



Universidad  
de Buenos Aires

Julio de 2001

L A B O R A T O R I O   I I I

**Electricidad y Magnetismo**  
**PRÁCTICA ESPECIAL**

## Conducción en Líquidos

Docente:

Ricardo Piegala

Integrantes:

Mario Acuña  
Javier Joaquín Calvo  
Diego Tanoni

### Resumen

Este trabajo está concentrado en obtener la carga del electrón a partir de experiencias de electrólisis. Obtuvimos  $e = (1,601 \pm 0,001) \cdot 10^{-19} C$ . Además, estimamos el radio del ion de Cu que se traslada por la cuba electrolítica, que aparenta viajar acompañado con moléculas de agua. El radio estimado es:  $R_{\text{ion}} = 4,80 \text{ \AA}$ .

## Introducción - Conducción

La primera experiencia se basó en el análisis de la conducción eléctrica en medios salinos. En el apéndice matemático se demuestran dos modelos teóricos respecto de la relación entre la tensión y la intensidad para soluciones en medios acuosos. Esta relación se cumple en el caso de que, al disociarse una sal, las dos clases de iones tengan la misma carga. Estos son:

$$I = \mu \frac{q^2 \cdot n_i \cdot A}{b} V \quad (1)$$

donde  $b$  es la distancia entre placas y  $A$  el área de las placas;  $V$  es la tensión aplicada entre bornes;  $q$  la carga del ion;  $n_i$  la cantidad de iones por unidad de volumen;

$\mu = \frac{\tau}{m_{ión}}$ , siendo  $\tau$  el tiempo medio en que cada ion tarda en perder la información del momentum que lleva debido a las colisiones, y  $m$  su masa.<sup>1</sup>

En caso de cumplirse la Ley de Ohm, se observa que  $I/R$  es directamente proporcional al número de iones por unidad de volumen. También existe una relación entre los  $\mu$  y  $r$  de los iones.

## Introducción - Electrólisis

### *Cálculo de la carga del electrón en función de la carga trasladada*

Mientras se realiza el fenómeno de electrólisis, en una solución de sulfato de cobre diluida en agua destilada, la masa total depositada sobre el cátodo está compuesta por iones de Cu que trasladan una carga equivalente a  $2 \cdot e$  cada uno. La masa depositada será:  $\Delta m = N \mu_{ión}$ , donde  $N$  es el número de iones depositados, que multiplica a la masa de cada ion. A su vez es:  $\mu_{ión} = \frac{M}{N_A}$ , donde  $N_A$  es el número de Avogadro y  $M$  es la masa molar del ion.

Durante el ensayo la carga total depositada será el número  $N$  de iones sedimentados sobre el cátodo que multiplica a la carga de cada ion. La carga da cada ion es de  $2 \cdot e$ .  $Q = Nve$  donde  $v \cdot e$  es la carga de los iones transportados. Entonces la carga  $e$  del electrón está dada por la ecuación:

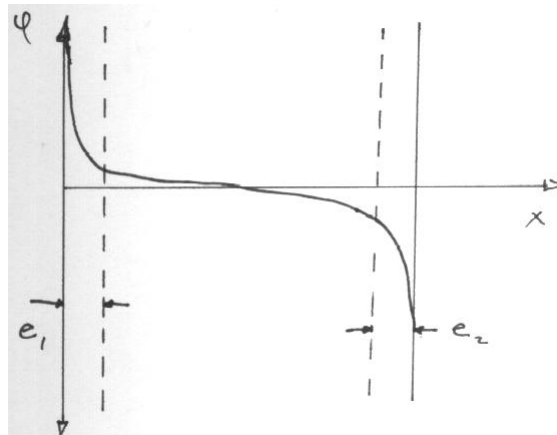
$$e = \frac{Mol_{ión} \cdot Q}{2 \cdot \Delta m \cdot N_A} \quad (2)$$

Según la bibliografía, si se observara la geometría de la depositación, podría notarse que es fractal. Además, a corrientes elevadas, se depositan en forma más débil.

---

<sup>1</sup> Si se cumpliera la Ley de Ohm (ver resultados) podría calcularse  $\mu$  y, por lo tanto,  $\tau$ . Esto nos abre el camino para calcular la sección eficaz de dispersión, tema que no profundizamos en este trabajo.

El potencial en función de la distancia, tendría la siguiente forma:



donde observamos que en un entorno cerca de los electrodos la variación del potencial es mayor que en el resto. Esto explica el hecho de que en el centro de la celda la fuerza sobre las partículas es despreciable. Como la fuerza es “menos el gradiente del potencial”, entonces vemos que todos los iones van a sentir una fuerza en el mismo sentido (el del campo). De esta manera se puede explicar el hecho que un electrodo pierda masa y el otro gane.

