

La Electroquímica: Un nuevo ámbito de fenómenos, la experiencia que se construye y la síntesis teórica que se pone en juego.

Sandra Sandoval Osorio

José Francisco Malagón Sánchez

Marina Garzón Barrios

Liliana Tarazona Vargas

Resumen

En el presente artículo se hace un análisis histórico crítico del proceso que llevó a consolidar la electroquímica como un dominio fenomenológico. Se identifica, un primer momento, donde dominios en apariencia disyuntos y con un alto nivel de organización, la electrostática y la química de antes de 1800, terminan fusionándose en uno nuevo: la electroquímica. Se muestra, en un segundo momento, cómo la batería voltaica y la comprensión de su funcionamiento y su uso, son el elemento que fundamenta y estructura el proceso anterior de unificación. Se destaca que para explicar el funcionamiento de las baterías se deben tomar como referencia los desarrollos de la electrostática y también se requiere adelantar una serie de procedimientos para medir las magnitudes asociadas como potencial, carga, corriente, así como diseñar una serie de instrumentos para medir dichas magnitudes. Se destaca también que la pregunta por lo que sucede en los electrolitos y los cambios químicos que se provocan al ser atravesado por una corriente eléctrica, así como los cambios en los electrodos en los casos del electrolisis, dan origen a nuevas preguntas que llevan a constituir un nuevo ámbito de investigación: La actividad eléctrica que ocurre en las baterías está íntimamente relacionada con propiedades y cambios químicos de las sustancias involucradas.

Este estudio histórico crítico nos genera elementos para estructurar y proponer rutas de aula centradas en la construcción y constitución de un nuevo dominio fenomenológico.

Palabras clave: Análisis histórico-crítico; Enseñanza de la electroquímica; Pila voltaica; Dominio fenomenológico.

Resumo

Este artigo faz uma análise histórica crítica do processo que levou à consolidação da eletroquímica como um domínio fenomenológico. Identifica-se, em um primeiro momento, domínios que, aparentemente, eles são disjuntos e cada um de les tem um alto nível de organização, eletrostática e química antes de 1800, finalmente eles se fundem em um novo: eletroquímica. Mostra, em um segundo momento, como a bateria voltaica e a compreensão de sua operação e uso são os elementos subjacentes e estruturam o processo de unificação anterior. Enfatiza-se que, para explicar o funcionamento das baterias, os desenvolvimentos eletrostáticos devem ser tomados como referência e também é necessário avançar uma série de procedimentos para medir as magnitudes associadas, como potencial, carga, corrente e também projetar uma série de instrumentos para medir essas magnitudes. Destaca-se também que a pergunta sobre o que acontece nos eletrólitos e as alterações químicas causadas ao atravessar uma corrente elétrica, bem como as alterações nos eletrodos nos casos de eletrólise, suscitam novas questões que levam a constituir uma nova área de pesquisa: A atividade elétrica que ocorre nas baterias está intimamente relacionada às propriedades e alterações químicas das substâncias envolvidas.

Este estudo histórico crítico gera elementos para estruturar e propor rotas de sala de aula focadas na construção e constituição de um novo domínio fenomenológico.

Palavras-chave: Análise Histórico-Crítica; Ensino de eletroquímica; Bateria voltaica; Dominio fenomenológico.

Abstract

This article does a critical historical analysis of the process that led to consolidate electrochemistry as a phenomenological domain. It is identified, a first moment, where domains in apparently insolated and with a high level of organization, electrostatics and chemistry before 1800, they are fused into a new one: electrochemistry. It shows, in a second moment, how the voltaic battery and the understanding of its operation and its use, are the element that

bases and structures the previous unification process. It is emphasized that to explain the operation of the batteries, the electrostatic developments must be taken as a reference and it is also necessary to advance a series of procedures to measure the associated magnitudes such as potential, charge, current, as well as to design instruments to measure these magnitudes. It is also highlighted that the question about what happens in the electrolytes and the chemical changes that are caused when being crossed by an electric current, as well as the changes in the electrodes in the cases of electrolysis, give rise to new questions that lead to constitute A new area of research: The electrical activity that occurs in batteries is closely related to properties and chemical changes of the substances involved.

This critical historical study generates elements to structure and propose classroom routes focused on the construction and constitution of a new phenomenological domain.

Keywords: Historical-critical analysis; teaching of electrochemistry; Voltaic battery; Phenomenological domain.

INTRODUCCIÓN

Cuando presentamos nuestra perspectiva de una enseñanza de las ciencias centrada en la constitución de fenomenologías, uno de los énfasis que hemos trabajado es que tanto los procesos de producción de efectos sensibles, como los procesos de síntesis teóricas son constitutivos de la actividad cognitiva que está comprometida en el aprendizaje de las ciencias¹. Una de las rutas a las que hemos acudido para fundamentar esta perspectiva es el análisis de textos de científicos (fuentes primarias) que abordan problemáticas que son objeto de nuestro estudio y cuya lectura esta direccionada por nuestras preguntas².

Para empezar, debemos señalar que para referirnos a las fenomenologías hemos acuñado términos como dominios o campos fenomenológicos en los cuales confluyen experiencias diferentemente organizadas que nos permiten realizar acciones intencionadas sobre objetos y procesos, así como hablar de una clase de fenómenos. Por ejemplo, contamos con sensaciones que aparecen como naturales, frente a las cuales los sujetos contamos con una experiencia bastante organizada, que es un punto importante para iniciar, en las clases de ciencias, la constitución del campo de la calorimetría y de la termodinámica. Sin embargo, en otros casos esta experiencia inicial no se da en las relaciones que establecemos con el mundo en nuestra experiencia cotidiana y es necesario construirla, por ejemplo, en el caso del electromagnetismo o del caso estudiado aquí de la electroquímica.

¹ Algunos elementos de esta perspectiva se pueden encontrar en la reciente publicación de los autores: Sandra Sandoval et al., *Una perspectiva fenomenológica para la enseñanza de las ciencias* (Fondo Editorial Universidad Pedagógica Nacional. 2018) Este constituye un buen balance de lo que el grupo ha considerado y demarcado desde hace aproximadamente una década.

² En el texto de los autores: Ayala, María Mercedes., José F. Malagón., & Sandra Sandoval. "La historia en la enseñanza de las ciencias. Una relación polémica" En: *Construcción de fenomenologías y procesos de formalización* (Editorial Universidad Pedagógica Nacional. 2013: 21), se establece que este 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.

Pero, en ambos casos, sea la construcción de la experiencia o la ampliación de la misma, esto es una condición para poder **hablar** de la fenomenología de estudio, es la manera en que los sujetos podemos distinguir el asunto de estudio al cual nos estamos refiriendo.

El caso de la electroquímica, que tratamos en este artículo, es considerado por nosotros un dominio fenomenológico que es necesario construir a partir de comprender los sucesos que se generan cuando se ponen dos metales diferentes en contacto con un electrolito, y analizar los cambios que se producen en el electrolito y en los electrodos cuando hay corrientes eléctricas. Estas dos cuestiones son tratadas a partir de montajes experimentales en donde se pone en contacto distintos metales y se observan los cambios que suceden en la tensión generada, o en las sustancias metálicas que intervienen.

A pesar que tengamos metales y líquidos en contacto a nuestro alrededor, las relaciones entre metales y electrolitos no son cotidianas, se requiere una observación intencionada y educada, que detalle en este tipo de efectos y que permita hablar de ello. Este es un punto que tratamos en el presente artículo, para lo cual recurrimos al estudio de las experiencias y las preguntas que dieron origen a la relación entre los fenómenos químicos y los fenómenos eléctricos, y que posteriormente fueron constituyendo el campo de la electroquímica.

EL EXPERIMENTO EN LA CONSTRUCCIÓN DE CAMPOS FENOMENOLÓGICOS.

El análisis del campo de la electroquímica nos ha permitido poner en juego las consideraciones que en anteriores investigaciones hemos profundizado sobre el papel del experimento en la construcción de fenómenos. Esta visión considera el experimento como una actividad de construcción de conocimiento, imbricada en procesos de organización conceptual e imprescindible durante las estructuraciones teóricas, sobre todo aquellas que se suelen denominar leyes empíricas. Se distancia de aquellas posturas tradicionales de la enseñanza de las ciencias que plantean el experimento como una actividad motivadora para la clase, o una manera de confirmar los hechos o conceptos científicos, o una forma de aprender técnicas y protocolos científicos, o una manera de derivar las relaciones entre magnitudes que se expresan en la formulación matemática de las leyes científicas. Hacemos la salvedad que no se trata de negar que estos roles del experimento sean posibles, sino de mostrar que para la construcción de fenómenos resulta no solo útil, sino además constitutivo, vincular la experiencia que tienen los sujetos con sus organizaciones del mundo.

Esta forma de concebir el experimento para la enseñanza de las ciencias nos permite abordar la construcción de campos fenomenológicos, la ampliación de la experiencia, la conceptualización de magnitudes, unidades de medida y aparatos de medida como parte de una fuerte comprensión de los

fenómenos de estudio. Esto lo hemos puesto en juego para el caso de la electrostática y la electroquímica, esta última el caso del que nos ocupamos aquí.

