

Práctica Fran-Hertz Mercurio

Daniel Vázquez Lago

18 de abril de 2024

Índice

1. Objetivos	3
2. Introducción teórica	3
3. Análisis de los resultados	4
3.1. Obtención usando el programa del laboratorio	4
3.2. Obtención usando la aproximación parabólica	4
3.3. Dependencia de U_2	5
3.4. Cálculo de la energía	5
4. Conclusiones	5
4.1. Diferencias entre máximos y mínimos	6
4.2. Dependencias de ΔE	6
4.3. Energía de excitación del mercurio: teórico vs experimental	6
4.4. Impresiones finales	7
5. Anexo	8
5.1. Tablas de datos	8
5.1.1. Extremos por aproximación parabólica	8
5.1.2. Extremos laboratorio	9
5.1.3. Energías por aproximación parabólica	11
5.1.4. Energías laboratorio	12
5.1.5. Energías medias	13
5.1.6. Energías medias sin ΔE_{max}^{1-2}	14
5.2. Gráficas	15
5.2.1. Representación ΔE frente al orden del extremo	22

1. Objetivos

El principal objetivo de esta práctica es calcular el valor de la energía de excitación del mercurio, que llamaremos ΔE .

2. Introducción teórica

Como hemos dicho queremos calcular el nivel de excitación del mercurio, es decir, la energía necesaria para que un electrón pase de su primer orbital al primer orbital excitado. Para evaluar dicha energía James Frank y Gustav Hertz diseñaron un experimento muy interesante, que es el que usaremos aquí.

El experimento consiste, de manera muy resumida, en emitir electrones desde un ánodo, y recibirlos en un cátodo en el otro extremo del tubo. La energía que tengan los electrones la podremos controlar nosotros en el laboratorio. Mientras la energía no sea muy grande, la corriente entre ánodo y cátodo no se verá alterada, dado que el choque electrón-átomo es un choque inelástico. Sin embargo cuando el electrón consiga determinada energía (la energía de excitación del mercurio) el choque con los átomos de mercurio transferirá toda la energía cinética del electrón para excitar el átomo de mercurio, convirtiéndose en una colisión inelástica. Esto hará que el número de electrones que llega al cátodo disminuya, haciendo que veamos un pico en la intensidad.

Si siguiéramos aumentando la energía de los electrones, aún tras el primer choque conservará suficiente energía cinética para llegar al cátodo, restableciendo la intensidad. De nuevo, cuando la energía cinética del electrón sea suficiente como para excitar átomos de manera consecutiva, la corriente volverá a disminuir. Así obtendremos una serie de máximos y mínimos de intensidad que nos permitirá calcular la energía cinética de los electrones.

Debido a la construcción del experimento, la energía a partir la cual vemos el primer mínimo no será la energía de excitación. Esto se debe principalmente a que existen factores (que podemos llamar V_{off}) que hacen que el voltaje a partir el cual se ve el primer mínimo venga dado por:

$$U_{\min}^1 = U + V_{off} \quad (2.1)$$

A partir de este voltaje no podremos calcular el voltaje de excitación (U), i.e. el voltaje que hay que aplicar a un electrón para que en el choque con un átomo de mercurio y se excita ($\Delta E = e \cdot U$). Sin embargo si consideramos la energía a partir la cual aparece el segundo mínimo:

$$U_{\min}^2 = 2U + V_{off} \quad (2.2)$$

podemos ver claramente como la diferencia de U_{\min}^2 y U_{\min}^1 si nos permitiría eliminar esta energía de offset. De esta manera podremos obtener la energía de excitación a partir de las diferencias de voltaje entre mínimos consecutivos, ya que:

$$U = U_{\min}^{n+1} - U_{\min}^n \quad (2.3)$$

donde U_{\min}^n simboliza el potencial del mínimo número n . Una vez hemos entendido como extraer el nivel de energía a partir de la excitación del mercurio solo queda analizar los datos experimentales, encontrar los mínimos y asignarles una incertidumbre. Una pregunta que desde ya nos podemos plantear es: ¿La diferencia entre máximos, dado que se encuentran a mitad de camino entre un mínimo y otro, no servirían también para calcular U ? Como el proceso usado para obtener los mínimos es el mismo que nos permite calcular los máximos, sin más esfuerzo que redactar un poco más, podremos ver si los resultados usando los máximos son iguales o parecidos que usando los mínimos, o si por el contrario son diferentes. De ser diferentes tendremos que buscar una razón.

Debemos mencionar que cada toma de datos se realizó para un potencial de retardo diferente y constante en cada medida. El potencial de retardo U_2 ; ahora diferenciamos de U_1 , el potencial que metemos a los electrones; es básicamente un potencial que reduce la velocidad de los electrones a medida que van cruzando el tubo. De esta manera el potencial de retardo no permite llegar al cátodo a aquellos electrones con una baja energía cinética. Por esa misma razón a medida que aumentemos U_2 los picos de los máximos serán menores. Eso se puede ver perfectamente en la figura 5.1.

3. Análisis de los resultados

En esta parte vamos a calcular los mínimos y máximos usando dos métodos. El primero de ellos es un método computacional que el propio programa que usamos para obtener los datos, nos asigna. Estos no vienen con incertidumbre, por tanto deberemos nosotros a mano asignarle unos. El otro método consiste en aproximar la región del mínimo/máximo para calcular una parábola. A partir de los coeficientes de la parábola calcularemos U_n . Entonces en esta sección vamos a analizar como se obtienen los mínimos/máximos, y comentar las incertidumbres de cada valor. Tras esto calcularemos las energías a partir de los mínimos, obteniendo así una cantidad de 8 energías para cada U_2 usada (4 energías por haber 5 mínimos, y otras 4 por haber 5 máximos).

3.1. Obtención usando el programa del laboratorio

Como hemos mencionado el programa del laboratorio ya nos da, aproximadamente, un valor para los máximos y otros para los mínimos. Sin embargo el valor que nos da es un valor sin incertidumbres, por lo que habrá que asignarle una de manera completamente arbitraria. Nosotros hemos elegido $\sigma = 0,25$ ya que nos parece el rango donde con una seguridad del 95 % el valor del máximo/mínimo cae. Los datos calculados así se presentan en las tablas del apartado 5.1.2, y en las gráficas 5.3, 5.5, 5.7, 5.9, 5.11 y 5.13.

3.2. Obtención usando la aproximación parabólica

Como sabemos una parábola viene determinada por la función $f(x) = a + bx + cx^2$. Para calcular la posición donde se encuentra su punto mínimo (o máximo) solo debemos derivar e igualar a cero. En ese caso podemos obtener que el mínimo/máximo se encuentra en la posición:

$$x_0 = -\frac{b}{2c} \quad (3.1)$$

por lo que la incertidumbre de cada máximo/mínimo viene determinada por la fórmula:

$$s(x_0) = \sqrt{\left(\frac{s(b)}{2c}\right)^2 + \left(\frac{s(c) \cdot b}{2c^2}\right)^2} \quad (3.2)$$

La incertidumbre será mayor o menor en función de la cantidad de datos y la dispersión de estos, por lo que consideramos que no hay ningún motivo para añadir una incertidumbre mayor que esta, dada por los coeficientes de las regresiones parabólicas. Los datos calculados se encuentran en las tablas del apartado 5.1.1, y en las gráficas 5.2, 5.4, 5.6, 5.8, 5.10 y 5.12.

3.3. Dependencia de U_2

Como podemos ver en las tablas (para cualquier método de obtención) los máximos y mínimos se desplazan en función de los valores de U_2 . A priori esto no debería de importarnos, ya que nos importa la diferencias entre los mínimos/máximos. De hecho, esta dependencia no acaba afectando a las diferencias entre los extremos, y por tanto $\Delta E = e \cdot U$ no se ve afectada.

3.4. Cálculo de la energía

Una vez hemos obtenido los valores de los mínimos podemos calcular la energía. Podemos hacerlo de varias formas, podemos calcular la diferencia entre el mínimo más grande y el mínimo más grande (análogamente los máximos) y dividir entre 4. Dado que tenemos todos los mínimos y máximos que menos que calcular la diferencia entre cada uno de estos. Esto mismo hemos hecho en las tablas de los apartados 5.1.3 y 5.1.4 donde $n - m$ significa que es la diferencia de energía dada entre el mínimo/máximo número n y número m .

La incertidumbre de cada valor de la energía viene dada por la incertidumbre del mínimo n y m , esto es:

$$s(\Delta E) = e \cdot \sqrt{s(U_n)^2 + s(U_m)^2} \quad (3.3)$$

Por esta misma razón la incertidumbre de los valores de los laboratorios (apartado 5.1.4) es la misma para todos, ya que $s(U_n) = s(U_m)$. Otra cualidad de los datos es que varía bastante en función de las posiciones $n - m$, en general siendo ΔE mas grande cuanto mas grande es $n - m$, lo cual será foco de debate en la siguiente sección.

4. Conclusiones

En este apartado calcularemos los valores medios de las energías, comparándolos con los valores teóricos; discutiremos las razones por las que ΔE cambia en función de $n - m$ (presentando una tabla); y por qué $\Delta E_{\text{máx}}$ da un diferente resultado que $\Delta E_{\text{mín}}$ en las tablas 25 y 26.

