

Trabajo de laboratorio en física con sistemas de adquisición de datos: una propuesta para apoyar la formación de profesores de ciencias naturales

Sonia Y. López^{1*}, Mónica E. Cardona¹, Luis F. Ramírez² y Jaime A. Osorio²

(1) Facultad de Educación, Dpto. de enseñanza de las Ciencias y las Artes, Universidad de Antioquia UdeA, Medellín-Colombia (correo-e: sonia.lopez@udea.edu.co; meliana.cardona@udea.edu.co).

(2) Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Instituto de Física, Universidad de Antioquia UdeA, Medellín-Colombia (correo-e: luisf.ramirez@udea.edu.co; jaime.osorio@udea.edu.co).

* Autor a quien debe ser dirigida la correspondencia

Recibido Jul. 24, 2020; Aceptado Sep. 29, 2020; Versión final Oct. 31, 2020, Publicado Abr. 2021

Resumen

El principal propósito de esta investigación es integrar, en la formación de maestros, herramientas tecnológicas que estén en mayor consonancia con los desarrollos propios de un área experimental como la física. Se implementó una propuesta de enseñanza fundamentada en la Teoría de los Campos Conceptuales de Vergnaud, en la que se hizo uso de sistemas de adquisición de datos (SAD) en el trabajo práctico de laboratorio para la enseñanza de la física, en un programa de formación de profesores de ciencias naturales. Los resultados obtenidos muestran que el uso de SAD favoreció la conceptualización en términos de la evolución de las representaciones construidas por los participantes. Por lo que se considera que la implementación de dicha propuesta en cursos de formación inicial y continuada de profesores de ciencias naturales puede contribuir de manera importante a la conceptualización en física y a la apropiación crítica de herramientas tecnológicas como los SAD.

Palabras clave: trabajo de laboratorio; enseñanza de la física; formación de profesores; ciencias naturales; sistemas de adquisición de datos; conceptualización

Practical physics laboratories with data acquisition systems: a proposal to support science teachers training

Abstract

The main objective of this research study is to integrate the use of technological tools for experimental sciences (e.g. physics) in teacher training processes. A teaching proposal is built on the basis of the Vergnaud's Theory of Conceptual Fields, in which the data acquisition (DAQ) system is implemented in physics laboratory courses taken by the students enrolled in the biological science teacher program. The results show that DAQ improves student conceptualization processes in representation evolution. It is concluded that implementing the proposal presented here in the initial stages and throughout the entire biological science teacher program can contribute to conceptualization in physics and to endorsing technological systems (e.g. DAQ) used in science.

Keywords: practical; laboratory; physics teaching; science teachers training; data acquisition system; conceptualization

INTRODUCCIÓN

No se niega la importancia que el trabajo de laboratorio tiene en la enseñanza de las ciencias y de manera particular, en la enseñanza de la física. No obstante, éste ha sido objeto de críticas desde sus inicios hasta la actualidad. Tal y como lo plantean Chia-Yu et al. (2017), los laboratorios de física en la educación secundaria tienen dos problemas esenciales: seguir las instrucciones del laboratorio paso a paso, de manera que los estudiantes se centran en ajustar los datos experimentales; y el otro problema se refiere a que la mayoría de los métodos de registro de datos son lentos, lo que dificulta el número de muestras que pueden ser tomadas y su precisión. Pero estas no son dificultades que se limiten exclusivamente a la escuela secundaria; pues también se presentan a nivel universitario; y de manera concreta en los programas de formación de maestros.

En lo que se refiere a estos programas de formación, desde este trabajo se pretende hacer un aporte a partir de la integración de herramientas tecnológicas que apoyen el trabajo experimental en el laboratorio de física; partiendo del hecho de que la formación de maestros debe estar dirigida a generar reflexiones en relación con el uso pedagógico de herramientas, recursos, programas, servicios y entornos caracterizados por el uso de la tecnología (Hepp et al., 2015); y que la adquisición de competencias digitales por parte de los docentes, sugiere una mejora significativa en los procesos de enseñanza (Instefjord y Munthe, 2017). En este sentido, las herramientas tecnológicas se han ido incorporando lentamente a la actividad docente, y la percepción que los docentes tienen del rol de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) y de su importancia en las actividades académicas incide en la apropiación de dichas herramientas (Tapasco y Giraldo, 2017). Apropiación que se ve favorecida por las múltiples posibilidades que estas tecnologías ofrecen para el proceso de aprendizaje, como son la accesibilidad, interactividad y flexibilidad; y que las convierte en aliados poderosos de las nuevas estrategias de aprendizaje (Cózar-Gutiérrez et al., 2016).

Y en cuanto a las potencialidades de las TIC para apoyar el trabajo de laboratorio en física, es preciso referirse a la manera en que estas pueden facilitar el proceso de toma de datos, favorecer la conceptualización y el interés y motivación de los estudiantes para asumir un papel activo en los procesos de aprendizaje (Villarreal-Villa et al., 2019). Y en consonancia con Munro (2018), quien plantea que las estrategias para incorporar la tecnología en la educación superior desempeñan un factor determinante para su adecuada implementación; se propone el uso de Sistemas de Adquisición de Datos (SAD); considerando que diferentes autores (Galeriu et al., 2015; Arnold et al., 2015; de Castro et al., 2015) valoran su papel en la comprensión de fenómenos físicos en campos conceptuales como la cinemática, el electromagnetismo, la óptica y la mecánica de fluidos.

En este trabajo se utiliza un Sistema de Adquisición de Datos basado en Arduino a nivel de software y de hardware, como una alternativa simple y de bajo costo para el trabajo de laboratorio en física (Bouquet et al., 2017; Sari, 2019; Moya, 2018). Una de las principales ventajas de este recurso es que se basa en código abierto, y con él los estudiantes podrán observar una mayor variedad de fenómenos y analizarlos de una manera más expedita. Atendiendo a lo anterior y al hecho de que no se han desarrollado muchos estudios que reflexionen sobre el papel de estas herramientas en la formación de profesores de ciencias y su potencial para la comprensión de conceptos físicos, y que los trabajos existentes se han concentrado más en el uso netamente instrumental de estas herramientas; se propone aquí el estudio del concepto de capacitancia a partir del análisis del proceso de carga de un condensador mediante un SAD, y se busca responder a la pregunta: ¿Cuál es la contribución de una propuesta de enseñanza con uso de SAD para la conceptualización en el trabajo de laboratorio en física?

OTROS ANTECEDENTES

El fundamento teórico de este estudio lo constituyen la Teoría de los Campos Conceptuales de Gerard Vergnaud, la concepción del trabajo práctico de laboratorio para la formación de maestros de ciencias y el uso de Sistemas de Adquisición de Datos (SAD) en los trabajos de laboratorio para la enseñanza de la física.

Teoría de los Campos Conceptuales

Esta teoría formulada por Vergnaud (1990), se apoya en la teoría del Desarrollo Cognitivo de Piaget, ampliando el concepto de esquema; y en la teoría de Vygotsky, dándole importancia a la interacción social, al lenguaje y a la simbolización en el progresivo dominio de un campo conceptual. Para Vergnaud, la conceptualización es el núcleo del desarrollo cognitivo y considera que el conocimiento está organizado en campos conceptuales, los cuales se definen como un conjunto de situaciones, conceptos, relaciones, tareas cognitivas, operaciones y procedimientos que se ponen en juego en el proceso de conceptualización. La esencia de este referente teórico se encuentra en la conceptualización, entendida como un proceso que implica la interacción permanente entre las situaciones, que se definen como una combinación de tareas que involucran procesos cognitivos complejos; y los esquemas, que se entienden como “la organización invariante de la conducta para una clase de situaciones dada” (Vergnaud, 1990).

