

# PRÁCTICA 1: "EXPERIMENTO DE FRANCK-HERTZ" MATERIA: LABORATORIO DE FÍSICA CONTEMPORÁNEA I.

LUIS RENÉ OROZCO GONZÁLEZ , CARLOS RUBÉN CARRERA PADILLA  
 Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., México  
 Fecha de entrega: 11 / Octubre / 2019  
*Draft version December 11, 2019*

## ABSTRACT

Se reproduce la curva característica de corriente contra voltaje en vapor de Hg al realizar el experimento de Franck-Hertz. Se emplea modo automático y el manual, presentando complicaciones técnicas en el modo manual. Se obtiene la energía de excitación de los átomos de Hg al analizar los máximos y mínimos de la gráfica (as) y se compara con el valor reportado en la literatura. Se obtiene el valor  $e\Delta U_{exp} = (4.70 \pm 0.06) \text{ eV}$  ( $\delta = 4.1\%$ ). Se verifica que la absorción atómica de la energía esta discretizada.

## 1. INTRODUCCIÓN

Hasta el año de 1913 existían acertijos en el campo de electroscopía, en partículas la razón de la aparición de líneas espectrales y su número. En dicho año Bohr resolvió algunos de estos misterios formulando algunas hipótesis que posteriormente serian demostradas.

Entre ellas, tenemos, la existencia de un número de diferentes estados en los cuales podría estar un átomo. Cada uno caracterizado por una energía. La diferencia entre los niveles de energía, esta relacionado con la constante de Planck  $h$ , y la frecuencia de líneas espectrales emitidas por el átomo.(6)

Gracias a algunos trabajos espectroscópicos se pudo demostrar que los átomos emiten radiación a frecuencias discretas; de acuerdo con el Modelo de Bohr, la frecuencia de la radiación  $\nu$  esta relacionada con el cambio en los niveles de energía a través de la siguiente relación:

$$E_f - E_i = \Delta E = h\nu \quad (1)$$

Experimentos posteriores demostraron que la absorción de radiación por vapores atómicos también ocurría para valores discretos de frecuencias. Una serie de experimentos basados en la excitación por colisión fueron realizados por James Frank y Gustav Hertz a principios de 1914. Estos experimentos demuestran que los niveles de energía atómicos existen y, aun más, los niveles encontrados son los mismos que las líneas espectrales.

### 1.1. Experimento de Franck-Hertz

Se espera entonces que la transferencia de energía a los electrones atómicos (*por cualquier mecanismo*) debe de ser siempre en cantidades discretas y relacionada con el espectro atómico por la ecuación 1 mencionada anteriormente. Un mecanismo de transferencia de energía es por colisiones inelásticas de electrones con el átomo. Si el átomo que es bombardeado no se ioniza entonces casi toda la energía cinética del electrón puede ser transmitida al sistema atómico.(3)

J. Franck y G. Hertz experimentaron para verificar las siguientes consideraciones: (a) es posible excitar átomos

por bombardeo electrónico de baja energía, (b) la energía transmitida a los átomos por los electrones siempre tiene valores discretos, y (c) los valores obtenidos para los niveles de energía están de acuerdo con los resultados espectroscópicos.

El aparato necesario consiste en un filamento emisor de electrones y de una estructura adecuada para acelerar electrones a un potencial adecuado (*variable*). Los electrones acelerados bombardean el vapor atómico y la excitación de los átomos se estudia como función del potencial acelerador.

Para detectar la excitación de los átomos en el vapor es posible observar, por ejemplo, la radiación emitida cuando los átomos regresan a su estado base, el cambio de absorción de una línea espectral dada, o algún otro fenómeno asociado; sin embargo, una técnica mucho más eficaz consiste en observar el haz de electrones mismo: si los electrones han sido acelerados a un potencial *igual* a la energía del primer estado excitado, algunos de ellos excitarán átomos del vapor y como consecuencia perderán casi toda su energía; si existe un potencial retardador pequeño antes de la región colectora, los electrones que han sido dispersados serán incapaces de alcanzar el ánodo.