4.1. Diferencias entre máximos y mínimos

Como podemos ver en las tablas 25 y 26, los datos de los máximos son sobre 0.10-0.15 eV diferentes. Sin embargo nosotros hemos dicho en la teoría que deberían ser parecidos a los valores de ΔE_{\min} . ¿Como es esto posible? Para esto debemos fijarnos en las tablas de los apartados 5.1.3 y 5.1.4. Como podemos ver en los ΔE_{\max}^{2-3} , ΔE_{\max}^{3-4} y ΔE_{\max}^{4-5} son parecidos (aproximadamente con 0.01 eV menores), siendo la diferencia ΔE_{\max}^{1-2} la que realmente es diferente respecto ΔE_{\min}^{1-2} (unos 0.5 eV). Es decir, es el primer máximo el que esta alterando en gran medida ΔE_{\max} para ambos métodos. La existencia de un potencial de retardo hace que el primer máximo no caiga necesariamente en $U_{\max}^1 = U_{\min}^1/2$, alterando en gran medida el valor. Si realizamos el valor medio pero ahora sin usar los valores de los primeros máximos podemos ver que sí se parecen 27 y 28. Sin este valor podemos observar que experimentalmente dan prácticamente el mismo resultado, por lo que usar los máximos es, al menos para nuestros datos, tan válido como usar los mínimos.

4.2. Dependencias de ΔE

En esta sección vamos a estudiar si ΔE depende de U_1 y U_2 . En otras palabras: vamos a ver si ΔE crece/decrece en función de U_1 , y si crece/decrece al aumentar U_2 .

Llamaremos a n el “orden del extremo”, de tal manera que tendremos 1 para los extremos 1-2, 2 para los extremos 2-3... Como podemos ver en las tablas del apartado 5.1.3 y las figuras 5.14 y 5.15 (en las cuales hemos representado ΔE en función de n), tenemos que ΔE_{\min} y ΔE_{\max} aumenta cuando n aumenta, esto es, que aumenta cuando U_1 aumenta. ¿A qué se debe esto? Una de la razones podría ser que, con un potencial tan grande, no se excite del estado fundamental al primer estado, si no que se exciten otros. Un estudio de las ondas de luz emitidas por el mercurio nos podría solventar esta duda. Otras razones pueden ser algún tipo de interacción del mercurio con el cátodo o ánodo, entre otras. Habría que hacer un estudio mas profundo de la teoría y de las colisiones atómicas, algo fuera de nuestro alcance. En las tablas del apartado 5.1.4 (figura 5.17). ocurre un fenómeno similar a la del apartado anterior, aunque de una manera menos pronunciada, ya que tiene un comportamiento más irregular respecto U_1 . Sin embargo para este método podemos ver que este patrón es mucho mas irregular, tal y como podemos ver en la figura 5.16.

El valor de ΔE no varía al cambiar U_2 (si que varía, al ser experimentos diferentes, pero la variación no muestra signos de un patrón claro), ni en un método ni en otro (tal y como hemos comentado anteriormente). De hecho esto se puede ver en las tablas 27 y 28, ya que los valores medios no prácticamente no varían según U_2 . Lo único que ocurre al variar U_2 es que el valor de las incertidumbres aumenta (lo cual es normal, ya que las aproximaciones son peores).

4.3. Energía de excitación del mercurio: teórico vs experimental

Para comparar el valor medio de los ΔE para mínimos y máximos (la última fila de las tablas 27 y 28) con el dato teórico primero tendremos que dar un valor al dato teórico. En el guión se nos dice que el valor real es:

$$\Delta E^{teo} = 4,886 \text{ (eV)} \quad (4.1)$$

Para que se pueda comparar rápidamente de un vistazo, sin tener que ir a las tablas, escribimos el valor medio experimental para cada método:

$$\Delta E_{\text{máx}}^{par} = 4,804 \text{ (eV)} \quad s(\Delta E_{\text{máx}}^{par}) = 0,095 \text{ (eV)} \quad (4.2)$$

$$\Delta E_{\text{máx}}^{par} = 4,826 \text{ (eV)} \quad s(\Delta E_{\text{máx}}^{par}) = 0,089 \text{ (eV)} \quad (4.3)$$

$$\Delta E_{\text{máx}}^{lab} = 4,802 \text{ (eV)} \quad s(\Delta E_{\text{máx}}^{lab}) = 0,067 \text{ (eV)} \quad (4.4)$$

$$\Delta E_{\text{máx}}^{lab} = 4,843 \text{ (eV)} \quad s(\Delta E_{\text{máx}}^{lab}) = 0,058 \text{ (eV)} \quad (4.5)$$

Dado que los resultados finales son pocos, realizar un test estadístico para hallar la relación no va a resultar nada complejo ni engorroso. El test usado va a ser un test de Student, esto es, el test típico de la media de una población normal. Dado que esto es una memoria y no un manual de tratamiento de datos o estadística, simplemente diremos que con un grado de confianza $1 - \alpha$ (α representa la probabilidad de cometer un error tipo I, o lo que es lo mismo, rechazar incorrectamente la hipótesis nula) aceptamos o rechazamos la hipótesis de que ΔE^{teo} es correcta. Entonces calculamos el t para cada medida ($t = (\bar{x} - x_{teo})/\sqrt{s/n}$; con $n=4$ al hacer la media con 4 valores). En ese caso:

$$t_{\text{mín}}^{lab} = 0,254 \quad t_{\text{máx}}^{lab} = 0,459 \quad t_{\text{mín}}^{par} = 0,283 \quad t_{\text{máx}}^{par} = 0,375 \quad (4.6)$$

ahora tenemos que compararlo con el valor tabulado con, por ejemplo un $\alpha = 0,05$. Si ocurre que $t > t_{\text{tabulado}}$ tendremos que rechazar la hipótesis. Si por el contrario tenemos que $t \leq t_{\text{tabulado}}$ podremos decir que ΔE^{teo} . Esto en la literatura se le llama *test de hipótesis estadística*. En cualquier caso para $\alpha = 4$, $n = 4$ (3 grados de libertad) tenemos que $t_{\text{tab}} = 2,132$, ergo aceptamos el valor ΔE_{teo} a con un nivel de significación del 95 %. Véase referencia [1] para la tabulación usada, y en más en general, el tratamiento de datos.

4.4. Impresiones finales

Como podemos ver hemos concluido satisfactoriamente la memoria, ya que aun que los datos no cuadren perfectamente con el valor teórico (una diferencia entorno a los 0.04-0.08 eV) el resultado es lo suficientemente conclusivo como para no rechazar el dato. Más allá de esto hemos podido comprobar no solo la verificación de este hecho experimental, si no que además hemos visto como funciona la dependencia de ΔE respecto U_1 y U_2 , así como la diferencia entre usar máximos y mínimos. Aunque hayamos ampliado considerablemente el objetivo inicial de la práctica, en lo personal me encuentro bastante satisfecho. Este último hecho nos ha permitido ver de primera mano como los orbitales están cuantizados, tal y como vieron Frank y Hertz, demostrando así (para sus coetáneos) que el modelo de Bohr era correcto, aunque nosotros ahora sepamos que es *incompleto*.

Lo único que ampliaría sería el rango de U_2 para estudiar (así ver si realmente existe una dependencia de con U_2) y un mayor rango de U_1 . También podríamos calcular h a partir de esta ΔE si conociéramos la longitud de onda emitida por la primera excitación, y dado que esta prácticamente es relativamente corta de realizar, podríamos haberlo hecho perfectamente, y así hacer un poco mas completa la práctica.

5. Anexo

5.1. Tablas de datos

5.1.1. Extremos por aproximación parabólica

	$U_1^{\text{máx}}$ (V)	$s(U_1^{\text{máx}})$ (V)	$U_1^{\text{mín}}$ (V)	$s(U_1^{\text{mín}})$ (V)
1	12.02	0.15	13.84	0.14
2	16.38	0.08	18.52	0.17
3	21.05	0.16	23.25	0.11
4	25.88	0.33	28.17	0.15
5	30.81	0.42	33.15	0.20

Cuadro 1: Extremos para $U_2 = 0,40$ V usando la aproximación-parabólica.

	$U_1^{\text{máx}}$ (V)	$s(U_1^{\text{máx}})$ (V)	$U_1^{\text{mín}}$ (V)	$s(U_1^{\text{mín}})$ (V)
1	12.04	0.22	13.86	0.23
2	16.42	0.12	18.56	0.12
3	21.08	0.13	23.30	0.21
4	25.93	0.28	28.22	0.23
5	30.85	0.29	33.20	0.28

Cuadro 2: Extremos para $U_2 = 0,50$ V usando la aproximación-parabólica.

	$U_1^{\text{máx}}$ (V)	$s(U_1^{\text{máx}})$ (V)	$U_1^{\text{mín}}$ (V)	$s(U_1^{\text{mín}})$ (V)
1	12.04	0.19	13.92	0.27
2	16.45	0.13	18.62	0.19
3	21.11	0.10	23.35	0.20
4	25.95	0.25	28.25	0.19
5	30.87	0.51	33.22	0.33

Cuadro 3: Extremos para $U_2 = 0,60$ V usando la aproximación-parabólica.

	$U_1^{\text{máx}}$ (V)	$s(U_1^{\text{máx}})$ (V)	$U_1^{\text{mín}}$ (V)	$s(U_1^{\text{mín}})$ (V)
1	12.16	0.21	14.05	0.23
2	16.56	0.12	18.75	0.18
3	21.23	0.13	23.49	0.22
4	26.04	0.19	28.41	0.22
5	30.97	0.50	33.39	0.29

Cuadro 4: Extremos para $U_2 = 1,00$ V usando la aproximación-parabólica.

	$U_1^{\text{máx}}$ (V)	$s(U_1^{\text{máx}})$ (V)	$U_1^{\text{mín}}$ (V)	$s(U_1^{\text{mín}})$ (V)
1	12.24	0.29	14.33	0.30
2	16.69	0.21	18.97	0.37
3	21.34	0.23	23.71	0.28
4	26.18	0.32	28.62	0.23
5	31.10	0.32	33.57	0.55

Cuadro 5: Extremos para $U_2 = 1,50$ V usando la aproximación-parabólica.