Entre los elementos cognitivos de los esquemas se encuentran metas, reglas de acción, inferencias e invariantes operatorios; siendo estos últimos de particular interés, dado que su función es identificar las propiedades, relaciones y transformaciones de los objetos, seleccionar la información pertinente para establecer las reglas de acción que permitirán abordar una situación (junto con los conceptos y las representaciones). Los invariantes operatorios están constituidos por los conceptos en acción y teoremas en acción; un teorema en acción es una proposición considerada como verdadera, mientras que un concepto en acción es una categoría de pensamiento que se cree pertinente. En este sentido, esta teoría permite analizar la relación entre conceptos y conocimientos que los sujetos ponen en acción frente a determinadas situaciones, y entre los significantes y significados de un concepto (Llancaqueo et al., 2003).

Con respecto a los conceptos, Vergnaud plantea que están constituidos por un conjunto de situaciones, invariantes operatorios y sus propiedades, que se pueden expresar a través de diferentes representaciones simbólicas (Vergnaud, 1990). Las situaciones corresponden a la realidad; es decir, lo que da sentido al concepto; los invariantes operatorios son el significado del concepto, en los que se basa la operacionalidad de los esquemas; y las representaciones son un conjunto de formas de lenguaje que ayudan a representar simbólicamente un concepto (representaciones simbólicas gráficas, lingüísticas, pictóricas y analíticas de magnitudes relacionadas); es decir, constituyen su significante.

Dado que los invariantes operatorios son considerados conocimientos implícitos que un estudiante tiene y se le dificulta externalizar; es a través de las representaciones (lenguaje natural, gráficos y diagramas, sentencias formales, etc.), que podría lograrse que un sujeto manifieste los conceptos que ha construido y los procedimientos que utiliza para abordar las situaciones propuestas. Es entonces a través de las situaciones que un concepto adquiere sentido para un sujeto; de esta manera “podrá asimilar las propiedades que formarán sus conceptos-en-acción y teoremas-en-acción, o en forma resumida sus conocimientos-en-acción, que en la medida que sean expresados en forma explícita mediante sus significantes, esos invariantes o conocimientos-en-acción pasan a conformar el concepto de un individuo” (Llancaqueo et al., 2003).

En el marco de esta investigación se retomaron las situaciones para el diseño de los trabajos de laboratorio que hacen parte de la propuesta de enseñanza aquí presentada; y el proceso de conceptualización de los profesores de ciencias en formación se analiza a la luz de las representaciones que fueron utilizadas por ellos a lo largo de la intervención.

El trabajo de laboratorio en la enseñanza de las ciencias

En la enseñanza de las ciencias naturales y de la física en particular, ha sido amplia la discusión sobre lo que debería considerarse como trabajo de laboratorio o actividad experimental en el ámbito formativo. Gudyanga y Jita (2019), señalan que a través del trabajo práctico de laboratorio los estudiantes pueden tener experiencias reales sobre el mundo natural; sin embargo, su implementación actual no tiene objetivos claros y a menudo se presentan múltiples enfoques para alcanzar dichos objetivos; obteniendo resultados muy bajos en el aprendizaje de los estudiantes, que resultan decepcionantes cuando se compara con la inversión de tiempo y recursos para los laboratorios.

Teniendo en cuenta la diversidad de estrategias que se utilizan en la clase de ciencias, Caamaño (2004) clasifica los trabajos prácticos de laboratorio como: experiencias, experimentos ilustrativos, ejercicios prácticos e investigaciones. Las experiencias buscan una familiarización perceptiva con los fenómenos; los experimentos ilustrativos están enfocados a ejemplificar principios, comprobar leyes o mejorar la comprensión de los conceptos; los ejercicios prácticos ayudan a desarrollar habilidades científicas a través de actividades de experimentación; y las estrategias de investigación se componen de actividades que buscan dar a los estudiantes la oportunidad de resolver problemas de carácter científico.

Asumir el trabajo práctico como una actividad investigativa llevada al ámbito de la enseñanza, favorece la familiarización de los estudiantes con el trabajo científico y el desarrollo de habilidades y procedimientos propios de la ciencia (Caamaño, 2004). Desde la perspectiva de este autor, en el presente estudio se asume el trabajo de laboratorio como un proceso de investigación, donde las actividades están diseñadas para que los profesores en formación se enfrenten a la resolución de situaciones problema, considerando que estas ayudan a desarrollar habilidades experimentales y brindan la posibilidad de establecer relaciones entre la teoría y los modelos con la experiencia, como una oportunidad para la adquisición de aprendizajes significativos (Jaime y Escudero, 2011).

Uso de Sistemas de Adquisición de Datos

El uso de SAD ha sido hasta el momento una modalidad poco explorada para la formación de profesores de física, posiblemente porque existe un desconocimiento acerca de su potencial para apoyar el trabajo de

laboratorio, en relación con: agilidad en el proceso de recolección de información; fortalecimiento de habilidades que serían difíciles de desarrollar mediante las prácticas de laboratorio tradicionales; y la posibilidad de tener una imagen más amplia del fenómeno a estudiar, al disponer de datos de manera casi inmediata y de gráficos que muestran la relación entre las variables involucradas en una situación (Haag et al., 2005; Enrique y Alzugaray, 2013).

En la literatura se ha encontrado que la mayoría de los estudios que hacen uso de los SAD en los trabajos de laboratorio, emplean sensores y placas de tipo Arduino (Chen et al., 2014; Kuan et al., 2016; Abdusselam y Karal, 2020). Gracias a esta herramienta, los estudiantes tienen la oportunidad de realizar actividades a las que comúnmente tienen poco acceso, como el diseño de diferentes montajes experimentales, utilizar software para el procesamiento de datos, realizar mediciones y elaborar gráficas en un tiempo reducido, así como disponer de mayor tiempo para interpretar y analizar el desarrollo del trabajo de laboratorio (Cardona y López, 2017). Un SAD se conforma por un dispositivo de medición que permite que los datos obtenidos con sensores sean leídos y analizados por un software computacional. El SAD requiere de un sensor para convertir alguna cantidad física - tal como la temperatura, la fuerza, la presión - en una señal eléctrica que se suministra a continuación al computador para la recolección y análisis de datos (Haag et al., 2005). En la Figura 1 se representan las etapas de un SAD.

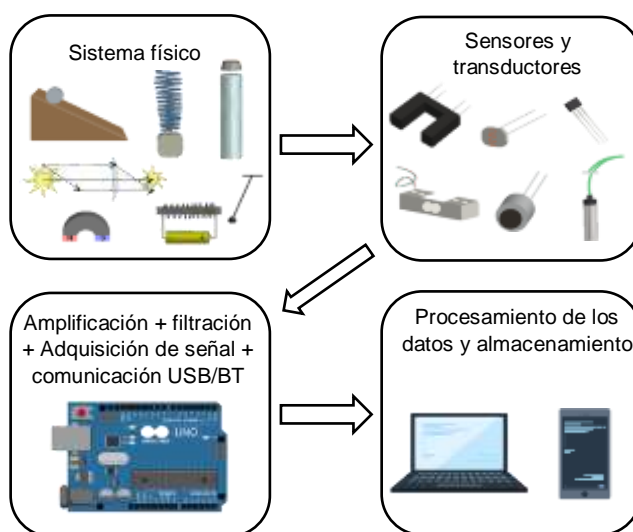


Fig. 1: Etapas de un Sistema de Adquisición de Datos como el empleado en este estudio

METODOLOGÍA

Se realizó una investigación cualitativa con un enfoque descriptivo e interpretativo, desde la perspectiva del estudio de caso instrumental (Stake, 2010); de modo que los resultados son válidos para el grupo de participantes que conforman el caso, sin intención de hacer generalizaciones. Los participantes fueron 14 futuros profesores de ciencias (cinco hombres y nueve mujeres), matriculados en el curso Física III (física de los campos), correspondiente al cuarto nivel de la Licenciatura en Ciencias Naturales de la Universidad de Antioquia, Colombia. Para identificarlos en el análisis de la información se utilizaron los códigos P1 a P14. Es importante resaltar que para la recolección de datos se realizó una contextualización inicial a los participantes, en la que se comunicó el propósito y resultados esperados. Asimismo, atendiendo a las consideraciones éticas de la investigación, cada uno de ellos firmó un consentimiento informado para autorizar el uso de los datos registrados.