Consideramos que cuando se estudian fenómenos eléctricos en la clase de ciencias, no basta con que los sujetos vean una chispa o tengan acceso a aparatos que funcionan con electricidad. Hoy en día, tenemos mucha experiencia en el uso de aparatos, pero cuando ponemos el acento en la comprensión de su funcionamiento no hay una experiencia sensible que dé cuenta de tal comprensión, en otras palabras, no hay manera de relacionar el funcionamiento de un aparato eléctrico con los chispazos o los corrientazos, a lo sumo se acepta que también son electricidad.

Además, cuando empezamos a abordar las temáticas de electricidad en clase, empezamos por hacer ejercicios de frotar un peine o una barra de silicona con un paño o con el cabello y vemos la atracción hacia algunos pedacitos de papel, y otros ejercicios similares, después empezamos a explicar lo que es un campo eléctrico, el potencial y la carga eléctrica, pero estas experiencias iniciales requerirían mayor trabajo para poder establecer, efectivamente, relaciones con los aspectos tratados, pues en un momento inicial se parecen más a los efectos de atracción magnética.

Consideramos que si los profesores de ciencias no pensamos y diseñamos experiencias que busquen constituir el campo de fenómenos que queremos estudiar, lo máximo que logramos es proponer actividades circunstanciales que aportan muy poco a la comprensión de los fenómenos científicos. Pero, además, consideramos que es imprescindible pensar y diseñar experiencias para dar la posibilidad de construir el campo de fenómenos al cual nos vamos a referir en nuestros estudios.

En primer lugar, resaltamos que el experimento es una actividad que aporta a la definición y delimitación de las cualidades que distinguen una clase de fenómenos. Para empezar a hablar de una clase de fenómenos no basta con señalar las cualidades de forma, tamaño, olor, color que lo distinguen, o de los efectos que produce sobre otros objetos o disposiciones experimentales, como dijimos antes en electricidad no basta con saber que se producen chispas o corrientazos, en química no es suficiente saber que se producen burbujes, o cambios de color, olor o sabor. Una vez que se tienen identificadas estas características 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.

Estas operaciones de ordenación, jerarquización, de producción de efectos, de relaciones de causalidad instalan en la percepción y en el lenguaje el campo de fenómenos que queremos estudiar.

En segundo lugar, destacamos que experimento se convierte en una instancia que nos ayuda a operar sobre la clase de fenómenos que estudiamos.

En esta instancia se privilegia el desarrollo de clasificaciones, ordenaciones de mayor o menor que en diferentes y específicas condiciones experimentales. Estas ordenaciones y clasificaciones son propicias para construir escalas de medida que fundamentan la construcción de magnitudes y aparatos de medida.³

Para poder reconocer estas distintas posibilidades e integrarlas a nuestra postura sobre la enseñanza de las ciencias, hemos acudido a los escritos de los científicos que, ubicados en un contexto histórico diferente, nos permiten analizar y estudiar cómo lograron organizar un determinado campo fenomenológico.

En ese punto, es importante precisar: Consideramos que los profesores de ciencias somos estudiosos de la ciencia, y por esto, los análisis de textos de otros científicos aportan a nuestra comprensión de los fenómenos y nos ayuda a idear y enriquecer los procesos de enseñanza. No pretendemos afirmar que tal como se procede en la construcción de los fenómenos científicos se debe proceder en la enseñanza de las ciencias, sino que, su historia nos hace partícipes de las formas de pensar y proceder en el estudio de los fenómenos, y nos abre un campo de reflexiones de las cuales acogemos aquellas que nos permiten dar sentido a la enseñanza.

En este reconocimiento de la riqueza que la historia de las ciencias nos proporciona para la enseñanza hemos encontrado que también para los científicos es necesario crear lenguajes para referirse a fenómenos (por ejemplo, el trabajo de Volta, Davy o Faraday así lo muestran) y establecer relaciones entre fenómenos que apenas empiezan a estudiarse⁴.

En este artículo presentaremos la actividad que subyace a la estructuración de la electroquímica como campo fenomenológico que emerge de la interrelación entre clases de fenómenos distintos ya consolidados, cada clase de fenómenos por sí solo, con un alto nivel de organización, donde se han establecido magnitudes, formas y aparatos de medida. Presentamos a continuación el análisis que hemos logrado en el estudio del proceso de relación de estos campos de fenómenos en su desarrollo durante el siglo XIX.

ESTUDIO HISTÓRICO CRÍTICO DE LA CONSTITUCIÓN DE LA ELECTROQUÍMICA

³ En este trabajo no damos por sentado el aparato de medida, sino que la comprensión del mismo pasa por comprender qué mide y cómo mide lo que se quiere medir.

⁴ Sandoval et al., 38

El estudio de caso ha sido construido teniendo en cuenta textos de los científicos de diferentes momentos y con la intencionalidad pedagógica expresada antes. La conformación de la electroquímica como campo fenomenológico, ya dijimos, nos interesa porque tiene la particularidad de que allí se establecen relaciones entre campos fenomenológicos aparentemente disyuntos, pero cada uno con una alta organización, donde ya hay magnitudes, formas de medida y aparatos de medida. Cómo se establecen estas relaciones, es un interrogante que nos ha permitido caracterizar procesos de constitución de campos fenomenológicos y síntesis teórica.

A continuación, 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 campo 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 medida de electricidades débiles.

- **Explicar el fenómeno de la electricidad animal en términos análogos a cómo se explica la electricidad voltaica**, esto es, por el contacto de dos materiales diferentes que dan lugar a las tensiones eléctricas; a pesar que las descargas y las chispas eléctricas producidas por las máquinas electrostáticas son efectos completamente distintos a los efectos generados en las experiencias de Volta y Galvani, las conmociones eran análogas en los dos campos, lo cual hace pensar que no se trataba de una electricidad de distinta clase. Las descargas en las baterías de Volta producen conmociones de la misma naturaleza que las producidas en las ranas por el contacto con dos metales, o las producidas por las descargas en las máquinas electrostáticas.

En los experimentos relatados por Volta para mostrar la acción de la electricidad sobre parpados, lengua, ojos, orejas, piel, y describir la clase e intensidad de las conmociones, los espasmos y los entumecimientos a los cuales se ve sometido por el paso de lo que ha denominado *fluido eléctrico*, **se distingue y se delimita el campo de efectos o de cualidades** desde donde se hablará de electricidad y de tensiones eléctricas, y también hace una descripción precisa del arreglo experimental en el que se dan tales efectos:

Los efectos sensibles a nuestros órganos que produce un aparato formado por 40 o 50 pares de platos, (e incluso menor si uno de los metales es plata o cobre, el otro zinc), no se reducen simplemente a conmociones: la corriente del fluido eléctrico, movido y actuado, por un tal número y especies de conductores distintos, plata, zinc y agua, dispuestos alternativamente de la manera descrita, no provoca sólo *contracciones* y espasmos en los músculos, convulsiones más o menos violentas en los miembros que atraviesa en su recorrido, sino que irrita también los órganos del gusto, de la vista, del oído y del tacto, propiamente dicho, produciendo sensaciones propias de cada uno⁵.

En el trabajo de Volta se destacan dos aspectos: consolida un nuevo campo de estudio que es de la producción de corrientes estacionarias por el contacto entre metales diferentes formando un círculo cerrado. Para esto se vale de construir un campo de efectos sensibles y además de desarrollar condiciones, formas y aparatos de medida.

Lo otro que hay que destacar es que, para consolidar este nuevo campo de estudio, se vale de los avances que se han dado en la electrostática y de los desarrollos de Galvani sobre la denominada electricidad animal. A partir de este trabajo en el cual se acude a hacer analogías, usar conceptos de la electrostática o establecer equivalencias entre efectos, es que se consolida un campo de estudios que es la **Electricidad**.

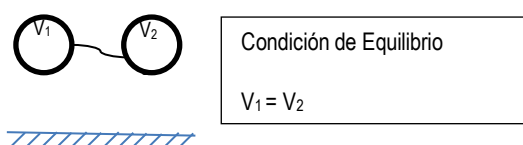
- **Ejemplificar cómo los aparatos de medida terminan siendo un factor de unificación**, ya que se usan los mismos aparatos y las mismas magnitudes. Es el caso del uso de aparatos y medidas reconocidas y utilizadas en el campo de la electrostática como la tensión eléctrica para organizar el campo recientemente establecido de las baterías. Los experimentos realizados por Volta sobre este aspecto

⁵ Alexander Volta. Opere I. *Mémoire sur l'électricité excitée par le contact mutuel des conducteurs même les plus parfait*. 459-490. Real Academia. Milano. 1818. Una edición también consultada es Volta, Alessandro. *Sobre la electricidad excitada por el simple contacto de sustancias conductoras de distintas especies*. Traducción hecha por Colombo, Emma Sallent. Lull: Revista de la Sociedad Española de Historia de las Ciencias y de las Técnicas, v. 23, no 48, (marzo, 1800 / Octubre, 2000): 776

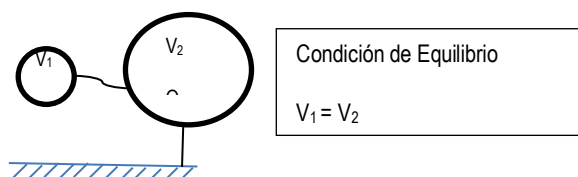
además de mostrar que la causa reside en el contacto de los metales, logra hacer ordenaciones de mayor a menor intensidad de las tensiones.