	$U_1^{\text{máx}}$ (V)	$s(U_1^{\text{máx}})$ (V)	$U_1^{\text{mín}}$ (V)	$s(U_1^{\text{mín}})$ (V)
1	12.42	0.40	14.49	0.41
2	16.85	0.31	19.14	0.32
3	21.49	0.39	23.91	0.45
4	26.32	0.24	28.81	0.62
5	31.24	0.64	33.78	0.87

Cuadro 6: Extremos para $U_2 = 2,00$ V usando la aproximación-parabólica.

5.1.2. Extremos laboratorio

	$U_1^{\text{máx}}$ (V)	$s(U_1^{\text{máx}})$ (V)	$U_1^{\text{mín}}$ (V)	$s(U_1^{\text{mín}})$ (V)
1	11.99	0.20	13.87	0.20
2	16.36	0.20	18.73	0.20
3	21.09	0.20	23.32	0.20
4	25.86	0.20	28.20	0.20
5	30.76	0.20	33.11	0.20

Cuadro 7: Extremos para $U_2 = 0,40$ V usando datos laboratorio.

	$U_1^{\text{máx}}$ (V)	$s(U_1^{\text{máx}})$ (V)	$U_1^{\text{mín}}$ (V)	$s(U_1^{\text{mín}})$ (V)
1	11.94	0.20	14.06	0.20
2	16.31	0.20	18.65	0.20
3	21.09	0.20	23.44	0.20
4	25.95	0.20	28.20	0.20
5	30.81	0.20	33.18	0.20

Cuadro 8: Extremos para $U_2 = 0,50$ V usando datos laboratorio.

	$U_1^{\text{máx}}$ (V)	$s(U_1^{\text{máx}})$ (V)	$U_1^{\text{mín}}$ (V)	$s(U_1^{\text{mín}})$ (V)
1	12.11	0.20	13.69	0.20
2	16.41	0.20	18.53	0.20
3	21.07	0.20	23.36	0.20
4	25.98	0.20	28.30	0.20
5	30.81	0.20	33.18	0.20

Cuadro 9: Extremos para $U_2 = 0,60$ V usando datos laboratorio.

	$U_1^{\text{máx}}$ (V)	$s(U_1^{\text{máx}})$ (V)	$U_1^{\text{mín}}$ (V)	$s(U_1^{\text{mín}})$ (V)
1	12.28	0.20	13.89	0.20
2	16.60	0.20	18.75	0.20
3	21.19	0.20	23.39	0.20
4	26.08	0.20	28.52	0.20
5	30.94	0.20	33.38	0.20

Cuadro 10: Extremos para $U_2 = 1,00$ V usando datos laboratorio.

	$U_1^{\text{máx}}$ (V)	$s(U_1^{\text{máx}})$ (V)	$U_1^{\text{mín}}$ (V)	$s(U_1^{\text{mín}})$ (V)
1	12.11	0.20	14.26	0.20
2	16.63	0.20	19.07	0.20
3	21.29	0.20	23.68	0.20
4	26.12	0.20	28.57	0.20
5	31.08	0.20	33.69	0.20

Cuadro 11: Extremos para $U_2 = 1,50$ V usando datos laboratorio.

	$U_1^{\text{máx}}$ (V)	$s(U_1^{\text{máx}})$ (V)	$U_1^{\text{mín}}$ (V)	$s(U_1^{\text{mín}})$ (V)
1	12.52	0.20	14.38	0.20
2	16.80	0.20	19.16	0.20
3	21.39	0.20	23.76	0.20
4	26.27	0.20	28.98	0.20
5	31.15	0.20	33.84	0.20

Cuadro 12: Extremos para $U_2 = 2,00$ V usando datos laboratorio.

5.1.3. Energías por aproximación parabólica

	$\Delta E_{\text{máx}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{máx}})$ (eV)	$\Delta E_{\text{mín}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{mín}})$ (eV)
1-2	4.36	0.17	4.68	0.23
2-3	4.67	0.18	4.73	0.21
3-4	4.83	0.37	4.91	0.19
4-5	4.93	0.54	4.98	0.26

Cuadro 13: valores de la energía para $U_2 = 0,40$

	$\Delta E_{\text{máx}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{máx}})$ (eV)	$\Delta E_{\text{mín}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{mín}})$ (eV)
1-2	4.38	0.25	4.70	0.26
2-3	4.67	0.17	4.74	0.25
3-4	4.85	0.31	4.93	0.32
4-5	4.92	0.40	4.98	0.37

Cuadro 14: valores de la energía para $U_2 = 0,50$

	$\Delta E_{\text{máx}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{máx}})$ (eV)	$\Delta E_{\text{mín}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{mín}})$ (eV)
1-2	4.41	0.23	4.70	0.33
2-3	4.66	0.17	4.73	0.27
3-4	4.83	0.27	4.89	0.27
4-5	4.92	0.56	4.98	0.38

Cuadro 15: valores de la energía para $U_2 = 0,60$

	$\Delta E_{\text{máx}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{máx}})$ (eV)	$\Delta E_{\text{mín}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{mín}})$ (eV)
1-2	4.40	0.24	4.70	0.29
2-3	4.66	0.18	4.73	0.29
3-4	4.81	0.23	4.92	0.31
4-5	4.93	0.53	4.98	0.36

Cuadro 16: valores de la energía para $U_2 = 1,00$

	$\Delta E_{\text{máx}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{máx}})$ (eV)	$\Delta E_{\text{mín}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{mín}})$ (eV)
1-2	4.45	0.36	4.64	0.47
2-3	4.66	0.31	4.74	0.47
3-4	4.83	0.39	4.91	0.37
4-5	4.92	0.46	4.96	0.60

Cuadro 17: valores de la energía para $U_2 = 1,50$

	$\Delta E_{\text{máx}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{máx}})$ (eV)	$\Delta E_{\text{mín}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{mín}})$ (eV)
1-2	4.42	0.51	4.65	0.52
2-3	4.64	0.49	4.77	0.55
3-4	4.83	0.46	4.89	0.76
4-5	4.92	0.69	4.97	1.06

Cuadro 18: valores de la energía para $U_2 = 2,00$

5.1.4. Energías laboratorio

	$\Delta E_{\text{máx}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{máx}})$ (eV)	$\Delta E_{\text{mín}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{mín}})$ (eV)
1-2	4.37	0.28	4.86	0.28
2-3	4.73	0.28	4.59	0.28
3-4	4.77	0.28	4.88	0.28
4-5	4.90	0.28	4.91	0.28

Cuadro 19: valores de la energía para $U_2 = 0,40$

	$\Delta E_{\text{máx}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{máx}})$ (eV)	$\Delta E_{\text{mín}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{mín}})$ (eV)
1-2	4.37	0.28	4.59	0.28
2-3	4.78	0.28	4.79	0.28
3-4	4.86	0.28	4.76	0.28
4-5	4.86	0.28	4.98	0.28

Cuadro 20: valores de la energía para $U_2 = 0,50$

	$\Delta E_{\text{máx}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{máx}})$ (eV)	$\Delta E_{\text{mín}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{mín}})$ (eV)
1-2	4.30	0.28	4.84	0.28
2-3	4.66	0.28	4.83	0.28
3-4	4.91	0.28	4.94	0.28
4-5	4.83	0.28	4.88	0.28

Cuadro 21: valores de la energía para $U_2 = 0,60$

	$\Delta E_{\text{máx}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{máx}})$ (eV)	$\Delta E_{\text{mín}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{mín}})$ (eV)
1-2	4.32	0.28	4.86	0.28
2-3	4.59	0.28	4.64	0.28
3-4	4.89	0.28	5.13	0.28
4-5	4.86	0.28	4.86	0.28

Cuadro 22: valores de la energía para $U_2 = 1,00$

	$\Delta E_{\text{máx}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{máx}})$ (eV)	$\Delta E_{\text{mín}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{mín}})$ (eV)
1-2	4.52	0.28	4.81	0.28
2-3	4.66	0.28	4.61	0.28
3-4	4.83	0.28	4.89	0.28
4-5	4.96	0.28	5.12	0.28

Cuadro 23: valores de la energía para $U_2 = 1,50$

	$\Delta E_{\text{máx}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{máx}})$ (eV)	$\Delta E_{\text{mín}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{mín}})$ (eV)
1-2	4.28	0.28	4.78	0.28
2-3	4.59	0.28	4.60	0.28
3-4	4.88	0.28	5.22	0.28
4-5	4.88	0.28	4.86	0.28

Cuadro 24: valores de la energía para $U_2 = 2,00$

5.1.5. Energías medias

U_2 (V)	$\Delta E_{\text{máx}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{máx}})$ (eV)	$\Delta E_{\text{mín}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{mín}})$ (eV)
0.40	4.70	0.17	4.83	0.11
0.50	4.70	0.15	4.84	0.15
0.60	4.71	0.17	4.83	0.16
1.00	4.70	0.16	4.83	0.16
1.50	4.71	0.19	4.81	0.24
2.00	4.70	0.27	4.82	0.38
-	4.704	0.078	4.826	0.089

Cuadro 25: valores medios de la ΔE usando la aproximación parabólica.

U_2 (V)	$\Delta E_{\text{máx}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{máx}})$ (eV)	$\Delta E_{\text{mín}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{mín}})$ (eV)
0.40	4.69	0.14	4.81	0.14
0.50	4.72	0.14	4.78	0.14
0.60	4.67	0.14	4.87	0.14
1.00	4.67	0.14	4.87	0.14
1.50	4.74	0.14	4.86	0.14
2.00	4.66	0.14	4.87	0.14
-	4.692	0.058	4.843	0.058

Cuadro 26: valores medios de la ΔE por los valores del programa.