### Introducción- Radio del ion de cobre

Si consideramos a cada ion como una “esferita”<sup>2</sup> de radio  $R$  sumergida en un medio viscoso continuo, entonces las principales fuerzas que actuarán sobre ella estarán relacionadas de la siguiente forma:  $m\vec{a} = \vec{F}_{(E)} + \vec{f}_{(v)}$ , donde  $F_E$  es la fuerza debida al campo eléctrico y  $f_v$  es la fuerza viscosa. Esta última depende de la velocidad, que, luego del régimen transitorio, se torna constante, por lo tanto la aceleración de la partícula es nula y los módulos de las fuerzas que actúan sobre ella resultan iguales, es decir:  $|\vec{F}_{(E)}| = |\vec{f}_{(v)}|$ .

Ahora resta describir el contenido de estas fuerzas: la fuerza eléctrica resulta del producto del campo eléctrico generado entre electrodos y la carga del ion. A su vez, el campo está generado por la diferencia de potencial entre dos placas paralelas y resulta del cociente de la tensión y la distancia entre placas. La fuerza de viscosidad según Stokes es:

$$f_v = 6\pi R\mu v \quad (3)$$

donde  $R$  es el radio del ion,  $\mu$  es el coeficiente de viscosidad del medio y  $v$  la velocidad del ion. Esta relación vale para el régimen laminar que ocurre para valores del número de Reynolds  $Re \ll 1$ , donde  $R_e$  es igual a:

$$Re = \frac{\rho d v}{\mu} \ll 1 \quad (4)$$

<sup>2</sup> Suponemos que no hay fuerzas intermoleculares.

En caso de no cumplirse esta desigualdad, se perdería la linealidad de la fuerza con la velocidad media y deberíamos tratar con una ecuación diferencial no lineal.

Bajo estas condiciones, tenemos la relación:

$$q \cdot \frac{V}{D} = 6\pi \cdot R \cdot \mu \cdot v \quad (5)$$

De alguna manera deberíamos conocer la velocidad de estas “pelotitas” (iones). La relacionaremos con la corriente  $I$ . La corriente medida corresponde al desplazamiento de cargas positivas y negativas. En otras palabras, la corriente total será la suma entre el flujo de carga transportado por los cationes y los aniones (cuyos sentidos son opuestos).

En nuestro caso los aniones sulfato tienen menor movilidad que los cationes cobre, siendo ésta el resultado del cociente entre los módulos de la velocidad y el campo, y sería razonable pensar que la corriente observada sólo proviene de la circulación de los cationes.

$$I = I_{cu}^{++} + I_{So_4}^{--} \quad (6)$$

$$\Rightarrow I \approx I_{cu}^{++} \quad (6')$$

Luego la relación entre la carga transportada y la corriente media esta dada por<sup>3</sup>:

$$I = n_i \cdot q \cdot A \cdot v \quad (7)$$

Al relacionar las ecuaciones (5) y (7) resulta:

$$R = \frac{q^2 \cdot n_i \cdot A}{6\pi \cdot \mu \cdot D} \cdot \frac{V}{I} \quad (8)$$

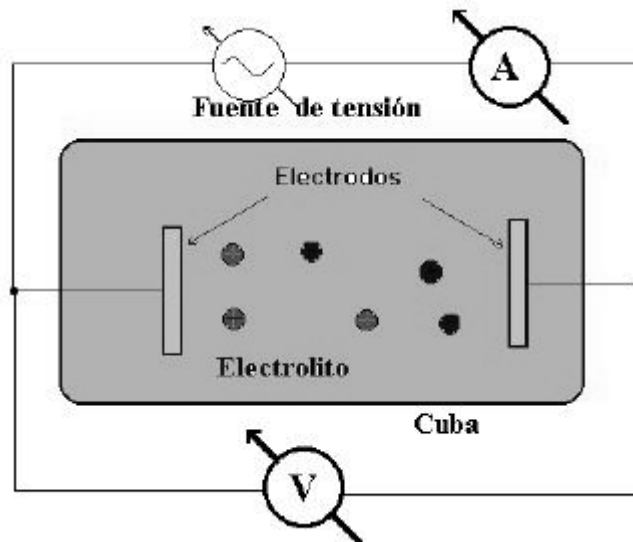
Este modelo tiene una visión macroscópica y no tiene en cuenta muchos fenómenos que podrían ocurrir, de modo que de nuestro trabajo solamente esperamos poder obtener el orden de magnitud del radio y extraer la mayor información posible sobre el tema.

