

TRABAJO FIN DE MASTER
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

PREPARACIÓN DE UNA PRÁCTICA DE LABORATORIO DE
FÍSICA:

***“ELECTROQUÍMICA:
Galvani, Volta o el Pez Torpedo”***

Alumna: Patricia GOBERNADO HERNANDEZ

Tutores: José María MUÑOZ
Carlos TORRES



MASTER UNIVERSITARIO EN PROFESOR DE EDUCACIÓN
SECUNDARIA OBLIGATORIA Y BACHILLERATO, FORMACIÓN
PROFESIONAL Y ENSEÑANZA DE IDOMAS

*A Alicia,
y a todos mis maestros.*

Valladolid, Julio 2013

ABSTRACT

ELECTROCHEMISTRY: GALVANI, VOLTA OR TORPEDO FISH

In this master thesis, a proposal for the development of a lab experience within the framework of the subject Physics, 2^o Bachillerato is presented. The aim of this work is to emphasize the importance of deepening basic scientific knowledge through experimentation, in the context of meaningful learning, which stresses that we learn best what is done for oneself. The acquisition of basic scientific knowledge is essential to encourage student creativity against future problems. The experiments proposed revolve around the construction of the electrochemical cell of Volta. The choice of this subject is justified in its ability to illustrate the importance of the relationship between scientific curiosity as a crucial tool to solve a problem (nature of electricity in the torpedo fish) and technological development (construction of the electrochemical cell).

RESUMEN

ELECTROQUIMICA: GALVANI, VOLTA O EL PEZ TROPEDO

El presente trabajo fin de master versa sobre el diseño y desarrollo de una práctica de laboratorio asociada a la asignatura de Física 2^o Bachillerato. El objetivo final de este trabajo fin de master es enfatizar en la importancia de profundizar en los conocimientos científicos básicos a través de la experimentación, en el marco de un aprendizaje significativo que plantea que se aprende mejor aquello que se hace por uno mismo. La adquisición de un conocimiento científico básico es esencial para fomentar la creatividad del alumno frente a problemas futuros. Las experiencias aquí propuestas giran en torno a la construcción de la pila electroquímica de Volta. La elección de esta temática se justifica en su capacidad para ilustrar la importancia de la relación entre la curiosidad científica por resolver un problema (origen de la electricidad en el pez torpedo) y el desarrollo tecnológico (construcción de la pila electroquímica).

CONTENIDOS

1. INTRODUCCION

1.1 Motivación

1.2 Objetivo del Trabajo Fin de Master (TFM)

1.3 Contextualización de la temática del TFM

1.4 Aspectos docentes y didácticos

1.4.1 Planificación de la enseñanza/aprendizaje

1.4.2 Metodología y estrategias de enseñanza

1.4.3 Evaluación de la enseñanza/aprendizaje

2. DISEÑO DE UNA PRACTICA DE LABORATORIO:

“ELECTROQUIMICA: Galvani, Volta o el Pez Torpedo”

2.1 Antecedentes históricos: Volta y su pila a columna

2.2 Procesos electroquímicos: obtención de energía eléctrica a partir de una reacción química (redox)

2.3 Pilas: definición y tipos. Pilas de combustible.

3. ACTIVIDAD DE LABORATORIO: CONSTRUIR UNA PILA DE VOLTA

3.1 Construcción de una pila de Volta a partir de materiales cotidianos

3.2 Descripción del proceso de construcción y puesta en funcionamiento de nuestra pila

3.3 Aplicación: Electrolisis del agua

3.4 Cuestiones para los alumnos

4. ACTIVIDAD DE LABORATORIO: ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DE UNA PILA

4.1 Resistencia interna de una pila:

Estudio comparativo de la pila de limón y la pila convencional.

4.2 Capacidad de una pila:

Estudio comparativo la pila de limón y la pila convencional.

4.3 ¿Por qué deja de funcionar una pila?

Deconstrucción de una pila convencional. Estudio de la variación de la fuerza electromotriz de la pila al principio y al final de su vida útil.

5. PILAS Y SUS APLICACIONES COTIDIANAS: Funcionamiento de una linterna con LED

5.1 ¿Qué es y cómo funciona un LED?

5.2 Bombillas, LEDs y espectro de radiación electromagnética: variación de colores de luz de un LED. ¿Cómo influyen en el rendimiento de las fuentes?

5.3 ¿Cuántas pilas necesita tu linterna?

6. CONCLUSIONES

7. REFERENCIAS

ANEXO I: Costo del material empleado en la actividad

LISTA DE FIGURAS

Título de la Figura	Página
Mapa Conceptual General: Electricidad	1
Perspectiva cronológica de la evolución de las pilas	13
Diagrama de la pila de hidrogeno	14
Tipos de pila de combustible	15
Pasos para la construcción de la pila a columna	17
Electrolisis del agua	18
Esquema del circuito eléctrico objeto de estudio	19
Montaje instrumental para medir la resistencia interna	21
Cálculo de la resistencia interna de la pila a columna	22
Montaje instrumental: capacidad de la pila de limón	25
Curva experimental de descarga de la pila	26
Curvas de descarga de pilas comerciales	26
Deconstrucción de una pila seca zinc-carbono	27
Diagrama del funcionamiento de la pila zinc-carbono	28
Representación de los constituyentes de un LED	30
Diagrama de polarización directa de un diodo	31
Espectro de radiación electromagnética	32
Espectro de emisión de lámpara incandescente	33
Diagrama de cromaticidad y espectro de emisión de LED	33
Resumen de mecanismos para producir LED luz blanca	34

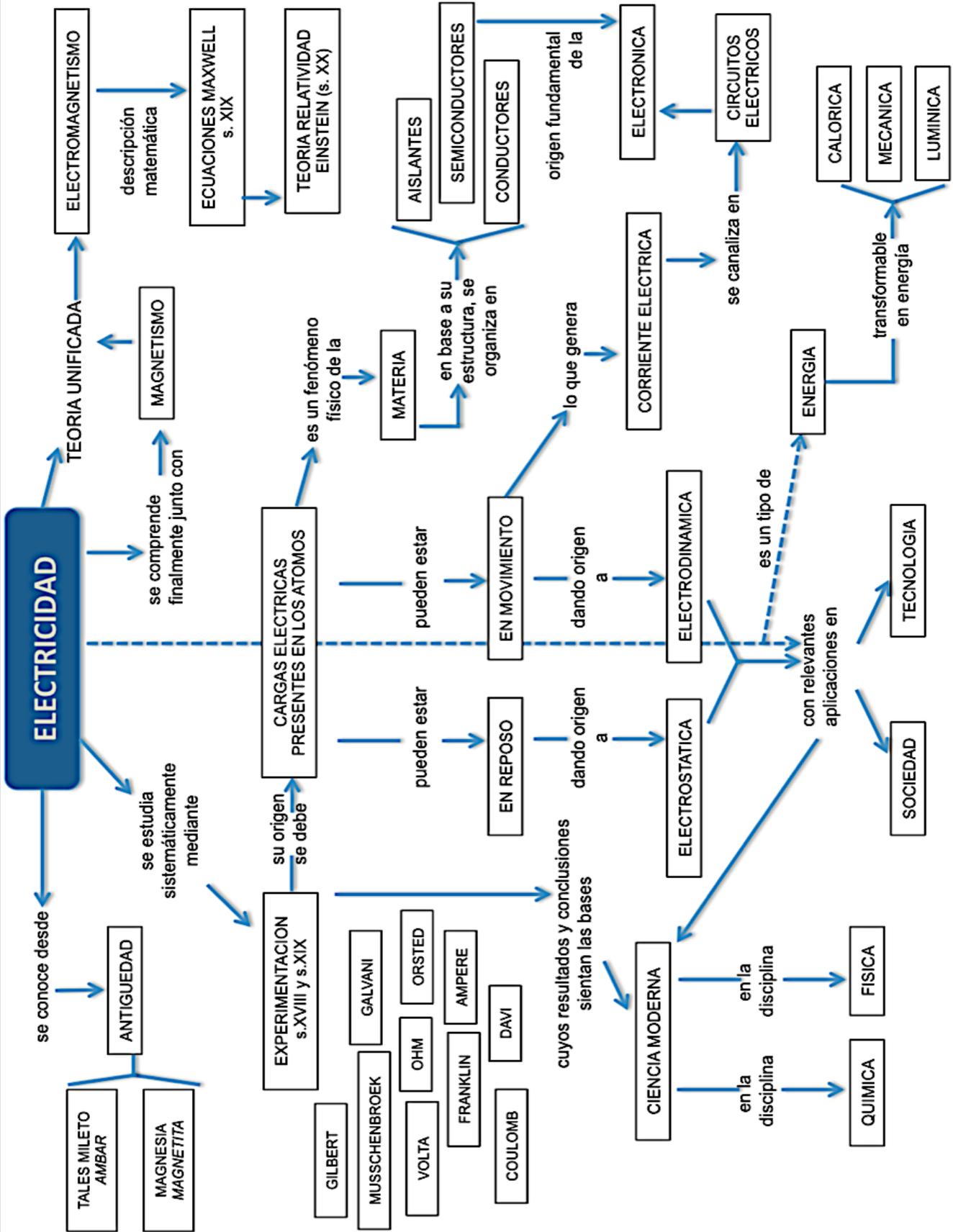


Figura 1. Mapa conceptual general: ELECTRICIDAD.

1. INTRODUCCION

1.1 Motivación

La principal fuente de mi motivación para la elección de una práctica de laboratorio de física como Trabajo Fin de Master (TFM) surge del convencimiento personal de la necesidad de acercar la experimentación a las aulas en las etapa educativa de secundaria (obligatoria y postobligatoria) como herramienta didáctica fundamental e inherente a las ciencias experimentales.

El presente TFM versa sobre la elaboración de una práctica de laboratorio de física para alumnos de 2º Bachillerato en la que a partir de materiales cotidianos se explican conceptos científicos relativos a la electroquímica: pilas y celdas electrolíticas. La elección de la *electroquímica* como el todo y las *pilas* como la parte se justifica por un lado, en que es esta una temática que a modo de *interfase* conecta las disciplinas de física y química, y más allá de estas dos a otras disciplinas como la tecnología, lo que en mi opinión ilustra adecuadamente la interdisciplinariedad de este enfoque. Adicionalmente, las innumerables aplicaciones de la electricidad y el electromagnetismo en ámbitos tan variados como la ciencia, la tecnología y la sociedad en nuestro día a día pone de manifiesto los vínculos fundamentales del saber científico con lo cotidiano lo que en mi opinión plantea un escenario de aprendizaje completo.

La organización de esta práctica cuenta con una breve reseña introductoria sobre la historia de la electricidad/electromagnetismo, prestando especial atención al debate Galvani-Volta entorno a la naturaleza y origen de la electricidad que da título a la practica: "*ELECTROQUIMICA: Galvani, Volta o el Pez Torpedo*" en la primera parte del capítulo 2. A continuación se describen los procesos químicos responsables de la transformación de energía química en energía eléctrica (procesos redox) para finalizar con una mención a las pilas de combustible que cubren amplias áreas de interés en la investigación y aplicación tecnológica actual. En el capítulo 3 se describen los paso para la construcción de una pila a colonna a partir de materiales cotidianos y se realiza una electrolisis del agua. Propiedades de las pilas como la resistencia interna y la capacidad se estudian en el capítulo 4, utilizando la pila a colonna previamente montada y la pila de limón. El fundamento de un LED se aborda en el capítulo 5 en el que se profundiza en el por qué del numero de pilas para encender una linterna que funciona con un LED. Finalmente, el en el último capítulo se recogen las conclusiones generales.

1.2 Objetivo del Trabajo Fin de Master (TFM)

El Trabajo fin de Máster supone el colofón al Master Universitario de Profesor en Enseñanza Secundaria Obligatoria, Bachillerato, Formación Profesional y Enseñanza de Idiomas. El objetivo último del mismo no es otro que el de reflexionar acerca de lo aprendido, discutido y experimentado a lo largo del máster, desarrollando una actividad didáctica relacionada con la especialidad académica del futuro profesor, Física y Química en este caso.

En el caso de la enseñanza de las ciencias experimentales, se hace imprescindible el manejo de múltiples y variados recursos didácticos que acerquen los conceptos científicos más abstractos al lenguaje cotidiano de los alumnos (eso si, sin olvidar el uso del lenguaje científico asociado a estas materias) al tiempo que despierten su interés por el saber científico, lo que les permita adquirir consciencia de su relevancia en la sociedad actual a través del estudio de fenómenos cotidianos desde un enfoque científico. Como recursos didácticos para la mejora de la enseñanza de las ciencias experimentales, se pueden enumerar:

- a. Uso de reglas nemotécnicas: ayudan a relacionar conceptos
- b. Uso de analogías: representación de un fenómeno o concepto a través de otro mas simple de comprender
- c. Desarrollo de una práctica de laboratorio: el hacer como elemento indiscutible del aprendizaje profundo
- d. Empleo de las TIC: manejo de las nuevas tecnologías de la información
- e. Juegos y dinámicas, etc.