5.1.6. Energías medias sin $\Delta E_{\text{max}}^{1-2}$

U_2 (V)	$\Delta E_{\text{máx}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{máx}})$ (eV)	$\Delta E_{\text{mín}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{mín}})$ (eV)
0.40	4.81	0.22	4.83	0.11
0.50	4.81	0.18	4.84	0.15
0.60	4.80	0.22	4.83	0.16
1.00	4.80	0.20	4.83	0.16
1.50	4.80	0.23	4.81	0.24
2.00	4.80	0.32	4.82	0.38
-	4.804	0.095	4.826	0.089

Cuadro 27: valores medios de la ΔE por los valores del programa sin $\Delta E_{\text{máx}}^{1-2}$.

U_2 (V)	$\Delta E_{\text{máx}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{máx}})$ (eV)	$\Delta E_{\text{mín}}$ (eV)	$s(\Delta E_{\text{mín}})$ (eV)
0.40	4.80	0.16	4.81	0.14
0.50	4.83	0.16	4.78	0.14
0.60	4.80	0.16	4.87	0.14
1.00	4.78	0.16	4.87	0.14
1.50	4.82	0.16	4.86	0.14
2.00	4.78	0.16	4.87	0.14
-	4.802	0.067	4.843	0.058

Cuadro 28: valores medios de la ΔE por los valores del programa sin $\Delta E_{\text{máx}}^{1-2}$.

5.2. Gráficas

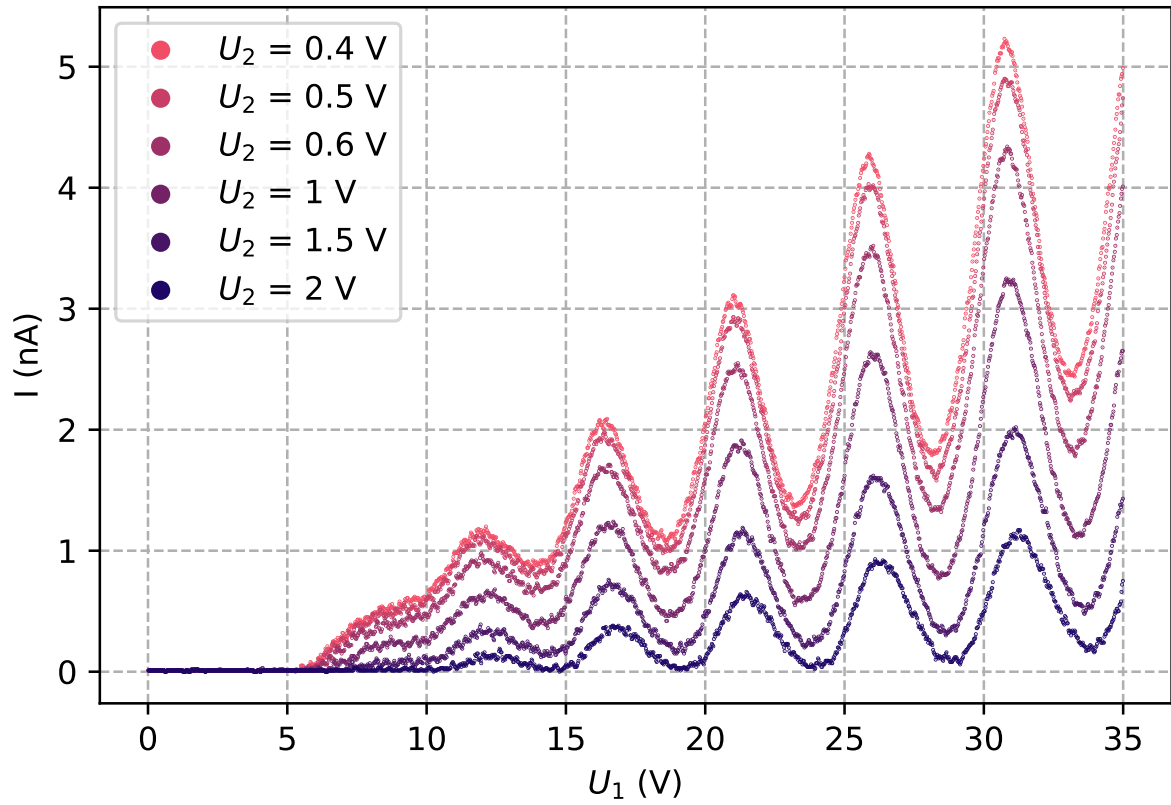


Figura 5.1: representación gráfica de los puntos experimentales.

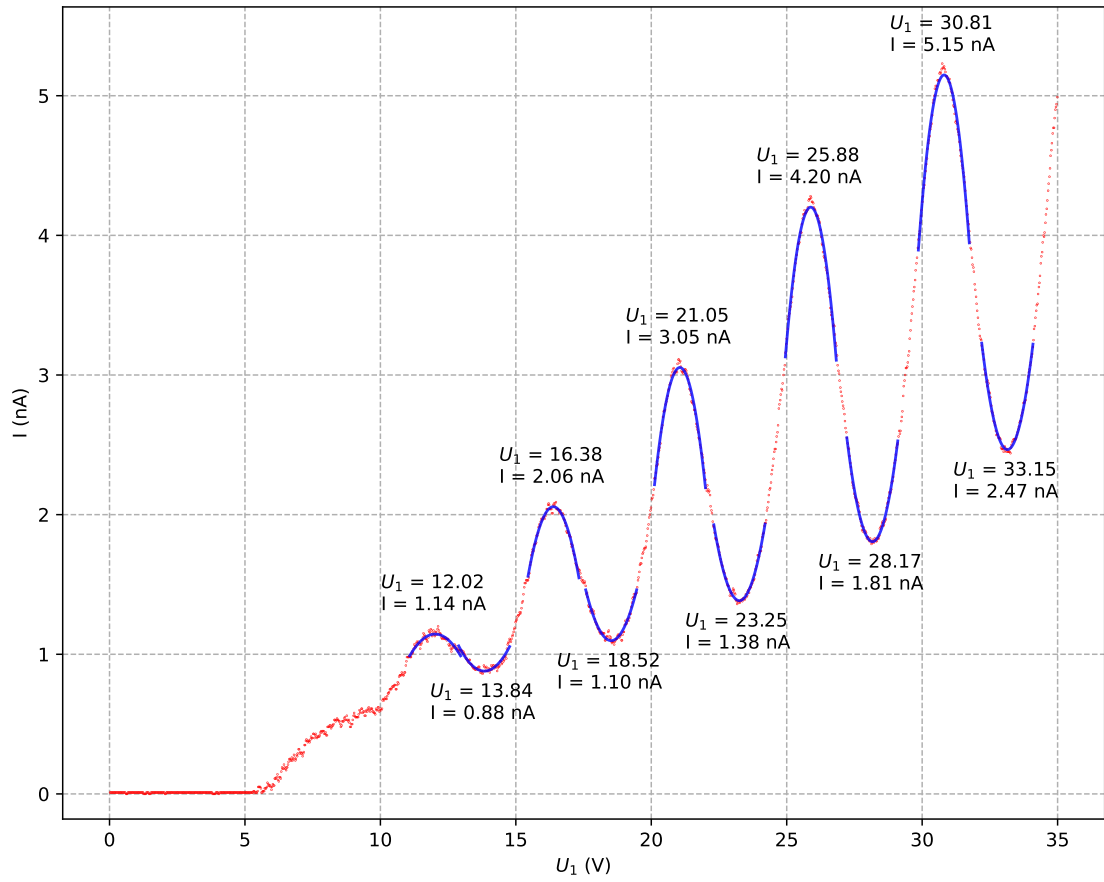


Figura 5.2: aproximación parabólica para $U_2 = 0,4V$.

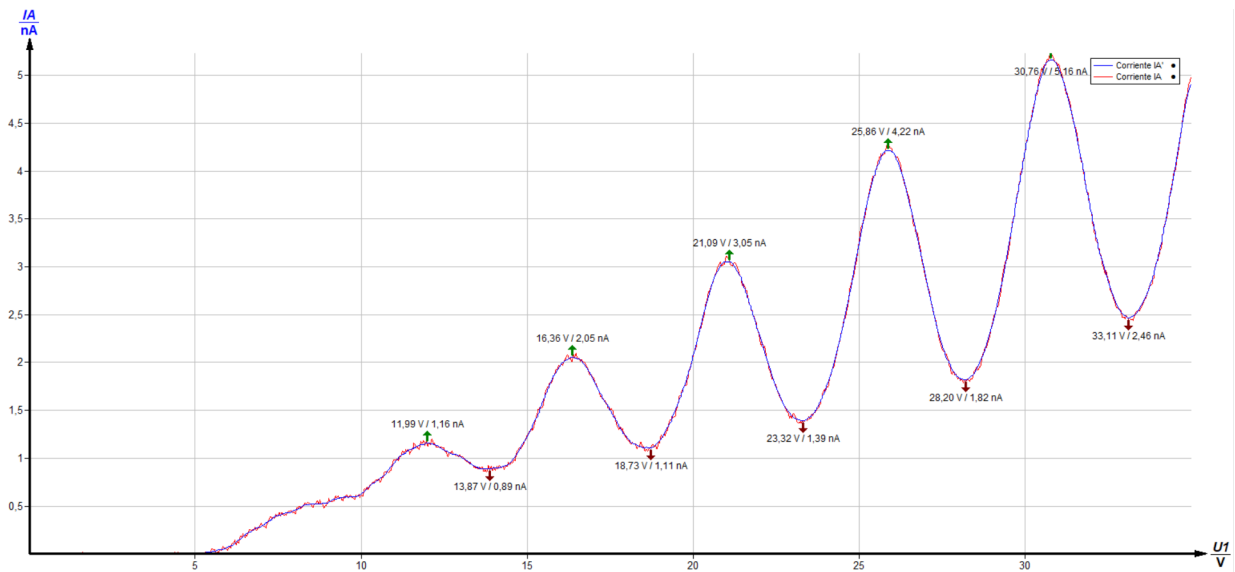


Figura 5.3: datos experimentales dados por el programa para $U_2 = 0,4V$.