Diseño e implementación de la propuesta de enseñanza

Fue diseñada una propuesta de enseñanza fundamentada en la Teoría de los Campos Conceptuales de Vergnaud (1990), con el propósito de conocer el proceso de conceptualización de los profesores de ciencias en formación a través de un trabajo de laboratorio apoyado en el uso de SAD. Para ello, se consideraron algunos momentos contemplados por el Modelo de Aprendizaje en los Trabajos de Laboratorio de Física MATLaF (Andrés et al., 2006), que fue elaborado para identificar el desarrollo cognitivo de los estudiantes al enfrentarse a situaciones experimentales novedosas. Al adaptar este modelo a la propuesta de enseñanza implementada en este estudio, se proponen tres momentos principales: diagnóstico, intervención y evaluación del nivel de conceptualización final; que se corresponden con tres de las cuatro fases del MATLaF, consideradas de mayor relevancia para la presente investigación, a saber: 1) identificación de invariantes

operatorios iniciales asociados al campo conceptual; 2) identificación de invariantes operatorios asociados con las subtarefas propiamente experimentales; y 3) evaluación de los aprendizajes logrados.

La implementación de la propuesta de enseñanza tuvo una duración de cuatro semanas con una intensidad horaria de dos horas semanales. En la Tabla 1 se sintetizan los momentos, actividades (codificadas como A1 a A4) y propósitos de la intervención; y posteriormente se profundiza en la descripción de estos elementos.

Tabla 1: Momentos para la recolección de información, actividades y propósitos

<i>Momento de la intervención</i>	<i>Duración</i>	<i>Actividades</i>	<i>Propósito</i>
Diagnóstico o estado inicial (Fase 1 MATLaF)	Una sesión de dos horas	Solución de cuestionario sobre el concepto de capacitancia (A1). Experimento ilustrativo sobre carga de un condensador (A2)	Conocer los conceptos y los teoremas en acción iniciales.
Intervención o estado intermedio (Fases 2 y 3 MATLaF)	Dos sesiones de dos horas cada una	Trabajo de laboratorio sobre el proceso de carga de un condensador (A3)	Obtener evidencias acerca de las representaciones simbólicas generadas en relación con los conceptos y las situaciones.
Evaluación del nivel de conceptualización final (Fase 3 MATLaF)	Una sesión de dos horas	Informe final tipo artículo y socialización (A4)	Identificar la evolución de las representaciones asociadas al concepto.

Primer momento: diagnóstico o estado inicial

El primer momento comenzó con la respuesta de manera individual a un cuestionario (A1) que indagaba por sus conocimientos previos acerca del proceso de carga de un condensador. Posteriormente se hizo un experimento ilustrativo donde cada participante realizó una representación gráfica del fenómeno y respondió por escrito dos preguntas relacionadas con lo observado (A2). El experimento consistió en conectar en serie un condensador, una resistencia, un led y una batería de 9V para observar qué sucedía al cerrar el circuito. En el uso de baterías (corriente continua), el flujo de electrones carga las placas del condensador y el LED permanece encendido; esta situación se mantiene hasta que el flujo de electrones se detiene (la corriente deja de circular) comportándose el condensador como un circuito abierto para la corriente continua (no permite el paso de corriente) y por ende el LED se apaga. Este experimento con corriente continua es de una gran riqueza observacional para los participantes, en la medida en que favorece la comprensión de conceptos como capacitancia y corriente eléctrica mediante un circuito RC simple en corriente directa.

Las preguntas planteadas a los participantes fueron: 1) desde el punto de vista físico, ¿qué cree que sucede en el fenómeno?, y 2) ¿qué conceptos, ideas, teorías, considera que son pertinentes para abordar la situación? Al final de este primer momento se realizó una presentación a los participantes sobre el uso y funcionamiento de los SAD, explicando en qué consistían y mostrando diferentes tipos de sensores y su utilidad.

Segundo momento: intervención o estado intermedio

Durante este momento se realizó un trabajo de laboratorio (A3) en grupos de dos y tres participantes, orientado al estudio cuantitativo del proceso de carga de un condensador, donde los participantes debieron realizar mediciones del voltaje en el condensador en función del tiempo, para deducir el tiempo de carga, hacer una descripción cuantitativa del fenómeno y fortalecer conceptos como corriente eléctrica, capacitancia, voltaje, etc. En el experimento ilustrativo (A2) realizado en el primer momento, los participantes observaron cómo el led del circuito solo encendía mientras el condensador se estaba cargando y cómo el tiempo que duraba encendido aumentaba con el valor de la capacitancia. Mientras que, en este segundo momento los participantes midieron la curva de voltaje en el condensador en función del tiempo haciendo uso del SAD; con el fin de describir cuantitativamente el proceso de carga del condensador, logrando percibir que el voltaje en este elemento aumenta de forma exponencial en el tiempo desde V_0 hasta el valor de voltaje de la fuente que lo cargó.

Luego de identificar e interpretar la curva obtenida, la contrastaron con el modelo teórico reportado en la literatura (ecuación 1) con el fin de calcular la constante conocida como tiempo de carga. Al final pudieron comparar los resultados numéricos con la observación cualitativa del primer momento.

$$V_c = V_0(1 - e^{-t/RC}) \quad (1)$$

En esta ecuación, V_c es el voltaje en el condensador, V_0 el voltaje aplicado al circuito, R la resistencia, C la capacitancia y t el tiempo.

El SAD empleado en este segundo momento consta de una tarjeta Arduino configurada para la conexión de sensores y circuitos externos; en este caso un circuito RC en serie. La aplicación del voltaje V_0 y la medición del voltaje en el condensador V_c se llevan a cabo en la misma tarjeta, de modo que solo hay que realizar las conexiones que se muestran en la Figura 2. Una vez comienza el proceso de carga, las parejas ordenadas (voltaje, tiempo) son enviadas a través de conexión Bluetooth a un dispositivo Android con una aplicación de terminal instalada. Los datos son guardados o compartidos en la aplicación para su posterior análisis, usando un software de hoja de cálculo.

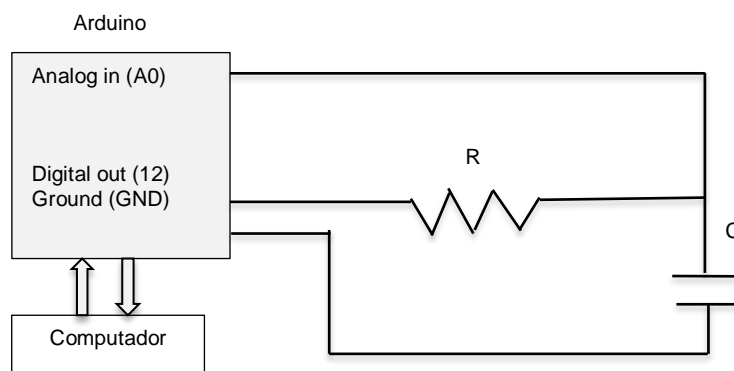


Fig. 2: Circuito RC conectado a un sistema de adquisición de datos basado en Arduino.

Tercer momento: evaluación del nivel de conceptualización final

En este momento se socializaron las experiencias de los participantes en relación con el trabajo de laboratorio. Adicionalmente, los participantes propusieron realizar una actividad para cargar el condensador por medio de un solenoide en el que se generaba corriente eléctrica a través de inducción electromagnética; observando lo que sucedía al utilizar diferentes imanes, solenoides o circuitos. En este mismo momento, se implementaron diferentes estrategias como el aprendizaje colaborativo y el informe de laboratorio en formato de artículo científico que contenía elementos como: introducción, marco teórico, metodología, resultados y conclusiones (A4); con el propósito de identificar las representaciones que daban cuenta de los invariantes operatorios de los participantes al final de la intervención, permitiendo así analizar la evolución de dichas representaciones.

