



Los procesos de síntesis teórica y la estabilización de un campo de fenómenos

Sandra Sandoval Osorio*

José Francisco Malagón Sánchez*

Marina Garzón Barrios*

Liliana Tarazona Vargas*

Introducción

En esta comunicación presentamos el estudio que hemos adelantado de la constitución de la electroquímica como un campo en el cual se establecen relaciones entre los fenómenos químicos y los fenómenos eléctricos. Este estudio, en el cual se acude a la revisión histórico crítica de los textos de científicos, entre los cuales destacamos a Volta, Davy, Faraday y Ostwald, se sustenta en la perspectiva de contribuir a una enseñanza de las ciencias centrada en la constitución de fenomenologías, esto es como docentes de ciencias hacemos un análisis de textos de científicos (fuentes primarias) que abordan problemáticas que son objeto de nuestro estudio y cuya lectura esta direccionada por nuestras preguntas.¹

En el estudio adelantado describimos las relaciones de equivalencia que se concretan en el caso de la electroquímica. A partir de esto, se han generado propuestas experimentales para la enseñanza, que hasta este momento nos permiten describir cómo se establece la equivalencia entre magnitudes como la corriente eléctrica y cantidad de sustancia, o entre tensión eléctrica y oxidación de las sustancias. Evidenciamos, una vez más, que la constitución de magnitudes, la construcción de formas de medida y aparatos de medida, son imprescindibles tanto en las operaciones

¹ Ayala, Malagón y Sandoval (2013) presentan claramente que esta es una lectura intencionada con fines pedagógicos a la que hemos denominado estudios histórico críticos y que no corresponde al ejercicio de un historiador de la ciencia o a un epistemólogo de las ciencias que centra su objeto de estudio en la reconstrucción de preguntas, metodologías y concepciones de los científicos en una época y contexto específico.

* Grupo de Estudios Histórico Críticos y Enseñanza de las Ciencias EHC*EC. Universidad Pedagógica Nacional de Colombia.
ssandoval@pedagogica.edu.co

de producción de efectos sensibles, a la vez que en la producción de teorización sobre los campos de estudio. En estos procesos, la determinación de una cualidad (o cualidades) que da cuenta del fenómeno que se estudia, el análisis de efectos producidos y las relaciones de orden permiten estabilizar el fenómeno (Malagón, Ayala, & Sandoval, 2013, p. 98).

En el caso del fenómeno electroquímico, es necesario definir cuáles son las cualidades que lo caracterizan, qué efectos se relacionan, cuál es la ordenación que se logra. La pregunta por cuánto más o menos está un punto con respecto a otro en una ordenación, lleva al problema de la construcción de la magnitud y del aparato con el que se mide. Con el trabajo de Faraday, hemos encontrado una primera organización cuantitativa de los efectos electroquímicos (la cantidad de sustancia transformada es proporcional a la cantidad de electricidad que pasa por el electrolito), además del establecimiento de equivalentes al comparar efectos (las cantidades de sustancias que viajan con cantidades iguales de electricidad son químicamente equivalentes). Ostwald (1910/1912) afirma que para establecer esta relación fue necesario identificar los “efectos susceptibles de ser medidos”, por un lado, Faraday reconoce “la desviación de la aguja imantada del galvanómetro (recientemente inventado), y, por otra parte, la descomposición química” (p. 96). Cada efecto vinculado a un dominio diferente, el galvanómetro: indicador del paso de corriente, y la cantidad de sustancia descompuesta: indicador de transformación química, ambos efectos visibles en la electrólisis.

En la serie V de los *Experimental reasearchs in electricity* Faraday (1849) señala varios aspectos importantes:

- La descomposición electroquímica depende esencialmente de la corriente de electricidad (p. 146).
- Algunos científicos asumen que hay dos clases de fluido eléctrico, pero para Faraday es un eje de poder que tiene fuerzas contrarias, exactamente iguales en cantidad, contrarias en dirección, (p. 148).
- El efecto depende esencialmente de las afinidades químicas entre las partículas de clases opuestas (p. 149).

Así la producción de metales o sales en los polos se debe a la presencia de otras sustancias con las que son afines, igualmente pasa en el caso de los gases que se liberan, los ácidos y álcalis que quedan en el fluido que rodea los polos. (la explicación de la descomposición por la atracción de

los polos no da cuenta de estos casos en los que las sustancias no quedan unidas a los polos).