## **Dispositivo experimental - Conducción**

El primer paso del experimento consistió en obtener una solución de cloruro de sodio 0,034 M en agua destilada en un vaso de precipitación. También se utilizó otro vaso con medio litro de agua destilada. En los extremos de este último se colocaron dos chapas de cobre en posición vertical que tenían (base x altura = 2,2 x 5,5) cm<sup>2</sup>.

---

<sup>3</sup> Esta ecuación está explicada en el Apéndice Relación entre I y V.



Como la experiencia se basa en el estudio de la conducción eléctrica en medios salinos, nuestra intención fue no modificar las condiciones de dicho medio. Para lograr esto utilizamos una fuente de tensión alterna (0-30 V). Como la corriente que circula en el medio es alterna, la carga transportada promediada en tiempos largos es cero. Registramos la diferencia de potencial entre electrodos y la corriente por medio de un voltímetro y un amperímetro.

**Con este armado realizamos dos experiencias:**

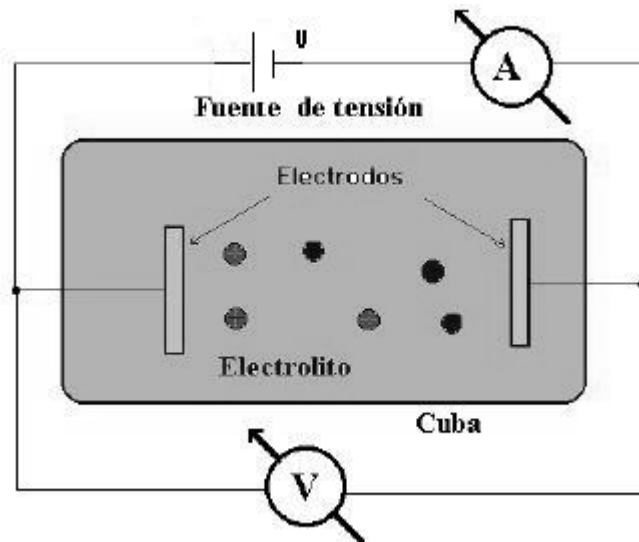
- i) A una diferencia de potencial fija (10 V), fuimos aumentando la concentración, agregando gotas de 0,6 ml de una solución 0,034 M, usando una pipeta. Esto hizo aumentar la corriente, y así barrimos un rango entre 0,2 y 7 A.
- ii) Sin variar la concentración de la última medición, fuimos variando la diferencia de potencial y levantando un gráfico  $I$  vs.  $V$ .

### **Dispositivo experimental- Electrólisis**

Se armó un dispositivo similar al anterior, pero con una fuente de tensión continua de 0-40 V, para obtener deposición. También se registró la corriente en función del tiempo con una interfaz MPLI. Se usó una solución conocida de sulfato de cobre diluida en agua. Luego pesamos los electrodos antes y después de cada ensayo, y los dejamos secar con el cuidado de no perder la masa depositada.

Hicimos seis experiencias en total, pero nos explayaremos sobre cuatro de ellas, ya que por problemas técnicos perdimos la información de la carga trasladada en las otras dos<sup>4</sup>. De las cuatro restantes, a la primera la llamamos “experiencia piloto”, ya que no pudimos obtener ningún resultado cuantitativo de ella pues se observaba a simple vista un burbujeo que consideramos atípico. Sin embargo, nos sirvió para observar el fenómeno y poder mejorarlo en futuras experiencias.

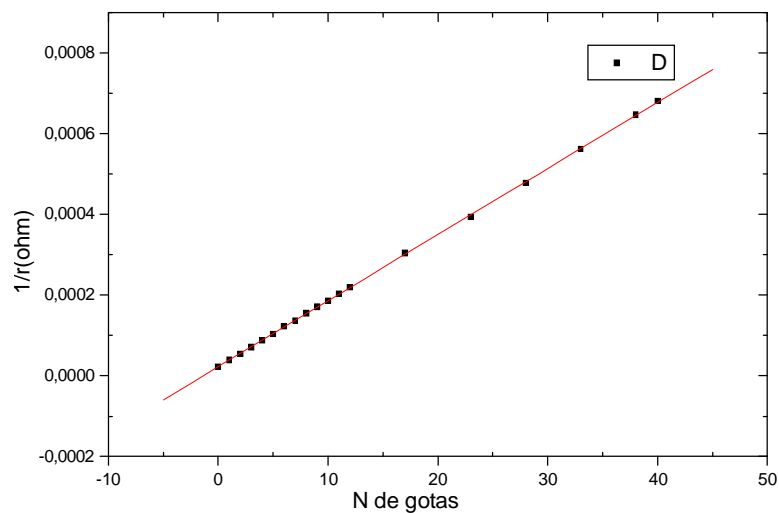
<sup>4</sup> Creemos conveniente comentar esto, de modo de tomar recaudos en el futuro en la protección de los datos.