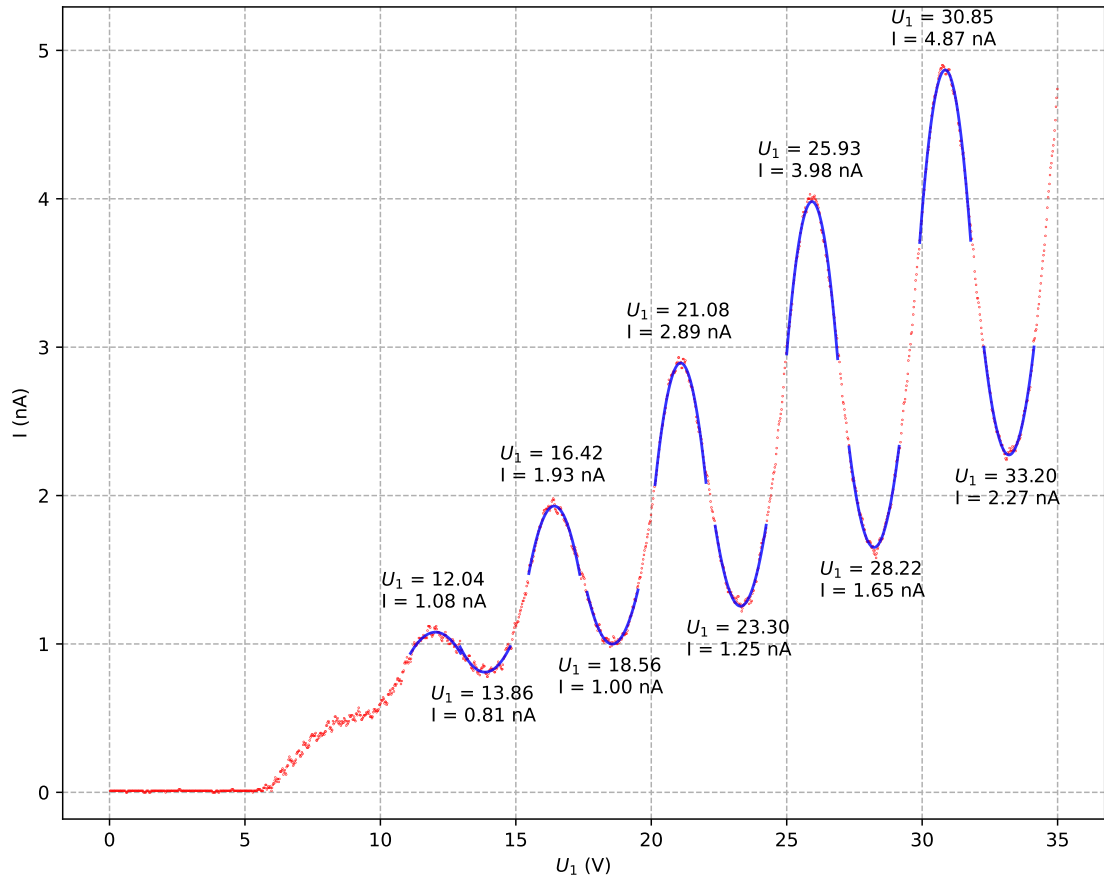


Figura 5.4: aproximación parabólica para $U_2 = 0,5V$.

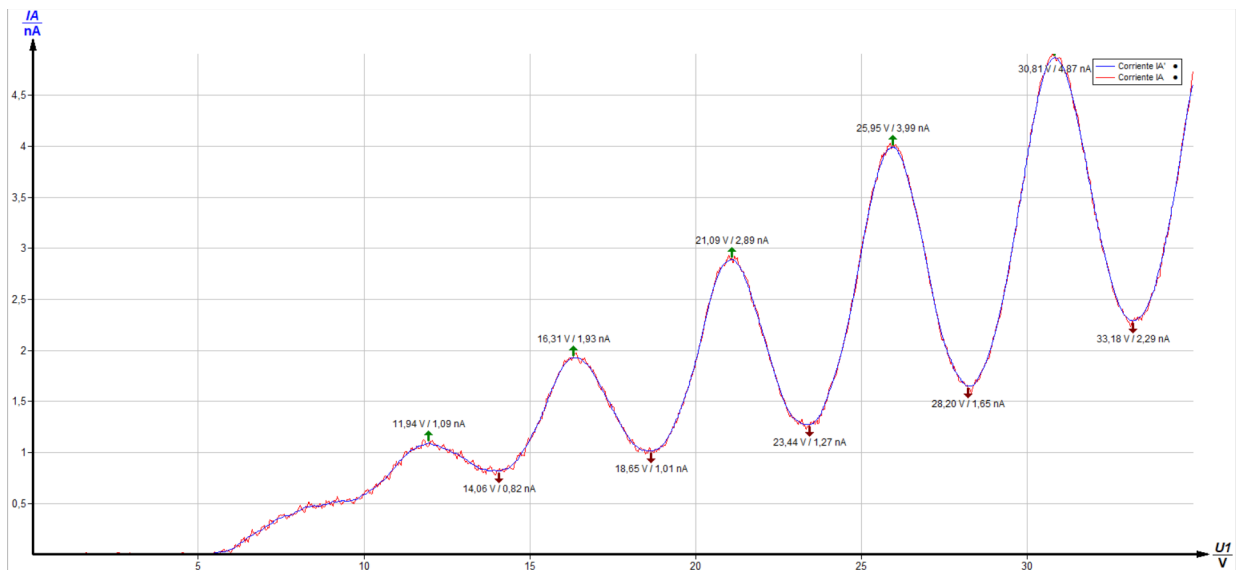


Figura 5.5: datos experimentales dados por el programa para $U_2 = 0,5V$.

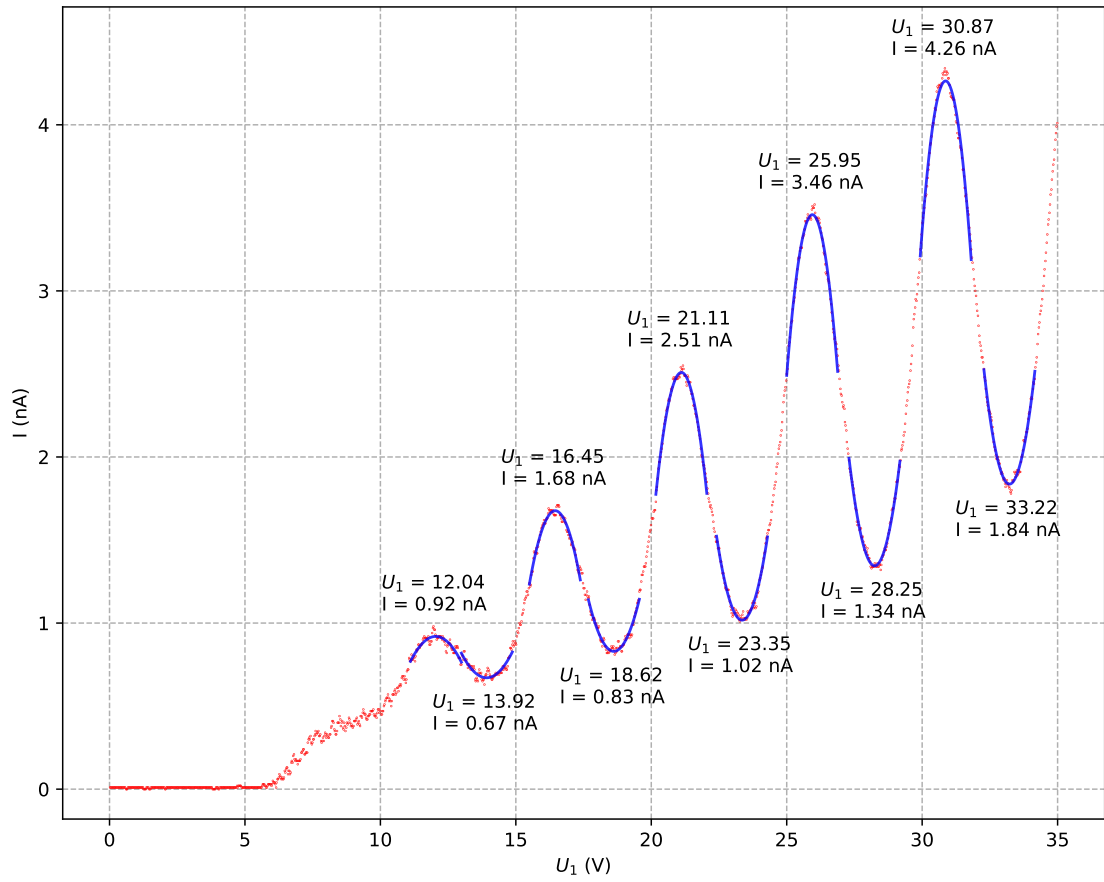


Figura 5.6: aproximación parabólica para $U_2 = 0,6V$.

