UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Voltaje, corriente y resolución de circuitos a través de las leyes de Maxwell

Leonardo Alberto Díaz Marulanda

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias

Maestría en Enseñanza de las Ciencias Exactas y Naturales

Bogotá, Colombia

2017

Voltaje, corriente y resolución de circuitos a través de las leyes de Maxwell

Leonardo Alberto Díaz Marulanda

Tesis final presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Enseñanza de las Ciencias Exactas y Naturales

Director:

Dr. Rer. Nat. José Daniel Muñoz Castaño

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias

Maestría en Enseñanza de las Ciencias Exactas y Naturales

Bogotá, Colombia

2017

A ti Dios, por todas tus bendiciones y por lo que has hecho en mi vida.

A mi esposa, a mi hija, a mis padres y hermanos.

El principio de la sabiduría es el temor de Jehová: Los insensatos desprecian la sabiduría y la enseñanza.

Proverbios 1:7

Agradecimientos

A mi esposa, por su incondicional apoyo en todas mis labores, a mis padres y hermanos por su confianza depositada.

A mi director José Daniel Muñoz Castaño, por las enseñanzas para el desarrollo de este trabajo y su contribución en mi crecimiento profesional. Él es claro ejemplo de un verdadero profesor.

A la Profesora Jazmine Escobar, del departamento de Psicología de la Universidad Nacional, Bogotá, por la asesoría en los datos estadísticos obtenidos.

Al jefe de departamento del programa de ingeniería electrónica Ing. Omaira Tapias, por la autorización de la implementación de las unidades, a la Ing. Leticia Acosta por facilitarme uno de sus cursos de circuitos I.

A los estudiantes de circuitos I grupo 02 periodo 2017-I de la Universidad Popular del Cesar, por permitirme desarrollar los contenidos de esta propuesta, por sus inquietudes y por hacer más amena mi labor.

A todas esas personas que de una forma u otra aportaron a la realización de este trabajo.

Resumen

Los conceptos de voltaje y corriente son ejes centrales de todo ingeniero electrónico, tanto en su formación como en su vida profesional. No obstante, la forma en que se enseñan deja oculto el verdadero significado de conceptos como la corriente del condensador o el voltaje de la bobina, y mantienen como verdades absolutas conceptos, como las leyes de Kirchhoff de circuitos o la idea de que voltaje es diferencia de potencial, que sólo son válidos en casos particulares. Este trabajo presenta e implementa una estrategia diferente para construir los conceptos precisos de voltaje y corriente, y para enseñar a solucionar circuitos eléctricos utilizando: la ley de conservación de la carga y la ley de Faraday, que toman el papel de las leyes de Kirchhoff en el caso general. La secuencia didáctica propuesta consta de ocho sesiones de 2 horas cada una, utiliza montajes demostrativos, videos y modelos mecánicos para construir los conceptos de voltaje y corriente. La propuesta se implementó con 17 estudiantes de tercer semestre del programa de ingeniería electrónica de la Universidad Popular del Cesar (período 2017-I), y se evaluó mediante un diseño pre-experimental con pre-test y post-test, usando para ello una prueba de 21 preguntas diseñada para tal fin, que permitió, además, conocer los conceptos previos de los alumnos. Los resultados evidencian una mejora significativa en el desempeño de los estudiantes. La secuencia constituye una propuesta valiosa para la enseñanza de estos conceptos a nivel universitario.

Palabras clave: voltaje, corriente, leyes de Maxwell, resolución de circuitos eléctricos.

Abstract

The concepts of voltage and electrical current are central for every electronic engineer, both in his background as in his professional work. The way they are traditionally taught, however, hide the true meaning of concepts as the current of a capacitor or the voltage on a solenoid and, shows as general concepts that are valid only at particular cases, like Kirchhoff's laws of circuits or the idea that voltage equals a difference in electrostatic potentials. This work introduces and implements a novel didactic strategy to construct the precise concepts of voltage and current and, to teach how to solve electrical circuits by using: Faraday's law and the conservation of charge equation, which assume the role of Kirchhoff laws in the general case. The proposed didactic sequence is developed in eight sessions, of two hours each, using experiments in class, videos and mechanical models to illustrate the concepts of voltage and electrical current. The proposal was implemented with 17 2nd-year students of the electronic engineering program at the *Universidad Popular del Cesar, Colombia* (semester 2017-I). It was assessed in a pre-experimental design with pre- and posttest, using 21-question test. The results show a significant improvement in student's learning. The sequence constitutes a valuable contribution for the teaching of these concepts at undergraduate level.

Keywords: Voltage, current, Maxwell's laws, circuit resolution.

Contenido

Pág.

Resumen ..... **IX**

Lista de figuras ..... **XIII**

Lista de tablas ..... **XV**

Introducción **1**

1. Aspectos Preliminares **3**
1.1 Planteamiento del problema 3
1.2 Pregunta orientadora de la propuesta 4

2. Objetivos **5**
2.1 Objetivo General 5
2.2 Objetivos Específicos 5

3. Referentes conceptuales **7**
3.1 Componente Histórico 7
3.2 Componente Disciplinar 13
3.2.1 Modelo Atómico de Rutherford 13
3.2.2 Cargas y fuerza electrostáticas 15
3.2.3 Campo eléctrico y campo magnético 16
3.2.4 Corriente eléctrica 17
3.2.5 Ley de Kirchhoff de corrientes y conservación de la carga 19
3.2.6 Voltaje y Ley de Kirchhoff de Voltajes 21
3.2.7 La ley de Faraday 24
3.2.8 El voltaje sobre la bobina 26
3.3 Componente Didáctico 27
3.3.1 Dificultades en el aprendizaje de Voltaje y Corriente eléctrica 27
3.3.2 Los libros de texto y la enseñanza de voltaje y corriente 28
3.3.3 Propuestas actuales en la enseñanza de Voltaje, Corriente y Circuitos29

4. Diseño de la propuesta metodológica **33**
4.1 Descripción de la población 33
4.2 Secuencia Didáctica: Diseño y Aplicación 34
4.2.1 Primera sesión: cargas 34
4.2.2 Segunda sesión: fuerzas y Campos 37
4.2.3 Tercera sesión: ¿qué es corriente eléctrica? 39
4.2.4 Cuarta sesión: leyes de la corriente eléctrica y sus aplicaciones 42
4.2.5 Quinta sesión: ¿Qué es voltaje? (Parte 1) 44

4.2.6 Sexta sesión: ¿Qué es voltaje? (Parte 2) 46
4.2.7 Séptima sesión: la ley de Faraday 48
4.2.8 Octava sesión: circuitos RL y RLC 50

5. Análisis de resultados 53
5.1 Prueba de desempeño 54
5.1.1 Preguntas unidad 1: Cargas 54
5.1.2 Preguntas unidad 2: Fuerzas y Campos 55
5.1.3 Preguntas unidad 3: ¿Qué es corriente eléctrica? 55
5.1.4 Preguntas unidad 4: leyes de la corriente eléctrica y aplicaciones 56
5.1.5 Preguntas Unidad 5: ¿Qué es voltaje? (Parte 1) 57
5.1.6 Preguntas unidad 6: ¿Qué es voltaje? (Parte 2) 57
5.1.7 Preguntas unidad 7: La ley de Faraday 58
5.1.8 Preguntas unidad 8: Solución de circuitos RL y RLC 58
5.2 Análisis de los resultados de la prueba 59
5.2.1 Tablas de resultados 59
5.2.2 Estadísticos descriptivos 61
5.2.3 Pruebas de normalidad 62
5.2.4 Comparación de medias 63
5.2.5 Análisis de resultados con énfasis en voltaje 64
5.3 Descripción cualitativa del efecto de la secuencia didáctica 66

6. Conclusiones y recomendaciones 69

A. Anexo: Galería de imágenes 73

Bibliografía 81

Lista de figuras

Pág.