El presente TFM versa sobre el diseño de una práctica de laboratorio (opción c de las propuestas anteriores) pues se entiende que lo experimental no solo es inherente a las ciencias experimentales sino que ha de formar parte de la propia práctica educativa de dichas materias.

1.3 Contextualización de la temática del TFM

Por tratarse esta de una propuesta experimental enmarcada en la asignatura de Física, según el DECRETO 42/2008, de 5 de junio (B.O.C.yL n0111), por el que se establece el currículo de bachillerato en la Comunidad de Castilla y León, la actividad experimental que se describe en este informe está vinculada al bloque 5 de la programación de Física 2^o Bachillerato, desglosada a continuación:

5. Interacción electromagnética:

– *Campo eléctrico. Magnitudes que lo caracterizan: intensidad de campo y potencial eléctrico. Relación entre fenómenos eléctricos y magnéticos. Campo creado por un elemento puntual. Principio de superposición. Campo creado por una corriente rectilínea. Estudio comparativo entre los campos gravitatorio y eléctrico.*

– *Campo magnético creado por una carga móvil, por una corriente indefinida, por una espira circular y por un solenoide en su interior.*

– *Acción de un campo magnético sobre una carga en movimiento. Fuerza de Lorentz. Acción de un campo magnético sobre una corriente rectilínea. Estudio cualitativo de la acción de un campo magnético sobre una espira. Mención a sus aplicaciones. Experiencias con bobinas, imanes y motores. Magnetismo natural. Analogías y diferencias entre campos gravitatorio, eléctrico y magnético.*

– *Interacciones magnéticas entre corrientes paralelas. El amperio.*

– *Inducción electromagnética. Experiencias de Faraday y Henry. Leyes de Faraday y de Lenz. Producción de corrientes alternas. Referencia al impacto medioambiental de la energía eléctrica y a las fuentes de energía renovables. Importancia de la síntesis electromagnética de Maxwell. Ondas electromagnéticas, aplicaciones y valoración de su papel en las tecnologías de la comunicación.*

Igualmente, la temática central de esta práctica está en íntima conexión con el bloque 7: *Introducción a la Electroquímica*, correspondiente a la asignatura de Química 2º Bachillerato, como menciona el DECRETO 42/2008, de 5 de Junio (B.O.C.yL n0111).

Respecto a la programación didáctica para la asignatura (optativa) Electrotecnia descrita en el mencionado DECRETO 42/2008, de 5 de Junio (B.O.C.yL n0111) que se centra en el estudio del electromagnetismo y sus aplicaciones, el tema de esta practica encaja dentro del marco general de la asignatura, que todo sea dicho, requiere conocimientos de física y química como requisito previo.

1.4 Aspectos docentes y didácticos

De acuerdo con el diccionario de la Real Academia Española, el profesor es la *persona que ejerce o enseña una ciencia o arte*. Me gustaría ir un poco más allá y definir al buen profesor como el profesional experto en su área o materia, reflexivo, crítico e investigador de su propia práctica docente capaz de entender la

complejidad de la realidad educativa y por tanto de adecuar su práctica docente al contexto determinado por el grupo de alumnos y sus circunstancias (relativas tanto al nivel de sus conocimientos como a sus condicionantes sociales), con el objetivo de una educación holística de los alumnos que les prepare para afrontar sus retos futuros.

1.4.1 Planificación de la enseñanza/aprendizaje.

✓ Organización del alumnado

La actividad experimental que se desarrolla en este informe está pensada y diseñada como experiencia de laboratorio para que sea realizada por el alumnado.

La distribución del alumnado en el laboratorio será en pequeños grupos (entre 2-4 alumnos) siempre en función del número total de alumnos.

La escasa peligrosidad de las actividades junto con el tipo de material necesario para el desarrollo de la misma, hace que sea viable la realización de la experiencia en el propio aula en aquellos casos en los que no se disponga de un aula de laboratorio.

✓ Temporalización

EL tiempo estimado para la realización de la práctica es de tres sesiones de 60 minutos. La secuenciación de actividades en cada una de las sesiones se detalla a continuación.

❖ Sesión 1

En la primera sesión el profesor hace una presentación general de la temática, al tiempo que explica los objetivos de la práctica, las tareas a realizar y el tiempo estimado para realizarlas y los criterios de evaluación. En esta primera sesión, los alumnos, organizados en grupos, dispondrán de tiempo para la organización del trabajo en equipo y la búsqueda bibliográfica-documentación.

❖ Sesión 2

La segunda sesión se dedica a la parte experimental, descrita en los puntos 3 y 4 de este informe, *Actividad de laboratorio: construir un pila de Volta* y *Actividad de laboratorio: Estudio de las propiedades de una pila*, respectivamente. Los alumnos deberán organizarse adecuadamente para completar los experimentos y trabajar los datos.

❖ Sesión 3

En la tercera y última sesión se presentan los datos y las conclusiones de cada grupo al resto de la clase. El profesor dirige el debate/discusión del punto 5: *Pilas y sus aplicaciones: funcionamiento de una linterna con LED*, en el que los grupos de alumnos exponen sus trabajos de investigación al resto de compañeros.

Finalmente, el profesor cierra la práctica con el resumen de los conceptos y contenidos más relevantes, aclara las dudas que surjan y hace una pequeña síntesis de la actividad experimental.

1.4.2 Metodología y estrategias de la enseñanza

En la elección de la metodología de enseñanza, parto del convencimiento de los beneficios de una metodología activa y siempre adaptada al grupo de alumnos y sus circunstancias, que esté basada en los ideales constructivistas del aprendizaje: promover y favorecer el desarrollo de capacidades metacognitivas en el alumno para llevar a cabo un aprendizaje significativo.

*“La condición indispensable para aprender una información de manera significativa es tener la experiencia personal de descubrirla”,
aprendizaje por acción y descubrimiento según J. S. Bruner.*

Si bien la bibliografía especializada describe una variedad de metodologías activas tales como el aprendizaje por descubrimiento, aprendizaje por proyectos, aprendizaje colaborativo/cooperativo en grupos (reparto de roles), etc., a la hora de elaborar la práctica no me limito a una metodología particular. Más bien me inspiro en las ideas fundamentales de las anteriores, adecuando la filosofía del aprendizaje constructivo a cada una de las actividades de las que consta la experiencia propuesta de laboratorio (ver tabla1). Así se entremezclan actividades de descubrimiento deductivo (alumno conoce los conceptos previamente) con otras en las que se adquieren conceptos a través de la observación (descubrimiento inductivo), siempre fomentando el trabajo en equipo y el consecuente reparto de tareas y roles que desarrolla y refuerza la capacidad para la interacción con los demás. La finalidad de las distintas actividades propuestas es que el alumno se erija como protagonista del proceso de construcción del conocimiento, combinando el saber científico (llamado *teoría*) con su aplicación (llamado *actividad práctica*). El profesor adquiere el rango de mentor/guía del proceso de aprendizaje estableciendo de manera clara los objetivos de la actividad, introduciendo la temática sin exponer los contenidos de un modo acabado, y estando accesible para resolver cualquier duda o cuestión que pueda surgir.

❖ Estrategia de enseñanza: Actividades propuestas

El diseño de una práctica de laboratorio a partir de materiales cotidianos es una estrategia didáctica en si misma. Los puntos fuertes de este tipo de actividad experimental son (i) la observación directa del fenómeno, que supone una actividad novedosa que rompe la cotidianidad del aula, (ii) la posibilidad de repetición de la experiencia fuera del ámbito del aula, lo que repercute positivamente en el interés del alumnado por la búsqueda de los por qué, (iii) el hacer por uno mismo y comprender las razones por las que ocurren las cosas, lo que refuerza las capacidades creativas y de planificación, mejora la relación de conceptos y ayuda a la comprensión profunda, sin lugar a dudas la base del aprendizaje significativo: *oigo y olvido, escucho y recuerdo, hago y comprendo, Confucio.*

Como contrapunto, surge la imprescindible y necesaria planificación docente que incluye: la selección de los contenidos, la definición clara de los objetivos a alcanzar por el alumnado, la secuencia de las tareas y de la metodología para el desarrollo de la práctica experimental.

Las actividades a desarrollar en el contexto del presente TFM y que se describen en la tabla 1, han sido pensadas y diseñadas pretendiendo la familiarización de los alumnos con la práctica investigadora inherente a una asignatura experimental como la Física (extensible a otras materias de Ciencias: Química, Biología, etc.) como parte de la alfabetización científica necesaria en la sociedad actual. En líneas generales, estas actividades se organizan en:

- ⇒ Trabajo en grupo: organización de las tareas, cooperación, reparto de roles, discusión activa, etc.
- ⇒ Búsqueda bibliográfica y documentación.
- ⇒ Actividades prácticas: diseño de experimentos y análisis crítico de los resultados.
- ⇒ Comunicación dentro del grupo de trabajo y con el resto de compañeros.

**Tabla 1. Detalle de las actividades a realizar por los alumnos en el contexto de la presente practica:
"ELECTROQUIMICA: Galvani, Volta o el Pez Torpedo".**

Actividades de documentación	Actividades experimentales	Actividades de comunicación
Búsqueda bibliográfica sobre tipos de pilas, correspondiente al punto 2.3 del guión de práctica: <i>"Pilas: definición y tipos. Pilas de combustible"</i>	Construcción de pilas (punto 3 del guion de práctica): <ul style="list-style-type: none"> • Pila Volta • Pila limón 	Organización de las tareas y reparto de roles en el grupo de trabajo
Aplicaciones de la electrolisis	Electrolisis del agua	Discusión de los resultados en grupo de trabajo
Elaboración de un informe correspondiente al punto 5 del guión de práctica: <i>"Aplicaciones de las pilas: LEDs"</i> (deberá ser entregado para su evaluación)	Estudio de las propiedades de una pila (punto 4 guión de práctica): <ul style="list-style-type: none"> • Resistencia interna • Capacidad 	1. Contribución al debate correspondiente al punto 5: <i>"Aplicaciones de las pilas: LEDs"</i> 2. Presentación de las conclusiones generales al resto de la clase.

1.4.3 Evaluación de la enseñanza/aprendizaje

La finalidad de todo proceso de enseñanza/aprendizaje debe ser que los alumnos aprendan, que adquieran una serie de conocimientos y desarrollen las competencias necesarias para aplicar el conocimiento adquirido más allá del aula. La tendencia actual es la de una evaluación continua, global, integradora e individualizada del proceso enseñanza/aprendizaje. Dicha evaluación se convierte en instrumento de acción pedagógica para la mejora de todo el proceso educativo. Desde este enfoque, la finalidad de la evaluación de la enseñanza/aprendizaje es proporcionar información al docente acerca de la eficacia educativa del procedimiento desarrollado en el aula tomando como medida o referente el éxito o fracaso del aprendizaje del alumnado respecto a los objetivos previstos.

En el caso concreto de esta práctica de laboratorio, la evaluación de los conocimientos y competencias adquiridos por el alumnado se basa en los indicadores:

- Evaluación continua del trabajo de campo: se observa la actitud del alumno para con la tarea (actitud científica, de responsabilidad con el saber hacer en el laboratorio), así como su capacidad de trabajar en un grupo (reparto de roles y tareas, comunicación y colaboración con sus compañeros, etc.). Se evalúa la actitud en relación al campo de conocimiento durante el desarrollo de la experiencia a través de preguntas cortas. (40%)
- Cuaderno del laboratorio: limpieza y orden del diario de laboratorio, razonamiento coherente de resultados y conclusiones. (30%)
- Actitud crítica respecto al papel de la ciencia en la sociedad: aplicación de los conceptos trabajados en la experiencia al mundo contemporáneo. Entrega del informe (30%) elaborado en grupo sobre uno de los temas:
 1. Tendencias en la investigación sobre pilas: pila de combustible
 2. Que es un LED, funcionamiento y aplicaciones

En profesor deberá autoexaminar y autoevaluar su propia estrategia de enseñanza al analizar las calificaciones de los alumnos llevando a cabo acciones de mejora para el futuro a lo largo de toda su vida profesional.

2. DISEÑO DE UNA PRÁCTICA DE LABORATORIO.

“ELECTROQUÍMICA: Galvani, Volta o el Pez Torpedo”

La experiencia de laboratorio *Electroquímica: Galvani, Volta o el Pez Torpedo* pretende que el alumnado se familiarice con la práctica científica, con la identificación de un problema que cuestiona el saber establecido, con el planteamiento de hipótesis, el desarrollo de experimentos y la evaluación de los resultados obtenidos, la emisión de conclusiones y la comunicación de los nuevos conocimientos.

2.1 Antecedentes históricos: Volta y su pila *a colonna*

En la actualidad, hablamos de *electricidad* para referirnos al conjunto de fenómenos físicos relacionados con la presencia y flujo de cargas eléctricas, pero su naturaleza permaneció sin descifrar hasta finales del siglo XVII - principios del siglo XIX. La historia de la evolución del conocimiento sobre la electricidad esta formada por observaciones aisladas, una serie de especulaciones, intuiciones médicas (ej. descargas eléctricas del pez torpedo para tratar migrañas y otras dolencias) y hasta objetos arqueológicos de interpretación discutible (ej. batería de Bagdad).