### 1.2. Transiciones Energéticas Cuantizadas

En la Figura 1 se presenta un dispositivo que pretende clasificar el fenómeno presente en el experimento. Un horno calienta el cátodo, por lo tanto, al alcanzar cierta temperatura critica los electrones son expulsados del cátodo caliente y forman una nube electrónica. Se logra acelerar a los electrones con un potencial de aceleración  $V_0$  presente en la rejilla. Algunos electrones logran pasar a través de la rejilla y únicamente los electrones con suficiente energía cinética logran vencer el potencial negativo entre la rejilla y la placa colectora. Sin embargo el tubo esta lleno de vapor de ( $^{202}_{80}\text{Hg}$ ) a baja presión, cuando los electrones tienen una cantidad de energía cinética definida (4.9 eV para  $^{202}_{80}\text{Hg}$ ) interactúan con

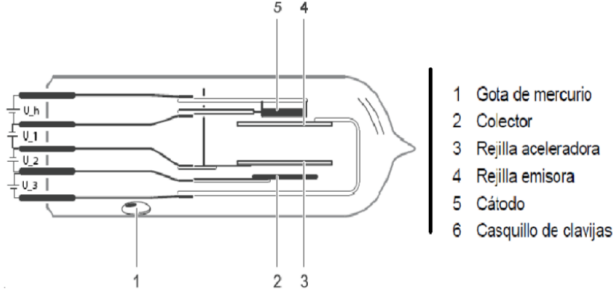


FIG. 1.— Diagrama esquemático del Tubo de Franck-Hertz.

los átomos de  $^{202}_{80}\text{Hg}$  y ceden su energía en colisiones inelásticas.

El experimento consiste en medir la corriente en el plato colector como función de  $V_0$ . Mientras  $V_0$  aumenta desde 0, la corriente aumenta hasta que se alcanza el valor crítico  $V_0 = 4.9\text{eV}$  en el cual la corriente decrece considerablemente. Si se continua aumentando  $V_0$  la corriente vuelve a aumentar hasta llegar a otro valor crítico, y así sucesivamente.

La explicación de este resultado.

Los electrones son producidos en un filamento por efecto termoeléctrico. A continuación, son acelerados y viajan a través del vapor de un elemento, colisionando con sus átomos. Las colisiones que se producen son elásticas, al menos que el electrón posea más energía que el primer estado excitado del átomo. Para colisiones elásticas tenemos, que la energía transferida:

$$\Delta K = \frac{4mM}{(m+M)^2} K_0 \quad (2)$$

Donde  $m$  es la masa del electrón,  $M$  la masa del átomo y nuestra energía inicial es  $K_0$ . Debido a que la masa de los electrones es mucho menor que la masa de los átomos ( $M \gg m$ ), entonces, la energía que se pierde por las colisiones individuales es despreciable  $\Delta K \approx 4 \frac{m}{M} K_0$ .

Para el caso en el que la energía de los electrones es mayor que la energía necesaria para excitar el átomo, se llevan a cabo colisiones inelásticas, en las cuales los electrones se frenan y otorgan su energía a los átomos excitándolos.

Después de las colisiones inelásticas, los electrones volverán a ser acelerados por el potencial en el orden de colisiones elásticas. Si se vuelve a alcanzar la energía de excitación se provocará de nuevo colisiones inelásticas, y así sucesivamente.

En el átomo como el mercurio ( $^{202}_{80}\text{Hg}$ ), debido a su tamaño, los electrones en las capas interiores del átomo son difíciles de desalojar, debido a la fuerte atracción electrostática del núcleo. En cambio, los electrones exteriores (de valencia) son más fáciles de mover debido a un apantallamiento que surge por capas internas.

La utilización del mercurio se debe a que en su forma de vapor es monoatómico. Este tipo de gases, monoatómicos son preferidos debido a que benefician al experimento debido a que los moleculares poseen estados

vibracionales más cercanos lo cual complica el espectro de excitación.