Figura 3-1: Balanza de torsión (Tomé López, 2017). 7
Figura 3-2: Pila eléctrica de Volta. (Paul, 2015) 8
Figura 3-3: Experimento de Oersted, conexión entre electricidad y magnetismo (Tomé López, 2017). 9
Figura 3-4: Principio del galvanómetro astático (Arca, 2006). 10
Figura 3-5: Montaje de Faraday para inducción magnética (Marimar, 2017)..... 12
Figura 3-6: Dispersión partículas alfa (Píñar Gallardo & Merlo, 2015)..... 14
Figura 3-7: Modelo atómico de Rutherford (Pereyra, 2015) 14
Figura 3-8: Carga en el átomo (Fernández, Moriel, & Recio, 2017) 15
Figura 3-9: Relación entre la dirección de la fuerza entre cargas eléctricas (Martín Blas & Serrano Fernández, 2017)..... 16
Figura 3-10: Líneas de campo eléctrico (izquierda) y magnético (derecha) (Geek3, 2010) 17
Figura 3-11: Definición de corriente eléctrica (izquierda), corriente en un alambre (centro) y nodo (derecha) (Muñoz Castaño, 2017)..... 18
Figura 3-12: Movimiento de las cargas dentro de un conductor (Posada, 2015; Spiridonov, 2010)..... 18
Figura 3-13: Densidad de corriente (Muñoz Castaño, 2017)..... 19
Figura 3-14: Ejemplo para ilustrar la ley de conservación de la carga (Muñoz Castaño, 2017). 20
Figura 3-15: Carga de un condensador (Muñoz Castaño, 2017)..... 21
Figura 3-16: Voltaje (Muñoz Castaño, 2017)..... 22
Figura 3-17: Voltaje en algunos elementos de circuito (Muñoz Castaño, 2017)..... 23
Figura 3-18: Ley de Kirchhoff de voltajes (Muñoz Castaño, 2017) 23
Figura 3-19: Mallas y nodos en un circuito RC (Muñoz Castaño, 2017)..... 24
Figura 3-20: La Ley de Faraday (Muñoz Castaño, 2017)..... 24
Figura 3-21: Dos voltímetros en paralelo que marcan diferente (Muñoz Castaño, 2017) 25
Figura 3-22: El voltaje de la bobina (Muñoz Castaño, 2017)..... 26
Figura 4-1: El átomo según Cantinflas (Delgado & Cantinflas, 1946)..... 35
Figura 4-2: Rutherford’s-Experiment (CosmoLearning, 2008)..... 36
Figura 4-3: Práctica de cargas eléctricas (Díaz Marulanda, 2017)..... 36
Figura 4-4: Práctica el electroscopio (Díaz Marulanda, 2017)..... 37
Figura 4-5: Electroscopio electrónico (Salgado, 2014)..... 37

Figura 4-6: Miremos líneas de campo eléctrico (Díaz Marulanda, 2017). 39
Figura 4-7: Miremos líneas de campo magnético (Díaz Marulanda, 2017). 39
Figura 4-8: Cómo es un conductor (Díaz Marulanda, 2017; Patiño Santa, 2015) 41
Figura 4-9: Velocidad de la corriente (Luján, 2011) 41
Figura 4-10: Implementación propuesta 4 (Díaz Marulanda, 2017). 43
Figura 4-11: Simulación carga del condensador (Díaz Marulanda, 2017; Labcenter Electronics Ltd, 2017)..... 43
Figura 4-12: Simulación descarga del condensador (Díaz Marulanda, 2017; Labcenter Electronics Ltd, 2017)..... 44
Figura 4-13: Botella para la explicación de voltaje (Díaz Marulanda, 2017)..... 45
Figura 4-14: Explicación de voltaje en algunos elementos electrónicos (Muñoz Castaño, 2017)..... 46
Figura 4-15: Explicación de voltaje en algunos elementos electrónicos (Muñoz Castaño, 2017)..... 47
Figura 4-16: Dos voltímetros en paralelo que marcan diferente (Muñoz Castaño, 2017).. 49
Figura 4-17: Práctica de dos voltímetros que marcan diferente (Díaz Marulanda, 2017).. 49
Figura 4-18: Voltaje en una bobina(Muñoz Castaño, 2017)..... 51
Figura 4-19: Solución de un circuito RLC (Muñoz Castaño, 2017). 51
Figura 5-1: Implementación pre-test y post-test (Díaz Marulanda, 2017)..... 53
Figura 5-2: Comportamiento de la calificación promedio por estudiante (Díaz Marulanda, 2017) 60
Figura 5-3: Diagrama de caja y bigotes, Pre-test Vs Post-test..... 62
Figura 5-4: Histograma de los resultados pre-test y post-test..... 62
Figura 5-5: Gráfico Q-Q normal pre-test y post-test..... 63
Figura 5-6: Diagrama de caja y bigotes, Pre-test Vs Post-test, Voltaje..... 65

Lista de tablas

Pág.

Tabla 3-1: Propuesta con enfoque a la implementación de tutoriales 30
Tabla 3-2: Propuesta con enfoque a la implementación de estrategias didácticas 30
Tabla 3-3: Propuesta con enfoque a comparación de conceptos entre libros de texto 31
Tabla 4-1: Propuesta unidad 1: cargas 34
Tabla 4-2: Propuesta unidad 2: fuerzas y campos 37
Tabla 4-3: Propuesta unidad 3: ¿qué es corriente eléctrica? 39
Tabla 4-4: Propuesta unidad 4: leyes de la corriente eléctrica y sus aplicaciones 42
Tabla 4-5: Propuesta unidad 5: ¿qué es voltaje? Parte 1 44
Tabla 4-6: Propuesta unidad 6: ¿qué es voltaje? Parte 2 46
Tabla 4-7: Propuesta unidad 7: la ley de Faraday 48
Tabla 4-8: Propuesta unidad 8: circuitos RL y RLC 50
Tabla 5-1: Resultados Pre-test (Díaz Marulanda, 2017) 59
Tabla 5-2: Resultados Post-test (Díaz Marulanda, 2017). 60
Tabla 5-3: Estadística descriptiva de los resultados del pre-test y post-test 61
Tabla 5-4: Pruebas de normalidad por Shapiro Wilk 63
Tabla 5-5: Resultados de la estadística relacionada por t-student 64
Tabla 5-6: Estadística descriptiva pre-test y post-test con énfasis en voltaje 64
Tabla 5-7: Pruebas de normalidad 65
Tabla 5-8: Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon 66

Introducción

Voltaje y corriente son los conceptos centrales de la ingeniería electrónica. Con ellos se calculan circuitos y se predice el funcionamiento de transistores, bobinas, condensadores y resistencias. Voltaje se entiende usualmente como diferencia de potencial, y corriente como el flujo de electrones a lo largo de una rama del circuito. Normalmente, cuando se enseñan circuitos, los valores de voltaje y corriente se calculan utilizando la ley de voltaje de Kirchhoff, que nos dice que la suma de voltajes a lo largo de una malla (una curva cerrada) es cero, y la ley de Kirchhoff de corrientes, que nos dice que la suma de corrientes que salen de un nodo (una superficie cerrada) es cero. Con estas leyes se solucionan los más variados circuitos, utilizando esquemas de solución, como mallas o nodos, que se basan en alguna de ellas para calcular la otra.