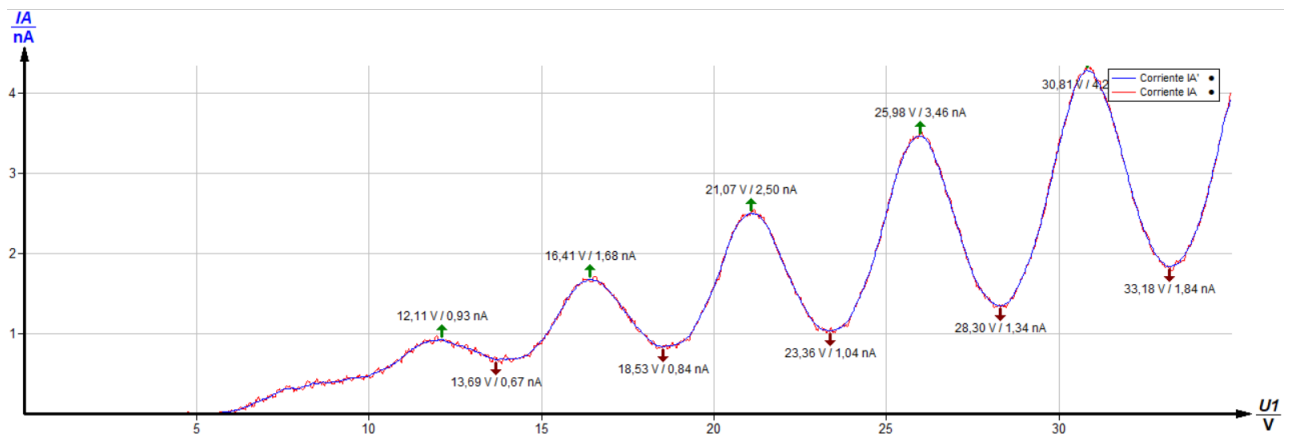


Figura 5.7: datos experimentales dados por el programa para $U_2 = 0,6V$.

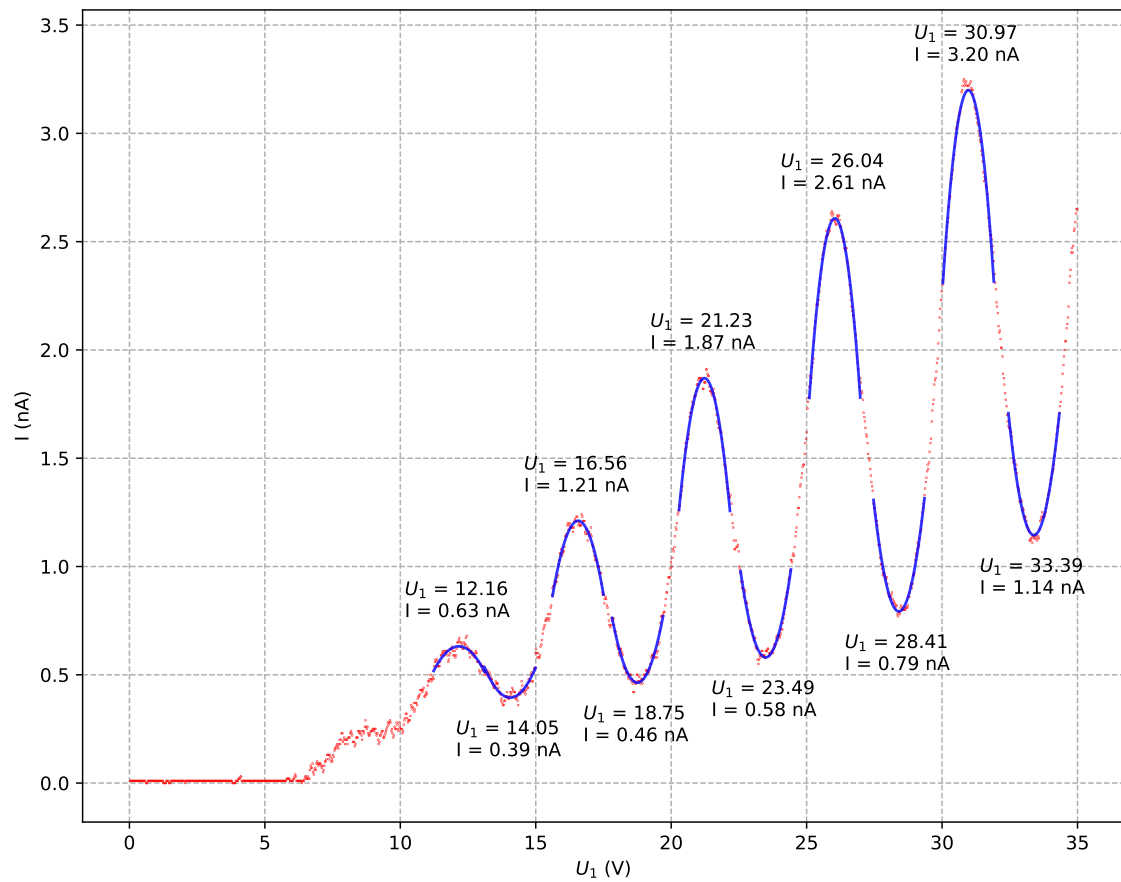


Figura 5.8: aproximación parabólica para $U_2 = 1,0V$.

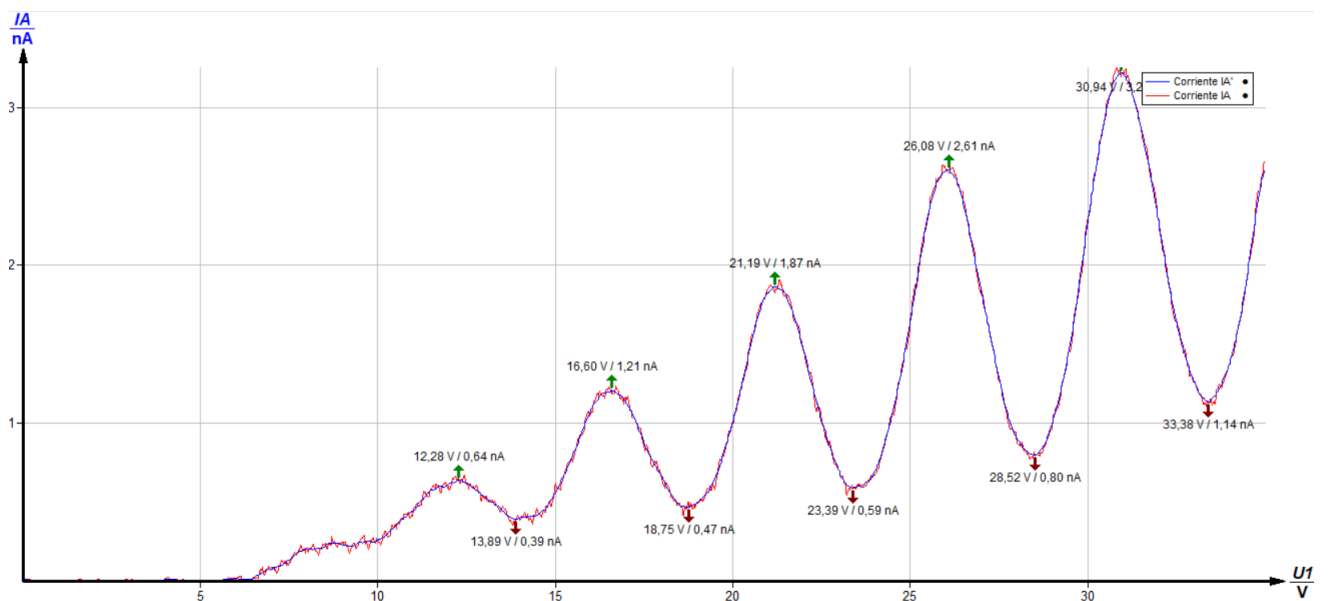


Figura 5.9: datos experimentales dados por el programa para $U_2 = 1,0V$.