Los fenómenos de electrización se conocen desde la antigüedad. Ya en el s.VI a.C., Tales de Mileto observó que al frotar una barra de ámbar con un paño ésta era capaz de atraer ciertos objetos, experiencia ésta pionera en la historia de los fenómenos eléctricos. Durante cierto tiempo, los fenómenos de electrización se limitaron a ser objeto de curiosidad para el gran público. Sin embargo, a finales del s.XVII y en el s.XVIII comienzan las primeras aproximaciones científicas al fenómeno mediante experimentos con rigor científico que pretenden entender el origen y la naturaleza de la electricidad. A las investigaciones de los Gilbert, Cavendish, o Mushenbroek, les siguen los exitosos resultados de Galvani, Volta, Coulomb o Franklin. La total comprensión del fenómeno, sin embargo, no se da hasta el s.XIX consecuencia de la explosión de conocimiento acerca del magnetismo y los fenómenos magnéticos, fundamentado en su relación con las cargas eléctricas en movimiento (o corriente eléctrica) a raíz de las experiencias fundamentales de Ørsted, Ampère, Faraday, Ohm, que culminan con la formulación matemática del electromagnetismo de J.C. Maxwell.

El desarrollo de la pila electroquímica es una pieza central del puzle del electromagnetismo, y constituye uno de los hitos de la pionera práctica científica en el vertiginoso y excitante periodo de final del s. XVII, primeros del s. XVIII. En el marco histórico de esta época, comienza a despertar el interés científico sobre la naturaleza de la electricidad, el origen de los fenómenos eléctricos y sus potenciales aplicaciones. Dos notables científicos son los protagonistas de un debate sin tregua para dilucidar el origen de los fenómenos eléctricos: Luigi Galvani y Alessandro Volta (referencia). El primero, (Galvani) inmenso en sus estudios de fisiología observó cómo las ancas de rana se movían espasmódicamente (el anfibio estaba muerto) al conectar dos metales con el músculo estando estos metales contacto mediante un arco metálico, como describió en *L. Galvani, "De viribus electricitatis in motu musculari Commentarius", De bononiensi scientiarum et artium instituto atque academia Commentarii, (Bononiae), 7 (1791), pp. 363-418*. El segundo, (Volta) inicialmente impresionado por tales descubrimientos prosiguió sus investigaciones utilizando diversos metales que sustituían a los tejidos vegetales de Galvani en la construcción de un órgano eléctrico artificial. De sus propios estudios con metales, dedujo que lo que Galvani clamaba era el resultado de la electricidad animal no era sino una manifestación equivalente del fenómeno eléctrico observado en metales.

En la actualidad sabemos que tanto Galvani como Volta tenían razón, las células vivas producen electricidad, pero también aparece una fuerza electromotriz cuando se ponen en contacto dos metales en un medio electrolítico. Los estudios de Galvani suponen el origen de la neurofisiología. Los de Volta, llevan al desarrollo de la primera pila electroquímica. En efecto, en 1800 Alexandro Volta anuncia su descubrimiento de la pila voltaica, la *pila a colonna*, cuya forma estaba inspirada en la estructura columnar de los órganos eléctricos del pez torpedo. La descripción científica de su descubrimiento la plasma en un artículo enviado a la Royal Society de Londres: *Volta, A. 1800. "On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds". Phil. Trans. Roy. Soc. 90: 403-31*. Sólo un año mas tarde, en 1801, viaja a Paris como invitado de Napoleón Bonaparte con la intención de exponer las características de su invento en el Instituto de Francia, donde un comité de expertos de la Academia de las Ciencias corroboró la validez del invento, lo que le valió una distinción nobiliaria (conde y senador del reino de Lombardía) por parte del emperador.

La pila de Volta despertó un gran entusiasmo entre los científicos de su época, sirviendo de impulso para una serie de experimentos a lo largo y ancho de Europa (ej. casi inmediatamente se descubrió que la electricidad podía descomponer el agua: electrolisis) que jugaron un papel esencial en los trabajos químicos de Davy y para el estudio de los fenómenos electromagnéticos de Faraday.

2.2 Procesos electroquímicos: obtención de energía eléctrica a partir de una reacción química (redox)

Las reacciones de oxidación y reducción son aquellas en las que se produce una transferencia de electrones entre las especies reactantes, lo que resulta en un cambio en el número de oxidación de dichas sustancias en el proceso global.

Para que se produzca una reacción redox, es necesaria la presencia conjunta de una sustancia que se gane electrones, especie reductora, y de otra que pierda electrones la especie oxidante, pues los procesos de reducción y oxidación se dan de forma simultánea.

El concepto de oxidación/reducción ha evolucionado a lo largo del tiempo. Así, Lavoisier (s.XVIII) definió la oxidación como el resultado de la combinación de una sustancia con oxígeno en tanto que la reducción consiste en la pérdida de oxígeno como consecuencia de un proceso químico. En una reformulación de los conceptos establecidos por Lavoisier supuso que toda reacción de hidrogenación es un proceso de reducción y de manera equivalente todo proceso de deshidrogenación es un proceso de oxidación. En la terminología actual se definen los procesos de oxidación y de reducción como

- *oxidación* se refiere a la pérdida de electrones (aumenta el número de oxidación)
- *reducción* se refiere a la ganancia de electrones (disminuye el número de oxidación)

En el presente contexto, el interés sobre las reacciones redox se centra en su utilización para la producción y almacenamiento de electricidad. La electroquímica estudia los procesos basados en procesos redox. Por un lado, el estudio de las pilas relaciona con la producción de electricidad a partir de un proceso redox espontáneo. Por otro lado, el uso de electricidad para llevar a cabo un proceso redox (no espontáneo) da lugar a los procesos electrolíticos.

Una buena manera de interrelacionar los conceptos redox con esta actividad de laboratorio es lanzar una pregunta del tipo “quizás te has preguntado acerca de la química que hace funcionar a una pila. Documentate sobre los procesos químicos que tienen lugar en ella y discútelos con tu grupo de trabajo”.

2.3 Tipos de pilas electroquímicas. Pilas de combustible.

Durante los más de 200 años transcurridos desde la aparición de la pila a columna, se han desarrollado una amplia gama de pilas que suponen mejoras en la eficiencia

energética, la contaminación, su tiempo de vida útil, tamaño, etc., si bien su funcionamiento está basado esencialmente en los principios fundamentales de la pila de Volta. En la figura 2-1 se puede ver un esquema ilustrativo acerca de la evolución de la pila desde la aparición de la pila de Volta hasta las tendencias futuras de pilas de combustibles.

Una pila electroquímica es un dispositivo que genera electricidad por medio de una reacción química, y que por lo tanto, convierte energía química en energía eléctrica. Los elementos estructurales de toda pila son dos electrodos, uno positivo o cátodo y otro negativo o ánodo, y un medio conductor de los iones o electrolito que puede ser un líquido, un sólido o una pasta. En el ánodo se produce la oxidación lo que genera electrones que son recibidos en el cátodo, en el que se produce la reducción. Al conectar los electrodos al aparato que hay que alimentar se produce una corriente eléctrica.

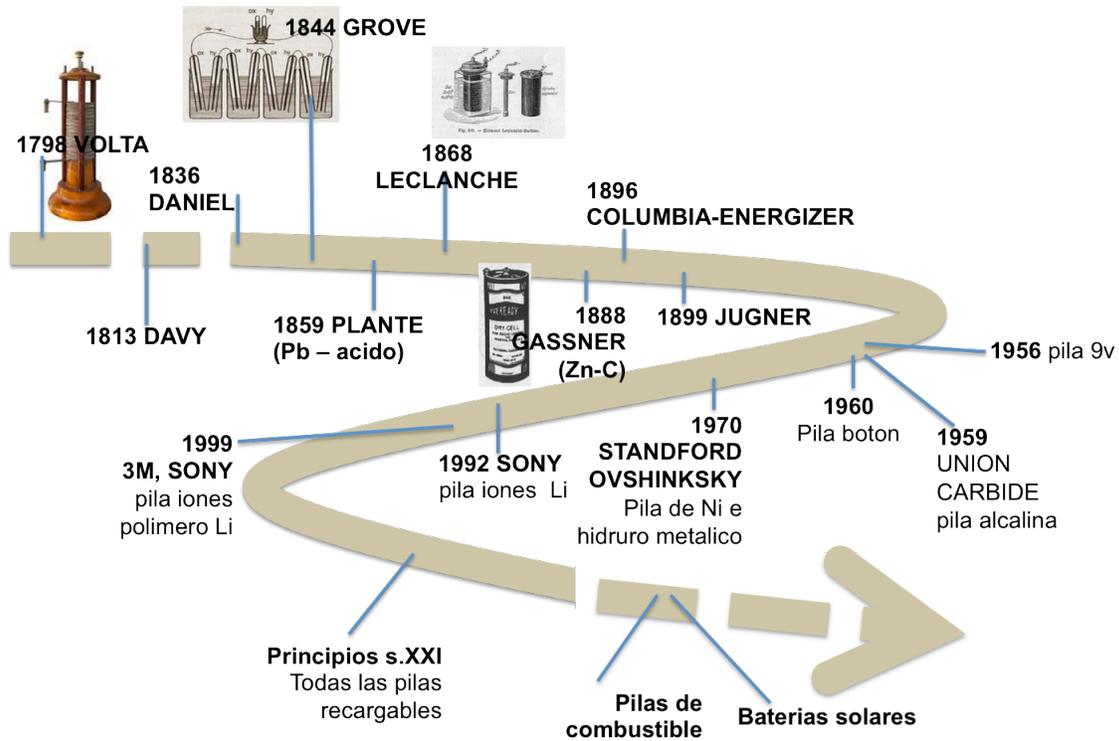


Figura 2-1. Perspectiva cronológica de la evolución de las pilas.

2.3.1 Clasificación general de los tipos de pilas

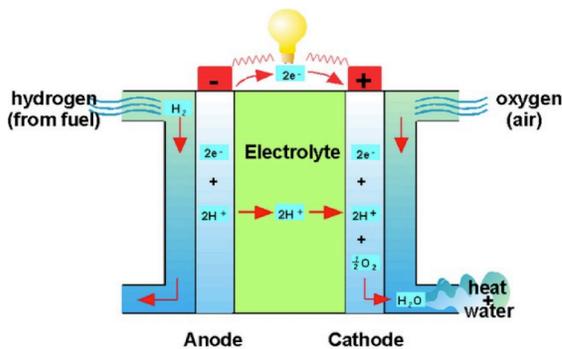
- *Pilas primarias* – aquellas que genera electricidad a partir de reactivos que quedan encerrados en el dispositivo al ser fabricada. Son pilas no

recargables, por lo que una vez alcanzado el equilibrio de la reacción la pila se agota y se desecha. Como ejemplos: pila salina, pila alcalina, pila de litio, pilas primarias de botón, pila de óxido de mercurio, etc.

- *Pilas secundarias* – deben recargarse a partir de otra fuente de energía antes de usarse. Suelen ser recargables normalmente (como una batería de coche) de manera que durante el proceso de recarga, una mezcla de reactantes que no está en equilibrio es generada por una fuente de electricidad externa. La pila produce electricidad a medida que la reacción evoluciona hacia el equilibrio. Algunos ejemplos: baterías plomo/ácido, baterías Ni/Cd, batería de litio, baterías solares, etc. También se denominan acumuladores.

2.3.2 Pilas de combustible

Una pila de combustible es un dispositivo que convierte la energía química de un combustible (hidrógeno, metanol, gas natural, etc.) y un oxidante (oxígeno o aire)



directamente en electricidad. Técnicamente se trata de reactores electroquímicos que precisan de un flujo constante de combustible (ver esquema en figura 2-2).

El fundamento científico de la pila de combustible fue propuesto por William Grove ya en el s. XIX, quien demostró la posibilidad de producir corriente eléctrica a partir de la reacción electroquímica entre el

Figura 2-2. Diagrama de la pila de hidrógeno.
Referencia: www.motorpasionfuturo.com

hidrógeno y el oxígeno. Su original experimento consistía de cuatro celdas electroquímicas cada una de las cuales contaba con un electrodo con hidrógeno y otro con oxígeno, separados por un electrolito. Grove comprobó que la reacción de oxidación del hidrógeno en el electrodo negativo combinada con la reducción del oxígeno en el electrodo positivo generaba una corriente eléctrica.

El dispositivo de la pila de combustible actual es muy simple. Consta de dos electrodos separados por un electrolito formado por un material que permite el paso de los iones (de carga positiva y negativa) pero no de los electrones. Al igual que en todas las pilas, en el ánodo se produce la oxidación y en el cátodo la reducción del oxígeno del aire.