Se examinan las condiciones de equilibrio eléctrico: En electrostática cuando se tienen dos o más cuerpos cargados de diferente forma y se ponen en contacto, hay dos magnitudes que caracterizan estos fenómenos que son la carga y la tensión o diferencia de potencial. Al considerar dos condiciones para este análisis, tenemos:

a) Si los cuerpos son iguales geoméricamente, el equilibrio se alcanza cuando las cargas Q y el potencial de los cuerpos son iguales.



b) Si los cuerpos son geoméricamente diferentes el equilibrio se alcanza cuando los potenciales se igualan. En este caso las cargas Q que alcanzan los cuerpos son diferentes.



Estas mismas condiciones de equilibrio se deberán cumplir para el caso de la electricidad animal y de la electricidad voltaica.

En el caso de la electrostática asistimos a un campo ya estructurado, de tal manera que existen ya aparatos como los electros copios, los electróforos, los condensadores, que responden a una alta organización de los efectos eléctricos y que permiten diferenciar magnitudes de medida específicas. Se utilizan estos aparatos para generar tensiones eléctricas comprometiendo cargas o cantidades de electricidad.

Las botellas de Leyden, las cuales se han estudiado ampliamente, se convirtieron en un dispositivo que se utiliza para hacer analogías entre esta electricidad y las otras dos. La botella de Leyden es el ejemplo más familiar de condensador o acumulador de electricidad.

La condensación eléctrica y el primer condensador fueron descubiertos basándose en la idea que la electricidad se comporta como un fluido. Como se había observado, los cuerpos electrificados se descargaban lentamente (lo cual se debe a que el aire húmedo es conductor), a mediados de siglo XVIII se atribuía este fenómeno a una evaporación de la electricidad. Por 1745 E. G. von Kleist, de Pomerania, propuso encerrar la electricidad en una botella tapada (semejante a cuando se coloca un líquido en un

recipiente). Para ello dispuso en el interior de una botella de vidrio un conductor (agua o láminas metálicas) la tapó y perforó el tapón con una varilla metálica, a continuación, cargó el conductor a través de la varilla sosteniéndola con una mano. Una vez cargada la tocó con la otra mano y experimentó con su cuerpo una seria descarga eléctrica: Lo que había hecho era descargar la botella que se podía considerar un condensador y cuya armadura externa era su propio cuerpo.

La experiencia fue repetida por P. von de Muschenbrock, de la ciudad de Leyden (Holanda) de donde la botella toma el nombre con el que es conocida en la actualidad. La sensación que experimentó Muschenbrock fue tan desagradable que manifestó “*no volvería a repetirla ni por todo el reino de Francia*” Desde este momento la botella empieza a ser objeto de indagación y estudio. Hoy en día se hacen las botellas recubriendo el interior y el exterior con láminas metálicas.



Ilustración 1: Botella de Leyden

Las observaciones y estudio de las estructuras fisiológicas que sobre los peces eléctricos se hacían constituyen el punto de partida para lo que se ha de llamar Electricidad Animal. En el siglo XVIII Galvani y otros están interesados en mostrar el papel que tiene los nervios en el mecanismo de la electricidad animal, pues piensa que esta electricidad es propia de los animales en general y no de unos pocos especímenes. Los estudios sobre la botella Leyden serían necesarios para dar cuenta de este tipo de electricidad.

Finger y Piccolino muestran que los manuscritos de Galvani son un compendio de una comprensión completa, para la época, de las condiciones anatómicas y físicas que influían en sus montajes experimentales y que por ello lo llevan a comparar los efectos producidos por los nervios con los espasmos o conmociones producidas por las botellas de Leyden, Galvani concluye que la electricidad animal es *una condición de desequilibrio entre el interior y las partes exteriores de las fibras excitables, como si fuesen frascos de Leyden en miniatura*⁶.

⁶ Finger, Stanley & Marco Piccolino, *The shocking history of electric fishes*. (Oxford University Press, Inc. 2011), 312.

Igualmente, Galvani procura mostrar los efectos de la electricidad atmosférica en los cuerpos de los animales, y para ello hace uso de arcos metálicos, o también puede utilizar conductores líquidos y considera que la electricidad natural atmosférica produce contracciones del músculo de la rana, y estas contracciones son idénticas a las producidas por la electricidad artificial de las descargas de la botella de Leyden. Pero además dice que las contracciones de la pata de la rana rompen el circuito con el contacto metálico y este es restablecido cuando la pierna se relaja, lo que da como resultado una acción repetitiva de movimientos.

Adicionalmente, Galvani señala que las contracciones son más vigorosas si los músculos y los nervios están envueltos en una capa fina metálica. Estas observaciones y sus minuciosos experimentos consolidan la analogía con la botella de Leyden y se abandona así toda posibilidad de espíritus misteriosos responsables de la electricidad animal.

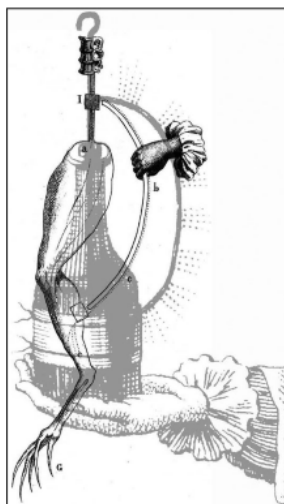


Ilustración 2: Perspectiva de Galvani de la analogía visual y funcional de la rana con la botella de Leyden
(Imagen amablemente proporcionada por Nicholas J. Wade) Tomado de Finger y Piccolino (2011:320)

Las botellas de Leyden en comparación con las sensaciones que se producen con las baterías y con los espasmos de las patas de la rana son un elemento que empieza a unificar en un mismo campo fenomenológico tres cosas que se consideraban completamente diferentes, por ello en algunas ocasiones se refieren a la rana como un *exquisito condensador de electricidad*.

Galvani y Volta, como veremos en lo que sigue, también se apoyan en un principio en las experiencias sensibles que les reportan sus sentidos para poder instalar las discusiones sobre las causas de la electricidad animal o de la electricidad voltaica respectivamente. Y es la botella de Leyden un importante referente para sus elaboraciones.

Además de la analogía con la botella de Leyden, se consolida el campo de la electricidad animal porque se hace uso de los aparatos y de las unidades de medida ya utilizados en la electrostática para dar cuenta de la intensidad de los espasmos y conmociones que se distinguen en la electricidad animal.

En esta época, tanto para el campo de la electricidad animal como para el de la electrostática, existen dos clases de fluidos eléctricos, denominados positivo y negativo. Este modelo se usa para explicar el funcionamiento de la botella de Leyden y Galvani lo utiliza también para explicar su electricidad animal. Uno de los aspectos que veremos con la electricidad voltaica es que lo que antes eran dos fluidos eléctricos diferentes, pasa a ser caracterizado por un fluido que varía solo en intensidad de tensión. Luego es la tensión, magnitud del campo de la electrostática y que como vimos anteriormente, establece la condición de equilibrio, es ahora la magnitud organizadora de los fenómenos eléctricos en general.

- **Medida de electricidades débiles**, ya que lo que sucede en la electrostática son electricidades de alta tensión y se miden con los instrumentos existentes en aquella época como los electroscopios, mientras que las electricidades débiles solo son detectables por mecanismos de acción biológica como las patas de la rana.

Poder hacer medidas de los efectos que se han distinguido, es un trabajo que implicó partir de los aparatos condensadores, introducir modificaciones, por estar tratando ya no con electricidades fuertes como las que se dan en las máquinas electrostáticas, (de una alta tensión) sino con electricidades débiles como las que se dan en el aparato eléctrico artificial y en el natural. Esta es una diferencia de grado o intensidad de la electricidad, pero en principio se pueden utilizar los mismos aparatos y magnitudes de medida.

Las primeras, electricidades fuertes, son de corta duración, en cambio que electricidades voltaicas y galvánicas son de larga duración y de muy baja intensidad, haciendo que se deban modificar los electrómetros para poder detectarlas y medirlas.

Volta desarrolla una modificación al electrómetro condensador de Nicholson pero debe vigilar que el instrumento de medida no interfiera de manera significativa en la medida que se está haciendo, cuestión fundamental en la construcción de aparatos y formas de medida.

Volta, según Bennet, introduce un recubrimiento eléctrico al condensador por lo cual es capaz de almacenar una gran cantidad de fluido eléctrico. Esto es percibido por la separación de las láminas cargadas⁷.

