada de reducción:



y al añadir H_2SO_4 para que se produzca el proceso de electrólisis más rápido:



Esa reacción nos permite saber que por cada 4 electrones se desprende una molécula de O₂ en el ánodo y dos moléculas de H₂ en el cátodo.

d. Obtención del número de Avogadro

Para obtener el número de Avogadro es necesario seguir los principios de conservación de la masa y la ecuación de los gases ideales, y usar las cargas que aparecen en la estequiometría del proceso de reducción.

Lo primero que hay que calcular es la carga total que pasa por el líquido, que se puede hallar mediante la ecuación:

$$Q_{\text{total}} = I \cdot t$$

“Q” hace referencia a la carga, medida en culombios (variable dependiente), e “I” hace referencia a la intensidad de corriente, que pasa por el circuito de la electrólisis, medida en amperios (variable controlada), y “t” es el tiempo en segundos (variable dependiente).

El número de moles que se producen de O₂ y H₂ se puede obtener aplicando la ecuación de los gases ideales: $n_{\text{moles}} = RT / PV$, donde “n” es el número de moles, “R” es la constante de gas medida en L·atm/K·mol, “T” la temperatura en Kelvin, “P” la presión en atmósferas y “V” el volumen en litros. Por lo tanto, también se trata el volumen como variable dependiente, que depende del tiempo. Además, la temperatura y la presión del momento en el que se realiza el experimento se pueden medir con un termómetro y un barómetro, y son variables controladas.

Una vez que se tiene el valor de la carga en Coulombs, se puede calcular el número de electrones, sabiendo que la carga del electrón es $q = 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, mediante la fórmula:

$$\text{N}^\circ \text{ de electrones} = Q / q$$

Anteriormente ya se dijo que hay dos moléculas de de H₂ por cada 4 electrones, por lo que para calcular el número de moléculas que hay de H₂ hay que aplicar la fórmula:

$$\text{N}^\circ \text{ moléculas H}_2 = \text{N}^\circ \text{ de electrones} / 2$$

Una vez que ya se tiene el número de moléculas del gas recogido, en este caso H₂, y el número de moles, se puede determinar el número de partículas por mol, o número de Avogadro, mediante la fórmula siguiente:

$$\text{N}^\circ \text{ de Avogadro} = \text{N}^\circ \text{ de moléculas H}_2 / \text{N}^\circ \text{ de moles H}_2$$

3. OBJETIVO DEL TRABAJO

El objetivo del trabajo es responder a la pregunta de investigación *¿Cómo de preciso es el método de la electrólisis del agua para obtener el valor del número de Avogadro?*, por lo que se pretende obtener un valor, aproximado, del número de Avogadro mediante el uso del método de electrólisis ya anteriormente explicado. Y

después analizar la precisión y exactitud de los resultados obtenidos comparándolos con el valor internacionalmente aceptado del número de Avogadro.

4. DISEÑO EXPERIMENTAL

A continuación explicaré y analizaré el procedimiento usado para determinar la constante de Avogadro mediante la electrólisis del agua. En el proceso de experimentación tuve en cuenta las cuestiones ambientales y éticas del trabajo, las cuales son ningunas debido a que no se utilizó ningún método de cuestionable moralidad ni compuesto químicos tóxicos que puedan dañar el ambiente natural. También tuve en cuenta las cuestiones relativas a la seguridad al momento de realizar la experimentación, ya que tuve que manejar un ácido (ácido sulfúrico), por lo que usé guantes para proteger la piel. También tuve precauciones al manejar la corriente eléctrica, aunque los voltajes e intensidades usados fueron muy bajos y no suponen ningún peligro.

Las variable independiente del trabajo fue el tiempo, y la dependiente el volumen formado por la electrólisis, ya que dependiendo de la cantidad de tiempo de la electrólisis se produce un volumen concreto. Las variables controladas fueron el voltaje (constante), la temperatura y la presión del laboratorio, ya que se realizó la experiencia el mismo día en un período de tiempo corto.