Con este armado fue posible obtener la variación de la masa de los electrodos y la carga transportada durante la experiencia. También nos sirvió para la estimación del radio del ion de cobre.

### Resultados- Conducción

i) Para la experiencia en la que variamos la concentración, obtuvimos los resultados de la Fig. 1, que muestra  $1/R$  en función del número de gotas añadidas de NaCl, o lo que es lo mismo, la Fig. 1 describe la conductividad en función de la concentración de iones.

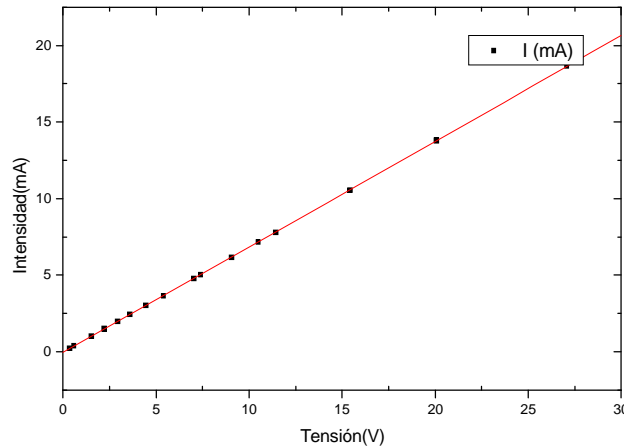


**Figura 1.** La recta de este gráfico tiene una pendiente de  $1,64 \cdot 10^{-5}$  y una ordenada al origen de  $2,28 \cdot 10^{-5}$ .

Vemos que existe una linealidad, por lo menos dentro del rango estudiado, entre la conducción y la concentración. Utilizando,  $q = e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C,  $\delta = 1$  gr/(m.s),  $A = 12,1$  cm<sup>2</sup>,  $b = 10$  cm, y considerando que la relación entre número de gotas es lineal con  $1/R$  con constante  $1,64 \cdot 10^{-5}$  se pueden obtener:

- $1/r_{Cl} + 1/r_{Na}$
- El tiempo medio entre colisiones<sup>5</sup>.

ii) A concentración constante, levantamos  $I$  vs.  $V$  y obtuvimos el resultado de la Fig. 2.



**Figura 2.** Se observa una relación lineal entre la intensidad y la tensión. Por lo tanto, esta solución se comporta como una resistencia óhmica de 1452 Ohm. La recta de este gráfico tiene una pendiente de 0,689 A/V y una ordenada al origen de  $-0,335$  A.

De la Fig. 2 observamos que, a concentración constante, la corriente es lineal con la tensión, por lo que el medio actúa como una resistencia óhmica y estamos bajo las hipótesis de la Ec. (1). Además, esta ecuación resulta consistente con la relación lineal observada en la Fig. 1

## Resultados- Electrólisis

### Experiencia piloto

En la experiencia piloto utilizamos alambres de cobre de 1,5 mm de espesor como electrodos. Trabajamos con una corriente y tensión aproximadas de 0,5 A y 17 V. Este último valor es bastante elevado, por la necesidad de generar una corriente que produzca un depósito apreciable en experiencias de poca duración, dado que cuanto más pequeña es la sección del electrodo, mayor es la tensión necesaria para generar una misma corriente. Al utilizar tensiones elevadas pueden ocurrir reacciones no controladas, además de la esperada. De hecho, se vio un burbujeo alrededor del ánodo. Éste es el motivo principal por el que descartamos el uso de electrodos de estas dimensiones. La diferencia de potencial también depende de la distancia entre electrodos, fenómeno que observamos pero no cuantificamos. También, al tener un área tan pequeña, el cobre se deposita en muchas capas o láminas débilmente unidas. Al extraer los electrodos del agua, las láminas caen a la solución, efecto que logramos contrarrestar al aumentar considerablemente la superficie de los electrodos en las siguientes experiencias [usamos chapas rectangulares de aproximadamente  $(5 \times 7)$  cm<sup>2</sup>]<sup>6</sup>.

<sup>5</sup> Ver apéndice Resultados de conducción.