⁷ Abraham Bennet, "An account of a doubler of electricity, or a machine by which the least conceivable quantity of positive or negative electricity may be continually doubled, till it becomes perceptible by common electrometers, or visible in sparks". *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* Vol 77, 288-296. (Published 1 January 1787): 288.

Bennet explica que el experimento que prueba la capacidad de duplicar la cantidad de electricidad es el siguiente:

Si las dos laminillas de hojas de oro colgantes del electrómetro se hacen divergir a una cierta distancia por el proceso anterior⁸, esa distancia casi se duplicará al repetir la operación. Otra prueba de que esta acumulación es duplicada es que, cuando la tercera placa se aplica a la primera, la divergencia de la hoja de oro es aparentemente no disminuida, pienso que en esta situación su electricidad se descarga sobre el doble de la superficie⁹.

Estos métodos de duplicar la electricidad son todos explicados por los mismos principios, se tienen precauciones extremas de tener un ambiente seco, de no tocar o mejor de aislar todas las piezas que intervienen en las cargas y descargas.

Estos métodos de duplicar la electricidad son todos explicados por los mismos principios, se tienen precauciones extremas de tener un ambiente seco, de no tocar o mejor de aislar todas las piezas que intervienen en las cargas y descargas.

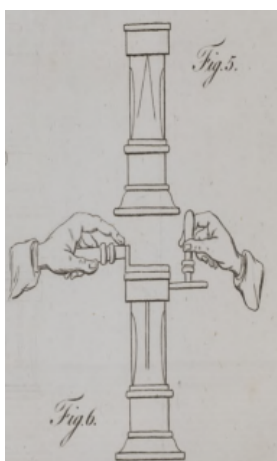


Ilustración 3. Electrómetro de Bennet (1787).

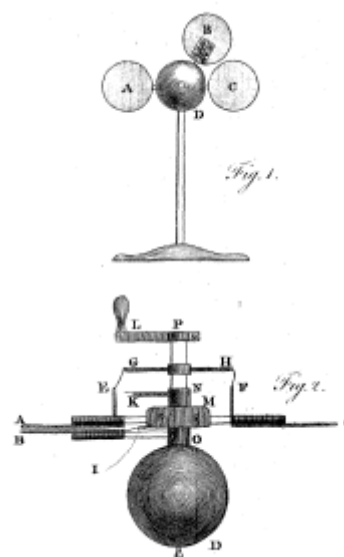


Ilustración 4. Condensador de Nicholson. (1788)

Volta además explica el funcionamiento del condensador de Nicholson más o menos de la siguiente manera: El condensador, como se ve en la figura consta de los platos A y B que son opuestos el uno al otro, los dos platos fijos A y C que son considerados como una sola masa; y el plato B giratorio junto con la bola D, constituirá otra masa. Todos los experimentos sin embargo prueban que estas dos masas no

⁸ De cargas en repetidas ocasiones

⁹ Bennet, 291.

poseen el mismo estado de electricidad, pero que con respecto la una a la otra sus electricidades serán positivas y negativas. Estos estados pueden ser simples y sin alguna compensación, si las masas están distantes la una de la otra; pero como este no es el caso, una parte de exceso de electricidad tomará la forma de una carga en los platos opuestos A y B. ... Los excesos de electricidades en las masas no están igualmente distribuidos: el plato A tiene cerca de 99 partes y el plato C una. Por la misma razón el plato giratorio B tiene 99 partes de electricidad opuesta y la bola D una¹⁰.

Adicionalmente, Nicholson explica qué sucede cuando se conecta el condensador al electrómetro de Bennet y cuáles son las dificultades que se tienen y con las cuales se enfrenta Volta.

Si una de las partes es conectada con un electrómetro, más específicamente el de Bennet, estos efectos serán muy claramente observados. La chispa es usualmente producida por un número de veces entre 11 y 20; y el electrómetro es aún menos sensible. Cuando una de las partes es ocasionalmente conectada con la tierra, o cuando el ajuste de los platos es alterado, hay algunas variaciones en los efectos, que pueden ser asumidos desde los principios generales, suficientemente curiosos para animar las meditaciones de las personas más experimentadas en esta rama de filosofía natural. [...] Si la bola es conectada con la parte inferior del electrómetro de Bennet, y el plato A con la parte superior, y cualquier electricidad débil es comunicada al electrómetro, mientras que la posición del aparato es tal que la pieza GH atraviese los dos pernos; unas pocas veces hará que sea perceptible. Pero aquí, tan bien como en el doblador común, el efecto es incierto por la condición, que la electricidad comunicada debe ser tan fuerte como para destruir y predominar sobre cualquier otra electricidad que los platos puedan procesar. Yo apenas necesito observar que, si esta dificultad en adelante es removida, el instrumento tendrá grandes ventajas como un multiplicador de electricidad por la facilidad de su uso, la muy rápida manera de esta operación, y la inequívoca naturaleza de sus resultados¹¹.

Ahora bien, la utilización del doblador de Nicholson al final resulta poco útil porque su confiabilidad no es superior que los meros órganos de los sentidos o las patas de la rana para detectar este tipo de electricidades débiles. Por ello Volta reemplaza los discos de metal A, B y C por distintos metales lo cual le permiten trabajar con electricidades en movimiento de diferentes conductores y llegar a conclusiones y

¹⁰ William Nicholson, "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. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* Vol 78, 403-407, (published 1 January. 1788): 405.

¹¹ *Ibid*, 406-407.

analogías con las electricidades que se mueven a través de las patas de la rana. E incluso es la base para establecer una serie o escala de metales de acuerdo a su poder decreciente de “empujar” el fluido dentro de los conductores húmedos, iniciando con el zinc y terminando con el carbono.

En la figura se muestran las diferentes representaciones que Volta hace del funcionamiento del

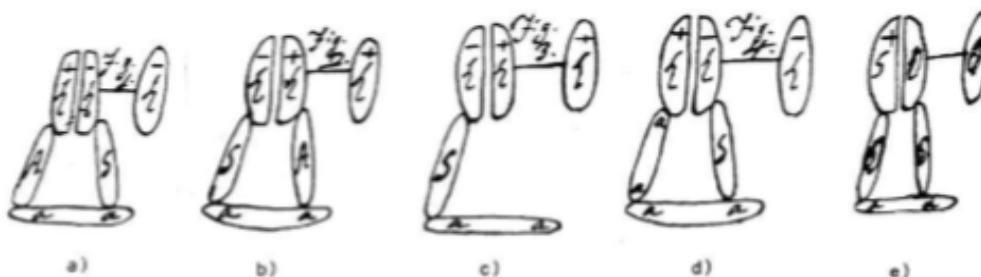


Ilustración 5: Representaciones de Volta de sus experimentos con el doblador de Nicholson, donde sustituyó diferentes metales en vez de los discos de latón. (Volta, Opere I)

condensador de Nicholson cuando reemplaza los discos de latón por diferentes metales y explica que los discos del doblador se separan, ya sea por una muy corta distancia o, más efectivamente por un cartón humedecido delgado, el cual si no está tan bien humedecido es un mal conductor. El fluido eléctrico excitado y puesto en movimiento, por las acciones antes mencionadas, debe acumularse en los discos de latón (L, figuras a y b) el cual es tocado por una varilla de plata A. Deberá también acumularse en el disco de estaño tocado por la varilla de latón (O, figura e). En contraste, el fluido eléctrico debe disminuir en el disco de latón, el cual es tocado por la varilla de estaño, (figuras a, b, c, d) y esto debe ocurrir muy fácilmente ya que son dos electricidades opuestas – balanceándose una a otra en los discos enfrentados – las cuales deben sostener una a la otra y deben, por lo tanto, compensarse mutuamente. Ya que las atmósferas están muy cercanas, se influyen mutuamente lo cual hace que disminuyan sus tensiones eléctricas¹².

LOS APARATOS DE MEDIDA Y LA CONSTRUCCIÓN DEL CAMPO FENOMENOLÓGICO DE LA ELECTROQUÍMICA.

A pesar de todos estos esfuerzos experimentales Volta no consigue tener un buen aparato de medida para las electricidades débiles producidas en las baterías que ha construido, logra hacer ordenaciones y las series de metales son un importante referente en adelante para el desarrollo de la electroquímica. Las precauciones que él toma provienen de una comprensión profunda del fenómeno, lo cual es una condición básica para diseñar o modificar los aparatos de medida que permiten asignar números

¹² Alexander Volta, *Opere I*, 475; También citado en Pancaldi, *Volta. Science and Culture in the Age of Enlightenment*, Segunda Edición. (Princeton University Press. 2005.185-186).

o magnitudes al fenómeno de estudio. Los aparatos no existen a priori del campo fenomenológico y aun las modificaciones de un aparato ya existente implica examinar las nuevas condiciones del fenómeno de estudio como acabamos de mostrar.

En lo que hemos visto hasta el momento, el experimento como se planteó al inicio es la base para hablar en términos de la definición de los efectos, los arreglos y las cualidades a estudiar, así como las disposiciones y las ordenaciones a medir: Es así que además de decir qué cualidades emergen en las nuevas propuestas experimentales de la electricidad, estas se recrean, se comparan o se diferencian de las ya establecidas en la electrostática y en la electricidad animal. Estamos ahora en el campo de la electricidad donde tensiones, cargas y corrientes son un aspecto fundamental de estudio en esta fenomenología. Pero nuevas preguntas surgen que no han sido abordadas o han sido dejadas de lado por Volta¹³.