Sin embargo, las afirmaciones anteriores solamente son válidas para circuitos DC. En efecto, cuando hay campos magnéticos variables no se puede definir un potencial eléctrico, y el concepto de voltaje se define, más bien, como el campo eléctrico a lo largo de una curva. Por su parte, la corriente es la cantidad de carga que atraviesa una superficie por unidad de tiempo. De manera similar, las leyes de Kirchhoff sólo se cumplen en DC, y son casos particulares de la ley de Faraday y ley de conservación de la carga (ecuación de continuidad), que sí tienen una validez general.

El desconocimiento de las definiciones y de las leyes generales que rigen el comportamiento de los circuitos genera múltiples conflictos conceptuales. Por ejemplo, si el voltaje fuera diferencia de potencial, ¿cómo se entiende que dos osciloscopios colocados en puntos diferentes en una línea de transmisión marquen diferente, como se evidencia en (Nicholson, 2005; Romer, 1982)? Y, si la corriente es la misma a lo largo de un alambre, ¿cómo se entiende, que una antena pueda tener una corriente medible en el centro y cero corriente en sus extremos? Si el voltaje de dos puntos unidos por un

alambre es el mismo ¿de dónde sale el voltaje medido sobre una bobina? ¿Y qué es la corriente del condensador? Estos interrogantes cobran más fuerza a medida que aumenta la frecuencia de las señales eléctricas, y por ello son de especial importancia para los ingenieros electrónicos, pues son ellos quienes se enfrentan a campos electromagnéticos variables todo el tiempo.

Este trabajo presenta una unidad didáctica para la enseñanza del voltaje y la corriente a los estudiantes del tercer semestre del programa de ingeniería electrónica de la Universidad Popular del Cesar, específicamente en la asignatura de Circuitos I, para enseñar la forma general de los conceptos de voltaje y corriente, y la solución de circuitos utilizando las leyes de Maxwell. De esta forma se espera poder subsanar los problemas conceptuales mencionados arriba y acompañar al estudiante en la construcción de modelos mentales que le permitan comprender el funcionamiento de los circuitos cotidianos que maneja.

1. Aspectos Preliminares

1.1 Planteamiento del problema

El Programa de Ingeniería Electrónica adscrito a la Facultad de Ingenierías y Tecnológicas de la Universidad Popular del Cesar de la ciudad de Valledupar, fue creado mediante el acuerdo N° 019 del 6 de marzo de 1998 del Concejo Superior, registrado por el ICFES el 15 de septiembre de 1998, iniciando sus labores el primer semestre de 1999. Actualmente su misión y visión se centra en formar ingenieros electrónicos con una educación de calidad, integral e inclusiva en sus diferentes áreas disciplinares, con responsabilidad social y cultural que generen a través de la investigación soluciones tecnológicas innovadoras al desarrollo sostenible de la región e impacto en la sociedad y ser en el año 2025 reconocido por el aporte al desarrollo regional, la alta calidad de su comunidad académica y su visibilidad a nivel nacional e internacional.

En este orden de ideas, hay conceptos relevantes que deben ser bien detallados y profundizados en la formación del ingeniero electrónico tal es el caso de voltaje, corriente y las leyes de Maxwell. Para este último, el programa cuenta con dos cursos: el primero es electromagnetismo, curso ubicado en el tercer semestre (ciclo básico) y en su contenido programático se muestra el tema al final de la unidades 4 y 5 y medios de transmisión, asignatura del noveno semestre (ciclo de profundización). En ambos, se aborda esta temática a manera muy básica, y no se ve aplicado a la solución de circuitos o líneas de transmisión, además de no dársele la importancia que amerita. Esto conlleva a dificultades para un mejor aprendizaje de cómo funcionan otros elementos electrónicos: inductancias, condensadores, antenas y líneas de transmisión. Viéndose solo en su gran

mayoría formulismos matemáticos para dar solución a ejemplos de libros de texto mas no a la análisis del comportamiento o fenómeno físico en sí.

Por otra parte, en el curso de circuitos I es donde se empiezan a construir las nociones de elementos electrónicos, leyes y técnicas de resolución de circuitos, desarrolladas en las cinco unidades propuestas en su contenido, pero de principio a fin, la asignatura es enfocada de manera muy práctica y se resume solo en el aprender las técnicas de resolución dejando de lado los conceptos físicos involucrados y en los cuales se fundamenta estos tipos de métodos. Creando esto una dificultad disciplinar y conceptual en el estudiante. De manera paralela los estudiantes deben estar cursando las asignaturas de cálculo multivariable, electromagnetismo, estadística descriptiva, metodología de la investigación, ingles junto con las de extraplan ya sea deportes o actividad cultural.

Teniendo en cuenta lo anterior, se propone diseñar y desarrollar una secuencia didáctica que contribuya al fortalecimiento de los conceptos de voltaje, corriente, y resolución de circuitos utilizando las leyes de Maxwell, dirigida a los estudiantes de circuitos I del tercer semestre del programa de ingeniería electrónica de la Universidad Popular del Cesar periodo 2017-I.

1.2 Pregunta orientadora de la propuesta

Fundamentado en lo anterior se hace necesario construir estrategias que ayuden al estudiante de ingeniería electrónica a mejorar el entendimiento de algunos conceptos fundamentales en su formación como ingeniero electrónico. Por lo tanto partimos de la siguiente pregunta:

¿Cómo desarrollar una unidad didáctica para la enseñanza de los conceptos generales de voltaje y corriente, y la solución de circuitos utilizando la ley de Faraday y la ley de conservación de la carga (ecuación de continuidad) en el tercer semestre de ingeniería electrónica de la Universidad Popular del Cesar?

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Desarrollar una unidad didáctica para la enseñanza de los conceptos de voltaje y corriente, y la resolución de circuitos utilizando las leyes de Maxwell, dirigida a los estudiantes del tercer semestre del programa de ingeniería electrónica de la Universidad Popular del Cesar.

2.2 Objetivos Específicos

- Identificar los conceptos previos que se requieren para construir los conceptos de voltaje y corriente, así como los requeridos para comprender las dos leyes de Maxwell, Faraday y Continuidad, y construir con ellos una secuencia.
- Escoger las actividades con las cuales se van a enseñar estos conceptos y construir con ellas una secuencia didáctica.
- Identificar las ideas previas de los estudiantes de Circuitos I acerca de los conceptos de voltaje, corriente, Leyes de Kirchhoff, campo eléctrico y campo magnético, así como de la manera en que los aplican para la solución de circuitos eléctricos.
- Implementar la secuencia didáctica con estudiantes de Circuitos I del programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad Popular del Cesar.
- Estimar el impacto y avances logrados con la implementación de la unidad didáctica mediante la aplicación de instrumentos de evaluación.

