

Estabilización de un dominio fenomenológico. Reflexiones desde la historia de la electroquímica para la formación de docentes

Liliana Tarazona Vargas[†]

Marina Garzón Barrios[‡]

José Francisco Malagón Sánchez[§]

Sandra Sandoval Osorio[¶]

Resumen

En este texto se trabaja la estabilización de fenómenos como una actividad que aporta en la comprensión de los momentos de síntesis que acompañan la construcción de dominios fenomenológicos, fruto del estrecho vínculo entre la experimentación y la formalización de los fenómenos. Se expone el caso de estudio de la organización de la electroquímica durante el siglo XIX. Se presenta el trabajo de Alessandro Volta (1745-1827) sobre la construcción de las pilas y a partir de los estudios de Humphry Davy (1778-1829) y Michael Faraday (1791-1867) los procesos químicos que se producen en los electrolitos cuando pasa una cantidad de electricidad. Se destaca que la estabilización de este dominio fenomenológico requirió:

- 1) Producir efectos de corriente eléctrica y garantizar su repetición, con un aparato que es la pila voltaica cuya organización unifica los fenómenos electrostáticos, la electricidad animal y la electricidad voltaica y produce nuevos fenómenos como la transformación de sustancias.

.....
[†] Departamento de Física, Universidad Pedagógica Nacional (UPN). Grupo Estudios Histórico Críticos y Enseñanza de las Ciencias EHCEC. Para contactar al autor, por favor, escribir a ltarazonav@pedagogica.edu.co

[‡] Departamento de Física, Universidad Pedagógica Nacional (UPN). Grupo Estudios Histórico Críticos y Enseñanza de las Ciencias EHCEC. Para contactar al autor, por favor, escribir a mgarzonb@pedagogica.edu.co

[§] Departamento de Física, Universidad Pedagógica Nacional (UPN). Grupo Estudios Histórico Críticos y Enseñanza de las Ciencias EHCEC. Para contactar al autor, por favor, escribir a jmalagon@pedagogica.edu.co

[¶] Departamento de Química, Universidad Pedagógica Nacional (UPN). Grupo Estudios Histórico Críticos y Enseñanza de las Ciencias EHCEC. Para contactar al autor, por favor, escribir a ssandoval@pedagogica.edu.co

- 2) Identificar las cualidades que se pueden ordenar y cuantificar para describir los fenómenos y la construcción de instrumentos de medida. 3) Establecer variables que describen el fenómeno y sus relaciones, que son síntesis formales sobre las cuales se pueden proponer otras disposiciones experimentales. Estos aspectos movilizan la construcción de dominios fenomenológicos en las clases de ciencias que implican abordar diferentes maneras de comprender los fenómenos, eje fundamental de nuestra propuesta de formación de docentes.

Introducción

Como se presenta a lo largo del texto, en este trabajo se derivan implicaciones para la formación de docentes en ciencias desde lo que hemos llamado perspectiva fenomenológica para la enseñanza de las ciencias (Ayala et al., 2018; Sandoval et al., 2018, 2021). Hacemos énfasis en que los docentes necesitamos comprender los objetos de estudio que enseñamos y para ello, nosotros, en particular, acudimos a los estudios histórico-críticos de las ciencias. Donde encontramos que la actividad experimental es un elemento clave para la producción de efectos y la estabilización de fenómenos en los procesos de constitución de dominios fenomenológicos; hallazgos que aportan una perspectiva para la formación en ciencias guiada a través de diferentes acciones como las siguientes:

- el establecimiento de las condiciones para la producción de efectos que puedan ser repetidos;
- la identificación de una cualidad o cualidades que den cuenta del fenómeno que se estudia;
- la determinación de variables que describen el fenómeno;
- la construcción de instrumentos de medida como forma de concreción de las organizaciones del fenómeno y poder establecer relaciones de orden de las cualidades identificadas;
- la expresión formal que da cuenta de las relaciones entre variables;
- la construcción de criterios conceptuales que generan nuevas situaciones experimentales.

Cuando los docentes en ciencias realizamos estas acciones, ganamos comprensión sobre los fenómenos y podemos pensar en el diseño de actividades que contribuyan a los procesos de enseñanza de las ciencias.

Desde nuestra perspectiva, la actividad experimental, los procesos de formalización y la construcción de dominios fenomenológicos son los aspectos principales en la generación de procesos de comprensión de los problemas de estudio en ciencias. En esta ocasión nos centraremos en la *estabilización* que acompaña la organización de conceptualizaciones y estructuraciones teóricas.