A condiciones ambiente el mercurio ebulle a  $356,7^\circ\text{C}$ , pero dicha temperatura puede ser reducida bajando la presión. En este sistema, el mercurio es sometido a una presión de 9 torr para lograr que temperatura de ebullición baje alrededor de los  $200^\circ\text{C}$ . (5)

La configuración electrónica del átomo de mercurio es  $[\text{Xe}]4f^{14}5d^{10}6s^2$ . Los niveles de energía más bajos,  $6s6p$  con multiplicidad 3, que podrían ser alcanzados con las colisiones inelásticas corresponden a las transiciones de  $^1S_0$  a  $^3P_0$ ,  $^3P_1$ ,  $^3P_2$  y  $^1P_1$ . Donde el estado  $^3P_0$  a pesar de ser el nivel con energía más baja respecto  $^1S_0$ , corresponde a un estado metaestable, al igual que el estado  $^3P_2$ ; por lo que ambas transiciones están prohibidas.

En medio de ambas se encuentra el nivel de excitación  $^3P_1$  que corresponde a una transición permitida  $^1S_0 \leftrightarrow ^3P_1$  y cuya diferencia de energía corresponde justamente a  $V_0 = 4.9\text{eV}$ , y en emisión de ultravioleta  $\lambda = 253.65\text{ nm}$ . La siguiente transición que se puede llegar a observar corresponde al nivel de energía  $^1P_1$  pero debido a su probabilidad menor, provoca anomalías suaves en la corriente. (4)

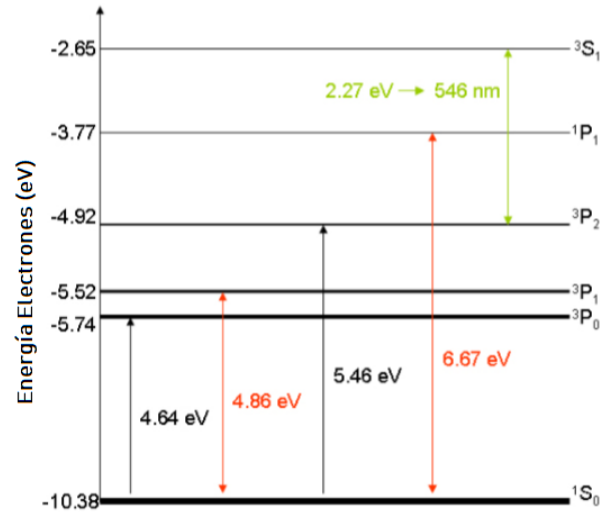


FIG. 2.— Diagrama de niveles energéticos para el átomo de Mercurio. Se observan las transiciones en los niveles  $^1S_0$  a  $^3P_0$ ,  $^3P_1$ ,  $^3P_2$  y  $^1P_1$ , posibles (rojo). (2)

La intención de este trabajo experimental es la observación de la curva característica de corriente contra voltaje en vapor de Hg al realizar el experimento de Franck-Hertz. Se calculará la energía de excitación de los átomos de Hg al analizar los máximos y mínimos de las curvas FH.

## 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Se empleó el “kit Frank-Hertz” de Leybold para realizar este experimento. Este kit está compuesto por tubo Frank-Hertz, un zócalo para conexión del tubo, un horno eléctrico para calentar el gas, una unidad de operación FH y un sensor de temperatura de NiCr. Después de

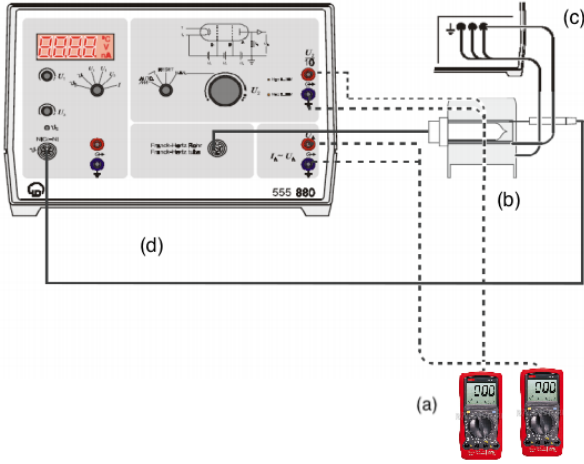


FIG. 3.— Esquema de arreglo experimental.