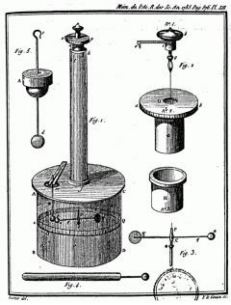
3. Referentes conceptuales

3.1 Componente Histórico

Aunque los antecedentes de la electricidad, entendidos como la descripción de efectos eléctricos y magnéticos, inician con los griegos y otras culturas de la antigüedad, realmente el estudio sistemático toma impulso en épocas casi actuales, a finales del siglo XVIII y comienzos del XIX, con los trabajos de Coulomb, Galvani, Volta, Oersted, Ampere, Ohm, Faraday, Gauss, Kirchhoff y Maxwell, entre otros. A continuación se mostrarán algunos de los aportes más decisivos.

Charles-Augustín Coulomb fue el primero en establecer leyes cuantitativas para las fuerzas eléctricas y magnéticas. Es el inventor de la balanza de torsión, que era uno de los elementos más precisos de su época (Becquerel, 1865). Esta balanza se ilustra en la Figura 3-1.

Figura 3-1: Balanza de torsión (Tomé López, 2017).



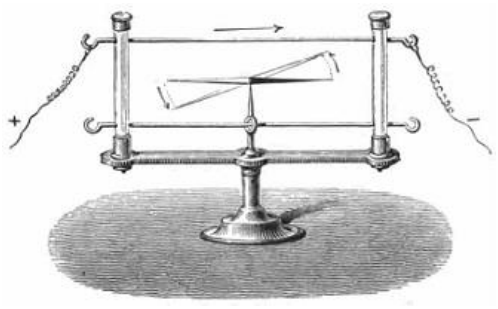
Con ella pudo establecer que las fuerzas eléctricas entre cargas en reposo es proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas.

En al año de 1790 el físico italiano Luigi Galvani observó que, al tocar con un bisturí cargado los nervios crurales de una rana desollada, las patas de la rana se contraían, evidencia de que los músculos eran activados por fenómenos eléctricos (Becquerel, 1865). Galvani especuló que los músculos y los nervios de la rana actuaban como la armadura externa e interna de una botella de Leyden, e inculpó el fenómeno a la existencia de una “electricidad animal”(Laín Entralgo, 1978). Opuesto a esta idea, Alessandro Volta propuso que esta electricidad se producía por el simple contacto entre el metal del bisturí y del cable metálico usado en el experimento y los fluidos de la rana, a lo que llamó “electricidad metálica”. El intentar reproducir estas condiciones por fuera de la rana lo llevó a la invención de la pila eléctrica, aportando en gran manera al origen de la electroquímica y la electrodinámica. (Laín Entralgo, 1978). La invención de Volta, su pila eléctrica, se muestra en la Figura 3-2.

Figura 3-2: Pila eléctrica de Volta. (Paul, 2015)

Hasta entonces los experimentos realizados no daban indicio de relación alguna entre electricidad estática e imanes, que se trataban como fenómenos separados. Hacia 1802, generando corriente eléctrica con la ayuda de una pila voltaica, el físico italiano Giuseppe Domenico Romagnosi observó pequeños movimientos en una brújula. Aunque sus observaciones fueron casi omitidas, fueron retomadas por Hans Christian Oersted hacia el año 1820, cuando era profesor de la Universidad de Copenhague, quien observó por accidente en una de sus clases que la aguja de una brújula orientada originalmente en dirección norte-sur tomaba cerca de un alambre una orientación perpendicular al alambre cuando éste era conectado a los extremos de una pila de Volta. El experimento de Oersted se observa en la Figura 3-3.

Figura 3-3: Experimento de Oersted, conexión entre electricidad y magnetismo (Tomé López, 2017).



Oersted nota también que al invertir el sentido de la corriente la aguja también cambiaba su sentido de giro, ubicándose de manera anti paralela al primer caso. Este accidente se convirtió en un momento histórico, pues por primera vez se encontraba una relación entre electricidad y magnetismo, cambiando la convicción que se tenía en esa época. (Peña, 2015).

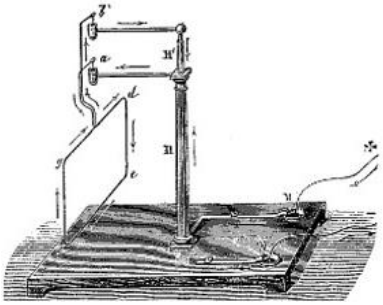
La noticia del hallazgo se hizo saber en diferentes partes del mundo, llamando la atención en especial del físico matemático André-Marie Ampère, conocido como el fundador de la electrodinámica. Él observó que dos alambres paralelos por los que circulan corrientes eléctricas se atraen entre sí cuando las dos corrientes circulan en el mismo sentido, y se repelen si las corrientes viajan en sentidos contrarios (Peña, 2015).

Este notable físico matemático realizó diversas contribuciones en cortos periodos de tiempo. En un primer documento del 18 de septiembre de 1820, Ampère notifica a la Academia de Ciencias sus reproducciones de los fenómenos analizados por Oersted, demuestra que la fuerza electro-dinámica está en cualesquiera de las porciones del hilo conductor, al igual que en la pila, descubre la ley general que establece la orientación de la aguja, y aporta un proceso para distinguir la orientación de la corriente con el fin de que no existiera caos entre los estudiosos en este campo. En este mismo documento muestra los instrumentos que planteaba construir, en especial espirales y hélices, alegando que podrían generar el mismo efecto de los imanes.

Ampere expone a la Academia de Ciencias el 25 de septiembre, el 9 de octubre y el 4 de diciembre del mismo año, otros resultados donde muestra las acciones de las corrientes eléctricas que recorren los circuitos independientemente del sentido que estas tomen,

revela cómo actúan estas corrientes sobre circuitos cerrados y expone la expresión analítica de atracciones y repulsiones de las corrientes eléctricas. Es notorio el avance de las investigaciones realizadas por Ampere en espacios de tiempos cortos, creando así las bases del electromagnetismo (Becquerel, 1865). De las diversas creaciones usadas por Ampere en sus prácticas se destacan las “agujas astáticas”, considerado como el primer galvanómetro. Este instrumento se aprecia en la Figura 3-4. A pesar de las contribuciones de Ampère, aún no se tenía una definición física de la intensidad de corriente eléctrica (Almudí, 2002).

Figura 3-4: Principio del galvanómetro astático (Arca, 2006).



Diversos investigadores y científicos del momento se veían cautivados por estos resultados. Entre ellos, vale la pena citar los esfuerzos de Thompson por relacionar fenómenos térmicos con eléctricos (Acevedo Díaz, 2004) (Harman, 1982), y los trabajos de Georg Simon Ohm por establecer afinidades entre la temperatura, la corriente, el calor y la tensión de la corriente (Cano Vásquez, Gómez Toro, & Cely Rueda, 2009). Entre sus aportes más conocidos encontramos la expresión

$$I = \frac{V}{R} \quad , \tag{3.1}$$

donde I es la intensidad de la corriente de la pila, R es la suma de todas las resistencias de la conductibilidad y V es la suma de las fuerzas electromotrices. Significa esto que en una pila la “*magnitud o la intensidad de la corriente es proporcional a la suma de todas las fuerzas electromotrices de la pila, y en razón inversa de todas las resistencias del circuito comprendido el de la pila*.”(Becquerel, 1865).