En nuestro interés por establecer la consolidación de la electroquímica como campo fenomenológico estos aspectos hasta aquí planteados, los consideramos necesarios para establecer como el estado de cuestiones y avances no ha tocado el papel activo del conductor húmedo o electrolito que analizaremos en la siguiente parte, con el propósito de señalar una nueva etapa de la consolidación de esta fenomenología y de presentar el papel que juega la actividad experimental en este sentido, recogiendo lo apenas señalado al inicio de este artículo.

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 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 liberaba¹⁴.

Otros investigadores como Haldane, Cruikshank, Davy, mostraron que, al trabajar con soluciones de sales de plata, zinc, cobre, plomo y otros metales, estas sales se podían precipitar o depositar en el

¹³ Volta las deja de lado porque considera que la actividad del conductor húmedo solo favorece el contacto entre los metales.

¹⁴ Wilhelm Ostwald, *L'Évolution de l'électrochimie*, Traducción del alemán al francés por E. Philippi. (Librería Felix Alcán. Paris. 1912), 76.

electrodo donde se liberaba hidrógeno, mientras que en el otro electrodo se daban otros procesos de transformación química diferentes.

Todos estos hechos, que trataremos de revisar detenidamente, 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.

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 y la consideración que 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.

• **La comparación de las escalas de tensión con las escalas de afinidad de los metales por el oxígeno.** Ritter hace una comparación entre los procesos de combustión, de oxidación y los procesos químicos que se dan en la pila voltaica, basándose en la descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno únicamente. El hidrógeno, en cualquier pila que pueda operar químicamente, aparece en el polo positivo y el oxígeno en el polo negativo.

Ritter considera que el hidrógeno y el oxígeno son liberados como gases en los procesos de combustión y explica de la misma manera el caso donde el oxígeno no aparece como gas, porque aparece unido con la sustancia combustible del polo positivo. Aun en una cadena galvánica el oxígeno aparece en el polo positivo asociado al metal calcinado, oxidado o que combuste. Por ejemplo, en una celda galvánica con electrodos de zinc y plata, luego de cerrarse el circuito, el zinc se quema con el oxígeno del agua y el hidrógeno aparece sobre la plata.

Con estos análisis Ritter establece que, en las calcinaciones, en las combustiones y en las oxidaciones sucede el mismo proceso que aquel que se da en la pila voltaica. El oxígeno es atrapado por los metales como el hierro, el zinc, etc.

Pero en los procesos donde el hidrógeno no aparece, se considera que son procesos simples de combustión. Luego varios procesos químicos no aparecen en los procesos galvánicos y la pila voltaica nos enseña que en estas últimas situaciones nada se combina o se separa una de otra fuera del oxígeno y el

hidrógeno, luego esta se convierte en una generalización para todos los procesos químicos, que se verán retomadas en los textos de Daniell o de Faraday al respecto.

Con lo anterior Ritter reitera que el oxígeno es el único que soporta las combustiones y las oxidaciones. Esto sucede en el metal electropositivo en donde se produce el oxígeno y se enlaza con el metal, mientras que el hidrógeno es liberado y durante esta *descomposición del agua se consumen inmensas cantidades de electricidad*¹⁵.

Más o menos la exposición lógica de argumentos que presenta es que el hidrogeno y el oxígeno es agua sin electricidad positiva o negativa¹⁶. Y que la luz y el calor que se produce en las combustiones es electricidad. Luego si en el agua están unidos es porque se ha ganado en afinidad química, relación, atracción o la razón por la cual los cuerpos se encuentran y se unen. Es así como señala que toda la atracción o afinidad química conduce a la afinidad eléctrica y las leyes conocidas para esta última pueden ser aplicadas con precisión a las afinidades eléctricas.

Adicionalmente, Ritter considera que solo hay una afinidad química, y la afinidad química es lo mismo que combustión, toda expresión de afinidad es proceso de fuego, y todo proceso de fuego: proceso eléctrico. Finalmente, Ritter termina diciendo que la química debe someterse a la física porque la electricidad ahora es física, al igual que la luz, el calor, el magnetismo y la mecánica, con lo cual la electricidad ya se ha relacionado¹⁷.

Ritter hace la siguiente extrapolación sobre la relación entre afinidades químicas y afinidades eléctricas:

Afinidad, como estableció en particular Berthollet – ... sólo hay una afinidad química, que entre oxígeno e hidrógeno; combustión no es más que afinidad química, y afinidad química entonces no es más que combustibilidad; toda *expresión* de afinidad son procesos de fuego y todos los procesos de fuego: procesos eléctricos. Las energías de los enlaces químicos son productos eléctricos y sus cantidades constantes llegan a ser la medida más exacta de la afinidad química existente¹⁸.

¹⁵ Ritter, *Key Texts on the Science and Art of Nature* (English and German Edition) (Parte 3: The history of chemistr), 667

¹⁶ En la electrostática se clasificaba la electricidad en vítrea y resinosa y en la electricidad que producía corrientes también se clasificaba la electricidad en positiva o negativa. Esto significa que se mantiene una concepción dual de la electricidad y de la materia, para algunos con esto se hace referencia a la existencia de dos clases de fluidos eléctricos y en otros hay solo un fluido, pero con dos comportamientos diferentes.

¹⁷ Consideramos que esta es última afirmación es una búsqueda de reducción de un campo de estudio a otro, pero para la época es una afirmación prematura.

¹⁸ Ritter, 667.

No solo es una comparación de los elementos experimentales, sino que además con Ritter se construye un esquema conceptual que establece la igualdad de procesos como la combustión, la calcinación o la descomposición electrolítica, un proceso de afinidad química y es uno de los primeros que sugerirá que esta puede ser medida por medio de lo que él denomina las afinidades eléctricas. Además, él señala no sólo que son comparables, ni que son análogas, sino que son de la misma clase, aspecto que quedará por el momento en el tintero, pero que es una dimensión de gran envergadura. Se presenta un análisis cualitativo sobre los cambios químicos que están ocurriendo y los resultados que son esperados, en unos casos se producen óxidos de cada uno de los metales intervinientes, en otros casos no se producen estos óxidos sino que se produce oxígeno e hidrógeno, y en otros casos se produce solo hidrógeno y sin embargo, en todos los casos se puede reducir a un esquema de descomposición del agua y de afinidad de los metales por el oxígeno, de la misma forma que cuando los metales se calcinan por exposición al fuego o cuando se produce una combustión. Ritter plantea la *relación entre los poderes eléctricos y las afinidades químicas*, incluso antes del invento de la batería por parte de Volta, dice Davy.

• **Cambios químicos de las sustancias por el paso de la corriente.** Los metales hasta el momento eran considerados como los únicos que, en proporción a su superficie y su número, ocasionaban la circulación constante de una cierta cantidad de electricidad a través de los fluidos o los cables de conexión en la pila; y los cambios químicos que ocurren en estos fluidos eran considerados como meros resultados, y no necesariamente se vinculaban a la circulación de la electricidad. La hipótesis que acuña Davy tiene que ver con que *la destrucción del equilibrio eléctrico es producida por el contacto entre los metales y el fluido, pero es restaurado por los cambios químicos y la circulación y dirección de la corriente depende de los componentes...* pero su hipótesis también se arriesga a señalar que *el poder eléctrico es o puede ser una medida de la intensidad de la unión química*, cuestión también planteada por Ritter, como acabamos de exponer en el apartado anterior¹⁹.

Davy, aproximadamente 30 años después de los trabajos de Volta, ha investigado sobre los principios de acción electroquímica para mostrar el papel activo que tiene el electrolito utilizado, cuestión que no se puede resolver en las investigaciones de Volta y que había quedado como un gran interrogante. Davy, hace rigurosas observaciones sobre la íntima relación entre los fenómenos eléctricos y los cambios químicos que ocurren en una batería y concluye que existe una interdependencia entre ambos. Desde 1802 Davy ha provocado cambios químicos utilizando metales, carbón o diferentes fluidos ácidos o alcalinos, e

¹⁹ Humphry Davy, "The Bakerian Lecture. On the relations of electrical and chemical changes". *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* Vol. 116, 383-422, (published 1 January 1826)

identificaba los polos por positivo y negativo. Los metales, incluido el carbono, son utilizados como electrodos y se les asigna este carácter de positivo o negativo²⁰.

He probado que las combinaciones galvánicas podrían estar formadas por metales simples o por carbón y diferentes fluidos principalmente ácidos y álcalis, y que el lado o polo de la sustancia conductora en contacto con el álcali será positiva y la que está en contacto con el ácido, negativo; y en ese mismo año publiqué, que cuando dos porciones separadas de agua, conectadas por una vejiga húmeda o fibra muscular, fueron electrificadas, el ácido nitromuriático aparece en el positivo y el álcali fija en el polo negativo²¹.