(a) Dos multímetros Esteren Rs232C MUL-600, (b) Horno F-H 55582, Tubo F-H con Hg 555 854, (c) y (d) Unidad de operación Frank-Hertz (555 880, marca LD) observando, en el medidor de temperatura señalado por la letra  $\vartheta$ , hasta  $170^{\circ}\text{C}$ . (1)

haber conectado todo como en el diagrama se calentó el Tubo de Franck-Hertz con Hg (555 854) (Marca LD Didactic GmbH) en el horno tubular eléctrico (200 W, 115 V 555 82, Marca LD) con ayuda de la unidad de operación Frank-Hertz (555 880, marca LD) observando, en el medidor de temperatura señalado por la letra  $\vartheta$ , hasta  $170^{\circ}\text{C}$ . (1)

Una vez alcanzada esa temperatura se puso la unidad FH en modo diente de sierra y se ajustaron los voltajes  $U_1$  y  $U_3$ . Para observar el comportamiento, altos y bajos, de forma rápida se observaron las señales de salida en un osciloscopio Tektronix de 4 canales, al correr el potencial  $U_2$  en la opción automática de 0 a 30 V. El osciloscopio se tuvo que poner en modo XY y se ajustaron la escala y el offset para que se alcanzara la curva deseada. Los valores primeros valores que fueron seteados son  $U_3 = (1.5 \pm 0.05) \text{ V}$  y  $U_1 = (1.5 \pm 0.05) \text{ V}$ . Posterior de observar las señales con el comportamiento deseado, se cambió la unidad a modo manual con el fin de medir la corriente en el colector cuando se variaba  $U_2$ : las mediciones de la corriente, se realizaron con un multímetro (Marca Esteren Rs232C MUL-600), conectado a la salida analógica  $I_A$ , mientras que las mediciones para el potencial  $U_2$ : se realizaron con la unidad Frank Hertz.

### 3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Se realizó el experimento empleando el modo automático y en solo un caso el modo manual, la causa de es que el aparato presentaba un error en la perilla que controlaba el potencial  $U_2$ , lo que impedía la obtención de datos de forma manual.

Como puede observarse se obtuvo la curva de Franck-Hertz con el modo automático (a diferentes potenciales  $U_1$  y  $U_3$ ) como se puede observar en las gráficas 4, 5, 6 y 7, y se determinó la distancia en potencial entre sus máximos consecutivos.

Un importante factor a considerar es que el modo automático utiliza por default 30 puntos para recorrer de 0 a 30 Volts, por lo cual se determinó que en algunos caso podría ser apropiado tomar al menos dos corridas. Se observa en todas la gráficas un comportamiento

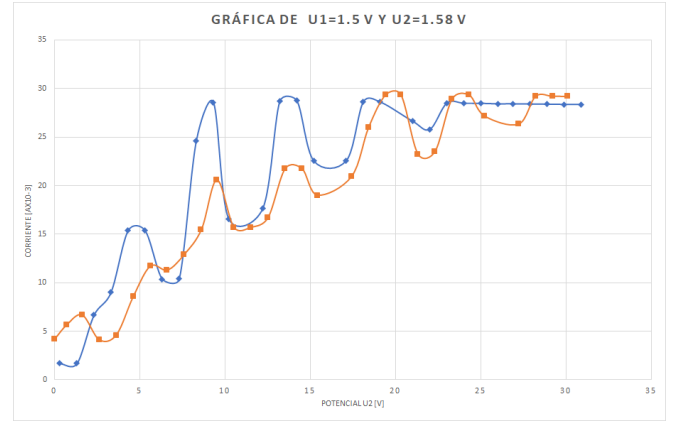


FIG. 4.— Gráfica dos corridas automáticas consecutivas para valores de potencial  $U_1 = 1.5 \text{ V}$  y  $U_3 = 1.58 \text{ V}$ , variando  $U_2$ .