Análisis de la información

Con base en los diferentes instrumentos utilizados en la implementación de la propuesta de enseñanza, fue posible analizar los resultados a la luz de representaciones de tipo simbólico, gráfico y lingüístico, que daban cuenta de los invariantes operatorios (conceptos en acción y teoremas en acción) de los participantes al enfrentarse a una situación novedosa. En la Tabla 2 se muestra una clasificación de las representaciones, a partir de la cual se valoran los procesos de conceptualización inicial y final.

Tabla 2: Clasificación de las representaciones

<i>Pertinentes</i>	<i>Aceptables</i>	<i>Deficientes</i>
Las representaciones dan cuenta de la comprensión de los significados y las propiedades de los conceptos. Se describen los procedimientos que permiten solucionar una situación.	Las representaciones explican parcialmente los conceptos. Los procedimientos para solucionar una situación se describen de manera confusa.	Las representaciones no reflejan una comprensión de significados y propiedades de los conceptos. No se describen los procedimientos para solucionar una situación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan aquí los principales resultados del estudio haciendo énfasis en la conceptualización lograda por los maestros en formación, en términos de las representaciones que permitieron explicitar los invariantes operatorios utilizados por ellos para resolver las situaciones propuestas, así como la comprensión lograda sobre el concepto de capacitancia. De esta manera, se identificaron las representaciones iniciales y finales relativas al proceso de almacenamiento de energía en un condensador y a las relaciones entre el tiempo de carga y capacitancia, para determinar el nivel en el que se encontraban atendiendo a la clasificación presentada en la Tabla 2. El propósito de dicha clasificación, de acuerdo con autores como Llancaqueo et al. (2003), es identificar a la luz de la teoría de Vergnaud, las relaciones de conocimiento entre las situaciones y las respuestas (teoremas y conceptos en acción) de los participantes.

Representaciones sobre el proceso de almacenamiento de energía

Durante el primer momento de la implementación de la propuesta de enseñanza, las representaciones fueron clasificadas como aceptables; dado que exhibían parcialmente propiedades referentes al concepto. En la Tabla 3 se muestran algunas representaciones de tipo lingüístico seleccionadas del diagnóstico, que dan cuenta de las respuestas a la pregunta en A1 sobre ¿cómo es el proceso de almacenamiento de energía en un condensador? De estas representaciones son inferidos algunos invariantes operatorios (conceptos en acción y teoremas en acción).

Tabla 3: Representaciones iniciales de los participantes sobre el almacenamiento de energía en un condensador

<i>Representaciones</i>	<i>Invariantes operatorios</i>	
	<i>Teoremas en acción</i>	<i>Conceptos en acción</i>
"En 2 placas de algún material conductor se almacenan en una placa los protones y en la otra los electrones y se puede poner entre ambas un elemento dieléctrico aislante que al momento de necesitarse por las cargas de las placas se produce una corriente eléctrica" (P1).	Las placas de un condensador son de un material conductor y cada placa almacena un tipo de carga diferente. El dieléctrico entre las placas es un aislante al cargar el condensador, pero un conductor al descargarlo.	Protones (P1) Carga eléctrica (P14) Corriente eléctrica (P1, P2, P12) Condensador (P2, P4) Dieléctrico (P4)
"El condensador en el interior tiene un material (dieléctrico) que al enrollarse permite que se almacene mayor número de electrones" (P4).	El dieléctrico permite un mayor almacenamiento de electrones.	Electrones (P1, P4, P14) Energía (P2, P12, P14)
"En un condensador entra energía almacenándose. Al llegar a su límite permanece cargado y la corriente continúa fluyendo" (P2)	Un condensador almacena energía. Al llegar al límite de almacenamiento, la corriente continúa fluyendo.	Capacitancia (P12)
"La corriente llega hasta el condensador y se almacena tanta energía como lo permite su capacitancia, impidiendo el paso de la corriente hasta este punto" (P12).	Existe un límite para el almacenamiento de energía en un condensador. Durante la carga la corriente se detiene.	
"La energía se almacena del modo: a) se da un paso de electrones desde la fuente de energía, b) estos electrones "pasan" por medio de un material conductor, c) una vez allí se permite que las cargas sean depositadas en placas generando un campo eléctrico homogéneo en cualquier punto" (P14).	Los electrones viajan desde la fuente de energía a través de un material conductor, luego se depositan en las placas del condensador generando un campo eléctrico homogéneo.	

Las expresiones en la tabla 3 reflejan las ideas de los participantes sobre el proceso de carga de un condensador, refiriéndose al almacenamiento de carga eléctrica en las placas que lo conforman y a la dependencia entre la cantidad de carga que se puede almacenar y la capacitancia. Asimismo, se afirma que el dieléctrico es un aislante entre las placas; y en las expresiones de P4, P12 y P14, se observa una noción de capacitancia cercana a la científica. Por el contrario, P1 tiene una concepción alejada de lo que sucede en el proceso de almacenamiento de carga; idea que persistió durante la implementación de la propuesta. De otro lado, en las representaciones de tipo gráfico, los participantes describen superficialmente algunos pasos relacionados con el proceso de almacenamiento del condensador, pero que reflejan el reconocimiento de algunos conceptos propios de este proceso, como se observa en la Figura 3.

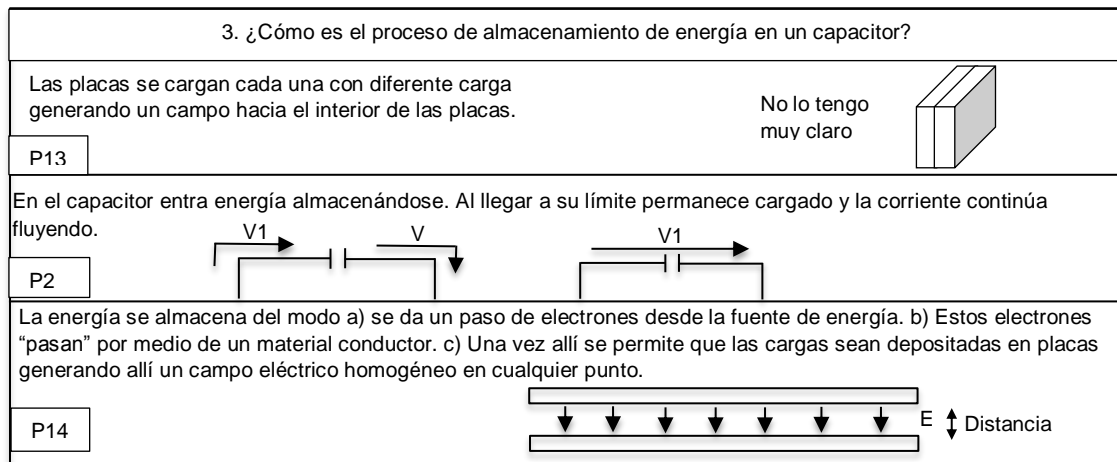


Fig. 3: Representaciones de los participantes sobre el proceso de carga de un condensador

Puede observarse que las representaciones de los participantes en la Figura 3 describen el proceso de almacenamiento de energía de un condensador como el transporte de electrones entre dos placas de material conductor. No obstante, en sus representaciones se identifican algunas concepciones erradas; una de ellas se refiere al hecho de que el participante P2 ubica las flechas del flujo de corriente en el circuito y las nombra como voltaje; y otra tiene que ver con que ninguno de los participantes hace referencia al trabajo que implica dicho transporte para vencer las fuerzas eléctricas generadas en el condensador. Por otra parte, en la Figura 4 se muestran las representaciones gráficas de los participantes sobre lo que creían que sucedía al cerrar el circuito del experimento ilustrativo realizado en el diagnóstico.