Material empleado:

- **Ácido sulfúrico** (H_2SO_4) muy diluido, es decir, con un **90% de H_2O**
- **Soporte** para todo el montaje
- **Cronómetro** para tomar las medidas del tiempo
- **Barómetro** para obtener el valor de la presión en el lugar de experimentación
- **Voltámetro de Hoffmann** para realizar la electrólisis del agua
- **Termómetro** para obtener el valor de la temperatura en el lugar de experimentación
- **Amperímetro** para obtener el valor de la intensidad que circula por el agua al momento de conectar la corriente para el proceso de la electrólisis
- **Fuente de alimentación** para obtener la corriente eléctrica necesaria

El sistema diseñado para realizar la electrólisis consiste en usar un soporte que sostenga un voltámetro de Hoffmann, el cual está lleno con H_2SO_4 muy diluido y conectado mediante los electrodos a una fuente de alimentación y a un amperímetro.

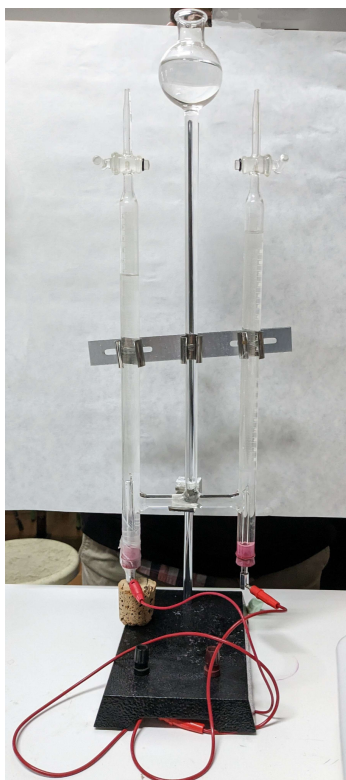


Figura 1: Disposición del voltámetro de Hoffmann.

5. PROCEDIMIENTO

1. Se toma medida de la presión y temperatura del laboratorio.
2. Se llena el voltámetro con H_2SO_4 muy diluido y se conectan los cables de la fuente de alimentación a los extremos del voltámetro de Hoffmann, tal y como se ve en la Figura 1.
3. Se abren las llaves situadas en la parte superior del voltámetro hasta que los tubos quedan completamente llenos y nivelados, luego se cierran
4. Se van anotando los valores del volumen de H_2 que se están formando debido al paso de la corriente eléctrica. Se supone que el volumen de oxígeno será la mitad. También hay que anotar la intensidad de corriente que circula.
5. Se anotan los datos cada vez que se produce 1mL de gas, y se detiene el proceso al obtener 11mL de gas.
6. Se rellena el voltámetro y se repiten los pasos mencionados anteriormente para obtener más medidas.
7. Se vierte el H_2SO_4 por el desagüe porque está formado por más de un 90% de agua, por lo que su toxicidad es mínima.