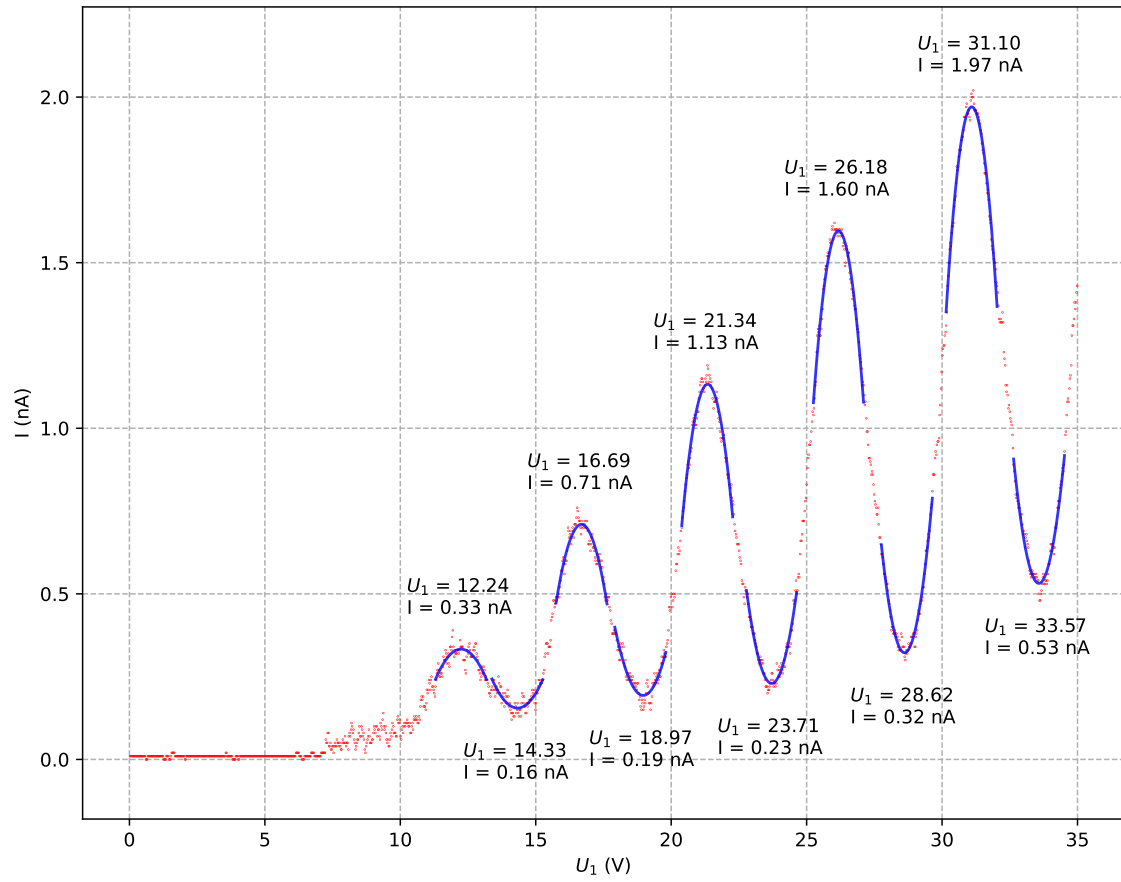


Figura 5.10: aproximación parabólica para $U_2 = 1,5V$.

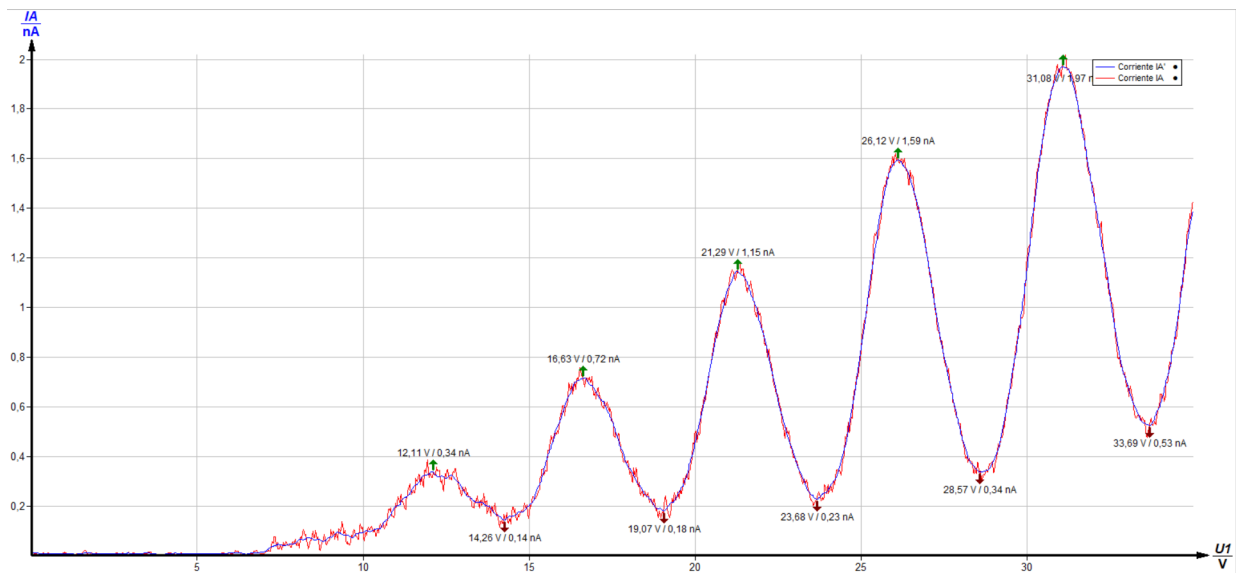


Figura 5.11: datos experimentales dados por el programa para $U_2 = 1,5V$.

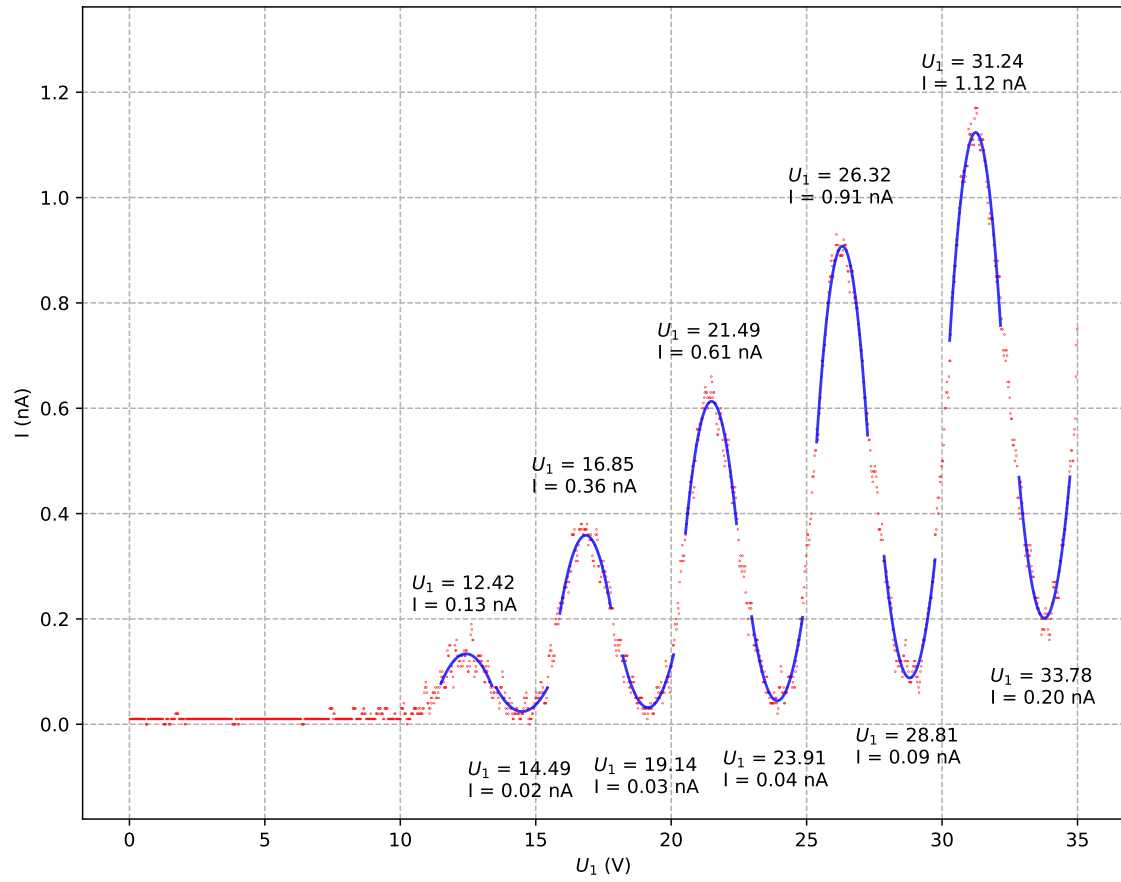


Figura 5.12: aproximación parabólica para $U_2 = 2,0V$.

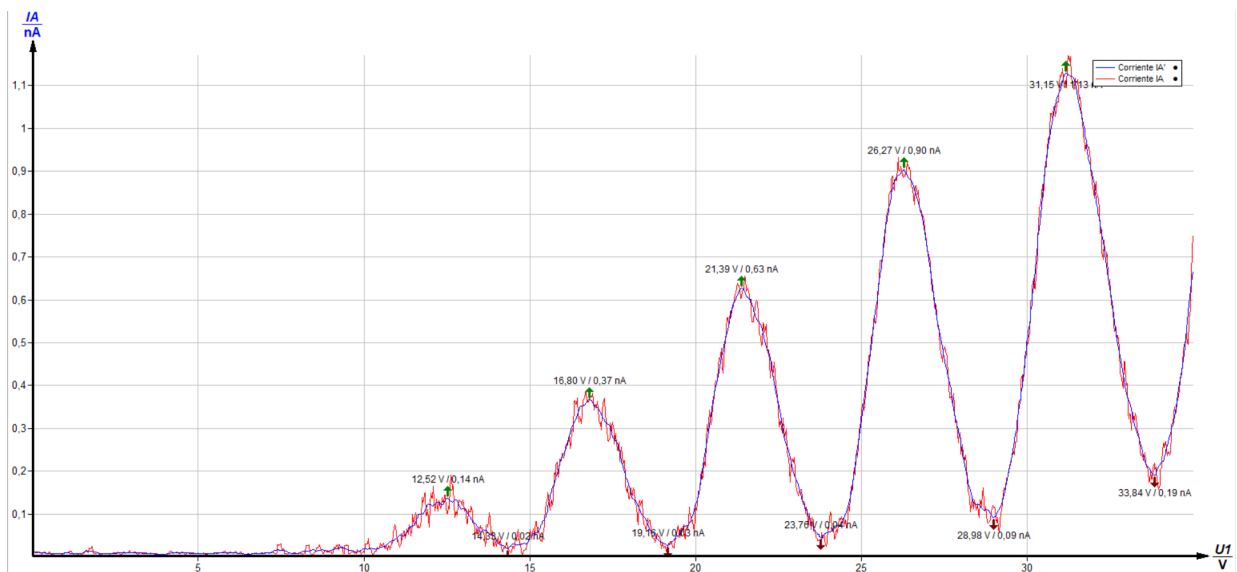


Figura 5.13: datos experimentales dados por el programa para $U_2 = 2,0V$.