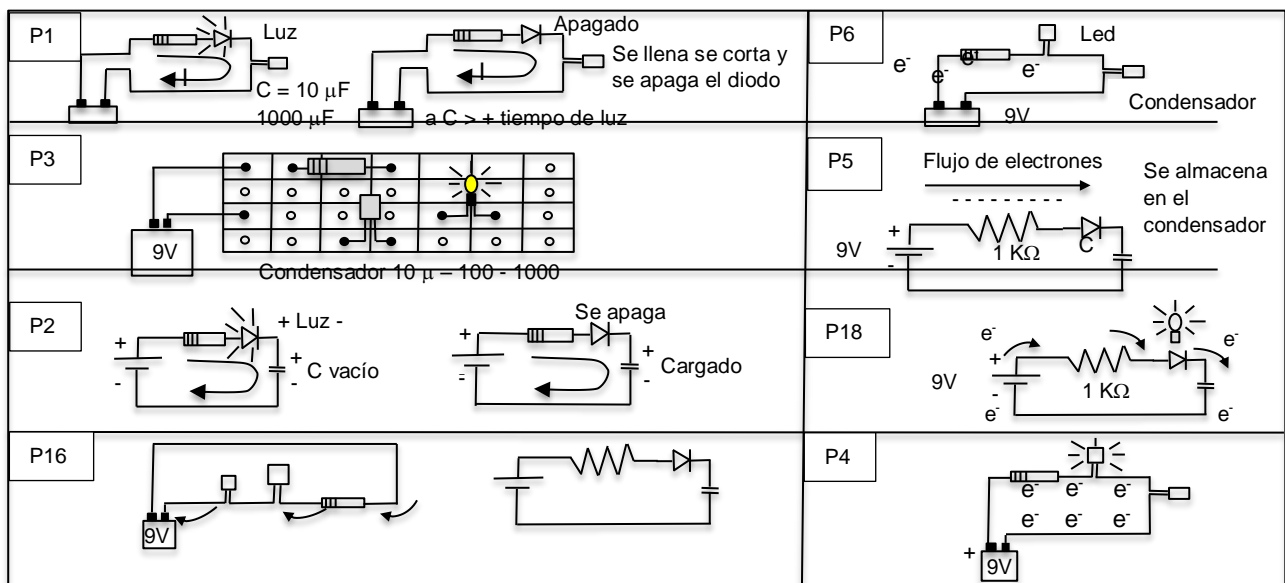


Fig. 4: Representaciones de los participantes sobre el proceso de carga de un condensador en el experimento ilustrativo

Como se observa en la Figura 4, recurrentemente los participantes realizaron el esquema habitual de un circuito en serie, similar a los presentados en libros de texto; sin embargo, añadieron elementos diferentes como los símbolos + y -, para representar la polaridad de la batería, el led y el condensador; además usaron e^- para representar electrones alrededor del circuito, y algunos incluyeron flechas para dar una idea de la dirección de la corriente. Los participantes P1 y P2 hacen una primera representación pertinente del fenómeno, al dibujar claramente el circuito con la corriente que fluye hasta que el condensador se carga y durante ese tiempo el LED ilumina; y en la segunda representación, ambos participantes indican que ya el condensador está cargado y el LED se apaga; sin embargo, siendo la corriente igual a cero, dibujan la flecha que la indica, generando un poco de confusión. Los otros participantes sólo representan el proceso de carga del condensador. La ausencia de explicaciones que acompañen las representaciones gráficas, puede ser interpretada desde la Teoría de los Campos Conceptuales de Vergnaud, y de manera similar a lo reportado por Llancaqueo et al. (2003), como una dificultad en la explicitación de los sujetos mediante el lenguaje, de situaciones que implican un mayor nivel de conceptualización.

Durante el segundo y tercer momento de la implementación de la propuesta de enseñanza los participantes explicitaron (por medio de representaciones lingüísticas) su comprensión sobre las situaciones propuestas en el trabajo de laboratorio y lo registraron en el informe final tipo artículo (A4); una alternativa de evaluación que se propone, atendiendo a la necesidad de generar estrategias que sugieran cómo evaluar el desempeño de los estudiantes en el laboratorio (Gobaw y Atagana, 2016); y en el cual se observó que expresaron los conceptos construidos con mayor claridad, logrando un dominio conceptual de la situación relacionada con el proceso de almacenamiento de energía en un condensador. Estos resultados coinciden con los planteados por Moya (2018), quien considera que la implementación de actividades con sistemas de adquisición de datos haciendo uso de Arduino, puede proporcionar a un estudiante de física una mejor comprensión de los conceptos de carga eléctrica y almacenamiento de energía en condensadores. Algunos participantes representaron el proceso de almacenamiento de energía en un condensador a través de la descripción del fenómeno, como se observa en la Tabla 4.

Tabla 4: Representaciones de los participantes sobre el almacenamiento de energía en un condensador

<i>Grupos de participantes</i>	<i>Representaciones</i>
P1, P2 y P3	"Cuando el condensador almacenaba e igualaba la carga del circuito, este detenía el movimiento de electrones cerrando el flujo de voltaje y por esto se apagaba, este mismo procedimiento lo realizamos con condensadores de mayor capacidad, de lo que observamos que el tiempo de luz que producía el LED era mayor, pero casi imperceptible ya que aumentaba también en centésimas de segundo"
P4, P5 y P6	"Durante el proceso de carga de un condensador [...] se establece una diferencia de potencial eléctrico entre las placas y el campo eléctrico, por el cable hace fluir los electrones en sentido de negativo a positivo [...] durante el proceso de descarga cuando se conectan por fuera las dos placas (por ejemplo, mediante el cable conductor), la diferencia potencial entre ellas produce un campo eléctrico que hace fluir a los electrones de la placa con carga negativa hacia la placa con carga positiva"
P7, P8 y P9	"Al observar cuando el led emite luz o no, puede establecerse si el condensador se encuentra cargado o en proceso de cargarse"

Posteriormente, los participantes realizaron un ejercicio práctico para cargar el condensador por medio de un solenoide en el que se generaba corriente eléctrica a través de inducción electromagnética. Algunos de ellos tomaron decisiones en cuanto a las diferentes posibilidades para cargar el condensador, identificaron cómo se relacionaba el campo magnético generado por los imanes con la corriente en los solenoides; y tuvieron más tiempo para relacionar los conceptos abordados previamente, llegando a conclusiones como las que se presentan en la Tabla 5. Estas representaciones dan cuenta de algunos invariantes operatorios de los participantes en el momento final de la implementación de la propuesta de enseñanza.

Tabla 5: Representaciones de los participantes en A3 y A4 sobre el proceso de almacenamiento de energía

<i>Representaciones</i>	<i>Invariantes operatorios</i>	
	<i>Teoremas en acción</i>	<i>Conceptos en acción</i>
<p>"El experimento para cargar un condensador [...] aprovecha la perturbación del campo eléctrico para producir una corriente eléctrica. El voltaje almacenado dependerá de la rapidez en el cambio del campo eléctrico y del área transversal del solenoide" (P4, P5 y P6).</p> <p>"Un condensador tiene la posibilidad de almacenar energía gracias a los dos conductores que lo conforman, una forma eficiente de cargar un condensador es utilizando un generador de inducción electromagnética el cual, gracias al campo magnético que se puede formar con los imanes, creará una corriente eléctrica que será introducida en el circuito hasta ser almacenada por el condensador, en este vemos cómo se fusiona el campo magnético con la corriente eléctrica" (P7, P8 y P9).</p> <p>"Para generar una mayor diferencia de potencial pueden modificarse diferentes variables; una de ellas sería la velocidad a la cual entra el imán al solenoide para generar el campo magnético; otra manera sería aumentar el área y las espiras del solenoide, siendo ambas directamente proporcionales al voltaje" (P10, P11 y P12).</p>	<p>La corriente eléctrica se produce a partir de la perturbación del campo eléctrico generado en un solenoide inducido magnéticamente. El voltaje en el condensador depende de la rapidez en el cambio del campo eléctrico y del área transversal del solenoide.</p> <p>La corriente eléctrica se produce a partir del campo magnético generado en un solenoide inducido magnéticamente. Dicha corriente fluye por el circuito y se almacena en el condensador.</p> <p>Las variables que influyen en el cambio de voltaje son: la velocidad del imán al interior del solenoide, el área transversal del solenoide y su cantidad de espiras.</p>	<p>Condensador (P4, P5, P6, P7, P8, P9) Inducción electromagnética (P4, P5, P6, P7, P8, P9) Campo eléctrico (P4, P5, P6) Corriente eléctrica (P4, P5, P6, P7, P8, P9) Voltaje (P4, P5, P6, P10, P11, P12) Energía (P7, P8, P9) Campo magnético (P7, P8, P9, P10, P11, P12) Diferencia de potencial (P10, P11, P12)</p>