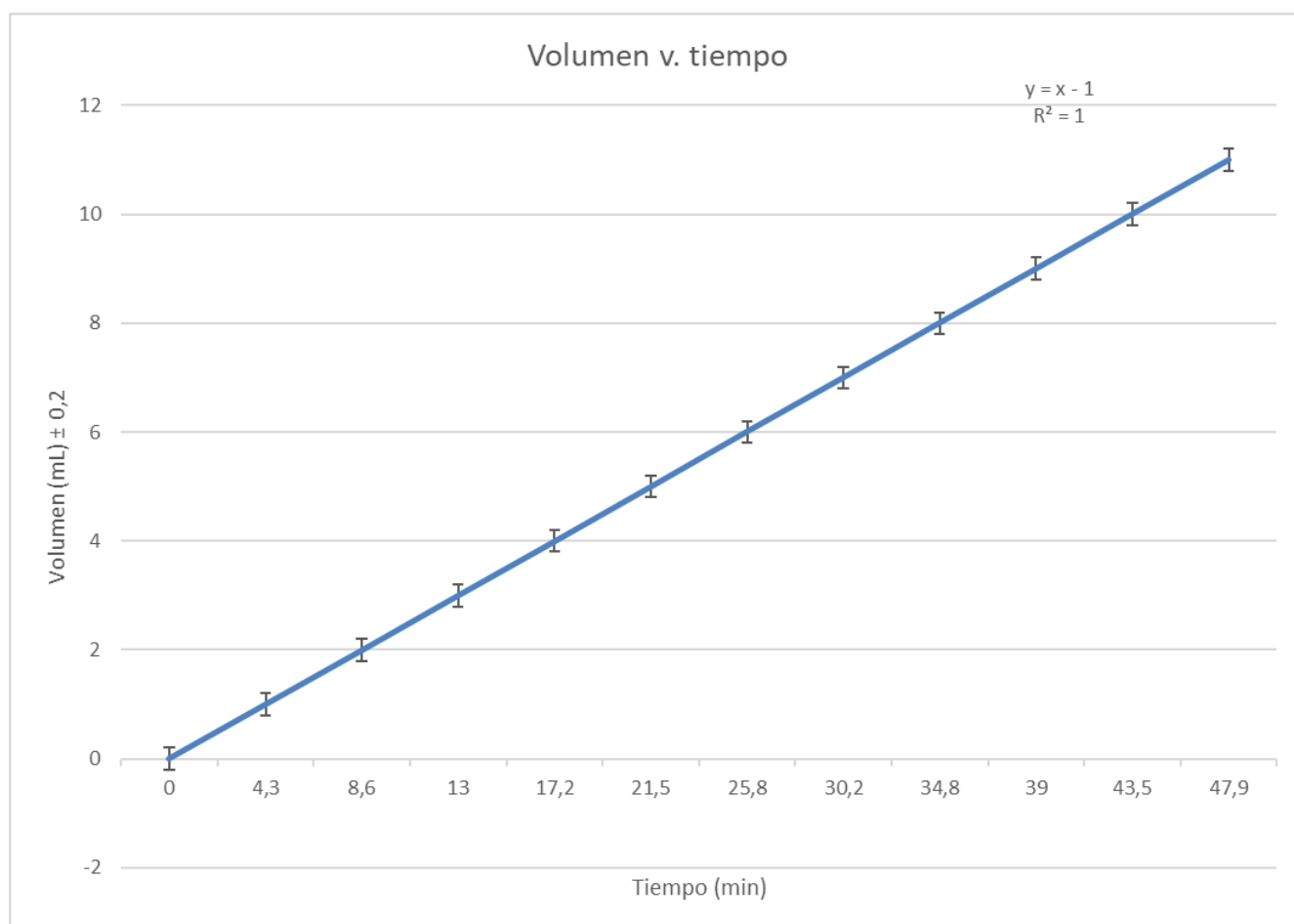
6. RESULTADOS

A continuación, aparecen los datos correspondientes a la electrólisis del agua con el error asociado.

En la primera tabla se muestran los datos obtenidos, resultados de la media de las 5 mediciones repeticiones hechas (datos disponibles en el Anexo 2), de la intensidad y de los volúmenes de H_2 en intervalos formados por el tiempo en el que se formaba 1mL. En la primera columna se incluye el error sistemático de las medidas debido a la propia imprecisión de los aparatos empleados para tomar las medidas.

t (min)	0	4,3	8,6	13,0	17,2	21,5	25,8	30,2	34,8	39,0	43,5	47,9	Media
I (A) $\pm 0,01$	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
V H_2 (mL) $\pm 0,2$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	

Tabla 1: Valores de la intensidad y cantidades producidas de volumen en períodos de tiempo



Gráfica 1: Producción de volumen de H_2 respecto al tiempo en el método de la electrólisis del agua. En el eje x, el tiempo(min), en el eje y, el volumen (mL).

El coeficiente de regresión cuadrático igual a 1 y la pendiente igual a 1 indican que la línea del gráfico es perfecta, por lo que los valores obtenidos son muy buenos y exactos.