<sup>6</sup> Esta sección, es la que se encuentra en contacto con la solución.

También observamos que el ánodo perdía tanta masa que parecía partirse. Por estos motivos descartamos el uso de alambres y utilizamos placas de cobre o de bronce en los demás ensayos.

## Resultados- Electrólisis

### Experiencia 1: “En quince minutos”

En esta experiencia los electrodos de cobre usados tenían un área de  $(2,2 \times 5,5)$   $\text{cm}^2$ . La tensión necesaria para hacer circular una corriente aproximada de 0,5 A fue de 7 V. No observamos reacciones gaseosas. A lo largo de un tiempo  $t$ , la carga transportada<sup>7</sup> es

$$Q = \int Idt = (452,5001 \pm 0,00001)C .$$

La diferencia entre la masa medida inicialmente y la medida después de haber hecho circular una carga  $Q$ , resultó

$$|\Delta m| = (0,15 \pm 0,02)Gr .$$

Como se puede ver, la determinación de esta masa se hizo con una precisión del 7 %, algo elevado. Justamente, al observar la expresión de la propagación del error para  $e$  (ver Apéndice), todos los demás términos son despreciables frente al error en  $\Delta m$ , por lo que es menester mejorar la medición de la masa depositada.

La carga del electrón calculada en base a los datos medidos inicialmente, y explica dos en la introducción, resultó:

$$e = (1,6 \pm 0,2) \cdot 10^{-19} C$$

## Resultados- Electrólisis

### Experiencia 2: “La ventanita”

En esta experiencia sumergimos una lámina no conductora en el centro del recipiente con una abertura centrada de  $1 \text{ cm}^2$ . La finalidad de esto consiste en conocer el área por el que pasan los iones, dato necesario para calcular el radio del ion. Esto nos permitiría obtener simultáneamente el radio del ion y la carga  $e$ . Al introducir la lámina observamos que la resistencia aumentó en forma considerable<sup>8</sup> y la corriente se mantuvo aproximadamente constante:  $V \approx 5,8V$  e  $I \approx 0,75A$

---

<sup>7</sup> El error en esta integral fue tomado como el error en la corriente medida con el MPLI

<sup>8</sup> Por lo tanto es una desventaja, ya que a medida que la f.e.m. aumenta, podría aumentar el número de reacciones químicas que se producen, y haría que lo calculado difiera de lo medido, vale decir que parte de la energía entregada se consumiría, por ejemplo, en formarse un compuesto gaseoso. En donde no serían válidas nuestras ecuaciones.



Además, al poner este obstáculo se puede alterar el campo de velocidades: *si el flujo de cargas es constante a lo largo de todo el sistema, entonces la velocidad de las partículas será mayor cuanto más cerca estén de la ventana.*

Por estos motivos, y porque entraríamos en campos que no dominamos, es que preferimos sacar este dispositivo. Todas estas hipótesis surgen a raíz de que el  $\Delta m$  medido difiere bastante del calculado, lo que en el resto de las experiencias no sucedió. Por otro lado, debido a la sencillez del modelo, nos conformamos con conocer el orden de magnitud del radio del ion de cobre, por lo que nos pareció razonable tomar como área  $A$  al área del electrodo sumergida en solución<sup>9</sup>.

La carga transportada fue

$$Q = \int I dt = (672,2 \pm 0,00001)C$$

El incremento de masa fue:

$$|\Delta m| = (0,27 \pm 0,02)Gr$$

Y la carga  $e$  calculada es:

$$e = (1,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-19} C$$

## **Resultados- Electrólisis**

### **Experiencia 3: “Por el honor”**

Después de tantas idas y venidas, elegimos esta experiencia para disminuir el error en la determinación de la carga  $e$ . Para esto usamos una balanza con una precisión de 0,0001 g del Laboratorio de Muestras del Depto. de Física, y buscamos que se depositara una mayor cantidad de masa, para disminuir el error relativo de esta determinación.

$$Q = \int I dt = (1809,74737 \pm 0,00001)C$$

$$|\Delta m| = (0,596 \pm 0,001)Gr$$

$$e = (1,601 \pm 0,001) \cdot 10^{-19} C$$

Al retirar los electrodos de la solución, observamos que parte de lo depositado caía a la solución. También podrían haber caído impurezas de los mismos<sup>10</sup>, lo cual aumentaría un poco el rango de incertidumbre. Por este motivo, consideramos un error estimativo

---

<sup>9</sup> Ver apéndice “Relación entre I y v”.

<sup>10</sup> Ya que caían cosas del electrodo que pierde masa (ánodo), y no sabemos cuál es la proporción de impurezas respecto de la masa depositada.