Hay pocas acciones eléctricas más intensas que las producidas por la operación de los hidrosulfatos sobre el cobre en estas diferentes circunstancias; tanto así que he construido una batería voltáica la cual descompone agua, por seis combinaciones consistentes solamente de delgadas correderas de cobre, de las cuales una mitad ha sido expuesta a la solución cerca de un minuto antes de la otra mitad: de hecho, la superficie oxidante estaba en el lado del metal limpio o más recientemente expuesto. Con el plomo, y aleaciones de estaño, plomo y hierro se tiene el mismo fenómeno, pero acciones eléctricas mucho más débiles, la superficie metálica la cual es primero introducida será la superficie negativa; y los principios de esta clase de acción son precisamente las mismas que las del cobre y hidrosulfatos. Zinc, platino, y metales que no tienen acción química sobre las soluciones de hidrosulfato no producen fenómenos de esta clase; plata y paladio, el cual actúa fuertemente con estas soluciones, produce efectos muy intensos; pero los compuestos que se forman en ellos son positivos con respecto a los metales puros, los fenómenos son al revés de los ofrecidos por los metales más oxidables: la superficie sumergida primero en la solución es la superficie positiva, y retiene esta relación en álcali, ácido y soluciones salinas, presentando peculiaridades que dependen del cambio de superficie sobre lo cual podría referirme de nuevo después de aquí²².

La acción eléctrica que se da en la batería, produce cambios químicos en las sales que se transforman en álcalis y ácidos, cada una en un electrodo específico, que llamaremos a partir de ahí positivo y negativo.

Se insiste en varios de sus textos en esta denominación de polos positivo y negativo:

²⁰ Estos vocablos, positivo y negativo, sobrevienen de la mirada de dos clases de electricidades, que apuntamos anteriormente.

²¹ Davy, 387.

²² Ibid, 395.

... el oxígeno y el hidrógeno se obtuvieron a partir de porciones separadas de agua, aunque intervinieron sustancias vegetales e incluso animales; y al concebir que todas las descomposiciones podrían ser polares, electricé diferentes compuestos en las diferentes extremidades, y encontré que el azufre y las sustancias metálicas aparecían en el polo negativo, y el oxígeno y el azoe en el polo positivo, aunque los cuerpos que las proporcionaban estaban separados entre sí. En la misma serie de documentos establecí la conexión íntima entre los efectos eléctricos y los cambios químicos que se producen en la pila, y saqué la conclusión de la dependencia de uno sobre el otro.²³

Este lenguaje es indicativo de la observación localizada de los efectos de la acción eléctrica sobre la descomposición química que se puede traducir en una dirección del fluido eléctrico o de la acción eléctrica. Es difícil distinguir el momento en el cual el término corriente eléctrica es incorporado en las investigaciones de Davy y los demás científicos, sin embargo, se puede señalar que cuando hablamos de las tensiones eléctricas sigue siendo válido que estas no dependen sino únicamente de los materiales: metales o conductores húmedos que se encuentran en las extremidades, en este caso los electrodos por ejemplo.

No tiene efecto sobre el valor de la tensión eléctrica si entre el metal A y B que componen la pila se coloca el conductor húmedo constituido de una sal, de un alcali o de un ácido. Sin embargo, en la mayoría de estos casos se producen descomposiciones del electrolito que van a depender de la clase de electrolito que se coloque, y que se produce solo en la medida que se cierra el circuito conductor. Si el círculo conductor es roto, las acciones químicas se detienen. Es por ello que podemos afirmar la aparición de un fluido en movimiento o corriente eléctrica responsable de los cambios químicos y análoga a la carga eléctrica en los procesos electrostáticos.

Es en este momento que se hace la distinción inicial entre corriente y tensión, como magnitudes diferentes que dan cuenta de los cambios químicos producidos por las corrientes. Luego veremos cómo esta distinción se consolida con la introducción de los aparatos y formas de medida.

Se establece una relación entre la cantidad de sustancia y la corriente, es una relación de equivalencia. Se habla entonces de uno en términos del otro. *Cuando una sustancia se somete, debido a la electricidad, a una transformación química, las cantidades transformadas son proporcionales a las cantidades de electricidad involucradas.*

Pero ¿cómo se empiezan a medir las corrientes eléctricas que generan los efectos químicos?: la siguiente cita con la que finalizamos esta parte presenta una idea inicial de cómo hemos abordado este problema, que continuaremos tratando en el siguiente apartado.

²³ Ibid, 387.

Para ilustrar el funcionamiento de estos aparatos, mostraré, que cuando el cable de la terminación inferior, el cual está a la izquierda, o al este del polo norte, es conectado con el electrodo de zinc, y el superior con el electrodo de platino, y ambos están en agua, la desviación de la aguja central es de 8 a 10 grados, el polo sur giraba hacia el este o la mano izquierda; lo que puede considerarse como un indicador de que la corriente eléctrica va desde el platino al zinc a través del cable, y que la superficie del zinc en el fluido es positiva con respecto a la superficie opuesta del platino; y se usan los términos positivo y negativo, para entender cómo aplicarlos a las superficies metálicas en contacto con el fluido²⁴.

MEDICIÓN DE CORRIENTES ELÉCTRICAS MEDIANTE EFECTOS MAGNÉTICOS.

Se incorpora un instrumento basado en la relación de las corrientes con los efectos magnéticos y que permite dos cosas simultáneamente: por una parte, dar un estimado de la magnitud de la corriente y a la vez determinar su sentido.

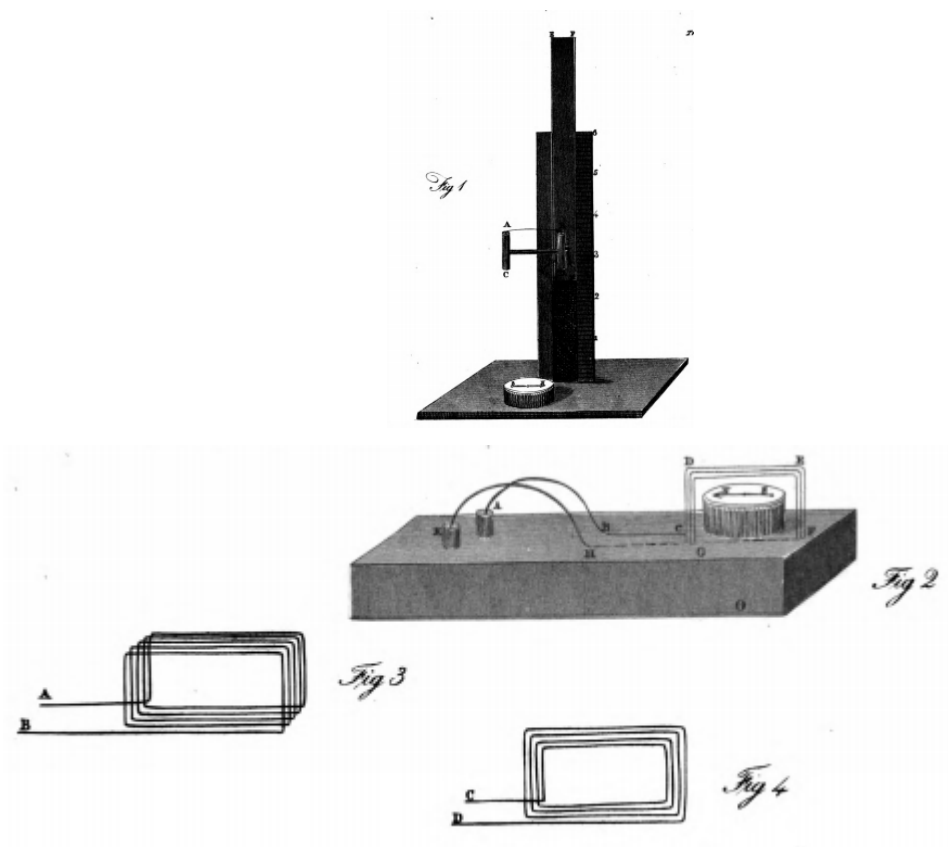


Ilustración 6: Tomado de J. Cumming (1821)

²⁴ Ibid, 392.

El alambre AB de la figura 1 está colocado sobre la aguja magnetizada SN, Los tubos CA y BD están llenos de mercurio y son los que conectan con los polos positivos y negativos de la batería o con las placas galvánicas como se muestra mejor en la figura 2 (Ilustración 6) Igualmente, en la figura 2 se muestra la espira que rodea la aguja imantada NS.²⁵



Ilustración 7. Multiplicador de Schweigger

En el caso del multiplicador de Schweigger 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 que Volta había podido detectar, ordenar, pero no medir, como mostramos en la sección anterior.