Otro científico que hizo un aporte notable al desarrollo del electromagnetismo fue Carl Friedrich Gauss. Gran parte de los contenidos de electricidad de cualquier libro de electromagnetismo se le debe a él. Gauss favoreció el uso de medidas absolutas en electromagnetismo y la instauración sistemática del sistema métrico (ampliado) que

derivó en el actual sistema Internacional de Unidades. Además, descubre las Leyes de Kirchhoff para los circuitos, y desarrolla una electrodinámica basada en una acción a distancia (Santander, 2006). Su contribución más importante a la electricidad es la denominada Ley de Gauss, que relaciona la carga eléctrica Q contenida en un volumen V con el flujo del campo eléctrico $\vec{E}$ sobre la cerrada superficie S que encierra el volumen V.

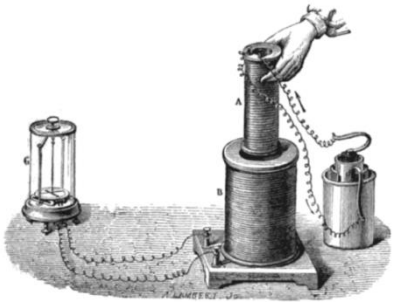
Gustav Robert Kirchhoff fue un físico prusiano cuyas leyes en el campo de circuitos eléctricos, anunciadas en 1845, ayudaron al cálculo de voltajes, resistencias y corrientes, dando otro horizonte de lo realizado por Ohm. Su primera ley establece que la sumatoria de corrientes eléctricas de un nodo es igual a la sumatoria de corrientes fuera de este. La segunda ley nos dice que la suma de voltajes en un bucle cerrado es igual a cero. Aunque este nuevo horizonte surge de las aplicaciones de las leyes de Ohm, Kirchhoff pensaba que la analogía entre el flujo de calor y el flujo de la electricidad planteada por Ohm podría llevar esto a una comprensión incorrecta de las corrientes eléctricas, pues aunque no fluye calor en un cuerpo a una temperatura uniforme sí puede existir una corriente estática en un conductor. Su trabajo llevaría un par de años después a brindar una comprensión correcta de cómo combinar la electrostática y la teoría de corrientes (Statistics & University of St Andrews, 2002).

Por la misma época aparece quien será la persona más determinante para nuestra comprensión de la electrodinámica: Michel Faraday. Faraday inicia su trabajo científico como asistente de Davy en la Royal Society. Sus primeros trabajos consistieron en replicar los experimentos de Oersted, que le sirvieron de base para desarrollar sus propios montajes innovadores. Un ejemplo es el fenómeno de “rotaciones electromagnéticas”, por el que una corriente que circula por un cable tiende a moverse en círculo alrededor de un imán, de manera semejante a la forma en que un imán se mueve alrededor de un conductor por el que circula una corriente. Éste es el principio del motor eléctrico, y es el primer desarrollo por el que Faraday alcanza fama mundial, a tal punto de fue nombrado en la Royal Society en 1824 (Gribbin, 2005).

Para 1831 Faraday plantea la ley de inducción magnética (ver la Figura 3-5) al variar la intensidad del campo magnético al interior de una bobina, se genera una corriente eléctrica en ella. Además, al mostrar que este campo magnético variable puede ser generado por una segunda bobina, aporta el principio del transformador (Penagos, 2015). Michael Faraday es, además, la persona que introduce el concepto de campo, como una

perturbación que las cargas, las corrientes y los imanes realizan en el espacio circundante.

Figura 3-5: Montaje de Faraday para inducción magnética (Marimar, 2017).



Aunque las ideas de Faraday lucían interesantes para la comunidad científica de ese entonces, faltaba una formulación que las plasmara matemáticamente y que las armonizara con los trabajos previos en una teoría que agrupara la electricidad, el magnetismo y la luz. Sin embargo, Faraday no contaba con la formación matemática para poder hacerlo. El sueño se ve realizado finalmente cuando el matemático británico James Clerk Maxwell presenta en el año de 1873 el libro *Electricity and Magnetism*, que expresa los modelos matemáticos que describen la teoría electromagnética a partir de los planteamientos de Oersted, Ampere y Faraday en términos de flujos y circulaciones de los campos eléctricos y magnéticos. Sus expresiones explican en cuatro leyes cómo el cambio de los campos magnéticos inducen fuerzas electromotrices y por consiguiente corrientes eléctricas, y también cómo los campos eléctricos y las corrientes eléctricas variables en el tiempo inducen campos magnéticos (Peña, 2015). Para ello Maxwell introduce un término extra en la ley de Ampère, que permite, además, deducir correctamente la Ley de Conservación de la Carga. Sus leyes permiten predecir, además, que los campos electromagnéticos oscilantes en el tiempo se pueden propagar en forma de ondas que transportan energía a la velocidad de la luz, es decir predice las ondas de radio que serán comprobadas experimentalmente por Hertz unos pocos años después. "*Es importante verificar que este apartado histórico, muestra cómo a pesar de la trascendencia e imponencia del trabajo de Maxwell, éste no puede ser visto como el trabajo de un solo genio, porque se debe tener en cuenta que el mismo se basó en la organización matemática de las contribuciones realizadas por los grandes aportes de Oersted, Ampère, Faraday y otros*" (Peña, 2015).

3.2 Componente Disciplinar

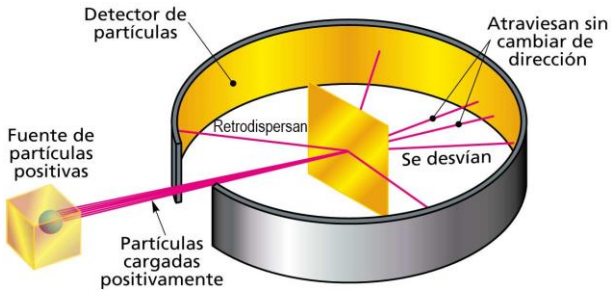
Los elementos disciplinares que se requiere construir para poder resolver circuitos con leyes de Maxwell inician describiendo cómo las cargas se mueven en un conductor por efecto de un campo eléctrico, y cómo el trabajo realizado por el campo electromagnético se disipa en las colisiones de la carga contra la red cristalina del conductor, con el efecto neto de que se obtiene una velocidad promedio y una densidad de corriente. Luego se define corriente como la cantidad de carga que atraviesa una superficie, que resulta ser el flujo de la densidad de corriente. Con este concepto se establece la Ley de Conservación de la Carga y se ilustra como ejemplo el proceso de carga de un condensador, para concluir mostrando que la ley de Kirchhoff de corrientes es un caso particular de dicha ley de conservación.

A continuación se retoma el efecto del campo eléctrico sobre las cargas de un conductor para construir el concepto de voltaje como cuánto campo eléctrico hay a lo largo de una curva, que coincide con el trabajo por unidad de carga realizado por el campo eléctrico sobre una carga que se mueve a lo largo de la curva. Luego se presenta la ley de Faraday, (concepto de inducción magnética) que ilustra cómo aparece el voltaje que mide un voltímetro sobre una bobina. Se muestra que la ley de Kirchhoff de voltajes es sólo un caso particular de esta ley de Faraday. Finalmente, se usan las dos leyes para explicar cómo funcionan los circuitos RLC, las antenas (ambas leyes se puede usar para su funcionamiento mas no se explicará en el documento), las líneas de transmisión y otros montajes interesantes.