La expresión *estabilización del fenómeno* proviene de los estudios de Ian Hacking alrededor del papel del experimento en la construcción de conocimiento científico. Para Hacking (1996), como para nosotros, los fenómenos se organizan en relación con una serie de circunstancias que posibilitan el experimento, donde distinguimos y delimitamos los efectos que han de ser estudiados y que son resultado de análisis formales, no se encuentran espontáneamente en la naturaleza.¹

Los fenómenos son difíciles de producir de manera estable [...] hay una serie de tareas diferentes. Está la tarea de diseñar un experimento que podría funcionar. Y la de hacer que el experimento funcione. Pero tal vez lo más difícil es aprender a distinguir cuándo funciona el experimento. (Hacking, 1996, p. 259)

¿Qué significa que el experimento funcione? Para nosotros que estamos interesados en la formación de docentes en ciencias, significa que genere la posibilidad de producir efectos intencionados, duraderos, repetibles, reproducibles y controlados que permitan el estudio y la comprensión de los fenómenos.² Estas características del experimento implican que:

Una vez que se tienen identificadas estas características [las cualidades que se distinguen en un fenómeno] se propician las condiciones para ordenarlas y jerarquizarlas, para seleccionar cuál o cuáles son de mayor importancia en el estudio de esta clase de fenómenos, para argumentar cómo se puede asegurar tal importancia, qué relaciones por ejemplo de causalidad se han establecido entre las cualidades seleccionadas y los efectos producidos en las condiciones del experimento. (Sandoval et al., 2020a, p. 6)

En este sentido, para lograr *estabilizar los fenómenos* es necesario: producir y organizar efectos sensibles; diseñar y elaborar instrumentos para detectarlos, medirlos, compararlos y relacionarlos; y asignar términos, símbolos y representaciones desde las cuales hablar sobre esos efectos. La estabilización aporta a la producción de nuevos efectos, instrumentos y símbolos que ponen en juego las organizaciones conceptuales y fenomenotécnicas ya estructuradas.

A través de estos procesos de estabilización se está configurando un dominio fenomenológico que se origina en la interrelación de fenómenos distintos ya consolidados y se entiende como la emergencia de un nuevo mundo sensible, simbólico y tecnológico (Ayala et al., 2018, p. 5). En estas páginas presentamos un caso: El dominio de la electroquímica, que amplía esta idea sobre estabilización de fenómenos.

.....

¹ Sin embargo, nosotros no compartimos la perspectiva de Hacking sobre la separación entre el representar y el intervenir, pues consideramos que mantiene la oposición habitual entre el teorizar y el experimentar. La perspectiva fenomenológica en la que nos ubicamos nos distancia de considerar esta diada como opuesta (Ayala et al., 2018; Sandoval et al., 2018, 2021).

² En relación con esta idea el grupo ha estudiado los fenómenos térmicos, los fenómenos de acidez o la flotación de los cuerpos (Sandoval et al., 2018).

La electroquímica surge del trabajo experimental en la producción de corriente eléctrica y en la observación de la descomposición de sustancias a su paso, surge también de la comparación con los procesos de oxidación y agregación, de las formas de detección de las clases de sustancias descompuestas o transformadas, de la construcción de formas y aparatos para detectar y cuantificar la medida de las transformaciones, de la ampliación y repetición de efectos, entre otros. Esta actividad experimental conlleva al vínculo entre dos clases de fenómenos que inicialmente se consideraron independientes: los fenómenos de transformación química de las sustancias y los fenómenos de conductividad eléctrica.

A continuación, de los estudios históricos que hemos realizado, presentaremos: 1) el trabajo de Alessandro Volta (1745-1827) y la construcción de las pilas y 2) el vínculo de los procesos químicos que se producen en los electrolitos cuando pasa una cantidad de electricidad, a partir de los estudios de Humphry Davy (1778-1829) y Michael Faraday (1791-1867).

La utilización de las pilas en los procesos electroquímicos

A finales del siglo XVIII y principios del siglo XIX, se instalan los problemas que constituyen el dominio de la electroquímica con los trabajos de Volta sobre la construcción de la pila eléctrica. Esta consistía en la organización de pares de discos metálicos y cartones humedecidos que al disponerse de una manera específica podía generar efectos similares a los de las electricidades que en ese momento se consideraban de diferente clase: animal y artificial, la primera, la que se encontraba en los tejidos y músculos de los animales y, la segunda, la electricidad asociada a la producción de descargas eléctricas; en ambos casos los efectos de esas electricidades eran cortos y momentáneos.

Con la pila se conseguían electricidades de distinta magnitud (según los tipos y la cantidad de pares de metales) y permanecían estables mientras un círculo conductor³ entre estos estuviera cerrado. Esta disposición de apilamiento es una de las condiciones necesarias para producir efectos y su repetición, no solo para Volta o Luigi Galvani (1737-1798), sino para cualquiera dispuesto a producir electricidad.

Una forma de diferenciar los efectos del apilamiento se hace a través de las sensaciones que genera la pila al ponerse en contacto sus extremos a una parte sensible del cuerpo o a través de las contracciones que genera al conectarla sobre el tejido nervioso de animales. Volta establece semejanzas y explica diferencias entre las conmociones que ocasionan las pilas, los peces eléctricos o las máquinas electrostáticas.

La electricidad se explica en términos de un desbalance entre el poder de los metales que causa el movimiento del fluido, detectable tan pronto como las placas metálicas son conectadas en un círculo a través del animal, la pata de la rana o la lengua de Volta. Si los metales son iguales, o si se quita uno de los arcos metálicos, los efectos no son

.....