En estos aparatos, la intensidad de la corriente es medida por el efecto magnético indicado por la deflexión de la aguja magnetizada. Luego también se utiliza un sistema de dos imanes permanentes para reducir el efecto del campo magnético de la tierra en el funcionamiento del aparato (principio astático primero

²⁵ James Cumming, "On the connexion of galvanism and magnetism". *Cambridge Phil. Soc. Trans*, Vol I, Parte II, 269-280, 1821.

desarrollado por Ampere) Dos agujas magnéticas de fuerza casi igual, pero con sus polos en direcciones opuestas conectadas al alambre doblado en la parte superior y suspendido sobre un punto de acero de tal manera que la aguja superior estaba justo arriba del cable conductor.

Así para el caso de los sistemas electroquímicos, la deflexión de la aguja es considerada 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.

Cuando las soluciones se ponen en contacto con superficies metálicas y se conectan al aparato medidor anterior se ordenan los efectos de la siguiente manera:

a) Cuando se coloquen metales iguales al mismo tiempo (por ejemplo, placas de cobre), no se produce ningún efecto eléctrico, pero si se sumergen los metales en diferentes tiempos, primero uno y después el segundo, se genera una acción eléctrica que describe como muy fuerte y la carga del primer metal sumergido es negativa.

... se le *comunica* una carga negativa, violenta y momentánea, que envía a través de la aguja toda una revolución: luego oscila; y casi inmediatamente regresa, y toma la dirección que indica que la pieza que se hundió por primera vez es negativa.²⁶

Davy ha observado que al introducir primero una placa se genera sobre su superficie una capa de óxido que hace que el material metálico ya no sea igual al cobre limpio y pulido y que por lo tanto se genere una acción eléctrica debida a la diferencia de los dos metales puestos en contacto con la solución conductora.

b) Con el zinc y el platino no se presentan acciones eléctricas ni cambios químicos.

c) Con metales como la plata y el paladio se presentan acciones eléctricas, pero las superficies de los metales quedan cargadas positivas, y se explica porque en este caso los metales se oxidan fácilmente.

d) Al sumergir metales iguales en soluciones iguales, por ejemplo, platino, se da una medida en el multiplicador de 60°, pero cuando se sumerge en dos soluciones diferentes (por ejemplo ácido nítrico y potasa) da una medida de 65°. Para estar muy seguro que la electricidad se genera por el contacto entre los metales y las soluciones, se coloca en contacto las dos soluciones y se dejan reaccionar y se encuentra que no se produce ninguna marca en el multiplicador. Esta medida se incrementa si se cambian las soluciones anteriores por ácido muriático (ácido clorhídrico) y amonio, el efecto comienza inmediatamente y aumenta con el tiempo.²⁷

²⁶ Davy, 394.

²⁷ Ibid, 400-401.

A pesar de lo sorprendente que podría resultar el hecho que algunos metales como el platino no sufrieran cambios químicos al estar en contacto con soluciones de ácidos como el nítrico, el clorhídrico o el sulfúrico, pero que si se produjeran fuertes efectos eléctricos que eran marcados por el multiplicador, también es muy importante destacar que estos efectos hacen que Davy organice una tabla de elementos de más a menos electronegativos por su efecto sobre el platino y dice: *“las soluciones de cloro o de ácido nitro-muriático produce mayor efecto eléctrico sobre el platino que el ácido nítrico, el ácido nítrico mayor que el ácido muriático, y el ácido muriático mayor que el sulfúrico... y en combinaciones de esta clase el ácido nitro-muriático es más activo que el ácido nítrico, la ordenación es , ácido nítrico, nitroso, sulfúrico, fosfórico, ácidos vegetales, sulfuroso, prúsico, sulfhídrico y, con los álcalis, potasa, sosa, barita, amoniaco, etc.”*²⁸ Además, si el platino está en contacto con ácidos es positivo y si está en contacto con álcalis es positivo, como lo deriva del electrómetro condensador que está utilizando en sus experimentos, esto se traduce en una dirección de la electricidad, la cual circula del metal hacia el álcali y del ácido hacia el metal. Estos mismos efectos los encuentra como el rodio, el iridio y el paladio que no sufren cambios químicos en contacto con los álcalis o con los ácidos. Lo mismo sucede con la plata y el paladio, sobre todo si se utiliza ácido nítrico. Con el carbón y con los llamados metales oxidables sucede de la misma manera, pero las acciones eléctricas son mucho mayores en proporción a los cambios químicos que se producen.

REPERCURSIONES PARA LA ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS

Los análisis que se han presentado a lo largo de este documento han aportado en la generación de propuestas para la enseñanza de las ciencias. Por ejemplo, se identificó que el trabajo experimental desarrollado en el estudio de estos fenómenos electrolíticos estuvo relacionado con dos preguntas:

La primera: ¿qué origina las tensiones eléctricas que se producen al interior de las pilas voltaicas?

La segunda: ¿cuál es el papel que desempeña el electrolito en la conducción de electricidad?

Estas cuestiones llevaron a describir un vínculo entre la cantidad de sustancia que intervienen en los procesos electrolíticos y las cantidades de corriente que se producen en la conducción electrolítica. Derivaron entonces, en la necesidad de encontrar métodos para cuantificar la cantidad de sustancia producida y la cantidad de corriente involucrada en su producción, que permitieron concluir que los cambios químicos que se dan en estos procesos se pueden colocar en términos de cantidades de electricidad y

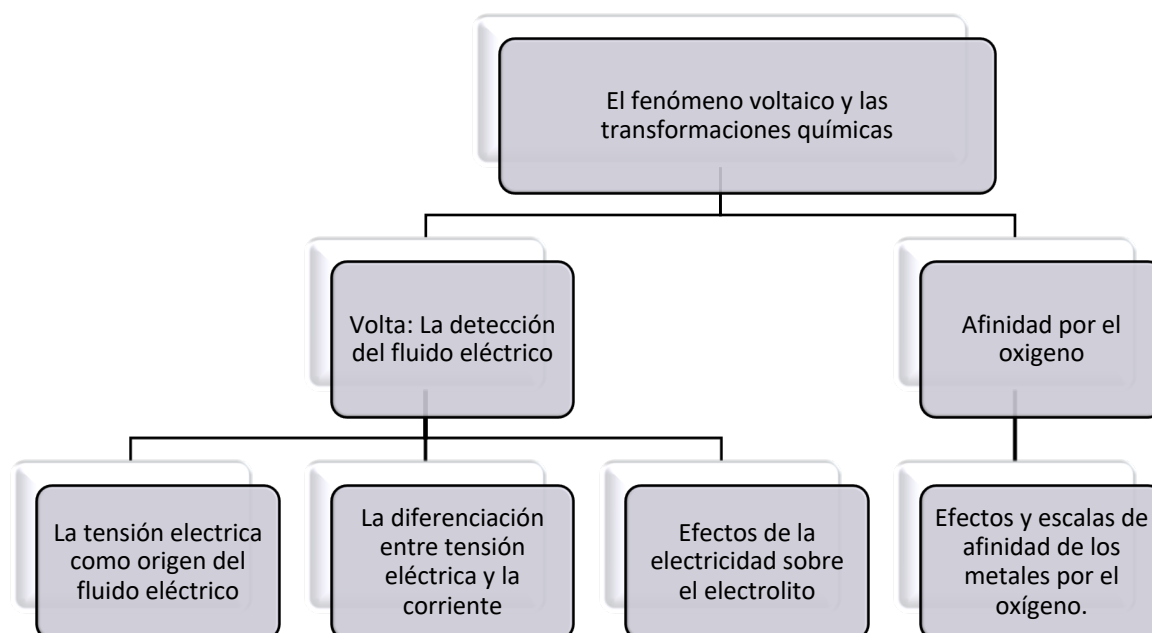
²⁸ Ibid, 402.

viceversa; y que, la afinidad química puede ser puesta en relación con las tensiones generadas en estos montajes experimentales.

Estos aspectos han terminado siendo la piedra angular de la organización de un curso electivo llamado *Construcción de pilas, experimentos en electroquímica para la enseñanza de las ciencias*, dirigido a los estudiantes de ciencia de la Facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad Pedagógica Nacional, al cual asisten estudiantes de Licenciatura en física, química, biología y tecnología.

El curso se desarrolla a través de actividades experimentales que permitan la construcción de vínculos entre fenómenos eléctricos y fenómenos químicos que se establecen en los procesos de conducción electrolítica. El objetivo central ha sido analizar el fenómeno voltaico y su relación con fenómenos de transformación química de las sustancias.

Para ello se ha organizado una propuesta experimental que queda representada en el siguiente esquema:

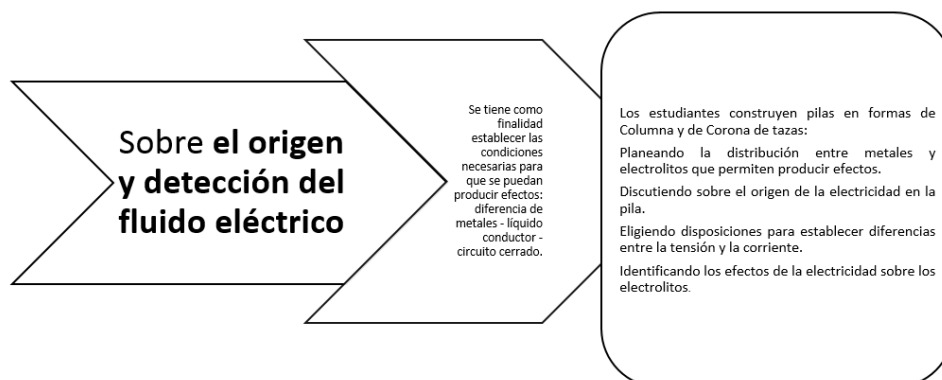


La propuesta se divide en dos secciones: En la primera sección se aborda el origen y detección del fluido eléctrico. Identificando los efectos de la electricidad sobre los electrolitos. En la segunda sección se aborda el proceso de oxidación de los metales.