5.2.1. Representación ΔE frente al orden del extremo

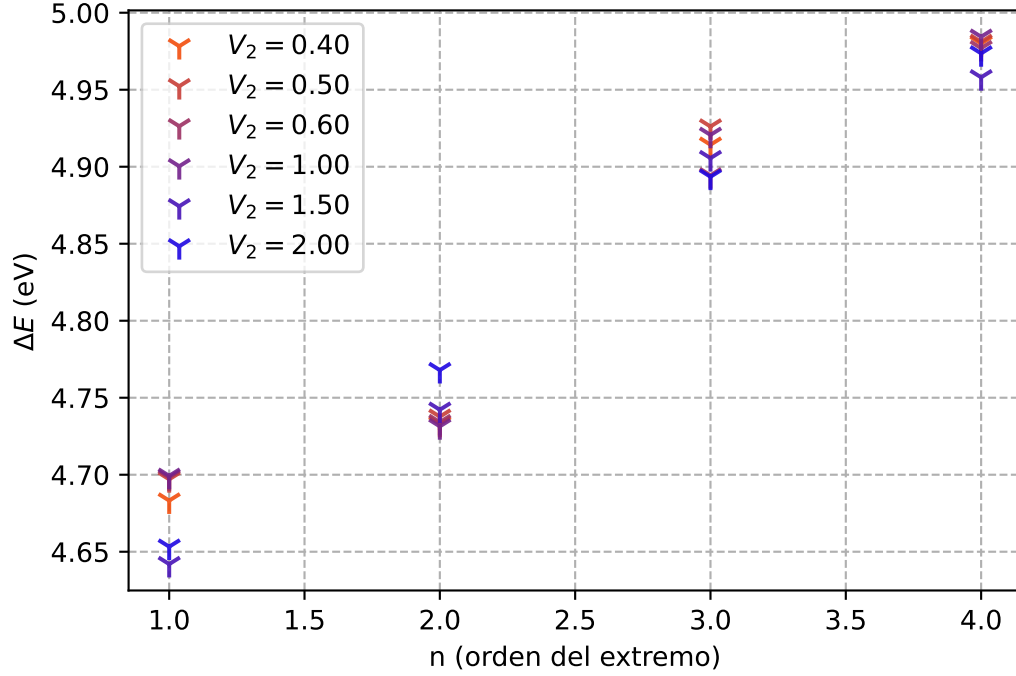


Figura 5.14: representación de ΔE frente al orden del extremo, mínimos parábolas.

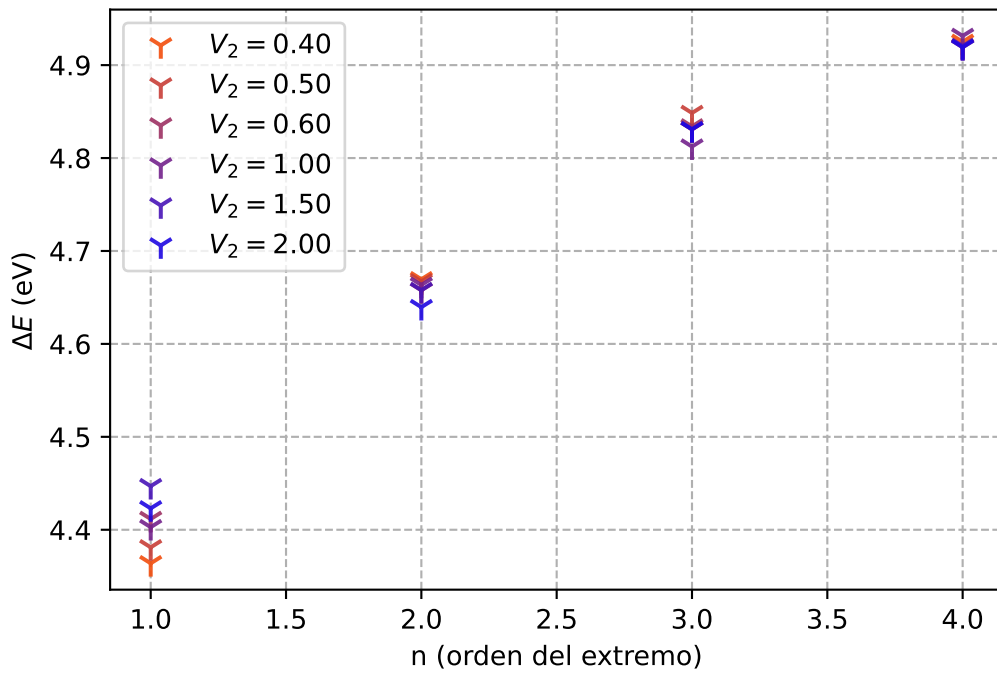


Figura 5.15: representación de ΔE frente al orden del extremo, máximos parábolas.

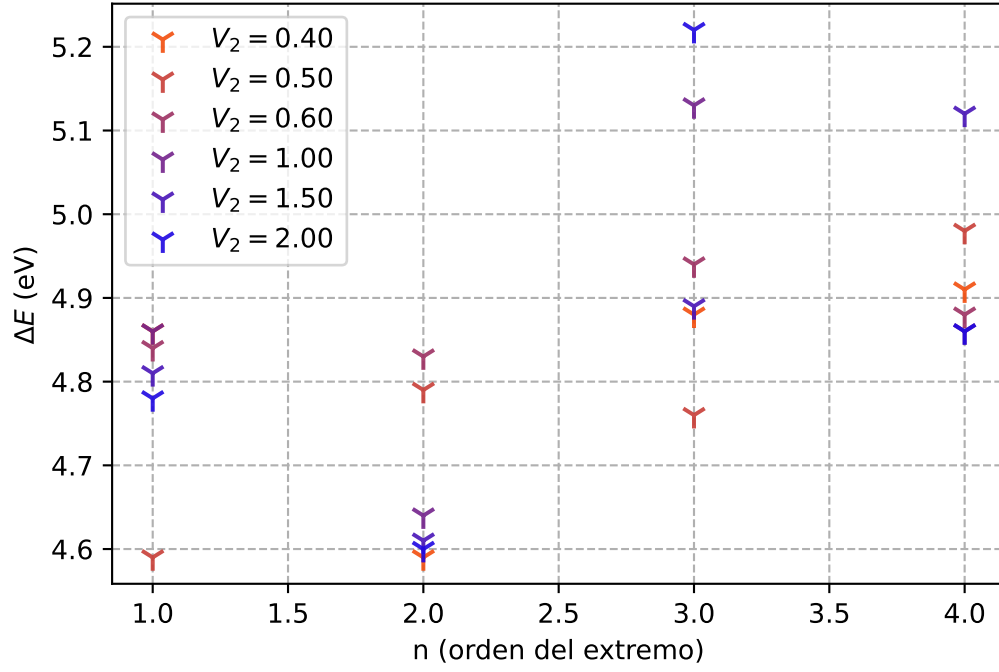


Figura 5.16: representación de ΔE frente al orden del extremo, mínimos laboratorio.

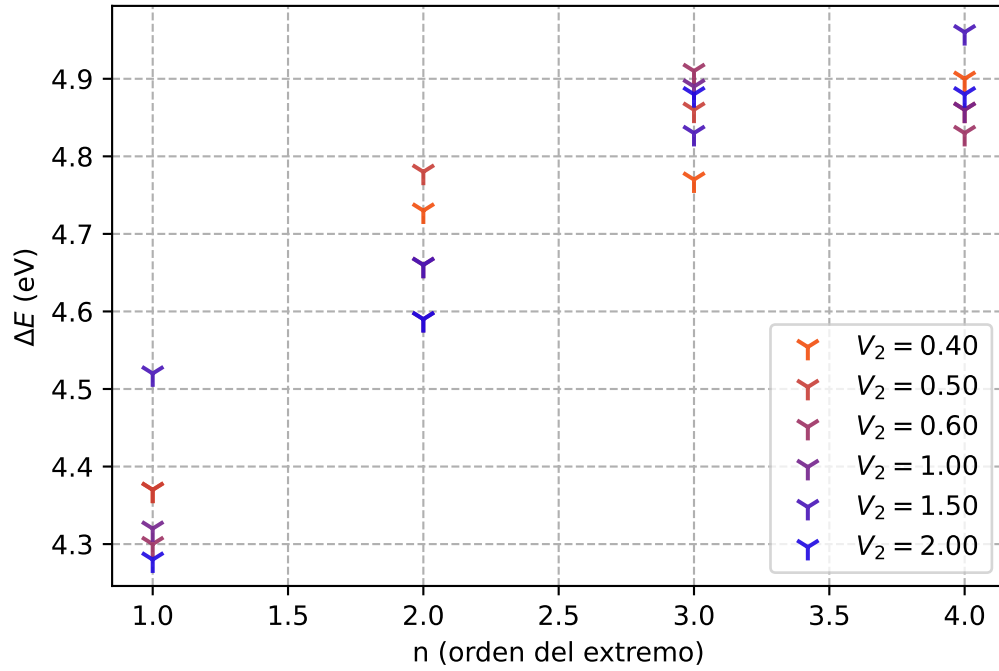


Figura 5.17: representación de ΔE frente al orden del extremo, máximos laboratorio.

Referencias

- [1] Luis Miguel Varela Cabo; Faustino Gomez, Jesus Carrete; *Tratamiento de datos físicos*.
- [2] Varios autores; *Phywe Franck-Hertz experiment with a Hg-tube*.
- [3] Marnik Metting van Rijn; *Franck-Hertz Experiment* February 8, 2020; ETH-Zürich.
- [4] Varios autores; *Guiones Técnicas III Física cuántica* Universidad de Santiago de Compostela.