³ El círculo conductor es un término inicial que se refería a lo que ahora denominamos circuito eléctrico.

perceptibles, esto indica que no se origina el fluido eléctrico, y se fortalece la explicación de su desequilibrio, que hoy día reconocemos como la diferencia de potencial eléctrico. (Garzón et al., 2020, p. 10)

Pancaldi (2003, p. 185) afirma que estos efectos establecen una escala de metales de acuerdo con su poder para impulsar el fluido eléctrico en conductores húmedos,⁴ lo que deriva en las escalas de tensión del fluido eléctrico. La escala iniciaba con el zinc y terminaba con el carbono. Cuanto más distantes en la escala estaban los metales puestos en contacto entre sí, más vigoroso era el movimiento que imprimían en el fluido eléctrico. Las escalas de tensión nos dan un panorama más general sobre cuál es la magnitud de la electricidad producida y cuáles son las más apropiadas para unos o para otros casos. Los comportamientos estudiados coinciden con los efectos sensibles asociados, pero difieren en la magnitud de los mismos.

Se entiende, que para llegar a la comprensión de la pila es necesario: garantizar que los efectos se producen en las mismas condiciones con la juntura de metales o de los conductores húmedos con los metales o de los conductores húmedos entre sí; además poder explicar cómo se hacen estas junturas; por último, hacer alguna explicación de cómo entiende Volta la producción de tales electricidades y cómo contribuye a nuestro propio entendimiento de estos fenómenos. Toda esta actividad involucrada en la organización de los pares de metales según los efectos que generan corresponde a un momento de estabilización del fenómeno.

En este panorama, hemos asegurado que la juntura de diferentes metales produce una cantidad de electricidad, podemos haber actuado sobre algunas configuraciones de metales, pero no necesitamos hacer todas las parejas posibles para comprender los efectos que puede generar la pila. Ahora son parte de nuestro conocimiento. Se ha producido una generalización que va acompañada del convencimiento de que cada uno de los casos posibles es solo un ejemplo de la situación desde la cual se obtiene una fuerza electromotriz.

En esta etapa, sobresale el lenguaje nuevo que se incorpora a la explicación de los fenómenos eléctricos, como: la tensión eléctrica, la corriente eléctrica, la carga, y el círculo conductor (Garzón et al., 2020); sobresalen también el diseño y construcción de los aparatos implicados en la producción del efecto y su medición, como: electroscopios, cubas electrolíticas, los voltímetros, entre otros (Sandoval et al, 2020a). Con estos procedimientos se estabilizan: el proceso de construcción de la pila, los términos para hablar del dominio de la electricidad y se vinculan fenómenos electrostáticos con los fenómenos de corriente.

En el proceso de recontextualización que hemos realizado con docentes, se hacen organizaciones de la intensidad de los efectos que se producen al utilizar diferentes: pares de metales, número de parejas, sustancias conductoras y concentración de las

.....

⁴ Posteriormente este poder del impulso eléctrico recibe el nombre de fuerza electromotriz.

sustancias. En el aula de clase, estas disposiciones ayudan a identificar en qué momento hay que dejar algunos elementos constantes para producir efectos por la variación de otros, y de esta forma identificar la causa de los cambios y las relaciones entre variables, a través de las cuales se describen las situaciones, siendo éste un eje central en la enseñanza de las ciencias naturales (estas ideas han estado en la base de un material pedagógico y de divulgación dirigido a docentes en formación y en ejercicio de nuestra autoría: <https://sites.google.com/view/ehcec/el-efecto-voltaico> [Sandoval et al., s.f., 2022]).⁵

La transformación de las sustancias y la equivalencia electroquímica

La posibilidad de tener un aparato que pudiera producir electricidad de diferente intensidad, pero constante, fue importante para estudiar nuevos efectos. Por ejemplo, al conectar alambres metálicos con cada extremo de la pila a un recipiente con agua, Volta encontraba la producción de una cantidad continua de burbujas en uno de los alambres y en el otro su calcinación.⁶ Este tipo de efectos empiezan a ser estudiados por otros científicos, como Humphry Davy (1778-1829), quien identificaba que la electricidad producida por la pila generaba cambios en las sustancias, particularmente la producción de un gas inflamable.

En sus trabajos, presentados en *The Bakerian Lectures* (1826), una de las preguntas que Davy se propone resolver es ¿cómo determinar la magnitud de la transformación de las sustancias a causa de la electricidad? Él hace uso de: el galvanómetro de Cummings o el multiplicador de Schweigger,⁷ a través de los cuales la cantidad de electricidad involucrada en la transformación de la sustancia es medida por la deflexión que experimenta una aguja magnética por el paso de la corriente eléctrica. Para él, la magnitud de la cantidad de gas producido o la cantidad de metal “calcinado”, medida en masa o volumen, es proporcional a la deflexión en los galvanómetros. El trabajo que realiza Davy con estos instrumentos le permite tener un efecto que puede ser: 1) medido a través de la desviación de una aguja imantada y, 2) multiplicado por medio del aparato de Schweigger que amplía los efectos de desviación generados por corrientes de electricidad pequeñas (Sandoval et al., 2020b).