Las representaciones identificadas en A4 se consideran pertinentes para el 65% de los participantes (P4 a P12), porque al compararlas con las iniciales, se observa cómo ha evolucionado la capacidad de describir el fenómeno matemáticamente; aunque aún presentan una confusión entre el campo “eléctrico” y el “magnético”, pues la inducción electromagnética se da por la variación del campo magnético en la región del solenoide, y ellos consideran que se debe al campo eléctrico. Así mismo, en la segunda y tercera representación de la Tabla 5 también se observa una mayor apropiación del lenguaje físico al establecer proposiciones más coherentes entre las distintas variables del ejercicio práctico; aunque persiste una dificultad al considerar que es el campo magnético y no su variación, lo que da lugar al fenómeno de inducción electromagnética. No obstante, en estas afirmaciones se identifican las propiedades del proceso de almacenamiento de energía de un condensador a través de la inducción electromagnética, favoreciendo en los participantes la selección de información pertinente para resolver la situación; así como la visualización de sistemas físicos reales a partir del uso de SAD, que difieren de las representaciones estáticas de los mismos sistemas en otros medios como los libros de texto. El 35% restante (P1, P2, P3, P13 y P14) permaneció en un nivel aceptable, porque en la descripción del proceso de almacenamiento de energía del condensador, explicaban parcialmente los conceptos necesarios para dar cuenta de un dominio de la situación.

Representaciones relativas a las relaciones entre tiempo de carga y capacitancia

Las representaciones lingüísticas que explicitaban los invariantes operatorios iniciales identificados en A2 para el 21% de los participantes (P1, P5 y P9), se encontraban en un nivel deficiente; debido a que no establecían relaciones coherentes entre las magnitudes involucradas en la situación y no trascendieron el nivel descriptivo del experimento. Dichas representaciones se muestran en la Tabla 6; donde se puede observar que dos de los participantes establecen una relación inicial entre tiempo de carga y capacitancia, refiriéndose a esta última como “tamaño” (P5) o “capacidad del condensador” (P1); y P9 realiza una descripción de cada uno de los componentes del experimento, haciendo referencia a sus funciones, pero sin establecer algún tipo de relación entre ellos.

Tabla 6: Representaciones de los participantes en A2 sobre el tiempo de carga y la capacitancia

Representaciones	Invariantes operatorios	
	Teoremas en acción	Conceptos en acción
"Entre más grande sea un condensador, más tiempo se demora en cargarse" (P5).	El tiempo de carga se relaciona directamente con el tamaño del condensador.	Condensador (P1, P5, P9) Intensidad lumínica (P1)
"A mayor capacidad del condensador mayor es la capacidad de almacenamiento, e invierte menos tiempo" (P1).	En un condensador, la capacidad de almacenar carga no se relaciona directamente con el tiempo de descarga.	Carga eléctrica (P9) Corriente (P9) Diferencia de potencial (P9)
"El condensador acumula la carga que viene de la batería permitiendo un menor flujo de la corriente. La batería proporciona la diferencia de potencial. Los cables conducen creando una corriente" (P9).	El condensador acumula la carga que proviene de la batería y disminuye la corriente.	

El 79% restante (P2 a P4, P6 a P8, P10 a P14) expresó a través de algunas relaciones matemáticas cierta comprensión de conceptos como capacitancia, carga eléctrica, voltaje; considerando dichas representaciones como aceptables. Algunas de estas se muestran en la Figura 5.

P1	Capacitancia $C = \frac{Q}{V}$ o $Q = C V$ Ley de Ohm $C = \frac{V}{R}$
P2	$C = \frac{Q}{V} \Rightarrow Q = VC$ Ley de Ohm $I = \frac{V}{R}$
P3	Capacitancia $C = \frac{I}{V}$ Ley de Ohm $I = \frac{V}{R}$

Fig. 5: Relaciones matemáticas presentadas por los participantes

De acuerdo con la Figura 5, no es posible hablar de representaciones totalmente pertinentes, al considerar expresiones como la del participante P1, quien expresa de manera inadecuada la ley de Ohm, escribiendo en la ecuación la capacitancia en lugar de la corriente; no obstante, escribe bien la ecuación para la carga almacenada en un condensador. Por su parte, el participante P3 escribe inapropiadamente la ecuación de la carga de un condensador, refiriéndose a la corriente en lugar de la carga (Q) almacenada. En cuanto a las representaciones finales que exteriorizaban los invariantes operatorios concernientes a las relaciones entre tiempo de carga y capacitancia, se caracterizaron por tener un mayor nivel, debido a que trascendieron de la descripción al análisis de la situación. Por ejemplo, el 79% de los participantes (P1 a P3, P6 a P14) se refirió a relaciones matemáticas que pudieron establecer a partir de la recolección de datos con el Arduino; algunas de las representaciones lingüísticas vinculadas a dichas relaciones son mostradas en la Tabla 7.

Tabla 7: Representaciones de los participantes en A3 y A4 sobre el tiempo de carga y la capacitancia

Representaciones	Invariantes operatorios	
	Teoremas en acción	Conceptos en acción
“La relación que hay entre el tiempo con la carga del condensador, es un tipo de relación directa, mientras mayor es el tiempo mayor es la carga que va a tener el condensador” (P1, P2 y P3).	La relación entre tiempo de carga y capacitancia es directa.	Condensador (P1, P2, P3, P7, P8, P9) Carga (P1, P2, P3) Voltaje (P7, P8, P9)
“Podemos corroborar que tanto en los procesos de carga y descarga del condensador, la carga y la corriente tienen un comportamiento exponencial” (P1, P2 y P3).	La relación entre carga y corriente es exponencial.	
“Para cargarse describe una curva asintótica con el voltaje límite en función del tiempo de carga por lo que la curva será más pronunciada en un condensador más pequeño, y más tenue en un condensador más grande” (P7, P8 y P9).	La relación entre tiempo de carga y voltaje en el condensador es exponencial.	

En las representaciones descritas en la Tabla 7, se observa que los participantes establecieron relaciones acertadas entre variables como tiempo y carga del condensador, mencionando principalmente que es una relación de tipo exponencial, lo cual se acerca a la descripción cualitativa de la expresión matemática presentada en la ecuación 1. Sin embargo, en la primera representación, aún se observa una relación matemática poco apropiada, al considerar como directa la relación entre la carga almacenada y el tiempo. Por otra parte, durante la implementación de la propuesta de enseñanza los participantes tuvieron la oportunidad de registrar en tiempo real, con un SAD como el presentado en la Figura 2, el valor del voltaje en un condensador de $10\ \mu\text{F}$ en función del tiempo, durante su proceso de carga y descarga; así como de realizar una gráfica para relacionar estas dos variables a partir de los datos recolectados. En la Figura 6 se presenta la gráfica del tiempo de carga del condensador (V_c , t), elaborada en Excel por uno de los grupos.