3.2.1 Modelo Atómico de Rutherford

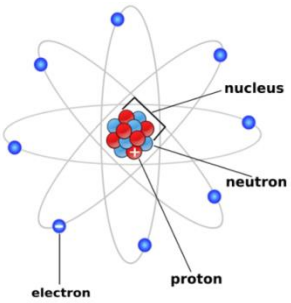
La idea de carga eléctrica – especialmente en lo que respecta a la carga electrostática y la corriente eléctrica – es más fácil de entender a partir del modelo atómico de Rutherford. Aunque el modelo de Dalton mantenía el átomo como indivisible (Beltrán & Fernández, 2003), el descubrimiento de los rayos catódicos y del electrón llevó a Thomson a proponer que el átomo estaba formado por cargas negativas (los electrones)

Figura 3-6: Dispersión partículas alfa (Píñar Gallardo & Merlo, 2015)



insertos en una distribución uniforme de carga positiva, como las uvas pasas en un pudín (Thomson, 1904). Para analizar la estructura de este pudín, Rutherford propone a Geiger y Mardsen realizar un experimento para bombardear una lámina muy delgada de oro con partículas alpha (de carga positiva), (ver Figura 3-6). Al suponer que la carga positiva estaba distribuida en un volumen grande, se esperaba que todas las partículas se desviasen un poco. Para sorpresa de todos, el experimento mostró que muchas partículas seguían derecho, pero que unas pocas prácticamente rebotaban hacia atrás (Geiger & Marsden, 1909), lo que evidenciaba que la carga positiva del átomo se encontraba concentrada en un volumen minúsculo en el centro del átomo: su núcleo (Rutherford, 1911 , 1914). Así se concluye que el átomo está formado por un núcleo positivo alrededor del cual se mueven los electrones que se conocerá como el modelo planetario (Cuéllar Fernández, Gallego Badillo, & Pérez Miranda, 2008). El modelo atómico de Rutherford se muestra en la Figura 3-7. Es de anotar que existen otros modelos mejor elaborados, por ejemplo, el de Bohr que muestran con más detalles la estructura atómica. En este documento se utilizó el modelo de Rutherford por ser más práctico al momento de explicar la existencia de iones y electrones.

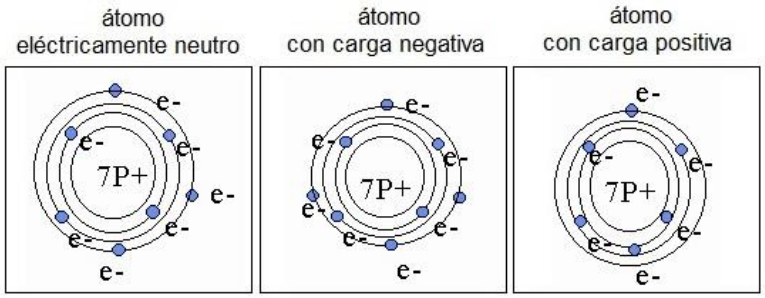
Figura 3-7: Modelo atómico de Rutherford (Pereyra, 2015)



3.2.2 Cargas y fuerza electrostáticas

La electricidad estática se conoce desde los tiempos de los antiguos griegos. Cuando se frotan dos cuerpos, suele suceder que uno de ellos adquiere carga positiva y el otro, carga negativa. Desde el punto de vista del átomo de Rutherford, esto sucede porque los átomos de cada material pierden o gana electrones. En su estado natural un átomo es neutro, y siempre tiene la misma cantidad de electrones y de protones (Fowler, 1992). Si pierde electrones, hay más protones que electrones, y el átomo tendrá carga neta positiva: será un ión positivo. Si gana electrones, habrá más electrones que protones, y el átomo tendrá carga neta negativa: será un ión negativo. Ver Figura 3-8.

Figura 3-8: Carga en el átomo (Fernández, Moriel, & Recio, 2017)

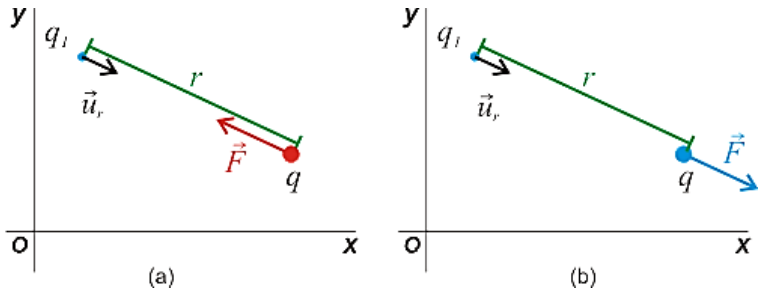


Cuando las cargas están en reposo, la interacción entre ellas se denomina fuerza electrostática. Dependiendo del signo de las cargas que interaccionan, la fuerza electrostática puede ser atractiva o repulsiva. La interacción entre cargas eléctricas en reposo viene dada por la ley de Coulomb: cargas eléctricas del mismo signo (o de diferente signo) se repelen (o se atraen) entre sí con una fuerza que es directamente proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas (Purcell, 1988),

$$\vec{F} = K\frac{q_1 q}{r^2}\,\vec{u}_r \qquad , \qquad (3.2)$$

donde $K = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ y $\varepsilon_o = 8.854 \text{ x } 10^{-12} C^2 N^{-1} m^{-2}$ se conoce como la permitividad eléctrica del vacío (Figura 3-9).

Figura 3-9: Relación entre la dirección de la fuerza entre cargas eléctricas (Martín Blas & Serrano Fernández, 2017).



Con estos elementos tan simples es posible explicar por qué un cuerpo cargado puede levantar papelitos neutros. Cuando se acerca el cuerpo cargado positivamente, por ejemplo, los átomos de los papelitos son atraídos, mientras que sus núcleos son repelidos. En consecuencia, la carga negativa queda más cerca que la positiva, y es atraída con una fuerza mayor que la que repele a la segunda. El efecto es que la fuerza neta es de atracción, el papelito se pega al cuerpo cargado.

3.2.3 Campo eléctrico y campo magnético

Un campo vectorial es un vector que asignamos a cada punto del espacio. Si colocamos una carga de prueba q (es decir, una pequeña carga positiva) en un punto del espacio, ésta experimentará una fuerza eléctrica $\vec{F}_e$. Definimos campo eléctrico como la fuerza por unidad de carga en ese punto (Ida, 2000),

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{q} \tag{3.3}$$

Ahora, si en vez de colocar la carga en reposo la colocamos moviéndose con velocidad $\vec{v}$, observaremos que experimenta una fuerza total igual a la fuerza eléctrica anterior más otra parte, que llamaremos fuerza magnética, $\vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}_m$. Si repetimos el experimento con velocidades de magnitud y dirección diferentes, observamos que la fuerza magnética resulta ser siempre perpendicular a la velocidad y de magnitud proporcional a ella. De hecho, observaremos que esa fuerza se puede escribir como

$$\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B} \tag{3.4}$$

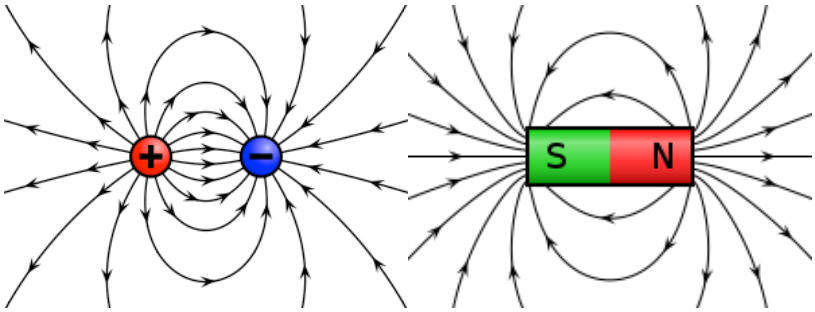
Al vector $\vec{B}$ lo llamamos densidad de flujo magnético. La suma de las dos fuerzas,

$$F_{total} = F_e + F_m = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} \qquad , \tag{3.5}$$

se conoce como la ecuación de la fuerza de Lorentz-Coulomb (a veces solamente como la ecuación de la fuerza de Lorentz).