Yo supongo que los efectos son debidos a la modificación, por la corriente eléctrica, de la afinidad química de las partículas que atraviesan o por las cuales la corriente pasa, dando el poder de activar con más fuerza en una dirección que en otra y en consecuencia haciéndolos pasar por una serie de sucesivas descomposiciones y recomposiciones en direcciones opuesta, y finalmente causando su expulsión o exclusión en los límites del cuerpo bajo descomposición, en la dirección de la corriente, y en cantidades pequeñas o grandes, de acuerdo con que la corriente sea más o menos poderosa. (Faraday, 1849, p. 152)

Faraday encuentra que la descomposición electroquímica de sustancias no dependía de la distancia entre los polos por los que entraba y salía la corriente. Para Faraday la atracción y repulsión entre los polos y las sustancias en contacto con éstos no da respuesta a la descomposición electroquímica. Con los experimentos en los que uno solo de los polos genera la descomposición, muestra que los electrolitos se descomponen y sus compuestos no necesariamente se acumulan sobre un polo. Lo que sí es necesario para que se dé la descomposición es la corriente (como lo describen los otros científicos).

Para Faraday será la corriente la causa de la descomposición de las sustancias que ésta atraviesa, más que la acción de los polos. Los polos serán el límite entre el electrolito y el camino por donde entra y sale la corriente eléctrica.

Otro aspecto que se deriva de esta explicación es que si la afinidad de los componentes de la sustancia es muy fuerte la corriente producida por la pila no podrá descomponerlo. En caso contrario, la capacidad del electrolito de sufrir descomposición está vinculada con la capacidad de conducir electricidad. Faraday lo expresa de la siguiente manera:

La conclusión es casi irresistible, que en los electrolitos el poder de transmitir la electricidad a través de la sustancia depende de la capacidad de sufrir descomposición; teniendo lugar solo mientras se están descomponiendo y siendo proporcional a la cantidad de elementos separados. (Faraday, 1849, p. 201)

La relación que establece Faraday es: a deflexiones iguales de la aguja, corresponden cantidades iguales de sustancias descompuestas, en tiempos iguales, sin que la fuente de electricidad tenga incidencia.

La relación de proporcionalidad, expuesta por Faraday, entre los efectos de transformación de sustancias dada una cantidad de electricidad, como forma de encontrar sustancias químicamente equivalentes, no es la única relación que encontramos al estudiar la constitución del fenómeno electroquímico. También destacamos procesos en los que la conversión de efectos químicos en efectos eléctricos son fundamentos para dar cuenta de la conducción eléctrica en soluciones (Arrhenius, van 't Hoff), de la relación de las fuerzas electromotrices en las células galvánicas y el trabajo generado en los procesos químicos surgidos en las pilas (Gibbs, Helmholtz). En esta línea, el estudio de la electrólisis y la construcción de pilas nos han permitido encontrar la equivalencia como una categoría epistemológica necesaria para dar cuenta de este nuevo dominio fenomenológico.

Destacamos dos aspectos relevantes dentro de la constitución de la electroquímica: la definición de la electricidad como síntesis teórica y la relación de la electricidad con los cambios químicos.

La electricidad: convergencia de tres campos fenomenológicos

Durante el siglo XVIII coexisten tres clases de fenómenos a los cuales se les conoce como electricidad: electrostática en la cual se han configurado magnitudes como la carga, el potencial y el campo eléctrico para hablar de la cantidad de electricidad. El otro la electricidad galvánica o animal en la cual se estudian los espasmos y conmociones como características de una electricidad que era considerada como propia de los seres vivos. Y, por último, el caso de la electricidad voltaica producida por el contacto de metales diferentes y que da origen a las corrientes que implica tener circuitos cerrados.

En este apartado destacamos dos aspectos sobre el experimento en la conformación de un dominio fenomenológico constituido por la convergencia de tres fenomenologías: la electrostática, la electricidad animal y la electricidad voltaica; etapa en la cual se generan las condiciones para explicar el fenómeno de la electricidad animal en términos análogos a cómo se explica la electricidad voltaica, ejemplificar cómo los aparatos de medida terminan siendo un factor de unificación, y medir electricidades débiles.

En esta síntesis que unifica son varias las cuestiones que juegan un papel importante, pero destaquemos los instrumentos y la producción de efectos que minuciosamente son operados una y otra vez hasta que se

establecen las magnitudes y formas de medida como la botella de Leyden y el galvanómetro de Cumming (1821).

Ya Volta había hecho el esfuerzo de utilizar el condensador multiplicador de Nicholson para medir los efectos que producen por el contacto de dos metales, pero se da cuenta que no puede distinguir entre la medida debida a las mismas piezas del aparato y los debidos a los fenómenos que ocurren en las disposiciones de metales en las pilas construidas

El galvanómetro de Cumming se introduce más tarde, por Davy (1826) para evidenciar los efectos que provocan las placas de metal de una pila y el cambio en la dirección de la corriente y con ello la polaridad (positiva o negativa) de las placas.