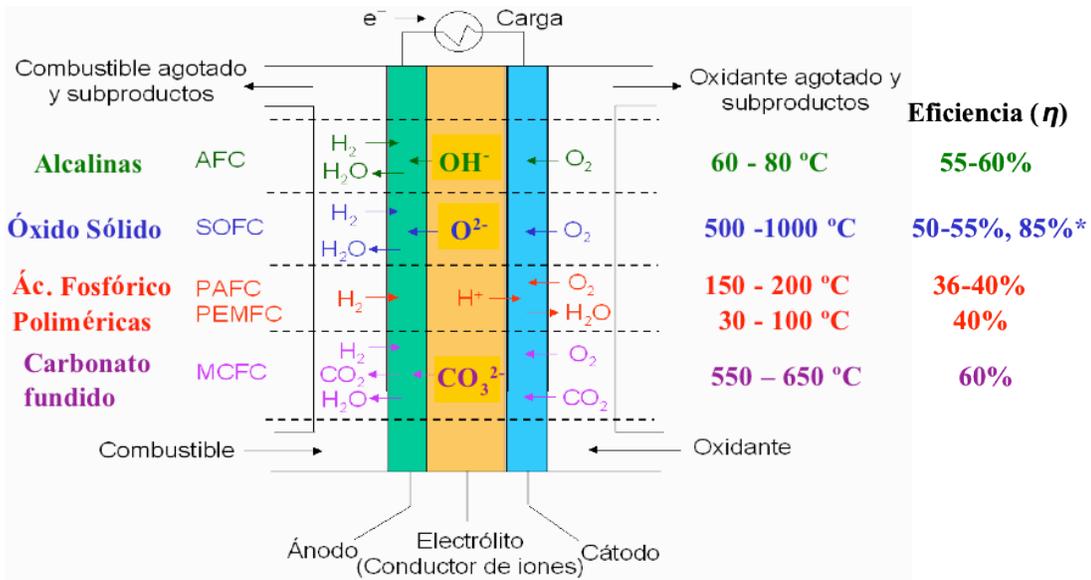
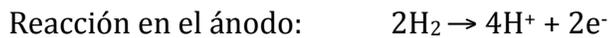


Figura 2-3. Tipos de pila de combustible, indicando el ion transportado por la membrana, la temperatura de uso y las eficiencias. Ref. <http://fmc.unizar.es/people/rmerino/papers/divsofc.pdf>

Analizamos el caso particular de la pila de hidrógeno (usa hidrógeno como combustible). La reacción que se produce en la pila de hidrógeno supone la combinación de hidrógeno y oxígeno para formar agua, generando energía eléctrica y calor:



Las aplicaciones de las pilas de combustible abarcan un amplio espectro de productos desde dispositivos portátiles (audífonos, teléfonos móviles, ordenadores, pequeños electrodomésticos), aplicaciones portátiles a vehículos de todo tipo (barcos, automóviles, autobuses) hasta generadores estacionarios de calor y energía en zonas residenciales u hospitales. La tendencia apunta a su uso como generadores de energía a gran escala, convirtiéndola en una potencial tecnología de futuro.

Las líneas de investigación en materiales y tecnología relativa a las celdas de combustible se centran en el estudio estructural de materiales y diseño de electrodos y membranas de intercambio de iones para su mejor rendimiento en las condiciones operacionales de funcionamiento.

3. ACTIVIDAD DE LABORATORIO: CONSTRUIR UNA PILA DE VOLTA

3.1 Construcción de una pila de Volta a partir de materiales cotidianos

Para la construcción de nuestra pila de columna (pila da Volta) vamos a necesitar los materiales:

- Soporte: taco de madera, palos de madera para brochetas.
- Metales: monedas de 5 céntimos de euro (o cualquier otra que esté recubierta de cobre), arandelas cincadas, papel de aluminio.
- Círculos de papel
- Vinagre
- Cable, LEDs de colores
- Horquillas conectoras

3.2 Descripción del proceso de construcción y puesta en funcionamiento de nuestra pila

Una vez que tenemos todos los materiales, nos dispondremos a montar nuestra pila a columna. Para ello, solo hay que apilar los elementos en la plataforma (entre los tres palos) siguiendo un orden: arandela cincada, papel (impregnado de vinagre), moneda de 5 céntimos, arandela cincada, papel, moneda de 5 céntimos, etc.

No debes olvidar conectar los cables a cada uno de los electrodos (uno a la arandela y otro a la moneda). Una vez montada la columna, conecta un LED a la pila..... y verás como se enciende!!

Apuntes:

- Debes prestar atención al orden de los elementos en la pila.
- Fíjate, los extremos de la columna deben estar formados por distintos metales, sino no aparece diferencia de potencial.
- Es conveniente dejar los papeles durante unos 5 minutos sumergidos en el vinagre para que se impregnen adecuadamente.

En la figura 3-1 se muestran los pasos seguidos en la construcción de nuestra pila de Volta.

Recuerda en qué consiste un cuaderno de laboratorio. No olvides tomar buena nota de cualquier incidencia, del procedimiento seguido, las observaciones pertinentes y

los datos experimentales (voltaje de la pila, número de unidades de cada elemento usadas, etc.) y cualquier incidencia ocurrida durante la medición.

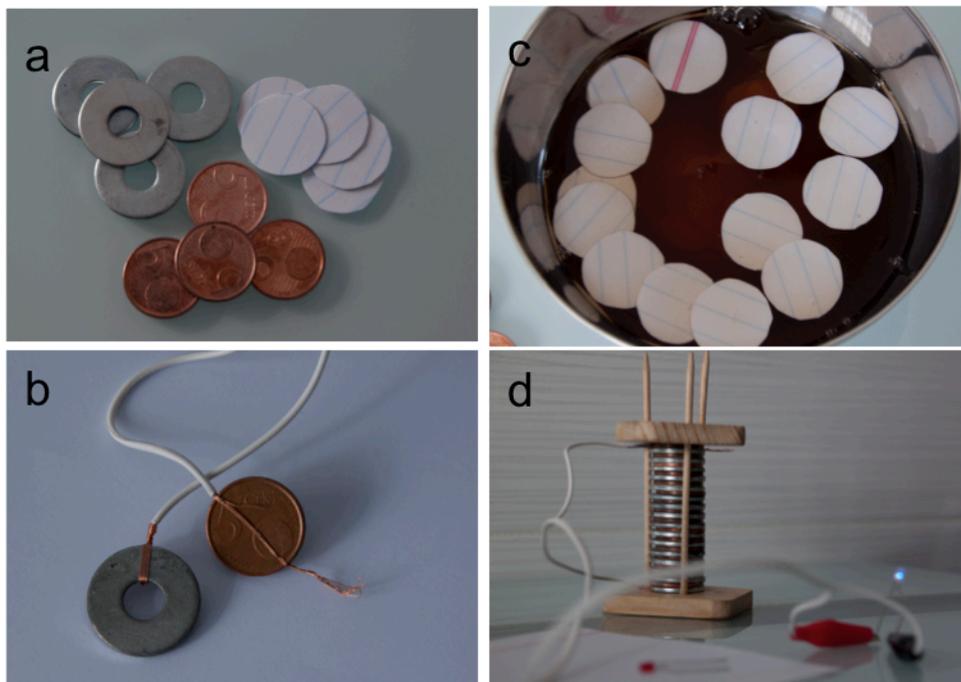


Figura 3-1. Pasos para la construcción de la pila: (a) materiales, (b) impregnación del papel con el electrolito, (c) detalle de los polos de la pila y (d) pila de materiales con LED.

3.3 Aplicación de la pila: Electrolisis del agua

La electroquímica estudia la transformación entre energía eléctrica y energía química. En el apartado anterior has construido un dispositivo que convierte la energía de un proceso químico en energía eléctrica: la pila. Pero también se puede llevar a cabo el proceso inverso (uso de energía eléctrica para llevar a cabo una reacción química) utilizando una celda electrolítica.

En este punto se utiliza la energía eléctrica de nuestra pila de columna para llevar a cabo una electrolisis. En particular, vamos a realizar la electrolisis del agua. Busca información y documéntate sobre el proceso: fundamento teórico, elementos de una celda electrolítica, voltaje necesario para poder realizar la descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno, etc., y construye tu celda electrolítica. Recuerda que la fuente de energía será la pila que has construido anteriormente.

Los electrodos de carbono los puedes obtener de la mina de un lapicero (figura 3-2). Conecta la pila a los electrodos, sumérgeles en el vaso con agua y anota lo que observas. ¿Puedes identificar el ánodo y el cátodo? Razona tu respuesta.

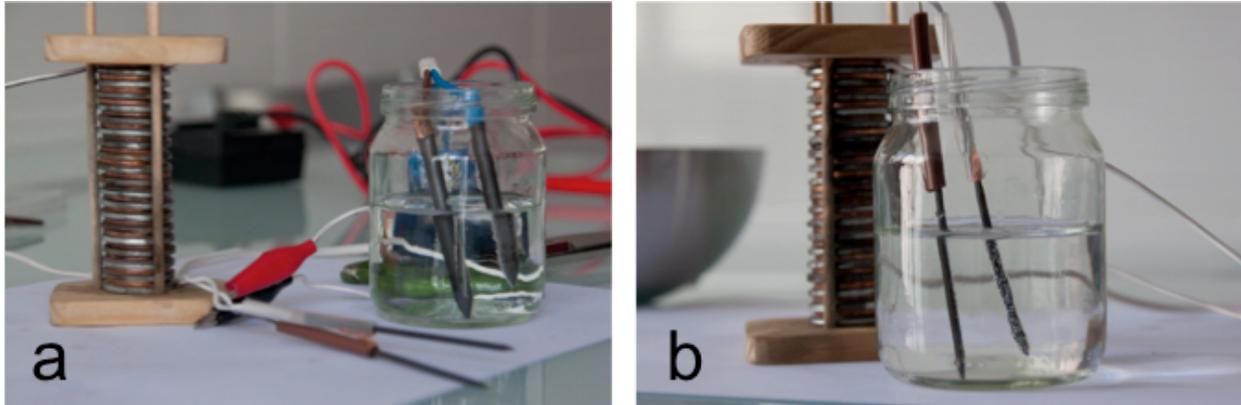


Figura 3-2. Electrolisis del agua utilizando la fuerza de una pila de 9v. (a) con electrodos de carbono gruesos y (b) con electrodos de carbono finos.

Prueba a llevar a cabo la electrolisis usando una pila de petaca (9v), y usando tu pila a columna (utiliza un número de cuerpos necesario para alcanzar el voltaje de la pila comercial). ¿Observas alguna diferencia? ¿Podrías explicar por qué?

3.4 Cuestiones para el alumnado

- Describe los procesos electroquímicos que tienen lugar en la pila a columna, indicando: ánodo, cátodo, semirreacciones que tienen lugar, etc.
- El orden en el que se apilan los elementos es fundamental, ¿sabrías explicar por qué?
- ¿Por qué es necesario el medio ácido? ¿Qué otra sustancia podrías utilizar?
- Como alternativa a lo anterior, se propone el uso de papel de aluminio en lugar de las arandelas cincadas. Anota el voltaje de la pila aluminio-cobre.
- ¿Sería posible utilizar dos metales al azar para la fabricación de una pila? Razona tu respuesta.

4. ACTIVIDAD DE LABORATORIO: ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DE UNA PILA

4.1 Resistencia interna de una pila: estudio comparativo de la pila a columna y la pila convencional

Fundamento teórico

Las pilas eléctricas se caracterizan por su fuerza electromotriz y por su resistencia interna. En esta experiencia se medirán ambas magnitudes. Finalmente, se comparan los valores obtenidos con los característicos de una pila convencional (pila seca zinc-carbono) de 1.5v. Los conceptos que se trabajan en esta experiencia son: Ley de Ohm, intensidad de corriente, resistencia interna, potencia.

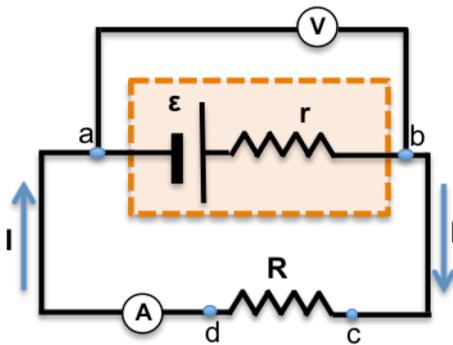


Figura 4-1. Esquema del circuito eléctrico objeto de estudio: un generador (pila columna), una resistencia externa (banco de resistencia variable), un voltímetro y un amperímetro.

Para medir la resistencia interna de la pila a columna construida en la sesión anterior, conectamos nuestra pila a un circuito como el que se esquematiza en la figura 4-1. Dicho circuito consta de una única resistencia externa conectada en serie con la pila representada por el recuadro anaranjado como la combinación de una fuerza electromotriz ideal en serie con una resistencia interna.

Recuerda la ley de Ohm (1826): *la intensidad de corriente eléctrica que circula por un conductor eléctrico es proporcional a la diferencia de potencial aplicada e inversamente proporcional a la resistencia del mismo,*

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R} [=] \frac{\text{voltios}}{\text{ohmios}} = \text{Amperios} \quad (\text{Ecuación 1})$$

La ley de Ohm generalizada aplica al estudio de circuitos: la intensidad de corriente que circula por un circuito cerrado es igual a la suma algebraica de las fuerzas electromotrices y contra electromotrices, dividida entre la suma de las resistencias externas e internas del circuito. Nuestro circuito objeto de estudio (figura 4-1) cuenta con una resistencia externa y un generador de electricidad (pila). Así, la ley de Ohm generalizada se expresa:

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

donde ε es la fuerza electromotriz de la pila, R es la resistencia externa y r es la resistencia interna de la pila.