Davy revisa los cambios producidos sobre clases de sustancias: sales y álcalis, y su magnitud; presenta cada uno de los casos que desarrolla: cobre, zinc, aluminio, potasa, soda, alumina, magnesia, etc., y al final expone una generalización que nos indica cuáles son las transformaciones que se producen en cada uno de los grupos de sustancias,

.....

⁵ En el libro pedagógico: La electricidad transforma sustancias. El dominio fenomenológico de la electroquímica, hemos ampliado el tipo de actividades de experimentación para la enseñanza que son diseñadas y trabajadas con docentes en formación y en ejercicio (Sandoval et al., 2022, pp. 85, 121-131).

⁶ La calcinación se refiere al proceso de oxidación que sufren los metales al contacto con el gas oxígeno.

⁷ El multiplicador de Schweigger puede ser consultado de Schweigger Multiplier —1820— MagLab (nationalmaglab.org) y ha sido incluido en Sandoval et al. (2020a), el galvanómetro de Cumming se presenta en *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, Vol 1, 1822, p. 279.

indicando en qué se descomponen los álcalis, en qué se descomponen las sales y dónde se producen tales descomposiciones.

Un aspecto clave de su trabajo es: la medición de cambios químicos en relación con la cantidad de electricidad establece una relación transitiva entre las medidas: la magnitud de la electricidad que pasa a través de un cable conductor se puede medir por la deflexión de la aguja imantada colocada en su cercanía, lo cual lleva a pensar que, si la electricidad produce transformaciones de las sustancias, entonces la aguja imantada indica la cantidad de electricidad que circula a través de ellas.

Estabilizar, en esta etapa de estudio, es asegurar que conocemos bien la relación magnetismo-electricidad, que el aparato de Schweigger es un buen medidor de la electricidad que se está produciendo y que esa electricidad es suficiente para generar las transformaciones químicas. De tal forma que este proceso sea reproducible para diferentes sustancias y pasa a ser algo de lo que todos podemos hablar con significaciones comunes.

Notamos, entonces, que es necesario hacer un seguimiento de muchos casos de las transformaciones químicas producidas por el paso de electricidad para establecer cuáles son los cambios que se producen y cómo se pueden ordenar. Se requiere organizar un esquema formal en el que se identifiquen todos los casos, que haga posible caracterizar cuáles cambios se dan en los alambres y en las sustancias conductoras utilizadas.

Reconocemos que este proceso experimental aporta a nuestras propias comprensiones y a la de otros profesores. Preguntarnos por: ¿Qué medir cuando la juntura de dos metales produce electricidad acompañada de cambios químicos?, ¿qué medir para saber la magnitud de las transformaciones químicas en relación con la corriente eléctrica generada?, ¿si los procesos de electrólisis son iguales a los procesos de electrodescomposición? (Sandoval et al., 2022, pp. 136-137), nos obliga a considerar: inicialmente, en qué tipo de experiencias podemos estudiar estas transformaciones; y posteriormente, cuáles son los cambios posibles de describir y organizar.

Michael Faraday (1791-1867), en *Experimental Researches in Electricity* (1849), hace descripciones de una gran cantidad de descomposiciones, como lo hace Davy, y establece que los cambios químicos suceden tanto en los alambres que conectan la pila a la sustancia disuelta (a los que él denominará electrodos) como en las soluciones (denominadas por él electrolitos) y los clasifica en cambios primarios y secundarios. Los cambios primarios son debidos directamente a la acción de la corriente sobre los electrodos o sobre los electrolitos; y los cambios secundarios, son producto de la acción de unas sustancias sobre las ya producidas en los procesos primarios. Con la distinción entre cambios primarios y secundarios, Faraday establece una organización de este nuevo campo de fenómenos, que estabiliza formas de medir la magnitud de las transformaciones químicas.

En el análisis del trabajo de Faraday encontramos que el agua es el mejor electrolito para dar cuenta de la proporción entre cantidad de sustancia descompuesta y cantidad de electricidad involucrada. Por las siguientes razones que expresa Faraday:

No hay ninguna sustancia mejor adaptada, en circunstancias ordinarias, para ser el cuerpo indicador en tal instrumento que el agua; pues se descompone con facilidad cuando se hace mejor conductor por la adición de ácidos o sales; sus elementos pueden en muchos casos ser obtenidos y recogidos sin ningún inconveniente por la acción secundaria y, siendo gaseosos, están en las mejores condiciones físicas para la separación y medición. El agua, por tanto, acidulada por ácido sulfúrico, es la sustancia a la que me referiré en general, aunque pueda resultar conveniente en casos o formas de experimentación particulares utilizar otros cuerpos. (Faraday, 1849, p. 207)

De esta actividad experimental de Faraday destacamos los siguientes elementos para estabilizar la electrodescomposición, en relación con la construcción de magnitudes que dan cuenta del vínculo de fenómenos que eran de dominios independientes: la afinidad química y la conducción de electricidad:

- Cuando hay efectos secundarios, aunque es posible identificar los elementos que componen un electrolito, no resulta sencillo medir la proporción entre los diferentes elementos. Sin embargo, cuando en la electrodescomposición se tienen únicamente efectos primarios es posible encontrar relaciones constantes entre los elementos resultantes. Por ejemplo, se puede reconocer una proporción fija entre el hidrógeno y el oxígeno resultantes en la electrodescomposición del agua.⁸
- Es necesario considerar el hidrógeno y el oxígeno dentro del proceso de medida. El hidrógeno porque se encuentra como uno de los resultados permanentes en todas las electrodescomposiciones y por su característica de poca afinidad química con otras sustancias que hace que se encuentre de forma aislada en uno de los electrodos, y se pueda medir su cantidad de volumen. El oxígeno, porque es otro de los elementos que es posible identificar, ya sea en forma de gas, cuyo volumen podría ser medido; o como causa de los cambios secundarios, por su mayor afinidad con otros elementos, y encontrado en los electrodos oxidados, o en combinación con el electrolito resultante.
- La proporción entre oxígeno e hidrógeno, identificados para la electrodescomposición del agua, está vinculada con cantidades fijas de electricidad proporcionales siempre a las cantidades de hidrógeno encontrado. Por lo cual, el hidrógeno se convierte en un elemento fundamental para determinar proporciones de electricidad y de transformación química de las sustancias.

.....

⁸ En las electrodescomposiciones en general es posible encontrar una proporción entre las sustancias que se descomponen en los dos electrodos, sin embargo, cuando hay efectos secundarios no es sencillo determinar proporciones fijas entre todos los elementos. Se requiere entonces identificar proporciones que se deriven no solo del proceso de afinidad química sino a su vez en relación con la cantidad de electricidad involucrada en la descomposición.

De esta manera, en el trabajo de Faraday se encuentra que la descomposición del agua se utiliza como referencia para la creación de la unidad de medida que da cuenta de la actividad electroquímica involucrada en cada descomposición.

Para la descomposición del agua, la batería requería producir una misma cantidad de electricidad (medida por el galvanómetro) para una misma cantidad de hidrógeno recogido, en lapsos iguales de tiempo transcurrido. La hipótesis de trabajo de Faraday es que, para otras descomposiciones, donde se haga circular la cantidad de electricidad que produce el volumen de hidrógeno gaseoso establecido para el agua, se tiene una cantidad equivalente de las otras sustancias. Esta es la expresión de la equivalencia entre la cantidad de sustancia y la cantidad de electricidad, en cualquier electrodescomposición.

Con lo anterior, no sólo se produce una generalización sobre el tipo de cambios químicos causados por efecto de las corrientes eléctricas, sino que además se produce una relación de equivalencia entre estos dos aspectos. La equivalencia señala que, en tiempos iguales, si pasan las mismas cantidades de electricidad, se transforman las mismas cantidades de sustancias. En palabras de Faraday:

[...] para una cantidad constante de electricidad, cualquiera que sea el conductor de descomposición, ya sea agua, soluciones salinas, ácidos, cuerpos fusionados, etc. la cantidad de acción electroquímica también es una cantidad constante, es decir, siempre sería equivalente a un efecto químico estándar basado en la afinidad química ordinaria. (Faraday, 1849, p. 145)

Y añade:

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)

De esta manera, el estudio de la electrodescomposición de sustancias nos lleva a destacar las siguientes características de la estabilización del dominio de la electroquímica: 1) la realización de numerosas descomposiciones, utilizando electrodos de diferentes metales y electrolitos de diferente naturaleza, pues de esta forma se pueden encontrar ciertas regularidades o casos especiales; 2) la necesidad de acudir a un lenguaje para su descripción, y cualidades para su organización; 3) establecer nuevos efectos que son posibles de producir, medir y utilizar como referente para la constitución de una unidad de medida; y 4) vincular dos dominios diferentes desde la equivalencia entre acciones independientes: la acción química (vinculada a la transformación de las sustancias por la afinidad química) y la acción eléctrica (que explica la conducción de la electricidad por el electrolito).

Este proceso corresponde a un momento de consolidación del dominio de la electroquímica, orientada por preguntas que surgen de las descomposiciones, de las condiciones en las que se producen y de los marcos teóricos que la orientan.

Hasta esta parte del análisis, el trabajo de Faraday nos permite reorientar el abordaje de la electrólisis. El establecimiento de proporciones entre cantidad de metales descompuestos, cantidades de gas recolectado y cantidad de electricidad involucrada implica la disposición de instrumentos, la selección de sustancias y electrodos, y el registro de datos y resultados; asimismo la organización de las ideas que dan sentido a esa actividad práctica. En este caso preguntas como: qué pasa si: se aumenta la diferencia de potencial, se varía la concentración del electrolito, se varía la distancia entre los electrodos, ¿qué sucede en el seno del electrolito cuando circula la corriente?, y ¿cómo se piensa la corriente en el electrolito? emergen cuando tenemos el propósito de comprender el fenómeno de electrodescomposición y enriquecen los procesos de enseñanza (Véase el material de trabajo con propuestas de actividades dirigidas a profesores en formación y en ejercicio que pueden ser consultadas en: Sandoval et al. (2022, pp. 140-149) y en el sitio web: <https://sites.google.com/view/ehcec/celdas-electrol%C3%ADticas/los-trabajos-de-faraday> (Sandoval et al., s.f.).