En el caso del multiplicador de Schweigger (fig. 1) se coloca una aguja magnetizada para contrarrestar el efecto del campo magnético terrestre. El sistema de Schweigger logra amplificar o multiplicar el efecto de una corriente eléctrica sobre una aguja magnetizada. En la medida que se hicieran más giros del cable conductor alrededor del marco de madera se lograba un efecto magnético mayor sobre la aguja magnetizada y permite medir y trabajar con corrientes débiles como las que ya habíamos descrito en los sistemas electroquímicos. La deflexión de la aguja es considera-



Fig. 1: Representación del multiplicador de Johann Schweigger.

Nota: Imagen extraída de “Schweigger Multiplier – 1820—MagLab”. <https://nationalmaglab.org/education/magnet-academy/history-of-electricity-magnetism/museum/schweigger-multiplier>

da proporcional a la intensidad de la corriente que circula por la bobina cuando se producen cambios químicos. Esto es, en síntesis, que la magnitud del cambio químico es medida por el efecto magnético que produce la circulación de corrientes eléctricas generadas en tal proceso químico.

El electrolito como generador de nuevas preguntas

El estudio de los efectos y reacciones que suceden en el electrolito genera un campo amplio de investigación. Volta y Galvani se habían centrado en establecer las causas de la fuerza eléctrica que se exhibía en los músculos de la rana y en caracterizar los efectos del contacto de los metales.

Nicholson y Carlisle (1788) habían observado la descomposición del agua que se utilizaba en una pila cuando el circuito se cerraba. Lo sorprendente fue que los dos componentes del agua se separaron, el oxígeno en uno de los hilos y el hidrógeno en el otro. Carlisle y Nicholson también observaron que en el electrodo donde se recogía oxígeno, el agua era ácida, y que era alcalina en el electrodo donde el hidrógeno se liberaba (Ostwald, 1910/1912, p. 76).

Pero ya Volta había observado este fenómeno. Él afirma:

El recipiente X-X [Figura 2] está lleno de agua destilada. A medida que el extremo del cable TT toca la superficie de la última lámina, las pequeñas burbujas de aire se forman sobre la superficie del cable SS en la parte sumergida en el agua, que crece gradualmente y se forman un chorro continuo de aire, que se recoge en la parte superior del tazón XX. Examinado este aire se encuentra que es aire inflamable. La superficie de los alambres metálicos está a la cabeza de unos pocos minutos calcinada. En los experimentos que realizó el profesor JACQUIN esta mañana, se utilizaron cables de oro, plata, hierro, plomo y latón. Todos estos hilos tienen agua descompuesta y han proporcionado una gran cantidad de gas inflamable. (Volta, 1800/1923, p. 4)

Se plantea dos interrogantes, si es posible acelerar o hacer más lenta la descomposición del agua, utilizando diversos metales interpuestos en la disposición de columnas. Y si es posible determinar la cantidad de agua descompuesta a partir de la cantidad de gas inflamable producido en un determinado tiempo. Seguramente, va a ser precisamente Faraday quien mejor aborde estas cuestiones, como ya lo adelantamos en la primera parte de este texto.

Otros investigadores como Haldane, Cruikshank, Davy, mostraron que, al trabajar con soluciones de sales de plata, zinc, cobre, plomo y otros

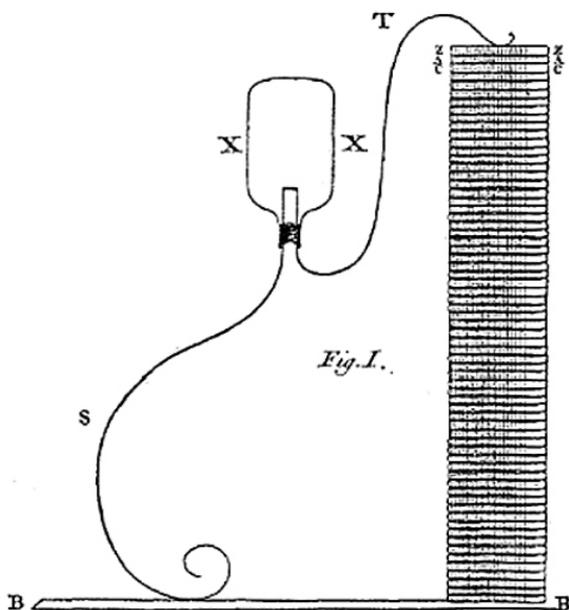


Fig. 2: Imagen incluida en la carta de Alessandro Volta al profesor Brugnatelli, “Sobre algunos fenómenos químicos obtenidos con el nuevo aparato eléctrico”. Otoño de 1800.
Nota: Imagen reproducida de “Lettera del prof. Alessandro volta al prof. Brugnatelli sopra alcuni fenomeni chimici ottenuti col nuovo apparecchio elettrico”. *Le opere di Alessandro Volta*, Vol. 2. Milano: Hoepli, 1923, p. 4.