Así definido, las líneas del campo eléctrico salen de las cargas positivas y llegan a las negativas. Estas líneas se pueden visualizar colocando a flotar semillas en medio de aceite de cocina, sumergiendo dos cuerpos metálicos en el aceita y aplicando un voltaje alto entre ellos (como el generado por una raqueta mata-mosquitos). En cambio, las líneas de campo magnético son cerradas (Figura 3-10), y se pueden visualizar arrojando limaduras de hierro sobre un papel encima de un imán permanente,

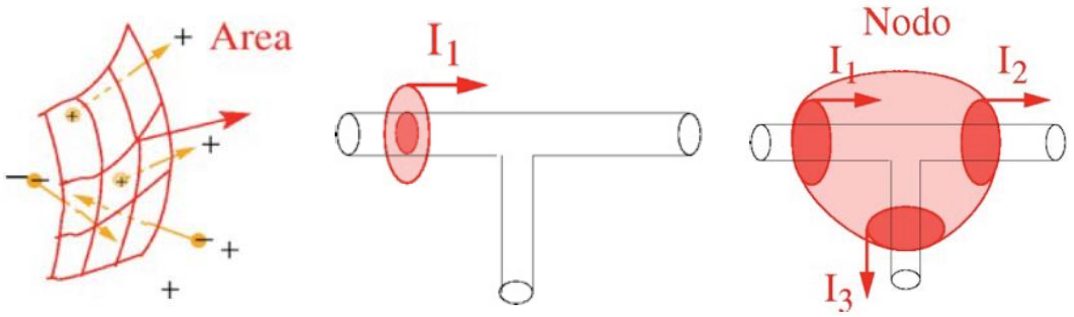
Figura 3-10: Líneas de campo eléctrico (izquierda) y magnético (derecha) (Geek3, 2010)



3.2.4 Corriente eléctrica

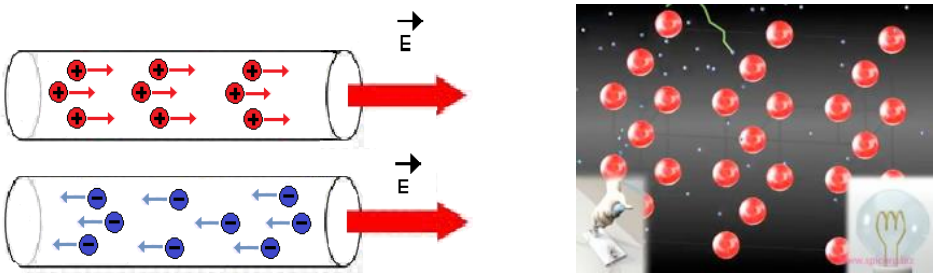
Considere un área orientada con cierta dirección como la que se muestra en la Figura 3-11. La corriente sobre esta área se define como la cantidad de carga que atraviesa el área por unidad de tiempo. Cuando hablamos de la corriente que va por un alambre, nos referimos a la corriente que atraviesa su sección transversal. Un nodo, que tradicionalmente se define como un punto de un circuito eléctrico al que llegan más de dos cables, corresponde realmente a una superficie cerrada.

Figura 3-11: Definición de corriente eléctrica (izquierda), corriente en un alambre (centro) y nodo (derecha) (Muñoz Castaño, 2017).



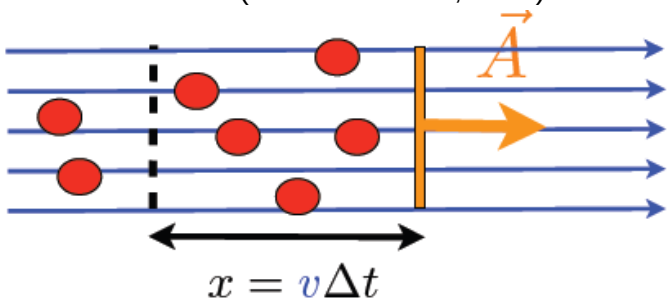
Dentro de un conductor, los electrones se mueven aleatoriamente en todas direcciones, chocando con la estructura cristalina del material. Para que haya corriente se necesita que el campo eléctrico penetre dentro del material y hale a los electrones (Figura 3-12). Los electrones son acelerados y, luego de cierta distancia (que se conoce como longitud de camino medio) chocan hasta casi el reposo, vuelven a ser acelerados y vuelven a chocar. En muchos materiales la velocidad media, que es del orden de 0.1mm/s, resulta ser proporcional al campo eléctrico aplicado.

Figura 3-12: Movimiento de las cargas dentro de un conductor (Posada, 2015; Spiridonov, 2010)



Si tenemos una región del espacio donde la velocidad media de las cargas es aproximadamente constante y colocamos una superficie perpendicular al flujo, la corriente I que atraviesa la superficie es claramente proporcional al área A de la superficie. Por lo tanto, vale la pena definir una corriente por unidad de área, o *densidad de corriente* $\vec{j}$ Figura 3-13. Esta densidad de corriente es un vector de magnitud $\|\vec{j}\| = I/A$ y orientado perpendicular al área que maximiza la corriente en ese punto.

Figura 3-13: Densidad de corriente (Muñoz Castaño, 2017)



Si las cargas son positivas y se mueven con la velocidad media $\vec{v}$, todas las cargas presentes en un volumen $Av\Delta t$ atravesarán la superficie en un intervalo de tiempo Δt. La densidad de corriente resulta ser, entonces, $\vec{j} = \rho\vec{v}$. En gran parte de las substancias y para un intervalo amplio de intensidades del campo eléctrico se encuentra que la velocidad de las cargas es proporcional a la fuerza eléctrica que las empuja, con lo que la densidad de corriente resulta ser proporcional a la intensidad del campo eléctrico que la causa,

$$\vec{j} = \sigma\vec{E} \qquad , \tag{3.6}$$

que se conoce como ***Ley de Ohm***, con σ la conductividad del material.

En términos de la densidad de corriente, la corriente eléctrica que atraviesa una superficie resulta ser el flujo de este campo vectorial, es decir la cantidad de campo que atraviesa la superficie,

$$I(A) = \int_A \vec{j} \cdot d\vec{A} \tag{3.7}$$

3.2.5 Ley de Kirchhoff de corrientes y conservación de la carga

La ley de Kirchhoff de corrientes establece que la suma de las corrientes que entran a un nodo es igual a la suma de corrientes que salen de él. Como un nodo es una superficie cerrada (Figura 3-11), esto equivale a decir que la suma de corrientes que salen de la superficie cerrada es cero, pero esto en general no es válido.