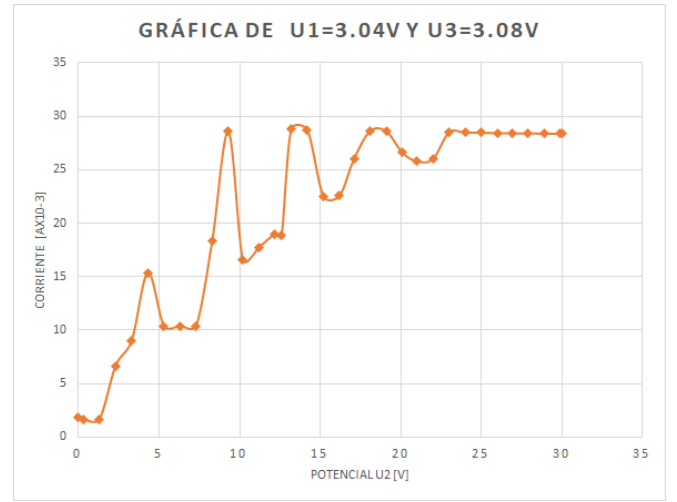


FIG. 5.— Gráfica una corrida automática para valores de potencial  $U_1 = 3.04 \text{ V}$  y  $U_3 = 3.08 \text{ V}$ , variando  $U_2$ .

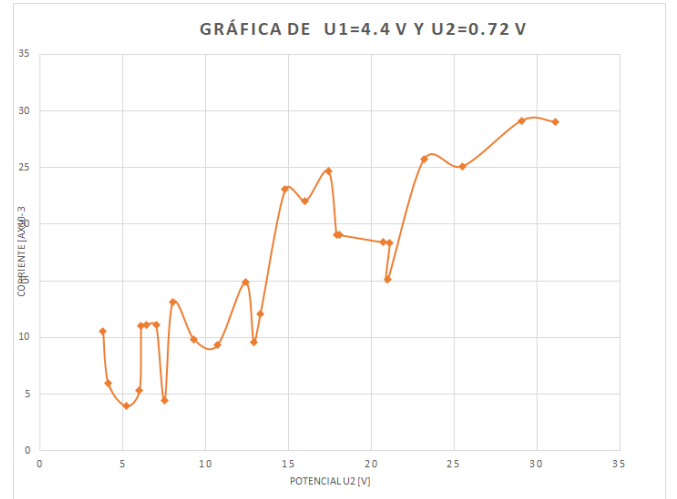


FIG. 6.— Gráfica una corrida manual para valores de potencial  $U_1 = 4.4 \text{ V}$  y  $U_3 = 0.72 \text{ V}$ , variando  $U_2$ .

similar, máximos y mínimos ascendentes, y como era de esperarse parece, estas crestas, se ubican en los mismos valores de energía potencial.

La razón por la que nuestras gráficas sean ascendentes

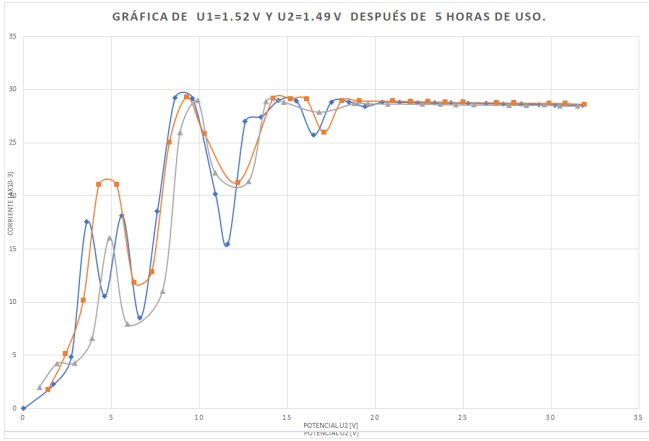


FIG. 7.— Gráfica de tres corridas automática, después de un uso continuo del sistema de cinco horas, para valores de potencial  $U_1 = 1.52V$  y  $U_3 = 1.49V$ , variando  $U_2$ . Se observan claras anomalías que solo permitan desplegar los primeros dos máximos.