metales, estas sales se podían precipitar o depositar en el electrodo donde se liberaba hidrógeno, mientras que en el otro electrodo se daban otros procesos de transformación química diferentes.

Estos hechos, que hemos estudiado en *Bakerian Lecture* (Davy, 1826), son los que permiten indicar que la actividad eléctrica que se da en las pilas o baterías está muy relacionada con las reacciones químicas producidas, en las cuales la clase de electrolito o conductor húmedo merece una investigación a profundidad.

Estas revisiones han sido de capital importancia para describir los cambios químicos que se dan en estos procesos en términos de cantidades de electricidad y viceversa, así como también la afinidad química puede ser medida en relación con las tensiones generadas en estos montajes.

La producción de ciertas sustancias en uno u otro electrodo de la pila, permitiría entonces dar cuenta de la polaridad de las placas tanto como

de las sustancias. Esto generó la pregunta si la electricidad descomponía sustancias y componía o generaba otras sustancias. Davy avanza en este asunto:

Yo concluí que las combinaciones y descomposiciones por electricidad eran atribuibles a la ley de atracciones y repulsiones eléctricas, y adelanté la hipótesis, “esas atracciones química y eléctrica fueron producidas por la misma causa, actuando en un caso sobre partículas, en el otro sobre las masas”; y que la misma propiedad, bajo diferentes modificaciones, fue la causa de todo el fenómeno exhibido por diferentes combinaciones voltaicas. (Davy, 1826, pp. 389-390)

Con esta conclusión e hipótesis que expone Davy se puede decir que los efectos de la electrodescomposición implicaron que los científicos del momento explicaran cómo se producían éstos (por atracciones eléctricas), si era posible concebir el movimiento de esas sustancias mientras eran afectadas por la electricidad, y cuántos de esos efectos eran producidos por las acciones químicas entre sustancias.

En estos trabajos se muestran dos relaciones muy importantes:

- La comparación de las escalas de tensión con las escalas de afinidad de los metales por el oxígeno, en la que se termina estableciendo una equivalencia entre las afinidades eléctricas con las afinidades químicas.
- A medida que se produce una tensión, por el contacto de dos metales, se producen cambios en las sustancias en solución (electrolito) o en las placas del metal (electrodos), cambios químicos que se explican por el paso de la corriente.

Estas relaciones nos ayudan a argumentar que cuando se logra hablar de un fenómeno en términos de otro, a través del análisis de las magnitudes que caracterizan a cada uno de los fenómenos, se establecen procesos de conversión de las magnitudes medibles de un fenómeno en términos de las magnitudes que organizan el otro fenómeno. Estudiar este tipo de convertibilidad entre magnitudes y fenómenos requiere construir formas de expresión que indiquen cuánto equivale el cambio del fenómeno A en términos del fenómeno B. La equivalencia es entonces una categoría de síntesis o de formalización de este cambio que se puede realizar o concretar en los aparatos de medida y la construcción de magnitudes.

Estabilización del dominio fenomenológico

De acuerdo con los trabajos relacionados hemos allegado criterios de estabilización del fenómeno que están ligados al hecho de que:

- Volta construye y explica el funcionamiento del aparato eléctrico artificial y observa, los cambios químicos que se suceden en estos montajes tanto en el aparato de columna como en la disposición de tazas. En esta etapa, sobresale la estabilización de la producción de fuerzas electromotrices por la organización de los pares de metales según los efectos que generan. Cuando se tiene estandarizado el proceso de construcción de la batería, se logran producir corrientes de diferentes intensidades y este pasa a hacer parte de los instrumentos eléctricos que son usados para la descomposición de sustancias, como la descomposición del agua o de las bases, lo cual da condiciones de posibilidad para estudiar los diferentes procesos que se dan, lo que llamaremos procesos electroquímicos.
- Para Davy es importante explicar lo que sucede a nivel de las reacciones químicas en las pilas y para ello establece condiciones de diferenciación entre clases de sustancias álcalis, ácidos, metales y sustancias en estado gaseoso. Estas diferencias se establecen en relación con los cambios eléctricos y químicos que se evidencian en las pilas.
- Y Faraday hace una revisión de las condiciones experimentales, de las teorías existentes y de las nuevas leyes que establece para este campo.