(mayor al de la balanza), en donde estimamos la masa que se cae. Tomamos como similar la diferencia entre dos pesadas, antes y después de limpiar los electrodos.

Utilizamos este criterio en el afán de repetir intencionalmente un fenómeno de características parecidas y ver el orden de magnitud de la variación. De éste resulta:  $\Delta m = 0,001$  g. Finalmente obtuvimos la carga del electrón con un error relativo del 0,06%, resultado que superó nuestras expectativas.

## Resultados- Radio del ion de cobre

Lo primero que hicimos con los datos medidos en la experiencia anterior, fue ver si estábamos trabajando dentro de un régimen laminar, para asegurarnos que es lícito usar la Ley de Stokes. Esto equivaldría a verificar que el número de Reynolds sea mucho menor que uno. Condición que se verificó<sup>11</sup>, donde se detallan las ecuaciones usadas):  $N_{Reynolds} = 2,744 \cdot 10^{-9} \ll 1$

También vimos cuál era el rango de velocidades medias para el cual íbamos a seguir estando dentro de este régimen. Esto arrojó que la velocidad máxima admisible es un orden de magnitud menor que la velocidad de la luz. Por lo tanto, este no iba a ser nuestro techo, ya que para corrientes de pocos Amperes se necesitan potenciales que efectúen más de una reacción. Este va a ser nuestro límite.

Usando la Ec.(7) de la introducción, que relaciona la corriente que circula en la solución con la velocidad media, resultó:

$$V_{media} = 2,8598 \cdot 10^{-4} \frac{cm}{seg}$$

Y de la Ec. (8):

$$R_{ion} = 4.8036 \times 10^{-8} \text{ \AA}$$

Este valor es casi 5 veces mayor que el que se puede encontrar en tablas (0,96 Å). Esta diferencia la podríamos explicar suponiendo que la “pelotita” que circula es un ion de cobre rodeado de moléculas de agua. En otras palabras: *el ion viaja mojado*.

## Conclusión- Carga del electrón

Esta experiencia fue nuestro interés original. Luego fueron apareciendo distintas ideas; algunas las llevamos a cabo, y otras no (el tiempo hizo que no nos pudiéramos disgregar demasiado).

---

<sup>11</sup> Por detalles del cálculo consultar a los autores.

La verdad es que obtener la carga del electrón con un error del 0,06 % no está nada mal, aunque se podría mejorar. Creemos que cualquier mejora no dista mucho del camino que elegimos para la experiencia “Por el honor”, con algunos detalles más.

Si en un futuro se repite la experiencia, y se busca mayor precisión, para lo que recomendamos:

- Disminuir o controlar las partículas que se caen de los electrodos.
- Agrandar la sección de los electrodos<sup>12</sup>.
- Aumentar la carga depositada, sin elevar la corriente.
- Conseguir soluciones y electrodos más puros<sup>13</sup> (con esto se podrían disminuir las impurezas ya mencionadas).
- Diseñar algún mecanismo que permita sacar los electrodos de la solución mas lentamente.
- Acercar más las placas en caso de necesitar diferencias de potenciales aún menor.
- Estudiar con más detalles (teóricamente) el rango de potencial en el que actúa una sola reacción y la cinética de las mismas.

## **Conclusiones- Radio del ion**

Con respecto al radio del ion de cobre, aún queda mucho por hacer<sup>14</sup>, trabajando con este sencillo modelo u otro más sofisticado. Aunque quedamos conformes, hicimos muy poco y acá hay mucho terreno virgen. Esto puede ser muy divertido, incluso más que la medición de  $e$ .

Si comparamos el resultado del radio del ion de cobre medido con el ya conocido, se observa que, aunque estamos dentro del orden de magnitud, éste es casi cinco veces mayor que el real.

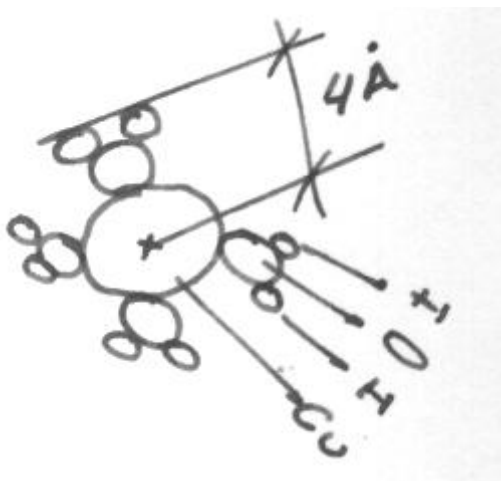
Vamos a suponer que el ion de cobre no viaja solo, sino rodeado con moléculas de agua (como se muestra en el gráfico siguiente). La suma entre el radio del ion de  $\text{Cu}^{++}$  y el diámetro de una molécula agua es un poco menor que el radio medido por nosotros.