La construcción de voltaelectrómetros⁹

Faraday asegura “que la potencia química, al igual que la fuerza magnética [que explican la posibilidad que unos elementos se unan entre sí y otros no], *está en proporción directa con la cantidad absoluta de electricidad que pasa* [por el electrolito]” (Faraday, 1849, p. 107, La itálica es del original). Esta afirmación surge al considerar que la descomposición que la acción química sólo depende de la acción eléctrica y agrega, además, que sólo depende de la electricidad (Faraday, 1849, p. 146). Para sostener esta afirmación relaciona los cambios químicos durante la electrodescomposición con otras variables como: la concentración de los electrolitos, la variación de la clase y del tamaño de los electrodos, la distancia entre ellos, y así garantizar que la descomposición es resultado de la acción de la electricidad. Por ejemplo:

El siguiente punto con respecto al cual se probó el principio de acción electroquímica constante fue la *variación de intensidad*. En primer lugar, se repitieron los experimentos anteriores, utilizando pilas de *igual* número de placas, *fuerte y débilmente* cargadas; pero los resultados fueron similares. Luego se repitieron, usando pilas que a veces contenían cuarenta, y otras veces sólo cinco pares de placas; pero los resultados seguían siendo los mismos. Por lo tanto, las *variaciones en la intensidad*, causadas por la diferencia en la fuerza de la carga o en el número de alternancias utilizadas, *no produjeron diferencia en cuanto a la acción igual de los electrodos grandes y pequeños*. (Faraday, 1849, p. 213. La itálica es del original)

.....
⁹ Michael Faraday llamó a su aparato voltaelectrómetro que posteriormente derivó a voltámetro, denominación que se utiliza actualmente.

Faraday reconoce el diseño y la repetición de experimentos con los que estudia las condiciones de la electrodescomposición que inciden sobre los resultados obtenidos. En la cita del ejemplo, se indica que variar la intensidad de la electricidad producida por la pila y que se pone en contacto con el electrolito, no es una condición que altere la cantidad de sustancia descompuesta siempre y cuando se haga pasar la misma cantidad de electricidad.

En este punto del desarrollo de la electroquímica, la identificación de las cualidades que describen un fenómeno, que son posibles de cuantificar (como es la producción de hidrógeno en la descomposición) y que conduce a la construcción de instrumentos de medida, son los medios necesarios para garantizar que se mide la magnitud que se busca medir, por lo que requiere también estabilizar el fenómeno.

Faraday afirma:

El instrumento ofrece el único *medidor real* de electricidad voltaica que poseemos actualmente. Porque sin verse afectado en absoluto por variaciones en el tiempo o intensidad, o alteraciones en la corriente misma, de cualquier tipo, o por cualquier causa, o incluso de pausas de acción, toma nota con exactitud de la cantidad de electricidad que ha pasado a través de ella, y revela esa cantidad mediante inspección; por lo tanto, lo he denominado un *voltaelectrómetro*. (Faraday, 1849, p. 217. La itálica es del original)

El uso de galvanómetros para medir la cantidad de electricidad; la identificación de la cantidad de gas hidrógeno como referente de la cantidad de sustancia a medir en cada cambio químico; y la construcción de voltaelectrómetros, estabilizan la relación de equivalencia entre cantidades de transformación química y de conducción electro-lítica. Entonces, diseña la manera de recolectar la cantidad de hidrógeno producto de la electrodescomposición sin que se mezcle con el oxígeno, o con cualquier otro gas, e identifica cuáles son los electrolitos y los electrodos que le sirven para establecer el equivalente en hidrógeno de la cantidad de electricidad involucrada en la descomposición del agua.

Los dispositivos diseñados consistían en tubos de vidrio donde se pudiera introducir el electrolito, los electrodos y se recolectara el hidrógeno:



Figura 1. (Faraday, 1849, Plate IV, Serie VII)

En las figuras anteriores se encuentran tres voltaelectrómetros conformados por tubos rectos o en ángulos graduados, en donde se introducen alambres de platino que actúan como electrodos y luego se llenan los tubos con agua acidulada. Uno de los extremos del tubo es abierto para que salga el oxígeno producido y el otro extremo es cerrado para no dejar escapar el hidrógeno, de esta manera se garantiza que los gases no se recombinen. La escogencia de agua acidulada y del metal de los electrodos se debe a la necesidad de que no se produzcan cambios secundarios y que la descomposición del agua en cantidades definidas de hidrógeno sea la descomposición de referencia.