Por otra parte $\Delta V = IR$, siendo ΔV la diferencia de potencial entre los bornes de la pila, cuyo valor se lee directamente en el voltímetro. Así, al combinar esta expresión con la ecuación 2, se obtiene:

$$\Delta V = \varepsilon - I \cdot r \quad \text{(Ecuación 3)}$$

De la expresión anterior ($\Delta V = IR$) se deduce que cuando varíe la resistencia externa (banco de resistencia variable), también variarán I y ΔV . Fíjate en la ecuación 3. De esta expresión matemática se lee que la caída de tensión entre los bornes de la pila que suministra corriente, en otras palabras, la diferencia de potencial de la pila que esta suministrando corriente es menor que su fuerza electromotriz. La representación grafica de los valores de ΔV frente a los de la I es un recta (ecuación 3). El valor de la fuerza electromotriz (ε) y la resistencia interna de la pila (r) se calculan a partir de la pendiente (con signo contrario) y la ordenada en origen, respectivamente.

Desde el punto de vista práctico-operacional, interesan pilas cuyas resistencias internas sean bajas. Y es que la diferencia de potencial real que genera una pila es función de su fuerza electromotriz (voltaje máximo en ausencia de corriente) y de su resistencia interna. Busca información acerca del origen de la resistencia interna de una pila y el efecto que este valor tiene en el funcionamiento de la pila.

Materiales necesarios

Amperímetro

Voltímetro

Pila de colonna

Cables conectores

Banco de resistencias variable

Procedimiento

En primer lugar se monta el circuito descrito en la figura 4-1, que consta de una fuente de alimentación continua, la pila a columna, que suministra corriente a una resistencia externa conectada directamente a los bornes de la pila. En paralelo a la fuente o pila se conecta el voltímetro que mide la diferencia de potencial entre los puntos a y b del circuito en la figura 4-1. En serie con la resistencia externa se conecta el amperímetro que mide la corriente que pasa a través de la resistencia

externa (puntos c y d del esquema en figura 4-1). Fíjate que la corriente circula tanto por la resistencia externa (R) como por la resistencia interna de la propia pila (r). Se mide la diferencia de potencial de la pila en ausencia de corriente. Este valor corresponderá con la fuerza electromotriz de la pila. En nuestro caso resulta ser de $\Delta V=6.06\text{v}$. A continuación, se cierra el circuito y se toman medidas de la lectura del voltímetro (ΔV) y el amperímetro (I) al variar la resistencia externa con el banco de resistencia variable, en orden creciente. Una vez cuentes con un número significativo de medidas (cuanto mayor sea el número de medidas más realista será el ajuste por regresión lineal, con 10 valores será suficiente) representa los valores gráficamente y calcula los valores de ϵ y la r interna de la pila.

La imagen en la figura 4-2 ilustra el montaje instrumental empleado en este caso. Como observación, la lectura del voltaje que mide el voltímetro en esta figura corresponde al momento en el que se conecta un LED azul a la pila.



Figura 4-2. Montaje instrumental para medir la resistencia interna de la pila a columna: amperímetro, voltímetro, pila, banco de escala de resistencias. En esta foto se capta el detalle del voltaje al conectar un LED azul.

Cuestiones para los alumnos y soluciones obtenidas durante la puesta a punto de la experiencia

1. Construye un montaje como el que aparece en la figura 4-1. Calcula los valores de la resistencia interna y la fuerza electromotriz de la pila a partir de la ley de Ohm.

El montaje de componentes eléctricos utilizado en este caso durante la puesta a punto de la experiencia aparece en la figura 4-2. Conecta el amperímetro y el voltímetro con la resistencia externa y la pila. Seguidamente, se procede a la toma de valores de las lecturas del voltímetro y amperímetro para un valor de la resistencia externa dado. Durante la toma de datos los alumnos rellenan una tabla del tipo a la tabla 4-1.

Tabla 4-2. Muestra de tabla a rellenar por los alumnos durante el desarrollo de la experiencia.

	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Medida 6	Medida 7, ..etc.
Resistencia Externa (MΩ)	0	0.076	0.033	0.02	0.0048	0
Intensidad (μA)	0	50	75	100	125	150
Diferencia de potencial (voltios)	6.06	3.80	2.53	2.00	0.60	0

A continuación se representan gráficamente los valores obtenidos durante la puesta a punto de la experiencia:

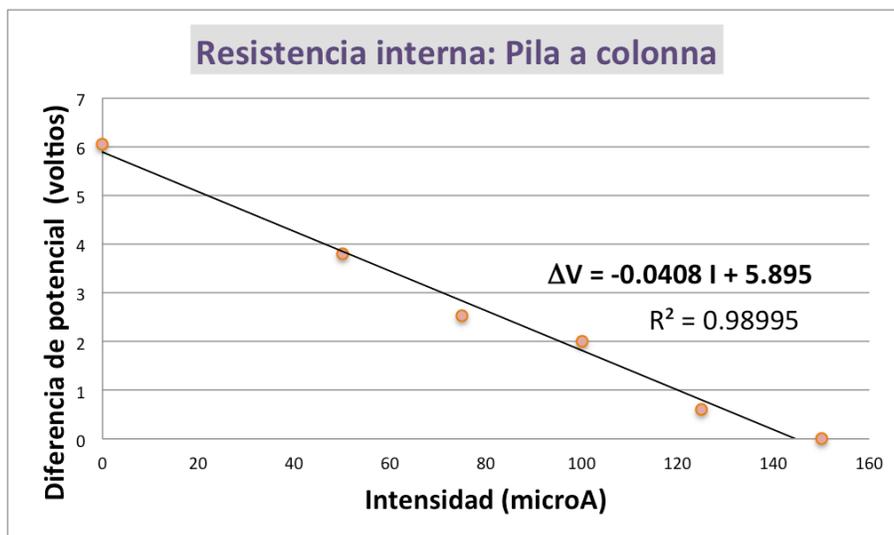


Figura 4-3. Representación gráfica de los resultados mostrados en la tabla 4-1. El valor de la resistencia interna de la pila a colonna se calcula con la pendiente de la recta, mientras que la ordenada en origen corresponde al valor de la fuerza electromotriz de la pila.

De acuerdo con la expresión de la recta de la regresión lineal (Excel) los valores de la resistencia interna y de la fuerza electromotriz en este caso son:

$$r = 0.04 \text{ M}\Omega$$

$\epsilon = 5.9 \text{ voltios}$ (en excelente acuerdo con la fuerza electromotriz medida al inicio de la experiencia correspondiente a 6.06 voltios).

2. Determina la potencia máxima suministrada por tu pila a columna. ¿Podrías estimar el valor de la resistencia externa para el que la pila suministra la máxima potencia a partir de la gráfica resultante?

Experimentalmente, a partir de los valores de I y V del apartado anterior se puede calcular la potencia (P) suministrada por la pila al circuito según la ecuación 4:

$$P = \Delta V \cdot I \quad \text{(Ecuación 4)}$$

A continuación se representan los valores de P calculados con la ecuación 4 frente a los valores de la resistencia y se ajusta la curva resultante. El máximo de la curva de la grafica potencia-resistencia corresponderá a un valor de R en coincidencia con el de la resistencia interna calculada en el apartado anterior para la pila a columna. La interpretación del resultado la da el teorema de la máxima transferencia de potencia: dada un fuente con su valor de resistencia la resistencia de carga que maximiza la transferencia de potencia es aquella con un valor óhmico igual a la de la resistencia interna de la fuente.

En este caso, el máximo deberá coincidir con $r = 0.04 \text{ M}\Omega$ del apartado anterior.

Para calcular teóricamente el valor de R que hace que la fuente suministre el máximo de potencia la circuito, sustituyendo en la ecuación 4:

$$P = I^2 \cdot R = \frac{\epsilon^2}{(R+r)^2} R \quad \text{(Ecuación 5)}$$

Derivando P_R respecto a R:

$$\frac{dP_R}{dR} = \epsilon^2 \frac{(R+r)^2 - R \cdot 2(R+r)}{(R+r)^4} = 0$$

La potencia máxima se obtiene cuando:

$$(R+r)^2 - 2R(R+r) = 0 \Rightarrow R+r - 2R = 0 \Rightarrow R = r \quad \text{(Ecuación 6)}$$

Así, la pila suministra la máxima potencia para un valor de la resistencia externa $R=r$.

3. Demuestra que si ϵ es la fem de una pila y r su resistencia interna, siendo R la resistencia de un voltímetro, la tensión que mide el voltímetro entre los bornes de la pila viene dada por la expresión: $V_{a-b} = \frac{\epsilon}{(1+r/R)}$

¿Se puede medir de forma exacta la fem de una pila con un voltímetro? Razona tu respuesta.

La expresión matemática de la diferencia de potencial V_{a-b} en el enunciado corresponde al caso de dos elementos, la pila con su ϵ y su r , y la resistencia externa R del voltímetro, conectados en paralelo.

El voltímetro va a dar un valor muy aproximado de fem de la celda. Esto se debe a que, incluso en el caso de voltímetro de muy alta resistencia el dispositivo drena algo de corriente lo que hace que una pequeña parte (pero una parte) de la fem de la pila se pierda en impulsar la corriente a través del equipo de medición, es decir, se obtiene una caída de potencial en la pila. Cuando la resistencia del voltímetro sea muy alta en comparación con la resistencia interna de la pila, esta caída de potencial será numéricamente despreciable.

Comparación con la pila convencional

Busca valores dados por fabricantes de pilas para la resistencia interna y compáralos con el valor de resistencia interna de tu pila a columna. En base a los valores, ¿crees que es sencillo hacer una buena pila?

4.2 Capacidad de una pila: estudio comparativo de una pila convencional y una pila de limón

Fundamento teórico

La capacidad de una pila se define como la carga que puede almacenar. Se expresa en amperios-hora (Ah). Si el fabricante indica que la pila tiene una capacidad de 1.400mAh quiere decir que puede suministrar una corriente de 1.4A durante 1 hora. Medir la capacidad de una pila no es trivial y depende de varios factores operacionales adicionales: aplicación para la que se usa, tiempo de uso, etc. En esta experiencia vamos a determinar el tiempo de descarga de una pila de limón, cuyo voltaje inicial no supera el valor de 1v.

Materiales necesarios

Amperímetro, Voltímetro

Pila de limón, arandela cincada o tornillo, moneda de 5 céntimos

Cables conectores

Banco de resistencias variable

Procedimiento

Para montar la pila de limón simplemente se hacen dos incisiones en un limón y se introduce en cada una de ellas cada uno de los electrodos, el ánodo (arandela/tornillo) y el cátodo (moneda) como se muestra en la figura 4-4a y 4-4b. Recuerda que la acidez propia del limón actúa como electrolito en esta pila. A continuación, conecta la pila limón al circuito como se muestra en 4-4c. Inserta la pila de limón en el circuito anterior. La toma de datos consiste en anotar la intensidad que lee el amperímetro en función del tiempo, por ejemplo toma valores cada 3 minutos.

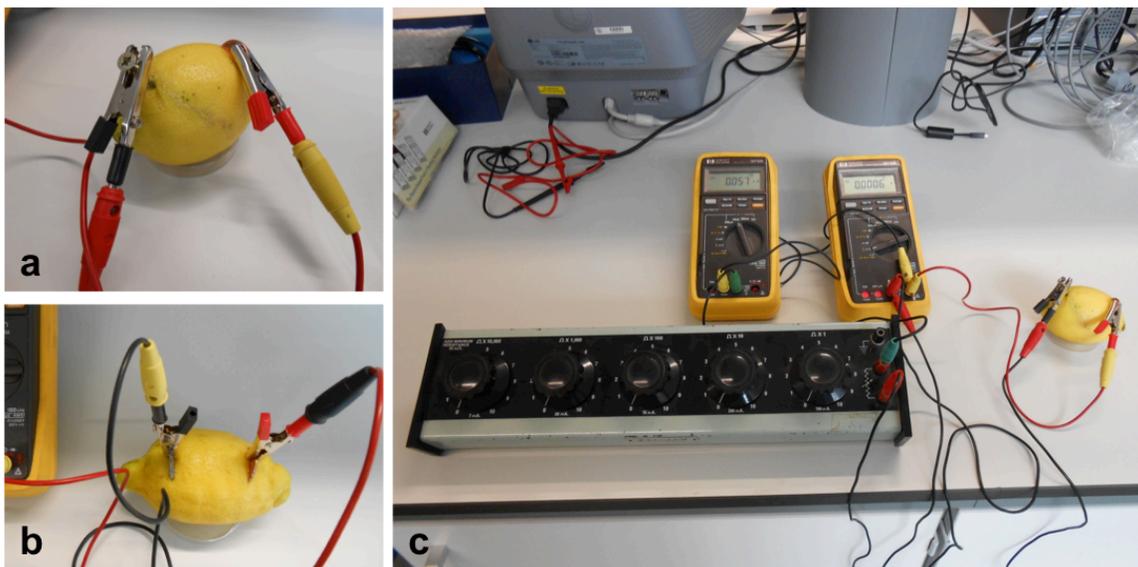


Figura 4-4. Montaje instrumental para determinar la capacidad en una pila de limón. (a y b) Construcción de la pila y (c) montaje del circuito.