---

<sup>12</sup> Por lo motivos ya especificados y los preferimos de cobre.

<sup>13</sup> Esta solución puede no ser muy económica, pero es el precio que hay que pagar por ponerse en exquisito.

<sup>14</sup> Se podría efectuar un experimento específico con este objetivo, a la vez de proponer nuevos modelos, cosa que es sumamente interesante.



Las direcciones que nosotros tomaríamos para tratar de corroborar esta hipótesis serían dos:

**1-) Con este modelo:** tratar de definir mejor el área, ya que supusimos que el depósito se producía sólo sobre la cara frontal, y observamos deposición en la cara posterior (aunque en menor grado). Consideramos que se podría mejorar de la siguiente forma.

- Tal vez se podría acercar mucho más los electrodos. Esto nos permitiría trabajar con diferencias de potenciales aún menores, y luego, al insertar un dispositivo que nos defina bien un área por donde pasaran los iones, “jugar” con estos parámetros y trabajar con un potencial levemente mayor al crítico. Nos gustaría probar con una ventana de espesor considerable, apoyar los electrodos sobre ella y tapar las caras posteriores de los mismos; y de esta manera, quedaría una cuba encerrada por los electrodos que tendría como paredes las caras internas de la ventana. Esto también presenta un inconveniente: la velocidad de las partículas cerca de las paredes sería menor que en el centro, y no trabajaríamos con una única velocidad.

**2-) Con un modelo mejorado:** que tenga en cuenta menos aproximaciones.

Al ir mejorando las experiencias, estaríamos acotando por encima el radio del ion que viaja en la cuba.

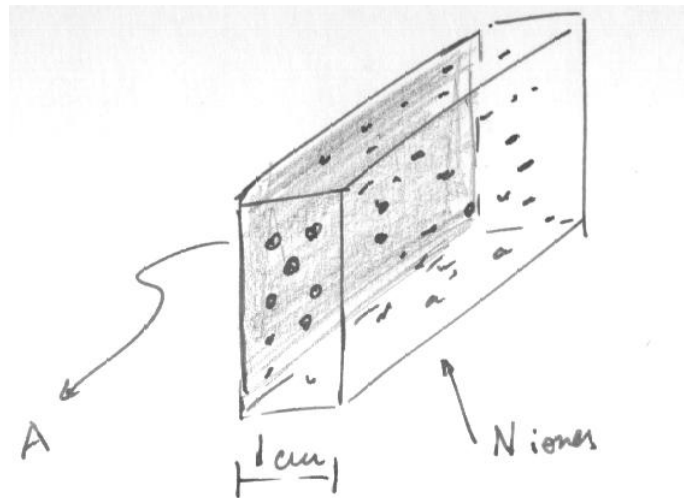
## **Agradecimientos**

Tenemos que agradecer a muchas personas que hicieron que nuestras experiencias y modelos fueran entendibles y creíbles. Creemos (¿?) que en la siguiente lista no nos olvidamos de nadie...

- A Eduardo Rodriguez, docente del Depto. de Física de la FCEyN, UBA.
- A la gente del Laboratorio de Electroquímica de la FCEyN, UBA.
- Al laboratorio de Tratamiento de Imágenes.
- A nuestros docentes del curso de Física Experimental III.
- A Gustavo Loureiro, a cargo del pañol del Laboratorio de Física III.
- A la gente del taller del Depto. de Física de la FCEyN, UBA.

## Apéndice- Relación entre I y V

Consideremos un sistema, en el cual tenemos dos placas metálicas sumergidas en un medio acuoso, que contiene sulfato de cobre, por el que circula una corriente continua apreciable. Y si suponemos que la dirección del movimiento de los iones que transportan la carga, es única y perpendicular a las placas. Y además estos iones se mueven con igual velocidad, entonces la carga trasladada durante un tiempo  $\Delta t$ , será el producto de la carga de cada ion, por el número de iones que circuló, o sea que atravesaron el área  $A$  del electrodo correspondiente. Pero este número es el producto entre el número  $n$  de iones que hay por unidad de volumen, el área del electrodo y la velocidad con que estos viajan. O sea:  $\Delta Q = n A v q \Delta t$



Es lo mismo:

$$I = n q A v$$

Esta es una relación entre la velocidad de los iones y la corriente que circula. Es importante resaltar, que los iones que se *incrustan* en la placa metálica, según este modelo, son los que se encuentran frente a ella. Y vimos en forma experimental, que sobre su cara posterior también hubo sedimentación, aunque en menor medida.