La siguiente tabla muestra todos los datos procesados que se dijo que son necesarios para obtener el número de Avogadro:

	I (A)	t (s)	Q (C)	T (K)	P (atm)	Nº mol H ₂	Nº e ⁻ H ₂	Nº moléculas H ₂	N _A H ₂ (mol ⁻¹)
Valor total	0,03	2874	86,22	294	0,97	$4,42 \cdot 10^{-4}$	$5,38 \cdot 10^{20}$	$2,69 \cdot 10^{20}$	$6,09 \cdot 10^{23}$
Incerti dumbre (±)	0,01	1	12	1	0,01	$0,1 \cdot 10^{-4}$	$0,5 \cdot 10^{20}$	$0,5 \cdot 10^{20}$	$1,0 \cdot 10^{23}$

Tabla 2: valores de los datos necesarios para el cálculo con su incertidumbre

$P = 0.97 \text{ atm}$; $R = 0.082 \text{ (atm}\cdot\text{L)/(mol}\cdot\text{K)}$; $T = 21+273 = 294^\circ\text{K}$; $V = 11 / 1000 = 0.011\text{L}$;

$n = (P\cdot V)/(R\cdot T) = 0.000442 \text{ mol}$; $I = 0.03\text{A}$; $t = 47.9 \cdot 60 = 2874.0 \text{ s}$; $Q = I \cdot t = 86.22 \text{ C}$; $q = 1.6021 \cdot 10^{-19}$;

$n\text{Electrones} = Q / q = 5.3816865364209474\text{e}+20$; $n\text{Moleculas} = n\text{Electrones} / 2 = 2.6908432682104737\text{e}+20$;

$n\text{Avog} = n\text{Moleculas} / n = 6.087156541902859\text{e}+23$;

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En los resultados se puede apreciar el constante valor de la intensidad, y es interesante destacar que hay ligeras variaciones en la producción de volumen por cada intervalo, es decir, que la producción no se mantiene constante, aunque esto se debe probablemente a acumulaciones de errores sistemáticos en la medición de los datos. Esto se refleja perfectamente en la gráfica 2, donde se percibe la forma de una línea recta con leves fluctuaciones difícilmente visibles. Aún así, se puede intuir que la formación de la sustancia sigue un patrón constante.

Cálculo del error absoluto y relativo respecto al valor bibliográfico:

$$E_a = |(6,022 \cdot 10^{23}) - (6,09 \cdot 10^{23})| = 6,8 \cdot 10^{21}$$

$$E_r = E_a / (6,022 \cdot 10^{23}) \cdot 100 = 1,13\%$$

La incertidumbre en el número de Avogadro es del $\pm 10\%$ (valor aproximado tras la acumulación de los errores de los valores que aparece en la tercera columna de la Tabla 2). A pesar de esto, los cálculos se aproximan bastante al valor bibliográfico de la constante, llegando a ser resultados casi excelentes, ya que se obtuvo una desviación de 1,13% respecto al valor supuesto, por lo que se puede considerar la experiencia como exitosa.

8. CONCLUSIONES

Al terminar el proceso de experimentación se consideraron los resultados como satisfactorios porque el valor obtenido fue $6,09 \cdot 10^{23}$, por lo que el error relativo respecto al valor bibliográfico es de un 1,13%, lo cual es impresionante para haber sido obtenido dentro de un laboratorio de un instituto de secundaria. Además, el método de la electrólisis ha sido completado sin problemas y con buenos resultados, que son muy próximos a los teóricos.

Además de emplear aparatos más precisos en el trabajo, los resultados podrían haber sido mejorados haciendo seguimientos en intervalos más breves de tiempo, en vez de volumen, para encontrar variaciones, por ejemplo, en la intensidad de la corriente. Otra posible causa de error evitable en el trabajo es la pérdida de parte de una mínima parte del gas en el voltámetro, lo cual se podría haber evitado sellando mejor la zona superior e inferior del sistema. También debería haber usado instrumentos y medidas más precisas, ya que la incertidumbre del valor obtenido es del $\pm 10\%$.