La estabilización cobra importancia en términos de la utilización de las baterías en los procesos electroquímicos, en asociar aparatos de medida para la medición de los efectos químicos y eléctricos, elaboración de leyes y principios que estructuran las teorías en el campo electroquímico.

Después de esta dinámica de discusión, repetición de experimentos en los que se encuentra que cambiando las clases de metales se obtienen las mismas fuerzas electromotrices, esto va acompañado de una operación en la cual se establece el orden de estas junturas de metales o disposición de orden de los metales en los montajes de tazas; igualmente esta posibilidad lleva a hacer comparación de resultados las cuales producen las escalas de tensión de los metales, o el establecimiento de las leyes de Volta. Estas ob-

servaciones y afirmaciones entran a hacer parte de la base de experiencias que conforman el dominio fenomenológico que hemos extendido. En este caso hemos estabilizado la construcción del instrumento.

Trabajo en el aula

En la enseñanza de las ciencias hemos llevado lo estudiado para trabajar con nuestros estudiantes de las carreras de ciencias de la Facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad Pedagógica Nacional y hemos desarrollado algunas actividades que tienen que ver con la construcción de montajes que permiten establecer relaciones que inicialmente no existían para el estudiante: la posibilidad de construcción de columnas o de tazas con diferentes disposiciones se busca establecer la generación de estos fenómenos que hoy conocemos como eléctricos y además establecer si los fenómenos dependen de los metales utilizados o de las sustancias que actúan como electrolitos.

Luego la pregunta por el electrolito y el papel que juega en las soluciones nos permiten también establecer cómo se pueden cuantificar los cambios que se observan sobre las placas de metales.

Finalmente se cuestionan los modelos que han sido aprendidos acríticamente de cargas + y - moviéndose en las soluciones, o peor aún de electrones que saltan de una sustancia a otra y que por ello producen cambios en las soluciones, a establecer sistemáticamente como se dan los cambios y de qué factores depende.

Agradecimientos

Este trabajo recoge algunos de los desarrollos en el marco del proyecto DQU509-19 La actividad experimental en el aula. Estabilización de un campo fenomenológico y construcción de instrumentos y formas de medida como síntesis teóricas, auspiciado desde la Subdivisión de Gestión de Proyectos CIUP – Universidad Pedagógica Nacional de Colombia.

Referencias

Ayala, M. M., Malagón, J. F., & Sandoval, S. (2013). La historia en la enseñanza de las ciencias. Una relación polémica. En M. M. Ayala, J. F. Malagón, & S. Sandoval (Eds.), *Construcción de fenomenologías*

- y procesos de formalización (pp. 21-37). Bogotá: Editorial Universidad Pedagógica Nacional.
- Cumming, J. (1821). On the connection of galvanism and magnetism. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, Vol I, Part II, 269-280.
- Davy, H. (1826). The Bakerian lecture. On the relations of electrical and chemical changes. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 116, 383-422. <https://doi.org/10.1098/rstl.1826.0031>
- Faraday, M. (1849). *Experimental researches in electricity*. Londres: R. & J. F. Taylor.
- Malagón, J. F., Ayala, M. M., Sandoval, S. (2013). La actividad experimental: construcción de fenomenologías y procesos de formalización. En M. M. Ayala, J. F. Malagón, & S. Sandoval (Eds.), *Construcción de fenomenologías y procesos de formalización* (pp. 87-104). Bogotá: Editorial Universidad Pedagógica Nacional.
- Nicholson, W. (1788). A description of an instrument which, by the turning of a winch, produces the two states of electricity without friction or communication with the earth. In a letter from Mr. William Nicholson to Sir Joseph Banks, Bart. P. R. S. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 78, 403-407. <https://doi.org/10.1098/rstl.1788.0028>
- Ostwald, W. (1912) *L'évolution de l'électrochimie* (E. Philippi, trad.). Paris, Francia: Librairie Felix Alcan. (Obra original de 1910)
- Volta, A. (1923). Lettera del prof. Alessandro volta al prof. Brugnatelli sopra alcuni fenomeni chimici ottenuti col nuovo apparecchio elettrico. Autunno 1800. En *Le opere di Alessandro Volta. Edizione Nazionale*, Vol. 2 (pp. 2-5). Milán: Ulrico Hoepli Editore. (Obra original de 1800)