O sea que es una aproximación, y es posible considerar que el área  $A$  es, en realidad, un poco mayor.

## Apéndice – Resultados de conducción

En el apéndice matemático se demuestran dos modelos teóricos en cuanto a la relación entre la tensión y la intensidad para soluciones en medios acuosos en el caso de que al disociarse una sal las dos clases de iones tengan la misma carga. Estos son:

$$I = \frac{q^2 \cdot n \cdot A (\mu_{Cl} + \mu_{Na})}{b} V \quad (1)$$

donde  $q$  es la carga del ion transportado,  $A$  es el área de las chapas,  $b$  la distancia entre estas,  $n$  el número de iones de un mismo elemento y el  $\mu$  de un ion es  $\tau/m$ , donde  $\tau$  es el tiempo medio en que cada ion tarda en perder la información del momentum que lleva debido a las colisiones que sufre (la información se encuentra en el apéndice) y  $m$  su masa.

$$I = \frac{q^2 \cdot n \cdot A (R_{Cl}^{-1} + R_{Na}^{-1})}{b \cdot 6\pi \cdot \delta} V \quad (2)$$

aquí  $r$  es el radio de cada uno de los iones y  $\delta$  la viscosidad dinámica del medio. Además esta última fórmula es sólo válida en el caso de que el número de Reynolds sea mucho menor que 1.

De estos dos modelos observamos que  $I/R$  es directamente proporcional al número de iones por unidad de volumen, además de hallarse una relación entre  $\mu$  y  $r$  de los iones.

## Apéndice matemático

Deducción de las ecuaciones (1) y (2) del apéndice “Resultados de conducción”:

(1) Si un ion de masa  $m$  se encuentra en un medio acuoso sometido a una fuerza constante  $F$ , su aceleración es  $F/m$ . Al producirse choques con las moléculas del medio, el ion pierde constantemente la información sobre el momentum que llevaba en un tiempo  $\tau$ , por lo que éste se mueve con una velocidad media ( $v$ ) que viene dada por el cociente entre su aceleración y  $\tau$ :

$$v = \frac{F \cdot \tau}{m}$$

Al encontrarse en ion en un campo eléctrico  $E = \frac{V}{b}$ , tenemos que  $v = \frac{\mu \cdot q \cdot V}{b}$ , siendo

$$\mu = \frac{\tau}{m}$$

La carga transportada en un tiempo  $T$  por una clase de iones viene dada por  $q \cdot n \cdot A \cdot v \cdot T$ . Como en nuestra experiencia las dos clases de iones circulan en sentido contrario ante un campo eléctrico, y usando el hecho de que el transporte de una carga en un sentido equivale al transporte de una en sentido opuesto, tenemos que en valor absoluto carga transportada es la suma de las cargas transportadas en valores absolutos de los iones y de los cationes.

La corriente  $I$  es la carga transportada por unidad de tiempo, por lo tanto  $I=q.n.A.vK$ . En nuestro caso la carga de los iones de Cl y Na son iguales en valor absoluto, por lo que tenemos:

$$I = \frac{q^2 \cdot n_i \cdot A \cdot (\mu_{Cl} + \mu_{Na})}{b} V$$

(2) Cuando una esfera de radio  $r$  se encuentra en un medio acuoso con viscosidad dinámica  $\delta$  esta sometido a una fuerza  $F$ , si el número de Reynolds es mucho menor que uno, este alcanza una velocidad media que viene dada por  $v = \frac{F}{6\pi \cdot \delta \cdot R}$ , de manera que:

$$v = \frac{V \cdot q}{6\pi \delta \rho b}$$

Al usar la expresión  $I = q.n.A.v = q.n.a.(v_{Cl}+v_{Na})$  se llega a:

$$I = \frac{q^2 \cdot n_i \cdot A \cdot \left(\frac{1}{R_{Cl}} + \frac{1}{R_{Na}}\right)}{b \cdot 6\pi \delta} V$$

### **Bibliografía:**

- *Física re-Creativa*, S. Gil y E. Rodríguez, Prentice Hall, Buenos Aires, 2001.
- *Berkeley Physics Course*, vol. II, E. Purcell.
- *Feynman*, vol. I y II, R. Feynman, R. Leighton and Sands.
- *Física*, vol. I y II, M. Alonso y E. Finn.
- *Química*, Raymond Chang.