El punto fuerte de la experiencia es que el método de la electrólisis permitió obtener un valor muy exacto del nº de Avogadro ($6,09 \cdot 10^{23}$) respecto al bibliográfico ($6,022 \cdot 10^{23}$). El punto débil de la experiencia es que hay muy poca precisión y una gran incertidumbre en los valores tomados, pero se compensan adecuadamente para acabar con un valor exacto.

Existen varios métodos para determinar el número de Avogadro de forma experimental que pueden ser más precisos:

1. Método de Rayos X: Este método utiliza la difracción de rayos X para determinar la distancia interatómica y el tamaño de los átomos.
2. Método de la gota de aceite: Este método utiliza la fuerza eléctrica para suspender una gota de aceite en el aire y medir su carga eléctrica.
3. Método de la difusión: Este método utiliza la difusión de gases para determinar el número de moléculas en un volumen conocido.
4. Método de la masa molar: Este método utiliza la masa molar y la densidad de un gas para determinar el número de moléculas en un volumen conocido.

Para mejorar la experimentación para obtener el número de Avogadro mediante la electrólisis del agua, se pueden seguir los siguientes pasos:

1. Utilizar un electrodo de platino en lugar de cobre para evitar la contaminación del electrodo y reducir la polarización.
2. Utilizar un amperímetro digital con más cifras significativas para poder apreciar los cambios de intensidad a lo largo del tiempo.

- Utilizar una fuente de alimentación más potente para poder realizar la experiencia más rápido al usar más voltaje.

9. BIBLIOGRAFÍA

Brown, C. y Ford, M. (n.d.). 2014. *Higher level chemistry*. 2nd ed. p.448-450. 2023.Ddd.Uab.Cat.<https://ddd.uab.cat/pub/edlc/02124521v7n3/02124521v7n3p306.pdf>

Sartain, Carl C. 1959. "Laboratory Experiment For Measuring Seven Atomic Constants". *American Journal Of Physics* 27 (8): 605-606. doi:10.1119/1.1934926.

Anexo: tabla de potenciales de reducción. (18 de febrero de 2022). Accedio el 30 de marzo de 2023, de https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo%3ATabla_de_potenciales_de_reducci%C3%B3n

Electrolysis of water. (25 de marzo de 2023). Accedido el 30 de marzo de 2023, de https://en.wikipedia.org/wiki/Electrolysis_of_water

ANEXO

1. Datos de las cinco repeticiones de las medidas:

t (min)	0	4,1	8,7	13,1	17,1	21,4	25,7	30,2	34,8	39,2	43,5	48,0	Media
I (A) $\pm 0,01$	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
V H ₂ (mL) $\pm 0,2$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	

t (min)	0	4,6	8,2	13,0	17,0	21,5	25,7	30,1	34,8	39,0	43,6	47,9	Media
I (A) $\pm 0,01$	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
V H ₂ (mL) $\pm 0,2$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	

t (min)	0	4,3	9,3	12,9	17,2	21,6	25,8	30,0	34,7	38,7	43,4	47,9	Media
I (A) $\pm 0,01$	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
V H ₂ (mL) $\pm 0,2$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	

t (min)	0	4	8,1	13,1	17,2	21,5	25,8	30,3	34,9	39,0	43,5	47,8	Media
I (A) $\pm 0,01$	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03

V H₂ (mL) ± 0,2	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
-----------------------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	--

t (min)	0	4,3	8,7	12,9	17,5	21,5	26,0	30,4	34,8	39,1	43,5	47,9	Media
I (A) ± 0,01	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
V H₂ (mL) ± 0,2	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	

Tabla con los valores de la media de los valores anteriores:

t (min)	0	4,3	8,6	13	17,2	21,5	25,8	30,2	34,8	39	43,5	47,9	Media
I (A) ± 0,01	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
V H₂ (mL) ± 0,2	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	