Con el voltaelectrómetro, Faraday ha definido las variables (volumen de hidrógeno, unidad de electricidad) y la manera de relacionarlas (una cantidad constante de electricidad corresponde a una cantidad constante de acción electroquímica). Con esto da cuenta del fenómeno electroquímico y de esta manera realiza una serie de disposiciones experimentales para estudiar por ejemplo la solubilidad de los gases que son producidos en la descomposición, el efecto de la variación de la intensidad de corriente que atraviesa los electrodos y la fuerza de la solución dada por las concentraciones de los electrolitos (Sandoval et al, 2022, p. 61).

Regresando nuevamente a la idea de Hacking, la estabilización de fenómenos no consiste simplemente en repetir una y otra vez el mismo experimento, “las repeticiones serias de un experimento son intentos de hacer mejor la misma cosa —producir una versión más estable, con menos ruido del mismo fenómeno” (Hacking, 1996, p. 260). Para nosotros esa mejora consiste en la actividad experimental que está orientada por unas preguntas y unos esquemas teóricos existentes que se ponen en juego para organizar el nuevo dominio fenomenológico. Se destaca que en esta actividad los instrumentos (el voltaelectrómetro y el galvanómetro) y organizaciones experimentales (comparación de efectos generados con electrodos diferentes o concentraciones diferentes del electrolito, por ejemplo) son maneras de estabilizar el dominio fenomenológico.

Reflexiones para la formación de docentes de ciencias

En las diferentes actividades experimentales destacadas del proceso de constitución de la electroquímica, vemos cómo la construcción de conocimiento científico ha estado mediada por el diseño y construcción de instrumentos y formas de medida, y cómo los instrumentos y los experimentos evolucionan de la mano de teorías que interpretan los datos que los instrumentos producen y generan un dominio de fenómenos estable. Se entiende por estabilización una actividad por la cual se objetivan resultados, procesos y medios de experimentación y se unifican formas y técnicas de aplicación. Se crea un lenguaje y se hace uso de las magnitudes medidas por los aparatos construidos, que llegan a ser parte de un dominio público y social mucho más amplio. Al respecto, Germán Guerrero (2012) señala que entre las funciones de los experimentos están las de crear, producir, refinar y estabilizar fenómenos. “La estabilización experimental de un fenómeno consiste en darle

identidad al fenómeno, en mostrar que es repetible y que lo es bajo distintos contextos y condiciones” (Guerrero, 2012, p. 18).

En síntesis, la estabilización del fenómeno es una actividad que acompaña la delimitación de las cualidades que distinguen la clase de fenómenos que estudiamos, la producción de escalas, formas y aparatos de medida y la producción de esquemas formales que aportan en la comprensión sobre cómo ocurren las transformaciones de las sustancias frente al paso de corriente eléctrica.

Estas ideas de estabilización llevan a caracterizar el rol que la actividad experimental tiene en la construcción de conocimiento científico:

La delimitación de las cualidades que distinguen un fenómeno o un dominio fenomenológico, lo cual aporta para construir escalas de medida y con ello comprender las condiciones que influyen en la producción de los efectos estudiados, en el vínculo de una cualidad a otra, y en dar razones por las cuales se considera que se produce un efecto mayor o menor.

Cuando previamente se desconoce el resultado de la experimentación, los científicos establecen un criterio de trabajo que orienta una etapa de exploración intencionada, que admite diversas posibilidades de disposición y resultados experimentales. Desde este estado de organización del fenómeno se encuentran elementos que son válidos para todos los casos posibles, es decir, se identifican aquellas situaciones que son generalizables y a partir de las cuales se estabiliza el dominio fenomenológico.

En estos procesos, notamos la importancia de identificar cuál es la unidad de medida porque es establecer el invariante con el cual se comparan los efectos producidos en los diferentes casos de la experimentación, como se mostró en el caso de los voltaelectrómetros.

La actividad experimental juega un rol similar en la construcción de conocimiento en las clases de ciencias y por tanto en la formación de docentes. Podemos afirmar que, estudios históricos, como el que hemos presentado, propician la generación de preguntas, procedimientos posibles, montajes experimentales viables para nuestras clases. Ayudan a que los docentes se comprometan con el estudio de un dominio fenomenológico, al poner en juego sus saberes iniciales con respecto a una base de experiencias que puede ser cuestionada, rectificadas o ampliada. Sin embargo, resultaría ingenuo pensar que la transmisión de teorías y hacer uso de los instrumentos de medida, o construir pilas u otros artefactos artesanales en las clases de ciencias son suficientes para que se propicie la construcción de fenomenologías en los procesos de enseñanza (Ayala et al., 2018; Sandoval et al., 2018, 2021). En este sentido, consideramos tres criterios para orientar las decisiones de los docentes al momento de generar propuestas de enseñanza: tematizar, experimentar y teorizar (Garzón et al., 2020).