Durante el desarrollo de las actividades específicas planeadas y trabajadas hemos observado lo siguiente:

1. Al principio los estudiantes asumen que para hablar del campo de lo eléctrico se pueden referir, de una forma indiferenciada, a potencial, tensión, carga, corriente o conducción. Se tiene la intuición de que estas son las magnitudes que organizan el fenómeno.

Para avanzar en un mayor grado de comprensión se procura hacer diferenciaciones estudiando diferentes montajes y procesos que permiten construir descripciones y ordenaciones cada vez más precisas. Podemos ver una síntesis de este proceso en la siguiente imagen:



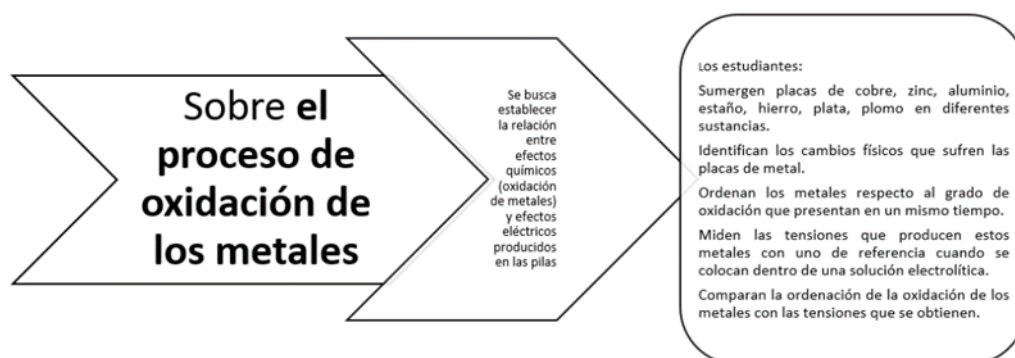
En esta etapa se proponen diferentes montajes con metales diferentes y el examen de los efectos que producen ordenados de mayor a menor intensidad.

2. Notamos que desde las diferentes disciplinas, los estudiantes arriesgan hipótesis de explicación sobre sus observaciones. Esto reafirma nuestra postura de que no existen campos puramente experimentales o puramente teóricos, sino que hay énfasis que se complementan.

La propuesta de trabajo que hemos construido tiene la intención general de poner en conversación con estudiantes de licenciaturas de química, física, biología o tecnología las comprensiones que tienen de las relaciones que se pueden establecer entre la producción de transformaciones químicas por el paso o producción de corrientes eléctricas, de tal manera que dicha comprensión sea además de discutida, enriquecida con nuevas preguntas y análisis de diferentes disposiciones experimentales que hacen aparecer condiciones y factores que intervienen más o menos la producciones de estos fenómenos. Por tanto, el punto de partida no es lo teórico organizado, ni de la observación y medición a priori, es decir no se parte de que se conozcan las teorías electroquímicas desde el punto de vista físico o químico, ni hace necesario conocer y manipular los aparatos potenciométricos ya especializados.

3. Otro aspecto que destacamos es que las actividades experimentales se han diseñado teniendo en cuenta que se pueden articular alrededor de los tres tipos de relaciones que hemos pensado entre lo químico y lo eléctrico. La explicación de lo que sucede en el elemento húmedo de la pila comienza a sugerir el nuevo campo fenomenológico que es la electroquímica.

De igual manera, trabajar qué condiciones se requieren para intensificar los cambios químicos lleva a distinguir en qué condiciones se establecen diferencias de potencial y en qué condiciones de corrientes eléctricas.



4. Construir formas de medida de estos fenómenos ha resultado un trabajo complejo. Hasta el momento se ha logrado comparar una escala cualitativa de rapidez de oxidación de algunos metales expuestos al aire o en agua acidulada con la escala de potencial eléctrico en el que se utiliza uno de los metales como referente y en el cual los estudiantes dan cuenta de la identidad entre las dos escalas.

También, para dar cuenta de la cantidad de electricidad que está involucrada en una transformación química hemos comparado una cualidad química común a varias sustancias, por ejemplo, las reacciones de electrólisis de varias sales, de esta forma, se encuentra que las masas de las sustancias que se obtienen cuando la cantidad de electricidad es la misma son equivalentes en todos los casos.

Pero en los dos casos es necesario avanzar en cómo colocar una magnitud Potencial eléctrico en términos de la otra magnitud Afinidad Química, de tal manera que se pueda decir que hemos colocado una cualidad X en función de una cualidad Y.

Sin embargo, debemos señalar que la riqueza de esta propuesta radica en el hecho que la organización de un campo de fenómenos se hace con referencias a otro campo de fenómenos, que en principio se ven como separados, pero que la relación entre diferentes campos fenomenológicos es una forma de abstracción o de síntesis teórica. En términos de Mach una economía de pensamiento.

UN INICIO PARA LA COMPRENSIÓN DE LA EQUIVALENCIA

Los aspectos tratados 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, no solo se relacionan fenómenos de distinta naturaleza, también 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.

Ernst Mach considera que la economía de pensamiento es el eje del proceso de teorización y de la actividad cognitiva en general; es el vector que los orienta y dinamiza. Dado que la gran multitud y variedad de objetos propuesta al conocimiento humano excede ampliamente la capacidad del intelecto humano de mantener en su memoria una simple copia de su experiencia personal; así como de transmitir a sus contemporáneos y a la posteridad los frutos de su experiencia, es necesario para almacenar en la mente las contribuciones de la percepción, dice Duhem, parafraseando el planteamiento de Mach: concentrarlas, condensarlas y extraer su esencia de tal manera que pueda alojar cada cosa útil de esa cantidad de datos en un compartimiento lo más pequeño posible. Realizar este resumen o abstracción es el objeto propio del trabajo científico. El progreso de la ciencia puede entenderse, entonces, como la búsqueda por representar cada vez más realidad en la forma más reducida posible.²⁹

Diez Calzada afirma que cuando se llega a una generalización se ha logrado un estatus de repetible, de regular que no es casual o circunstancial, por ello nosotros hemos propuesto que tales niveles de generalización sean el producto de un estudio sistemático de las distintas condiciones a las que se ha sometido la escena en estudio, es una síntesis de aquellas condiciones y sus efectos en los estudios de los fenómenos por los cuales podemos decir que pertenecen a un mismo campo de estudio. Esta síntesis es una tensión entre la generalidad que recoge todas las especificidades.

En esta síntesis también se puede decir que se reduce una cantidad de fenómenos inicialmente independientes a una misma clase de fenómenos, a un mismo campo fenomenológico. Y afirma Diez Calzada que *aumentamos nuestra comprensión del mundo reduciendo el número de supuestos básicos que dan cuenta de los fenómenos*³⁰.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo se produce en el marco del proyecto de investigación **Relaciones de equivalencia y construcción del campo fenomenológico: el caso de la electroquímica DQU 478 18**; financiado por el Centro de Investigaciones, Universidad Pedagógica Nacional de Colombia.

²⁹ Pierre Duhem, *Essays in the History and Philosophy of Science*. Traducido y editado por Ariew, Roger y Barker, Peter. (Hackett Pub Co Inc; Edición 1, 1996)

³⁰ José Diez Calzada, "La explicación científica: causalidad, unificación y subsunción teórica" En *Filosofía de la ciencia en Iberoamérica*. Peris Viné, Luis Miguel (Ed.) 517-567, (Editorial Tecnos, 2012)

SOBRE OS AUTORES:

Sandra Sandoval Osorio

Grupo de Estudios Histórico Críticos y Enseñanza de las Ciencias EHCEC.
Departamento de Química. Universidad Pedagógica Nacional
ssandoval@pedagogica.edu.co

José Francisco Malagón Sánchez

Grupo de Estudios Histórico Críticos y Enseñanza de las Ciencias EHCEC.
Departamento de Física. Universidad Pedagógica Nacional
jmalagon@pedagogica.edu.co

Marina Garzón Barrios

Grupo de Estudios Histórico Críticos y Enseñanza de las Ciencias EHCEC.
Departamento de Física. Universidad Pedagógica Nacional
mgarzonb@pedagogica.edu.co

Liliana Tarazona Vargas

Grupo de Estudios Histórico Críticos y Enseñanza de las Ciencias EHCEC.
Departamento de Física. Universidad Pedagógica Nacional
ltarazonav@pedagogica.edu.co

Artigo recebido em 12 de dezembro de 2019
Aceito para publicação em 06 de abril de 2020