Cuestiones para los alumnos y soluciones obtenidas durante la puesta a punto de la experiencia

1. Representa gráficamente los valores experimentales y estima a partir de la gráfica la capacidad de la pila de limón.

Una vez ordenados los datos, represéntalos gráficamente. En nuestro caso, hemos realizado medidas utilizando como ánodo un tornillo (capa de bricromatado + capa galvanizado con Zn) y una arandela de zinc. En la figura 4-5 se muestra la gráfica resultante para el ánodo de tornillo una vez se alcanza la capa del galvanizado.

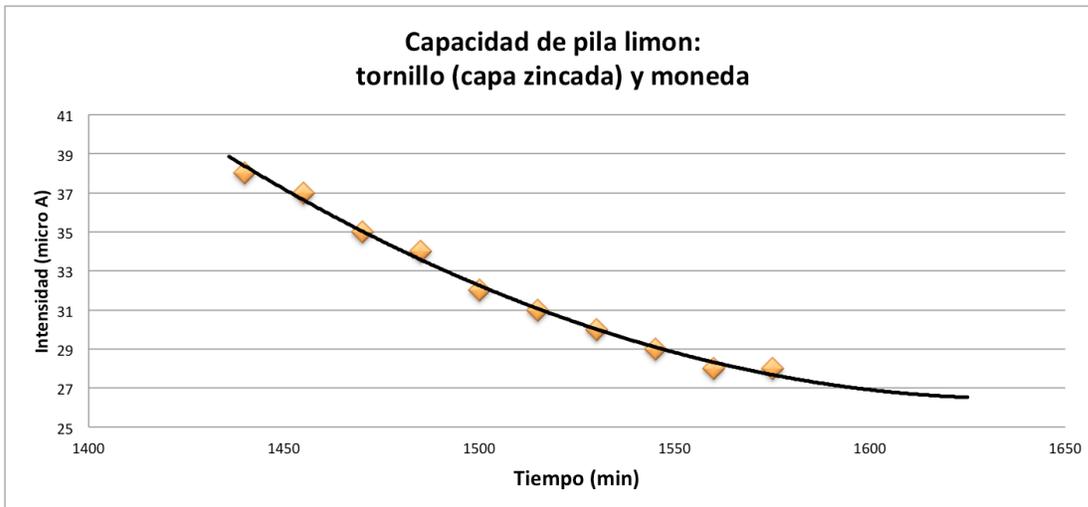


Figura 4-5. Curva experimental de descarga de la pila de limón.

Para estimar la capacidad de la pila bastaría con identificar el valor de la intensidad de corriente a la que se opera y observar por cuanto tiempo la pila puede proporcionar esa intensidad en base a la curva de descarga obtenida.

Comparación con la pila convencional

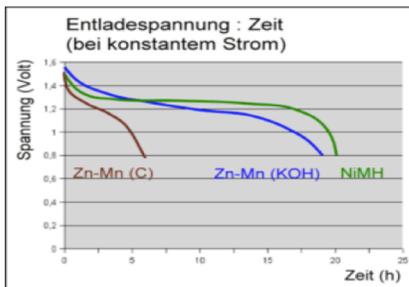


Figura 4-6. Curvas de descarga de varias pilas comerciales. Referencia: http://es.wikipedia.org/wiki/Pila_alcalina#Capacidad

Busca las curvas de descarga de varias pilas comerciales y compáralas con la obtenida para la pila de limón. En la figura 4-6 tienes algún ejemplo de curvas de descarga. Investiga las diferencias.

4.3 ¿Por qué deja de funcionar una pila? Deconstrucción de una pila convencional. Estudio de la variación de la fuerza electromotriz de la pila al principio y al final de su vida útil.

Una pila es una celda electrolítica en la que se produce la conversión de energía química en energía eléctrica mediante un proceso redox. Como elementos estructurales cuenta con un ánodo (donde se produce la oxidación), un cátodo (donde se produce la reducción) y un medio transportador de iones (electrolito).

Los distintos tipos de pilas emplean diferentes materiales para cada uno de los elementos anteriores. No todas las pilas tienen la misma duración y potencia, pues estas propiedades dependen del tipo de pila y de las sustancias químicas presentes.

A continuación vamos a deconstruir una pila seca (de las convencionales de 1,5v) de zinc-carbono. Esta es una pila primaria, no puede ser recargada y por tanto se desecha una vez agotada. La estructura de la pila seca se muestra en la figura 4-7. Consiste de un cátodo que es una varilla de carbono o grafito al que rodea una pasta compacta de negro de carbono y dióxido de manganeso (MnO₂), separada por una capa de papel del ánodo situado en la capa mas externa. Este

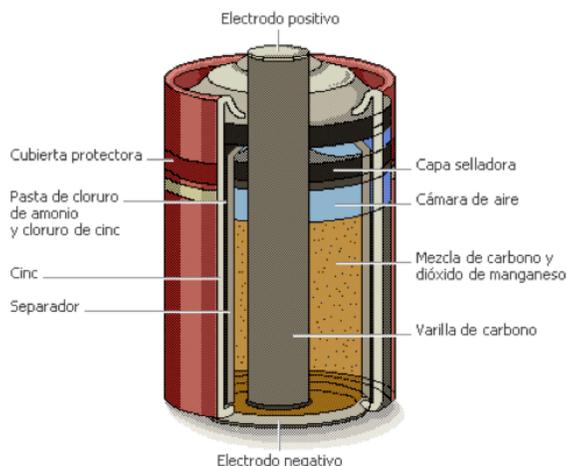


Figura 4-7. Deconstrucción de una pila seca zinc-carbono.

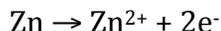
Referencia:

http://denipabofet.blogspot.com.es/2012_04_01_archive.html

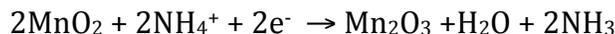
ánodo es una carcasa metálica de zinc que contiene una pasta *húmeda* de cloruro de amonio (NH₄Cl) que actúa como electrolito embebida en un sólido absorbente (serrín, carbón en polvo) con cloruro de zinc (ZnCl₂) que dado su carácter higroscópico mantiene la humedad.

Las reacciones químicas que ocurren (complejas) se pueden resumir en las semirreacciones:

- Ánodo (-): oxidación



- Cátodo (+): reducción



(el NH₃ se forma con los iones Zn²⁺ el complejo [Zn(NH₃)₄]²⁺ evitando la acumulación del amoníaco (NH₃) en el interior de la pila, lo que la hincharía)

El tiempo de vida útil de la pila va ligado esencialmente al agotamiento del Zn del ánodo y del MnO₂ del cátodo.

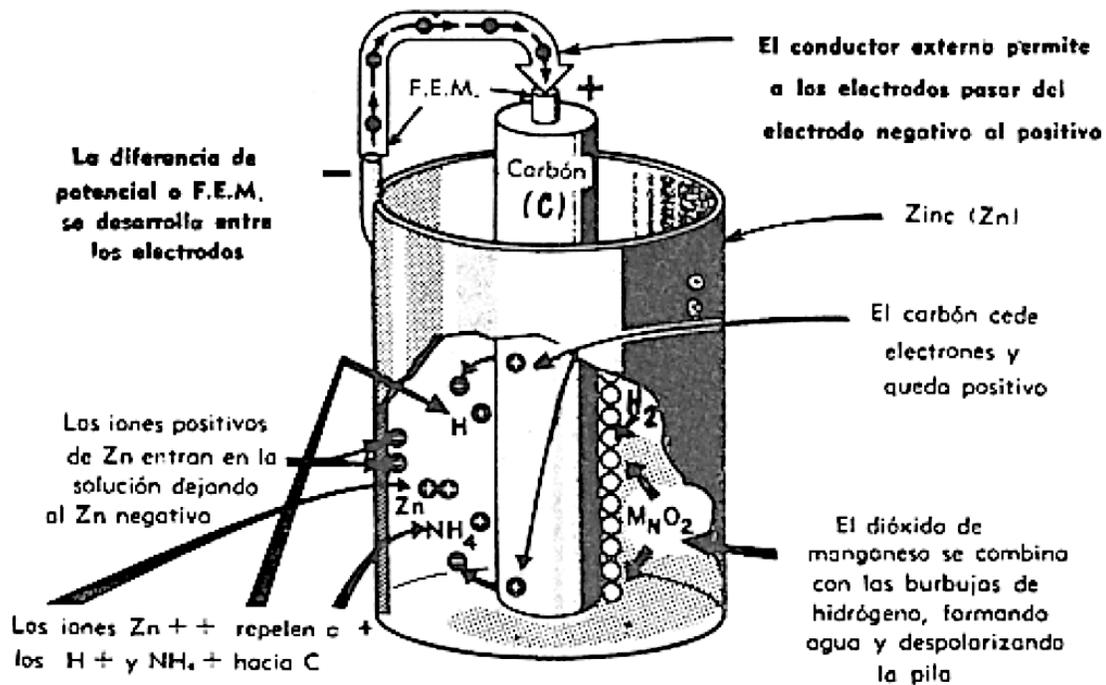


Figura 4-8. Diagrama explicativo del funcionamiento de la pila zinc-carbono.
Referencia: http://www.sapiensman.com/electrotecnia/pilas_y_baterias.htm

Describe los pasos del funcionamiento químico de la pila siguiendo el diagrama que aparece en la figura 4-8.

En cuanto a la energía eléctrica que puede proporcionar esta pila, al principio de su vida útil, (pila “nueva”) la pila tiene una fem de 1.5v. Sin embargo, al final de su vida útil, es decir que cuando se haya oxidado todo el Zn o bien se haya secado el electrolito, se produce una caída de tensión entre los electrodos ese voltaje decrece hasta aprox. 1.1-0.8v (pila “descargada”). Recuerda que un valor determinante del funcionamiento de la pila es su resistencia interna, que has medido en la primera experiencia propuesta. La variación de la resistencia interna de la pila seca zinc-carbono a medida que se desgasta aumenta desde un valor inicial aproximado de $0,5\Omega$. A medida que la resistencia interna aumenta, disminuye la diferencia de potencial o tensión entre los polos de la pila de manera que cuando esta resistencia interna llega a hacerse muy grande la pila se inutiliza.

La energía eléctrica que proporciona una pila también se ve afectada por las condiciones de almacenamiento, aún cuando ésta no haya sido utilizada. Compara el funcionamiento de una pila nueva que acabes de comprar con otra hayas comprado hace ya algún tiempo (>1 año). El incorrecto/largo almacenamiento de las pilas (envejecimiento de la pila) hace que la resistencia interna aumente por lo que la pila se desgasta sin usar!!

Cuando una pila se descarga no esta completamente agotada como indica el que tenga un voltaje de entrono a 1v, simplemente no puede proporcionar corriente suficiente para la aplicación particular, no supera el valor umbral de tensión necesario. Para agotar completamente la pila siempre puedes reutilizar la pila en alguna otra aplicación que requiera de menor voltaje umbral, o bien puedes tratar de “exprimir” la pila. ¿Conoces el *ladrón de Julios o Joule Thief*? Documentate sobre el dispositivo, en qué consiste y para qué se utiliza.

Por último, solo recordarte la importancia del reciclado de las pilas y baterías.....siempre una mirada positiva por el medioambiente!!

5. PILAS Y SUS APLICACIONES COTIDIANAS: FUNCIONAMIENTO DE UNA LINTERNA CON LED

Este punto se trabaja en la última sesión de prácticas. El objetivo es estudiar desde un enfoque más teórico el funcionamiento de una fuente lumínica como el LED, de extendido uso en la actualidad. El objetivo es descubrir la investigación fundamental, de corte teórico, como parte importante de la práctica investigadora presente a partir de la cual se generan conocimientos que ayudan a la mejor comprensión de los fenómenos, lo que resulta en implementación e innovación tecnológica. Con este punto se cierran la actividades de esta práctica de laboratorio.

5.1 ¿Qué es y cómo funciona un LED?

Un LED es un diodo de emisión de luz que toma el nombre del acrónimo de su notación en inglés: **L**ight **E**mitting **D**iode.