Tematizar consiste en que el docente plantee problemáticas, se haga preguntas y razone sobre el fenómeno que enseña, entre en diálogo con la ciencia y sus resultados. De aquí, el profesor podrá tomar decisiones sobre la organización de los fenómenos, la forma como los presenta y discute en sus clases. Experimentar, permite interpretaciones

y descripciones estructurantes de los fenómenos y argumentaciones sobre lo que se observa, derivando organizaciones teóricas para describir y comprender el mundo, además de las acciones prácticas para hacerlo. Y teorizar consiste en explicitar las generalizaciones que se identifican en la actividad experimental intencionada y que muestra las organizaciones conceptuales que emergen al momento de definir magnitudes, relaciones entre magnitudes, unificación de fenómenos, establecimiento de analogías, etc. “Esto obliga que el profesor conciba que los estudiantes podrían tener diferentes argumentos y estrategias para obtener esas generalizaciones, para representarlas y discutir las a la luz de las otras experiencias” (Garzón et al., 2020, p. 18).

Estos procesos son contextuales, por lo cual, la selección que hacen los docentes depende de su intencionalidad de trabajo en el aula, de sus preguntas y las de sus estudiantes. En este sentido, no proponemos qué es lo que se debe enseñar como tampoco cuáles son los pasos a seguir, aunque el proceso pueda coincidir con secuencias análogas a las acaecidas históricamente en la estabilización de los fenómenos. De este modo, el profesor se puede acercar a los estudios históricos, con intenciones diferentes a replicar lo que hicieron los científicos, y tomar decisiones para comprender los fenómenos que aborda en sus clases desde sus propias preguntas y enriquecer la perspectiva que tiene sobre el experimento, la teoría, la necesidad de considerar nuevas experiencias y evocar otras.

Agradecimientos

Este artículo se produce en el marco de los proyectos de investigación: DQU560-21 Teorización y formalización en la estructuración de la relación carga-ion. Fundamentos para la enseñanza de las ciencias y DQU535-20 Estructuración teórica en la consolidación de un dominio fenomenológico. De la electroquímica al ion. Abordaje para la enseñanza de las ciencias, financiados por el Centro de Investigaciones (CIUP), Universidad Pedagógica Nacional de Colombia. Agradecemos también las sugerencias de los evaluadores asignados.

Bibliografía

- Ayala, M., Malagón, J. F., Sandoval, S., & Garzón, M. (2018). Constitución de un dominio fenomenológico para la enseñanza de las ciencias. Implicaciones desde el estudio del caso del fenómeno voltaico. *Ensaio. Pesquisa em Educação em Ciências*, 20, 1-23. <https://doi.org/10.1590/1983-211720182001017>
- 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* (Vol 1.). University of London.
- Garzón, M., Tarazona, L., Sandoval, S., Malagón, J. F., & Ayala, M. (2020). El efecto Volta. Un caso de estudio sobre la producción de efectos sensibles y los procesos de teorización en ciencias. *Ensaio. Pesquisa em Educação em Ciências*, 22, 1-22. <https://doi.org/10.1590/1983-21172020210113>

- Guerrero, G. (2012). Datos, fenómenos y teorías. *Estudios de Filosofía*, (45), 9-32. <https://doi.org/10.17533/udea.ef.13475>
- Hacking, I. (1996). *Representar e intervenir*. Editorial Paidós.
- Pancaldi, G. (2003). *Volta. Science and Culture in the Age of Enlightenment*. Princeton University Press. <https://doi.org/10.1515/9780691188614>
- Sandoval, S., Malagón, J. F., Garzón, M., Ayala, M., & Tarazona, L. (2018). *Una perspectiva fenomenológica para la enseñanza de las ciencias*. Universidad Pedagógica Nacional.
- Sandoval, S., Malagón, J. F., Garzón, M., & Tarazona, L. (2020a). La electroquímica: un nuevo ámbito de fenómenos, la experiencia que se construye y la síntesis teórica que se pone en juego. *História da Ciência e Ensino. Construindo interfaces*, 21, 3-31. <https://doi.org/10.23925/178-2911.2020v21p3-31>
- Sandoval, S., Malagón, J. F., Garzón, M., & Tarazona, L. (2020b). Los procesos de síntesis teórica y la estabilización de un campo de fenómenos. En A. A. Ilcic, S. Mondaca, P. Torres & A. N. Venturelli (Eds.), *30ª Jornadas de Epistemología e Historia de la Ciencia* (pp. 135-145). Editorial de la Facultad de Filosofía y Humanidades, Universidad Nacional de Córdoba.
- Sandoval, S., Malagón, J. F., Garzón, M., & Tarazona, L. (2021). Estudio de dominios fenomenológicos para la enseñanza de las ciencias. En *Itinerarios de la investigación educativa y pedagógica* (pp. 185-194). Universidad Pedagógica Nacional.
- Sandoval, S., Malagón, J. F., Garzón, M., & Tarazona, L. (2022). *La electricidad transforma sustancias. El dominio fenomenológico de la electroquímica*. Universidad Pedagógica Nacional.
- Sandoval, S., Malagón, J. F., Garzón, M., & Tarazona, L. (s.f.). Grupo de estudios histórico críticos y enseñanza de las ciencias (<https://sites.google.com/view/ehcec/home>).

Reflexiones filosóficas e históricas: ciencia, enseñanza de la ciencia y política científica



Associação de Filosofia
e História da Ciência do Cone Sul
Asociación de Filosofía
e Historia de la Ciencia del Cono Sur