esta relacionado con la diferencia de potencial que se genera, que incluso después de haber pasado el valor de los choques analíticos, va a seguir acelerando a los electrones que se frenaron generando corriente.

Con la finalidad de ejemplificar el procedimiento a seguir para la distancia entre máximos se seleccionó el caso de la gráfica 6, donde sus parámetros eran  $U_2 = 3.04V$  y  $U_2 = 3.08V$ , obtuvimos cinco máximos y tres mínimos.

Presentamos los voltajes correspondientes:

- Máximos:  $U_1 = 4.3V$ ,  $U_2 = 9.3V$ ,  $U_3 = 14.2V$ ,  $U_4 = 19.1V$ ,  $U_5 = 24V$ .
- Mínimos:  $U_6 = 6.3V$ ,  $U_7 = 11.2$ ,  $U_8 = 16.2V$

Todos los valores anteriores tienen una incertidumbre asociada de  $\pm 0.05V$ , por lo tanto los valores para la distancia entre máximos (mínimos) de corriente son:

$\Delta E_{a,b}$	Promedio	Incertidumbre
E <sub>1,2</sub>	5.0	0.1
E <sub>2,3</sub>	4.9	0.1
E <sub>3,4</sub>	4.9	0.1
E <sub>4,5</sub>	4.9	0.1
E <sub>6,7</sub>	4.9	0.1
E <sub>7,8</sub>	5.0	0.1

TABLE 1  
RESULTADOS CORRESPONDIENTES A LOS VALORES PARA LA DISTANCIA ENTRE MÁXIMOS (MÍNIMOS) DE CORRIENTE SON:.

Y promediando los valores anteriores se obtiene que:  $\Delta U_{exp3,0} = (4.93 \pm 0.06)V \rightarrow e\Delta U_{exp3,0} = (4.93 \pm 0.06)eV$ .

Análogamente se realizó la estimación de distancia entre máximos para las configuraciones de potenciales cercanos a los 1.5 V, tanto inicial como después de las cinco horas de calentamiento, obteniendo:

$$e\Delta U_{exp1.5} = (4.47 \pm 0.06)eV$$

$$e\Delta U_{exp1.5P} = (4.72 \pm 0.06)eV$$

La energía de excitación esperada para el átomo de Hg (a una cifra decimal) es  $e\Delta U = 4.9eV$ . Por lo tanto, tomando en cuenta nuestros tres resultados, la incertidumbre porcentual de la energía  $e\Delta U_{exp} = (4.70 \pm 0.06)eV$  es de  $\delta = 4.1\%$ . Este resultado es aceptable y se considera parcialmente bueno, desde el punto de vista de los autores por la cantidad de problemas que se tuvieron al llevar a cabo el experimento.

Nótese que aunque se tuvo problemas con el equipo lo que repercutió en que no se tuviera un número grande de datos para poder visualizar mejor el comportamiento en las gráficas y por que no decirlo reducir con esto el intervalo de error.

Otros errores que se localizaron son: la señal medida por los multímetros que fluctuaba mucho al dejar estático un potencial en  $U_2$ , en particular la corriente, lo cual nos motiva a suponer que fallos en las salidas. Otro problema significativo fue la nula disposición del potenciómetro de  $U_2$  ante voltajes bajos, parecía tener un "falso contacto" lo que imposibilitaba medidas pequeñas de forma manual,

Algunas observaciones importantes para la repetición del experimento. Se recomienda la utilización de otro kit Frank Hertz, o en su defecto más tiempo que el despolvé por los autores para identificar los fallos y poder solucionarlos sin afectar las mediciones.