Pero, ¿qué es un diodo? Los diodos son componentes electrónicos de estado sólido que tienen la peculiaridad de conducir la electricidad con mayor facilidad en un sentido que en el otro. Los LED pertenecen al tipo de diodos semiconductores. Están formados por un chip semiconductor dopado con

impurezas para crear una estructura tipo p-n que conecta los dos terminales eléctricos. En un LED, la polarización directa hace que los huecos de la zona positiva se muevan hacia la zona negativa y los que electrones se muevan de la zona negativa a la positiva. El movimiento de portadores de genera la corriente que circula por el diodo. La polarización directa del LED (ver figura 5-2) hace que los electrones en exceso del lado “n” sean atraídos por el ánodo (repelidos por el cátodo) lo que fuerza a que los huecos se muevan hacia la zona de contacto p-n. Cuando esos electrones recombinan con un hueco, pasan a un nivel energético menor emitiendo el exceso de energía como un fotón (emisión de luz). El color de la luz emitida dependerá de la diferencia energética entre las bandas de valencia y la de conducción, y de esta forma, depende directamente del material empleado.

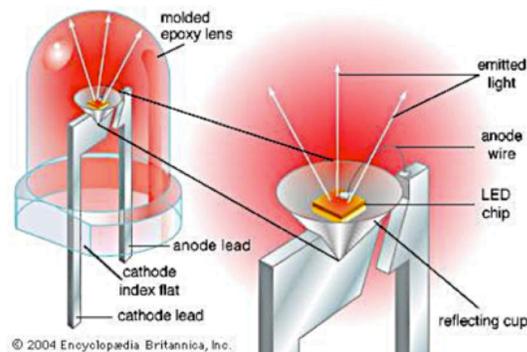


Figura 5-1. Representación de las partes constituyentes de un LED.
Referencia: Enciclopedia Británica (2004)

Los materiales empleados en la unión p-n determinan la diferencia energética entre

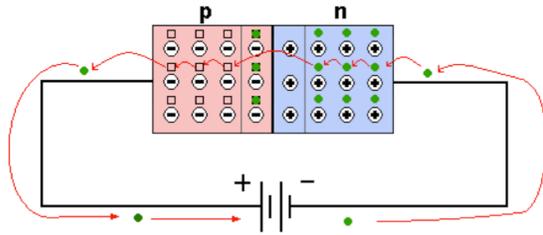


Figura 5-2. Representación de la polarización directa en un diodo (LED)

Referencia:

las bandas de valencia y de conducción, determinando la eficacia del LED. A los primeros materiales empleados como arseniuro de galio (GaAs) o fosfuro de galio (GaP) les han seguido otros más prometedores como el fosfuro de aluminio-indio-galio (AlInGaP) para obtener radiación de longitud de onda larga como ámbar, amarillos o rojos ($590 < \lambda < 630$ nm), o

el nitruro de indio-galio (InGaN) para las longitudes de onda cortas como los verdes o azules ($470 < \lambda < 525$ nm). Además del material semiconductor, un LED está formado por una lente de resina epoxi y un material reflector como se indica en la (ver figura 5-1). En cuanto a la polaridad, la pata larga del LED es siempre el ánodo siendo por lo tanto el cátodo la pata más corta.

Un LED produce luz por electroluminiscencia (conversión directa de energía eléctrica en luz) mediante un mecanismo de recombinación de portadores de carga por polarización directa. Por tanto, un LED difiere de una lámpara incandescente en que no tiene filamento, pero también difiere de una lámpara de descarga pues tampoco tiene electrodos como las lámparas de descarga.

Cuestiones para los alumnos

1. Documentate sobre los semiconductores. ¿Qué es un semiconductor tipo n y uno tipo p?
2. ¿Sabes qué es la electroluminiscencia?
3. Señala las principales diferencias estructurales y operativas (mecanismo de producción de luz) entre una lámpara incandescente y un LED.

5.2 Bombillas, LEDs y espectro de radiación electromagnética: variación de los colores de luz de un LED. ¿Cómo influyen en el rendimiento de las fuentes lumínicas?

Todas las fuentes de luz artificiales suponen la conversión de algún tipo de energía en radiación electromagnética. El proceso físico de conversión de energía en radiación a escala atómica consiste fundamentalmente en la excitación y desexcitación de átomos o moléculas que genera la consecuente emisión de energía

en forma de fotón. En el caso particular de los LED, hemos visto que el fotón emitido tendrá una frecuencia y longitud de onda características de la energía de la banda prohibida directa.

Recuerda el espectro de radiación electromagnética y las magnitudes características (frecuencia, longitud de onda, energía) de cada zona del espectro:

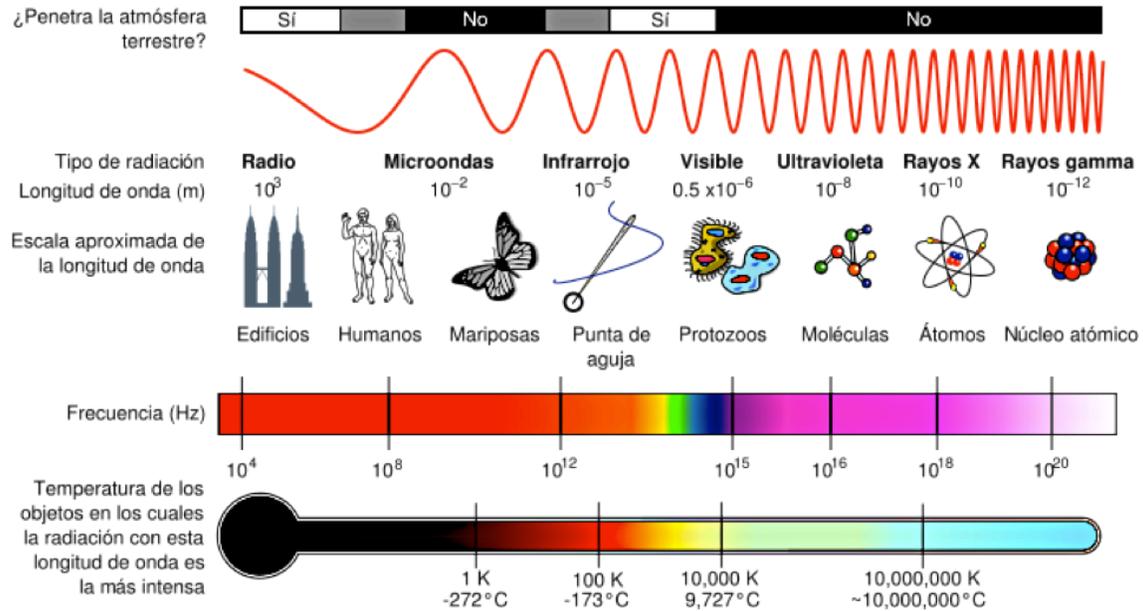


Figura 5-3. Espectro de radiación electromagnética.

A continuación veremos los espectros característicos de emisión de la lámpara incandescente (bombilla convencional) y los LEDs:

- a. La lámpara incandescente convencional produce luz como consecuencia del calentamiento eléctrico del filamento metálico (que se pone incandescente) a un temperatura tan alta que la radiación se emite en la zona visible del espectro. Estas bombillas reproducen una luz muy cercana a la luz natural solar caracterizada por un espectro de emisión continuo que resulta en un reproducción cromática excelente. Sin embargo, la mayor parte de la energía de pierde en forma de calor ($\approx 90\%$) y presentan depreciación luminosa con el tiempo, por lo que tienen una baja eficiencia lumínica.

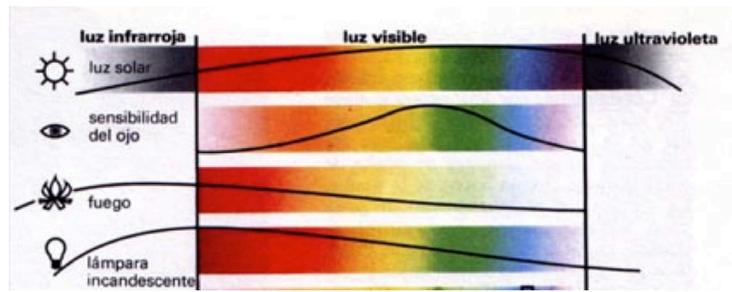


Figura 5-4. Espectro de emisión continuo de la lámpara incandescente. Referencia: www.cielosur.com

- b. En el caso de un LED, la distribución espectral se caracteriza por bandas con anchos que varían desde 17nm para los LEDs de AlInGaP y de 35nm para los de InGaN. Los primeros LED de colores en producirse a escala industrial fueron los infrarrojos, rojos, amarillos y verdes en los años 60-70. Más tarde llegaron los azules y ultravioletas. En la figura 5-5a se muestra el diagrama de cromaticidad del espacio de color (CIE, 1931) que establece las longitudes de onda para cada color y el espectro de bandas resultante para cada uno de estos colores y tonalidades (ver figura 5-5b).

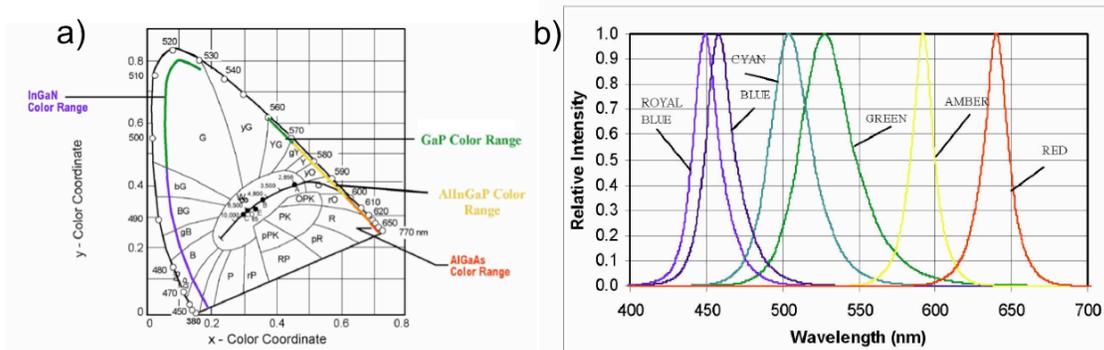


Figura 5-5. (a) Diagrama de cromaticidad del espacio de color de CIE 1931 y (b) espectro de emisión de bandas de LEDs de diferentes colores.

Ref. http://energia.guanajuato.gob.mx/siegconcyteg/eventosieg/archivos/Al_Led.pdf

Mención especial merecen los LED blancos. Su desarrollo, claramente impulsado una vez se obtuvieron los LED azules, es de los más recientes. Uno de los métodos para producir LED de luz blanca consiste en recubrir un LED azul con una capa de fósforos¹. Estos fósforos producen luz amarilla que tras combinarse con la luz azul produce una luz blanquecina llamada *luz luna* (recuerda que el amarillo y el azul son colores complementarios en el

¹ Se denomina fósforos a los compuestos que recubren el interior de fuentes luminosas como los tubos fluorescentes o los LED. Se trata de compuestos de metales de transición o compuestos de tierras raras, por lo que no debe confundirse con el elemento químico fósforo (P).

espectro RGB). Además de este proceso, se puede obtener LED de luz blanca mediante los procesos mostrados en la figura 5-6. La eficacia de un LED es función de la intensidad de funcionamiento y de la temperatura de operación, que deben ser especificados por el fabricante. Como contrapunto la luz “blanca” de un LED es una luz fría que crea un ambiente luminoso no muy confortable para el uso doméstico.

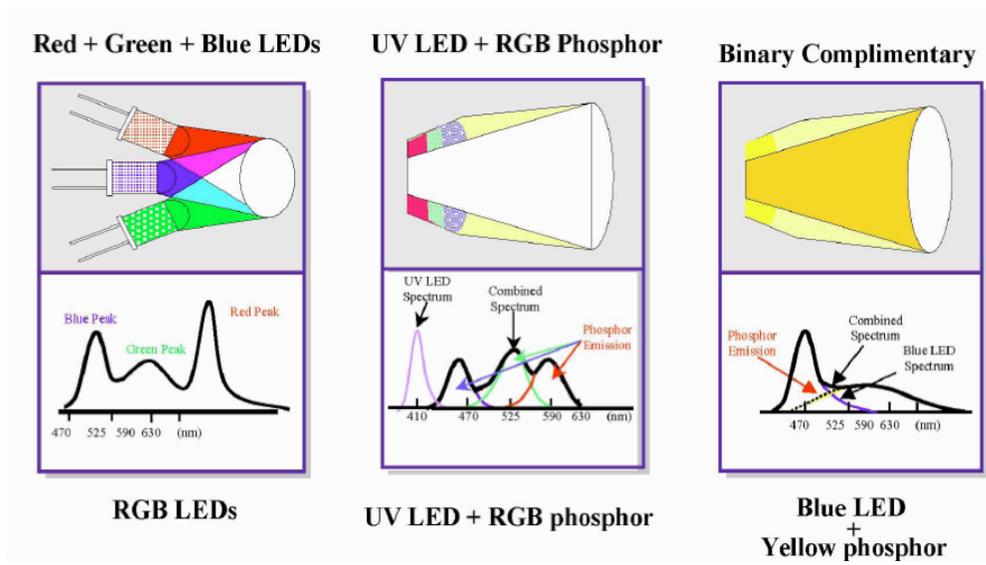


Figura 5-6. Resumen de los mecanismos para producir LED de luz blanca. Ref. <http://energia.guanajuato.gob.mx/siegconcyteg/eventosieg/archivos/Al Led.pdf>

En cuanto al rendimiento de cada tipo de fuente luminosa, sabiendo que el rendimiento luminoso (η) se define como el cociente entre el flujo de luz emitido y la potencia consumida por la fuente. El valor del rendimiento luminoso da cuenta del rendimiento energético de la fuente para proporcionar luz. Por ejemplo, si tenemos una fuente luminosa de 60w de los que 51w se emplean en calentar el foco, el aire y las paredes cercanas mientras que solo 9w se emplean en iluminación proporcionando una iluminación de 900 lúmenes, el rendimiento luminoso de la fuente es de 15lm/w.