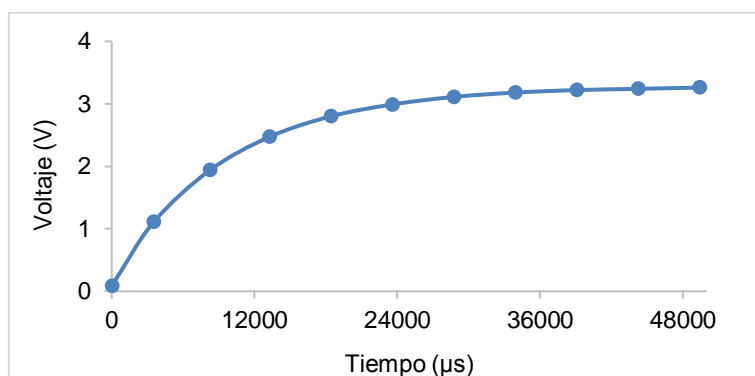


Fig. 6: Carga a través del tiempo (μs) de un condensador de $10\ \mu\text{F}$ en serie con una resistencia de $1\ \text{k}\Omega$

Algunos de los participantes (P1 a P9) lograron deducir a partir de la gráfica (V_c , t) de la Figura 6, el comportamiento de la corriente en el circuito y cómo esta se va reduciendo a medida que el condensador se carga; además, en sus interpretaciones involucraron conceptos pertinentes para la situación; como se observa en la Tabla 8. En la Tabla 9 se describen algunas de las interpretaciones de los participantes en relación con la gráfica obtenida durante el proceso de descarga (Figura 7). En las representaciones de tipo lingüístico descritas en la Tabla 7, se pudo identificar que los invariantes operatorios fueron cada vez más pertinentes para enfrentarse a situaciones relacionadas con el concepto de capacitancia; los teoremas y conceptos de la mayoría de los participantes fueron claros y puestos en acción; es decir, se exteriorizaron y relacionaron con las situaciones presentadas.

Tabla 8: Interpretaciones de los participantes sobre la gráfica de carga del condensador

Grupos de participantes	Interpretaciones
P1, P2 y P3	"Como se puede observar la línea tiende a crecer de forma logarítmica, tendiendo a estabilizarse y a tender a una recta en 3,26 voltios"
P4, P5 y P6	"Como se observa en la gráfica, a medida que transcurre el tiempo (eje horizontal), los voltajes aumentan (eje vertical), iniciando desde 0,06 V en el tiempo de 7 μ s, hasta llegar a 3,26 V en el tiempo de 56515 μ s, evidentemente esta gráfica demuestra la carga del condensador. En la gráfica también se puede contemplar que a medida que aumenta el tiempo, los voltajes se mantienen constantes o ascienden de manera más lenta. Esto sucede debido a que el condensador va recibiendo menor intensidad de corriente eléctrica, pues cada vez estará mayormente cargado y al alcanzar la carga máxima la corriente eléctrica en el circuito se hará cero"
P7, P8 y P9	"En las gráficas se puede observar que mientras el condensador se está cargando la gráfica es ascendente y llega a un punto en el que comienza a ser una línea recta, esto nos indica que el condensador ha llegado a un punto máximo donde está cargado completamente, hallándose en ese punto el voltaje máximo (V_0)"

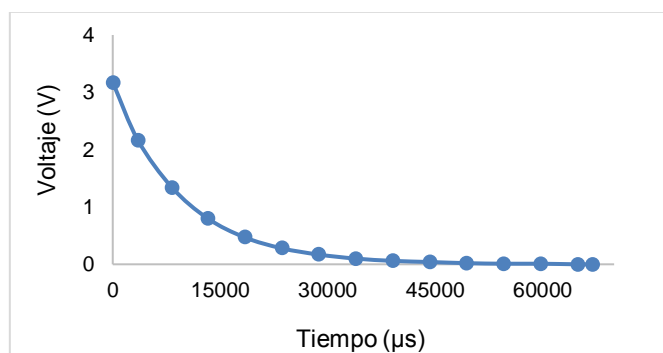
Fig. 7: Descarga a través del tiempo (μ s) de un condensador de 10 μ F en serie con una resistencia de 1 K Ω

Tabla 9: Interpretaciones de los participantes sobre la gráfica de descarga del condensador

Grupos de participantes	Interpretaciones
P1, P2 y P3	"Como se puede observar la línea tiende a decrecer de forma logarítmica tendiendo a estabilizarse y a tender a una recta al llegar 0 voltios"
P4, P5 y P6	"Una vez el condensador está cargado, se procede a la descarga del mismo, en la figura [Figura 7] se representa la descarga del condensador de 10 μ F, en este proceso el condensador le proporciona al circuito la carga que inicialmente adquirió"
P7, P8 y P9	"En la gráfica de descarga del condensador se evidencia que esta va de manera descendente, a medida que este se está descargando la luminosidad del led va disminuyendo con el tiempo llegando a un voltaje cero"
P10, P11 y P12	"Se descarga en un inicio de manera muy veloz y luego lentamente, lo cual se relaciona con la cantidad de carga contenida"

En las interpretaciones de las Figuras 6 y 7 (Tablas 8 y 9), se nota una apropiación del lenguaje matemático y su relación con el fenómeno observado para el 86% de los participantes (P1 a P12). Por ejemplo, en la interpretación de la gráfica de descarga del condensador (Figura 7), P10, P11 y P12 se refieren a un aumento en la velocidad de descarga al inicio de la gráfica y a una disminución gradual que se observa como un decrecimiento en la pendiente de la gráfica. Por lo que esta y las demás representaciones fueron consideradas como pertinentes, aunque se resaltan algunas dificultades en la lectura de las gráficas; por ejemplo, P1, P2 y P3 describen el comportamiento de la gráfica como logarítmica, lo que es inconsecuente con la ecuación 1.

El 14% restante (P13 y P14) permaneció en un nivel aceptable, porque en las representaciones utilizadas explicitaban de manera parcial los invariantes operatorios y los conceptos construidos; es decir, no lograron adquirir un dominio significativo de los conceptos. Esto se pudo identificar en el ejercicio práctico propuesto por los participantes, en el que P13 y P14 describieron que "así como una corriente eléctrica puede generar un campo magnético, un campo magnético también puede generar una corriente eléctrica, ya que ambos son fenómenos inversos que tienen en común el movimiento de cargas y campos electromagnéticos" (A4); lo que pone en evidencia que para estos participantes sigue siendo confusa la relación entre el campo "eléctrico" y el "magnético", identificada en las representaciones iniciales.

Los anteriores resultados dan cuenta de un acercamiento entre la teoría y los fenómenos, que de acuerdo con Jaime y Escudero (2011), favorece la incorporación de la novedad a través de las situaciones propuestas y la evolución en las representaciones que ayudan a explicitar sus conocimientos; poniendo de manifiesto la potencialidad de la propuesta de enseñanza aquí descrita para favorecer la integración teoría-práctica a partir del trabajo de laboratorio. Por su parte, los Sistemas de Adquisición de Datos implementados en esta propuesta proporcionaron a los futuros maestros de ciencias otras formas de seleccionar y transformar la información necesaria para enfrentarse a una situación de la manera más pertinente posible, trascendiendo el carácter meramente instrumental de la herramienta y favoreciendo la reflexión sobre la forma de construir conceptos a partir de la experimentación, así como el proceso de conceptualización, lo que fue evidenciado en una mayor apropiación de los conceptos al comparar los estados inicial y final de la intervención. Estos resultados son coherentes con los planteados por Chaudry (2020), quien considera que el trabajo con Arduino desde un enfoque práctico facilita el aprendizaje de conceptos de física y sus aplicaciones en la vida cotidiana.

De otro lado, la propuesta de enseñanza fundamentada en la Teoría de los Campos Conceptuales y haciendo uso de SAD, se constituye en un aporte para la formación de profesores, como una estrategia factible de ser implementada en su futura práctica docente con el propósito de resignificar el trabajo práctico de laboratorio en la enseñanza de la física. Y en este sentido, Enrique y Alzugaray (2013) afirman que cuando los futuros profesores se enfrentan al diseño de un trabajo de laboratorio como investigación, logran apropiarse de diferentes aspectos teóricos, didácticos y motivacionales. Y aunque el interés y la motivación de los participantes no era objeto de valoración del presente estudio, es importante mencionar que estos elementos se vieron altamente favorecidos con el uso del Sistema de Adquisición de Datos basado en Arduino, en concordancia con lo planteado por El-Abd (2017) y Chaudry (2020) en sus investigaciones.