Por otro lado, es sumamente importante dejar calentar al sistema para que se estabilice, así como colocar el bulbo dentro del horno al encender el dispositivo. De lo contrario el bulbo puede sufrir un choque térmico y romperse, o en el mejor de los casos se esperara a que el horno se enfrié para colocar el bulbo.

#### 4. CONCLUSIONES

El modo manual arroja resultados aceptables. Sin embargo, fue una lastima no poder contrastar el resultado obtenido con el modo manual para ver cual de estos dos es más fino al momento de la medición aun con esto se obtuvo que la  $e\Delta U_{exp} = (4.70 \pm 0.06)eV$  ( $\delta = 4.1\%$ ). La curva de Franck-Hertz  $I(v)$  pudo reproducirse en todos los casos aquí reportados. Se concluye que la absorción de energía en los átomos de Hg es discreta y se traduce a una dispersión inelastica cuando los átomos de Hg son excitados por un mecanismo de colisión. Otra manera de verificar la absorción y emisión discreta de energía es al observar el espectro de emisión característico del Hg, i.e, el ultravioleta, al ser excitados sus niveles energéticos. Aunque el mecanismo o dispositivo experimental para acoplar el tubo de Franck-Hertz con un detector de espectro parece complicado, en teoría esto se podría hacer.

#### 5. REFERENCIAS

## REFERENCES

- [1] Física atómica y nuclear :experimento de franck-hertz.  
url<http://media.utp.edu.co/facultad-ciencias-basicas/archivos/contenidos-departamento-de-fisica/labfisicamodernaingfisica.pdf>.
- [2] Kirstin Beck and Jacob Mainzer. The franck hertz experiment.
- [3] A. Beiser and A.N. Jaimes. *Conceptos de física moderna*. McGraw Hill, 1981.
- [4] GF Hanne. What really happens in the franck–hertz experiment with mercury? *American Journal of Physics*, 56(8):696–700, 1988.
- [5] Marcia L Huber, Arno Laesecke, and Daniel G Friend. Correlation for the vapor pressure of mercury. *Industrial & engineering chemistry research*, 45(21):7351–7361, 2006.
- [6] C.W. Oseen. Award ceremony speech nobel prize in physics 1925. url<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1925/ceremony-speech/>.

## ANEXOS

Primera Corrida		Segunda Corrida	
U2 ( $\pm 0.05V$ ) I [mA] ( $\pm 3\%$ )		U2 ( $\pm 0.05V$ ) I [mA] ( $\pm 3\%$ )	
0.3	1.68	0	4.2
1.3	1.68	0.7	5.65
2.3	6.66	1.6	6.65
3.3	9.03	2.6	4.09
4.3	15.37	3.6	4.59
5.3	15.37	4.6	8.58
6.3	10.38	5.6	11.7
7.3	10.4	6.6	11.28
8.3	24.6	7.6	12.92
9.3	28.59	8.6	15.5
10.2	16.59	9.5	20.58
12.2	17.65	10.5	15.69
13.2	28.67	11.5	15.69
14.2	28.75	12.5	16.69
15.2	22.53	13.5	21.73
17.1	22.57	14.5	21.73
18.1	28.62	15.4	19.01
19.1	28.6	17.4	20.93
21	26.62	18.4	25.99
22	25.79	19.4	29.35
23	28.5	20.3	29.36
24	28.48	21.3	23.23
25	28.47	22.3	23.52
26	28.42	23.3	28.93
26.9	28.42	24.3	29.33
27.9	28.4	25.2	27.17
28.9	28.38	27.2	26.33
29.9	28.36	28.2	29.2
30.9	28.36	29.2	29.2
		30.1	29.19