Al consultar los valores típicos de la eficacia lumínica de una bombilla incandescente y un LED resultan 80-140lm/w y 8-20lm/w, respectivamente. Claramente, los LEDs presentan un mayor rendimiento luminoso. ¿A qué se puede deber esto? Fíjate de nuevo en los espectro de emisión de ambas fuentes. La bombilla incandescente se caracteriza por un espectro emisión continuo lo que hace que se pierda radiación en otras zonas fuera del rango del visible, a mayores de la disipación de energía en forma de calor típica de estas fuentes luminosas. Al contrario, el calentamiento de

un LED es muy bajo y además la luz emitida, concentrada en un rango pequeño de longitud de onda casi monocromático (pero solo casi) hace que transforme en luz prácticamente la mitad de la energía eléctrica que consume.

En resumen, el estudio comparativo de las principales características y propiedades de las lámparas incandescentes (bombilla) y los LEDs se muestra en la tabla 5-1.

Tabla 5-3. Comparación de las principales características y propiedades de las lámparas incandescentes y los LEDs. Referencias: <http://luckfirst.com/blog/post/Bombillas-LED-tablas-de-comparacin.html>; http://www.asifunciona.com/tablas/leds_equivalencias/leds_equivalencias.htm

<p style="text-align: center;">LAMPARA INCANDESCENTE</p> 	<p style="text-align: center;">LED</p> 
Bajo costo inicial	Costo inicial medio/alto
Frágiles (tiempo de vida unido a la rotura del filamento)	Duraderos
Encendido instantáneo	Encendido instantáneo
Emisión de calor alta	Emisión de calor muy baja
No presentan sensibilidad a la temperatura	Sensibilidad a la temperatura
Eficiencia Baja	Eficiencia alta
Espectro continuo de emisión	Espectro emisión de bandas, con estrechos anchos de banda (virtualmente luz monocromática)
No materiales peligrosos	No materiales peligrosos
Consumo aproximado: ⇒ 50-80 lúmenes= 10 w ⇒ 450 lúmenes = 40 w ⇒ 1600-1800 lúmenes = 100 w	Consumo aproximado: ⇒ 50-80 lúmenes= 1.3 w ⇒ 450 lúmenes = 4-5 w ⇒ 1600-1800 lúmenes = 16-20 w
Coste operativo (variable según precios mercado): <ul style="list-style-type: none"> • Vatios por bombilla (equivalente a 60 vatios): 60w • Kwh de electricidad usada durante 50.000h: 3000Kwh 	Coste operativo (variable según precios mercado): <ul style="list-style-type: none"> • Vatios por bombilla (equivalente a 60 vatios): 6w • Kwh de electricidad usada durante 50.000h: 300Kwh

Cuestiones para los alumnos

1. En base a las características de los espectros de emisión de una lámpara incandescente y un LED, ¿por qué el espectro de emisión de un LED es discreto con picos relativamente estrechos? Justifica tu respuesta

2. ¿Sabrías explicar la diferencia entre un LED y un LASER?
3. ¿Cuál(es), en tu opinión son las principales ventajas e inconvenientes para reemplazar las bombillas por LED en el ámbito doméstico? Discute el impacto que el desarrollo de los LED blancos pueda tener en el consumo doméstico de energía.
4. ¿Qué es el diagrama de cromaticidad y para qué se utiliza?

5.3 ¿Cuántas pilas necesita tu linterna?

Quizás nunca te hayas parado a pensar por qué tu linterna necesita un número determinado de pilas. ¿Por qué en el caso de las linternas de LED blanco se necesitan 3 pilas de 1.5v para hacerlas funcionar?

La respuesta a esta pregunta se encuentra en el valor mínimo (o umbral) necesario para que un LED comience a emitir luz. La necesidad de superar un cierto valor umbral para que un fenómeno suceda la has estudiado en otros contextos. Recuerda el efecto fotoeléctrico, por ejemplo.

En el caso de un LED blanco (blanco-azulado) la tensión mínima necesaria, o tensión umbral, para encenderse es de 3v. Si solo tuviéramos 2 pilas de 1.5v tendríamos los 3v pero de manera tan justa que para asegurarnos que realmente dispondremos de tensión necesaria (mayor a la umbral) tendremos que utilizar 3 pilas de 1.5v, que suponen 4.5v. Sencillo, ¿no? Puedes informarte sobre las tensiones mínimas para LEDs de otros colores y ver cuántas pilas necesitaría tu linterna!!

6. CONCLUSIONES

La elaboración de una práctica de laboratorio de física para el nivel educativo de 2º Bachillerato es el tema elegido para este trabajo fin de master (TFM). En sintonía con el marco general del master, el TFM supone la aplicación de los conocimientos pedagógicos y didácticos adquiridos durante la etapa genérica y específica del curso de especialización al tema específico elegido.

La elección de un TFM sobre la preparación de una práctica de laboratorio a partir de materiales cotidianos surge del convencimiento personal de la necesidad de utilizar la experimentación como herramienta didáctica en sí misma en el estudio de las ciencias experimentales, bien como demostración de cátedra bien como experiencia de laboratorio que el alumnado ha de realizar por sí mismo.

En cuanto a la temática elegida, las experiencias de laboratorio propuestas versan sobre la electroquímica (título de la práctica *Electroquímica: Galvani, Volta o el Pez Torpedo*) por ser éste un tema de interés interdisciplinario que se trabaja en la asignatura de Física (unidad didáctica Interacción Electromagnética) pero también en la asignatura de Química (unidad didáctica Introducción a la Electroquímica), pudiendo incluso formar parte de la programación de otras asignaturas como Electrotecnia o Biología. Con esto se pretende que el alumnado interrelacione conceptos comunes a varias áreas de conocimiento lo que favorece el aprendizaje significativo y la aplicación de los nuevos conocimientos adquiridos a nuevos contextos.

En mi opinión, la labor de organización y planificación docente es de crucial importancia y de ella depende en gran medida el éxito de la experiencia. En esta línea, el estudio de los contenidos científicos de lo cotidiano y las actividades propuestas a lo largo de este informe TFM se fundamentan en la organización y planificación que como docente hago de la temporalidad, secuenciación de contenidos, actividades a realizar y evaluación del alumnado. De esta manera, el objetivo es el de profundizar en los conceptos, adecuados a la programación curricular del nivel educativo, a través de actividades motivadoras que despierten el interés y la curiosidad científica que se proyecte más allá de lo visto en el aula, pero también que fomenten el trabajo en equipo y la interdisciplinariedad como entornos esenciales de trabajo.

El profesor es como el director de orquesta que dirige al *grupo* de músicos alternando intervenciones específicas de *solistas* en una secuencia armónica de

actuación. Así, el docente también enseña su saber consciente de la heterogeneidad de su alumnado en tanto adecua su práctica docente a las características cada grupo siempre actuando como guía/mentor con la finalidad de completar el proceso de enseñanza/aprendizaje satisfactoriamente. De esta manera, la metodología propuesta para las distintas actividades desarrolladas a lo largo del este TFM es un compendio de actividades que trabajan competencias de (auto)aprendizaje y solución de problemas, tratamiento de la información, comunicación, trabajo en equipo, etc. El conjunto de actividades está descrito detalladamente en la tabla 1-1. El diseño y planificación de las mismas se ha realizado desde un enfoque constructivista del aprendizaje, tomando como leitmotiv del aprendizaje significativo el dicho *“oigo y olvido, escucho y recuerdo, hago y comprendo, Confucio”*. Con el objetivo de inculcar lenguaje y proceder científicos se planifica una secuenciación de actividades en sintonía con los pasos del método científico: aparición de un problema (origen de la electricidad animal), búsqueda bibliográfica (que se sabe sobre ello), planteamiento de hipótesis (diseño de los experimentos: pila a columna), comprobación de la hipótesis (metales como conductores de electricidad), establecimiento de una ley. Adicionalmente se abren las puertas del laboratorio para proyectar la práctica científica al mundo cotidiano, viendo la proyección que el saber científico tiene sobre la tecnología y la sociedad actuales, con el desarrollo de fuentes lumínicas que cuenten con menor consumo y mayor eficiencia (pila de hidrogeno, LED).

Por último, pero no por ello menos importante, comentar el tratamiento de los conceptos científicos. Esta práctica está diseñada como parte de la asignatura de Física 2^o bachillerato y por tanto trabaja contenidos que son parte de su programación curricular: electricidad, corriente eléctrica, fuerza electromotriz, diferencia de potencial, potencia eléctrica, reacciones redox, materiales: semiconductores, etc.

Sin embargo, cada una de las experiencias propuestas puede ser adecuada a los conocimientos de niveles educativos anteriores, pudiendo ser realizadas como experiencias de cátedra por el docente.

7. BIBLIOGRAFIA

Normativa

1. REAL DECRETO 1467/2007, de 2 de noviembre, por el que se establece la estructura del bachillerato y se fijan sus enseñanzas mínimas.
2. DECRETO 42/2008, de 5 de junio (B.O.C.yL n0111), por el que se establece el currículo de bachillerato en la comunidad de Castilla y León.

Artículos

1. *Una nueva oportunidad para la formación inicial del profesorado de secundaria*, M. González Sanmamed, Revista de Educación, 350 (2009), pp.57-78.
2. *Ser Profesor de Secundaria Hoy: El desarrollo de competencias de gestión de aula, elemento clave de la profesion*, J. Teixidó Saballs (2001).
3. *Investigación en didáctica de la física: tendencias actuales e incidencia en la formación del profesorado*, A. García-Carmona, Lat. Am. J. Phys. Educ., Vol. 3. No 2 (2009), pp. 369-375.
4. *Que es la investigación-acción y que es un maestro investigador?*, M. Uttech, Revista de Educación, 8 (2006), pp. 139-150.
5. *Metodologías activas y aprendizaje por descubrimiento*, A. Bajo Cáliz, Revista Digital Innovación y Experiencias Educativas, N0 40 (2011), pp.1-11.
6. *Importancia de la aplicación de la didáctica en la ciencia electroquímica*, C.A. Carreón Gutiérrez, G. Castillo Camacho, R.D. Alonso Cruz, XXV Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, EE118, (Zacatecas México, 2010), pp. 1325-1333.
7. *The controversy on animal electricity in eighteen-century Italy: Galvani, Volta and others*, W. Bernardi.
8. *El pez eléctrico y el descubrimiento de la electricidad animal*, Chau H. Wu, Elementos, 65 (2007), pp. 49-62.
9. *Notas históricas. Sobres peces eléctricos y algunos avances científicos*, Revista Española de Física, 15 (4) (2001), pp. 53-57.
10. *Física de semiconductores en la enseñanza básica de la electrónica: primeros pasos de un proceso de transposición didáctica*, A. García-Carmona, A.M. Criado, Enseñanza de las Ciencias, 29 (1) (2011), pp. 89-100.

Libros de texto

1. "Enseñanza y Divulgación de la Química y la Física", Eds.: G. Pinto Cañón y M. Martín Sánchez, Garceta 2012.
2. "Electrodynamics: from Ampère to Einstein", O. Larrigol, Oxford University Press 2000.

3. "Física 2^o Bachillerato", Ed. EDEBE.

Internet

1. <http://alambique.grao.com/revistas/alambique/054-intercambio-de-experiencias/quimica-en-la-oficina>
2. <http://www.unizar.es/icma/divulgacion/pdf/pdfceldascomb.pdf>
3. <http://www.heurema.com/PDF24.htm>
4. <http://www.edutecne.utn.edu.ar/eli-iluminacion/cap04.pdf>
5. <http://es.wikipedia.org>

ANEXO I: COSTO DEL MATERIAL EMPLEADO

⇒ Actividad de laboratorio: Construcción de la pila a columna

- 20 arandelas cincadas 5 euros
- 20 monedas 5 céntimos..... 1 euro
- LEDs de colores..... 3 euros
- Cable 1 euro
- Pinzas conectoras..... 2.5 euros
- Material de madera..... 2 euro
- Vinagre..... 0.70 euros
- Papel..... (un par de hojas)

⇒ Actividad de laboratorio: electrolisis del agua

- Minas de carbón..... 2 euros
- Pila de 9v..... 3.5 euros

⇒ Actividad de laboratorio: Estudio de las propiedades de una pila

- Limones..... 1.5 euros
- Voltímetro..... 10-20 euros
- Amperímetro..... 10-20 euros
- Tabla resistencia variable..... 200 euros
(varias resistencias de diversos valores:
..... 2-3 céntimos la unidad)