CONCLUSIONES

En este trabajo se implementó una propuesta de enseñanza fundamentada en la Teoría de los Campos Conceptuales de Vergnaud, en la que se integró el uso de un Sistema de Adquisición de Datos basado en Arduino para apoyar el trabajo práctico de laboratorio en la enseñanza de la física. La propuesta fue implementada con un grupo de profesores de Ciencias Naturales en formación; y los principales hallazgos dan cuenta de que su implementación, permitió a los participantes 1) obtener una importante cantidad de datos en un tiempo reducido, pudiendo así dedicar un mayor tiempo a la discusión de dificultades conceptuales; 2) adquirir habilidades en el proceso de medición y de construcción de los sistemas físicos, necesarias para la comprensión de conocimiento científico; 3) obtener una mayor precisión en los datos y las gráficas, favoreciendo así la interpretación de éstas; y 4) establecer relaciones entre variables, gracias a una mayor apropiación del lenguaje matemático en el proceso de interpretación de las gráficas obtenidas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Comité para el Desarrollo de la Investigación (CODI) de la Universidad de Antioquia y a su convocatoria programática Ciencias Sociales, Humanidades y Artes 2016, por la financiación total del proyecto de investigación que da lugar a este trabajo.

REFERENCIAS

- Abdusselam, M.S., y Karal, H., The effect of using augmented reality and sensing technology to teach magnetism in high school physics, <https://doi.org/10.1080/1475939X.2020.1766550>, Technology, Pedagogy and Education, 1-18 (2020).
- Andrés, M.M., Pesa, M., y Moreira, M.A., El trabajo de laboratorio en cursos de física desde la Teoría de los Campos Conceptuales, <https://doi.org/10.1063/1.4915490>, Ciência y educação (Bauru), 12(2), 129-142 (2006).
- Arnold, F., De Mallie, I., Florence, L., y Kashinskia, D., Method for collecting thermocouple data via secured shell over a wireless local area network in real time, <https://doi.org/10.1063/1.4915490>, Review of scientific instruments, 86(035112), 1-5 (2015).
- Bouquet, F., Bobroff, J., Fuchs-Gallezot, M., y Maurines, L., Project-based physics labs using low-cost open-source hardware, <https://doi.org/10.1119/1.4972043>, American Journal of Physics, 85(3), 216-222 (2017).
- Caamaño, A., Experiencias, experimentos ilustrativos, ejercicios prácticos e investigaciones: ¿una clasificación útil en los trabajos prácticos?, Alambique: Didáctica de las Ciencias Experimentales, 39(8), ISSN 1133-9837, 19-25 (2004).
- Cardona, M. E., y López, S.Y., Una revisión de literatura sobre el uso de Sistemas de Adquisición de Datos para la enseñanza de la física en la educación básica, media y en la formación de profesores, <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2016-0308>, Revista Brasileira de Ensino de Física, 39(4), e4404 (2017).
- Chaudry, A.M., Using Arduino Uno microcontroller to create interest in physics, <https://doi.org/10.1119/10.0001841>, The Physics Teacher, 58(6), 418-421 (2020).

- Chen, S., Chang, W., Lai, C., y Tsai, C., A comparison of students' approaches to inquiry, conceptual learning, and attitudes in simulation-based and microcomputer-based laboratories, <https://doi.org/10.1002/sce.21126>, *Science Education*, 98(5), 905-935 (2014).
- Chia-Yu, L., Chao-Jung, W., y otros tres autores, Scientific modeling with mobile devices in high school physics labs, <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.11.004>, *Computers & Education*, 105, 44-56 (2017).
- Cózar-Gutiérrez, R., Moya-Martínez, M.V., Hernández-Bravo, J.A., y Hernández-Bravo, J.R., Conocimiento y uso de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) según el estilo de aprendizaje de los futuros maestros, <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50062016000600010>, *Formación Universitaria*, 9(6), 105-118 (2016).
- De Castro, L.H., Lago, B.L., y Mondaini, F., Damped harmonic oscillator with Arduino, <http://dx.doi.org/doi:%2010.4236/jamp.2015.36075>, *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 3(6), 631-636 (2015).
- El-Abd, M., A review of embedded systems education in the Arduino age: lessons learned and future directions, <https://doi.org/10.3991/ijep.v7i2.6845>, *International Journal of Engineering Pedagogy*, 7(2), 79-93 (2017).
- Enrique, C.M., y Alzugaray, G.E., Modelo de enseñanza-aprendizaje para el estudio de la cinemática de un volante inercial usando Tecnologías de la Información y la Comunicación en un Laboratorio de Física, <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50062013000100002>, *Formación Universitaria*, 6(1), 3-12 (2013).
- Galeriu, C., Letson, C., y Esper, G., An Arduino Investigation of the RC circuit, <https://doi.org/10.1119/1.4917435>, *The Physics Teacher*, 53, 285-288 (2015).
- Gobaw, G.F., y Atagana, H.I., Assessing laboratory skills performance in undergraduate biology students, <https://doi.org/10.5901/ajis.2016.v5n3p113>, *Academic Journal of Interdisciplinary Studies*, 5(3), 113-122 (2016).
- Gudyanga, R., y Jita, L.C., Teachers' implementation of laboratory practicals in the South African physical sciences curriculum, *Issues in Educational Research*, 29(3), ISSN 1837-6290, 715-731 (2019).
- Haag, R., Araujo, I., y Veit, E., Por que e como introduzir a aquisição automática de dados no laboratório didático de física?, *Física na escola*, 6(1), ISSN 1983-6430, 69-74 (2005).
- Hepp, P., Prats, M.A., y Holgado, J., Teacher training: technology helping to develop an innovative and reflective professional profile, <https://doi.org/10.7238/rusc.v12i2.2458>, *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 12, 30-43 (2015).
- Instefjord, E.J., y Munthe E., Educating digitally competent teachers: a study of integration of professional digital competence in teacher education, <https://doi.org/10.1016/j.tate.2017.05.016>, *Teaching and Teacher Education*, 67, 37-45 (2017).
- Jaime, E.A., y Escudero, C., El trabajo experimental como posible generador de conocimiento en enseñanza de la física, <https://doi.org/10.5565/rev/ec/v29n3.167>, *Enseñanza de las Ciencias: Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, 29(3), 371-380 (2011).
- Kuan, W., Tseng, C., Chen, S., y Wong, C., Development of a computer-assisted instrumentation curriculum for physics Students: using LabVIEW and Arduino Platform, <https://doi.org/10.1007/s10956-016-9603-y>, *Journal of Science Education and Technology*, 25(3), 427-438 (2016).
- Llancaqueo, A., Caballero, M.C., y Moreira, M.A., El aprendizaje del concepto de campo en física: una investigación exploratoria a luz de la teoría de Vergnaud, <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172003000400011>, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 25(4), 399-417 (2003).
- Moya, A.A., An Arduino experiment to study charge-voltage relationships in capacitors, <https://doi.org/10.1088/1361-6552/aaea1d>, *Physics Education*, 54(1), 1-4 (2018).
- Munro, M., The complicity of digital technologies in the marketisation of UK higher education: exploring the implications of a critical discourse analysis of thirteen national digital teaching and learning strategies, <https://doi.org/10.1186/s41239-018-0093-2>, *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 15(11), 1-20 (2018).
- Sari, U., Using the Arduino for the experimental determination of a friction coefficient by movement on an inclined plane, <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ab0919>, *Physics Education*, 54(3), 1-7 (2019).
- Stake, R.E., *Investigación con estudio de casos*, 5ª Ed., Ediciones Morata, Barcelona, España (2010).
- Tapasco, O.A., y Giraldo, J.A., Estudio comparativo sobre percepción y uso de las TIC entre profesores de universidades públicas y privadas, <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50062017000200002>, *Formación Universitaria*, 10(2), 3-12 (2017).
- Vergnaud, G., *La Théorie des Champs Conceptuels*, *Recherches en didactique des mathématiques*, 10(2), ISSN 0246 – 9367, 133-170 (1990).
- Villarreal-Villa, S., García-Guliany, J., Hernández-Palma, H., y Steffens-Sanabria, E., Competencias docentes y transformaciones en la educación en la era digital, <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50062019000600003>, *Formación Universitaria*, 12(6), 3-14 (2019).