FIG. 8.— Tabla de datos obtenidos para dos barridos automáticos, gráficas potencial  $U_1=1.50$  y  $U_2=1.58$ . 4

U2 ( $\pm 0.05V$ )	I [mA] ( $\pm 3\%$ )
0	1.86
0.3	1.65
1.3	1.68
2.3	6.66
3.3	9.033
4.3	15.37
5.3	10.38
6.3	10.4
7.3	10.4
8.3	27.6
9.3	28.59
10.2	16.59
11.2	17.75
12.2	19
12.6	18.82
13.2	28.77
14.2	28.75
15.2	22.53
16.2	22.57
17.1	26
18.1	28.62
19.1	28.6
20.1	26.62
21	25.79
22	26
23	28.5
24	28.48
25	28.47
26	28.42
26.9	28.42
27.9	28.4
28.9	28.38
29.9	28.36
30	28.37

FIG. 9.— Tabla de datos obtenidos para un barrido automático, gráfica potencial  $U_1=3.04$  y  $U_2=3.08$ . 5

U2 ( $\pm 0.05V$ )	I [mA] ( $\pm 3\%$ )
3.8	10.52
4.1	5.98
5.2	3.92
6	5.35
6.1	11.06
6.4	11.1
7	11.1
7.5	4.41
8	13.09
9.3	9.81
10.7	9.31
12.4	14.89
12.9	9.61
13.3	12.06
14.8	23.06
16	22.01
17.4	24.69
17.9	19.05
18.1	19.03
20.7	18.39
21.1	18.38
21	15.13
23.2	25.74
25.5	25.09
29.1	29.14
31.1	29.05

FIG. 10.— Tabla de datos obtenidos para un barrido manual, gráfica potencial  $U_1=4.4$  y  $U_2=0.072$ . 6

Primera Corrida		Segunda Corrida		Tercera Corrida	
U2 ( $\pm 0.05V$ ) I [mA] ( $\pm 3\%$ )		U2 ( $\pm 0.05V$ ) I [mA] ( $\pm 3\%$ )		U2 ( $\pm 0.05V$ ) I [mA] ( $\pm 3\%$ )	
1.7	2.26	1.4	1.75	0.9	2.01
2.7	4.84	2.4	5.13	1.9	4.2
3.6	17.54	3.4	10.14	2.9	4.28
4.6	10.59	4.3	21.05	3.9	6.58
5.6	18.14	5.3	21.05	4.9	16.06
6.6	8.5	6.3	11.85	5.9	7.94
7.6	18.58	7.3	12.85	7.9	11.04
8.6	29.22	8.3	25.01	8.9	25.99
9.6	29.19	9.3	29.29	9.9	28.99
10.9	20.19	10.3	25.83	10.9	22.19
11.6	15.46	12.2	21.26	12.8	21.38
12.6	26.99	14.2	29.16	13.8	28.88
13.5	27.4	15.2	29.14	14.8	28.83
14.5	28.98	16.1	29.1	16.8	27.9
15.5	28.96	17.1	25.99	18.8	28.7
16.5	25.72	18.1	28.96	19.59	28.69
17.5	28.85	19.1	28.94	20.7	28.67
18.5	28.85	21	28.92	22.7	28.65
19.4	28.4	22	28.89	23.7	28.62
20.4	28.82	23	28.86	24.6	28.59
21.4	28.8	24	28.83	25.6	28.57
22.4	28.77	25	28.8	27.6	28.55
23.4	28.74	26.9	28.77	28.6	28.53
24.3	28.74	27.9	28.74	29.6	28.57
25.3	28.71	29.9	28.72	30.5	28.49
26.3	28.68	30.8	28.7	31.5	28.47
27.3	28.66	31.9	28.61		
28.3	28.64				
29.3	28.61				
30.2	28.55				
31.8	28.53				

FIG. 11.— Tabla de datos obtenidos para tres barridos automáticos, gráficas potencial  $U_1=1.52$  y  $U_2=1.49$ , correspondiente a las 5 horas de uso. 7