En teoría electromagnética, la ley de la conservación de la carga viene dada por,

$$\nabla \cdot \vec{j} = \frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \tag{3.8}$$

Figura 3-14: Ejemplo para ilustrar la ley de conservación de la carga (Muñoz Castaño, 2017).

Para ilustrarlo consideremos un salón que cuenta con una puerta y una ventana (Figura 3-14). Por la superficie de la puerta abierta entran 3 niños por segundo, mientras que por la ventana salen 2 niños por segundo. Si al principio había 10 niños en el salón, dentro de un segundo habrá 12 niños, 14 dentro de 2 segundos, 16 dentro de tres segundos, y así sucesivamente. Vemos que la razón de cambio de la cantidad Q de niños encerrados en el volumen del salón (2 niños por segundo) es igual a la corriente de niños que entran por segundo menos la corriente de niños que salen por segundo,

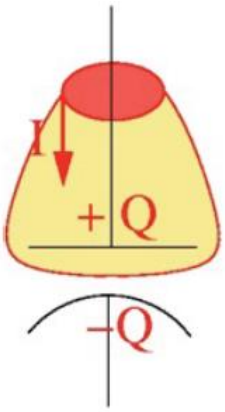
$$\sum I_{\text{entran}} - \sum I_{\text{salen}} = \frac{\partial \text{Q}_{\text{encerrada}}}{\partial \text{t}} \tag{3.9}$$

Lo mismo aplica para las cargas. Las corrientes que entran no tienen por qué ser iguales a las corrientes que salen, excepto que no se acumulen cargas en el interior del nodo.

Considere, por ejemplo, el caso de un condensador que está siendo cargado por una corriente I (Figura 3-15). La ecuación de conservación de la carga () nos dice que la corriente que entra al nodo es igual a la velocidad con que aumenta la carga acumulada en su interior,

$$I = \frac{\partial \text{Q}_{\text{encerrada}}}{\partial \text{t}} \tag{3.10}$$

Figura 3-15: Carga de un condensador (Muñoz Castaño, 2017).



El término de la izquierda es una corriente, pues corresponde a la cantidad de carga que atraviesa una superficie por unidad de tiempo. En cambio, el término de la derecha no es una corriente (aunque tenga unidades de amperios), pues corresponde a cómo cambia en el tiempo la carga encerrada en un volumen. Este es el verdadero significado de la llamada “corriente del condensador”.

3.2.6 Voltaje y Ley de Kirchhoff de Voltajes

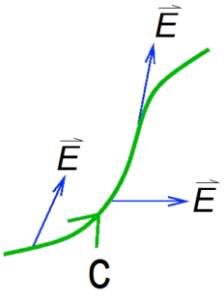
Para que haya corriente en un alambre debe haber un campo eléctrico que hale los electrones dentro del alambre, pero solamente la componente del campo tangente al alambre producirá la corriente. El voltaje a lo largo de una curva es precisamente cuánto suma el campo eléctrico a lo largo de la curva,

$$V(C) = \int_C \vec{E} \cdot \overrightarrow{dL} \tag{3.11}$$

Este valor coincide con el trabajo por unidad de carga que el campo electromagnético realiza sobre una carga que se mueva a lo largo de la curva C. Ver Figura 3-16. Como la fuerza magnética es perpendicular a la velocidad de la carga, no hace trabajo, y todo el trabajo es ejercido por el campo eléctrico.

$$V(C) = \frac{W}{q} = \frac{\int_C q\vec{E}\cdot\overrightarrow{dL}}{q} = \int_C \vec{E} \cdot \overrightarrow{dL} \tag{3.12}$$

Figura 3-16: Voltaje (Muñoz Castaño, 2017)



Cada elemento de circuito suele tener una región donde el campo eléctrico es diferente de cero, y una curva a lo largo de esa región (línea de voltaje) tiene un voltaje diferente de cero. Por ejemplo, una resistencia es un cilindro de material óhmico. Si el campo eléctrico es uniforme en todo el cilindro, también lo es la densidad de corriente $\vec{j} = \sigma\vec{E}$. Si el cilindro tiene una sección transversal de área A, la corriente a través de esa área será $I = \|\vec{j}\|A$. Similarmente, el voltaje a lo largo de una línea paralela al eje del cilindro será $V = \|\vec{E}\|L$, con L la longitud del cilindro. Por lo tanto, a partir de la Ley de Ohm (Ec. 3.6) se tiene que

$$V = IR \quad , \text{ con } \quad R = \frac{1}{\sigma}\frac{L}{A} \text{ el valor de la resistencia.} \tag{3.13}$$

Para que la resistencia quede definida positiva, la línea del voltaje debe estar orientada en misma dirección de la corriente.

En un condensador, el campo eléctrico es diferente de cero entre sus placas. El voltaje a lo largo de una curva que va de una placa a la otra resulta proporcional a la carga,

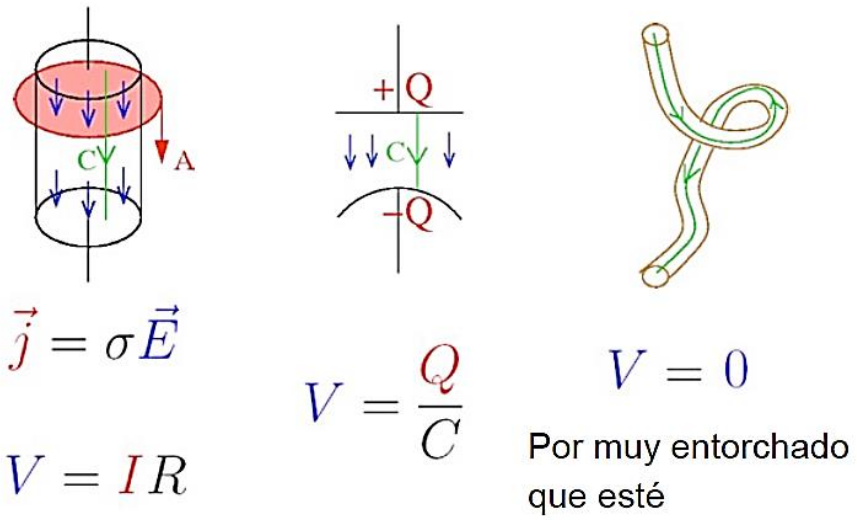
$$V = \frac{Q}{C} \quad , \tag{3.14}$$

donde C es la capacitancia del condensador. Para que la capacitancia quede definida positiva, la línea del voltaje debe ir de la carga positiva a la negativa.

Otros elementos se comportan de manera similar a un condensador. Por ejemplo, en una batería de 9V DC una reacción química produce cargas positivas en un borne y negativas en el otro, y el campo eléctrico a lo largo de una curva que vaya del borne positivo al negativo es exactamente 9V. Similarmente, el elemento de entrada de un voltímetro digital es un transistor MOS-FET, en el que las cargas positivas se acumulan en la terminal positiva (Gate) y las negativas en la negativa (Source). Finalmente, si las

corrientes son pequeñas, el campo eléctrico al interior de un alambre de un buen conductor (ej: Cu) es muy pequeño, y el voltaje a lo largo de una curva que vaya por dentro del alambre es prácticamente cero, por muy entorchado que esté el alambre. Estos resultados se pueden ver resumidos en la Figura 3-17.

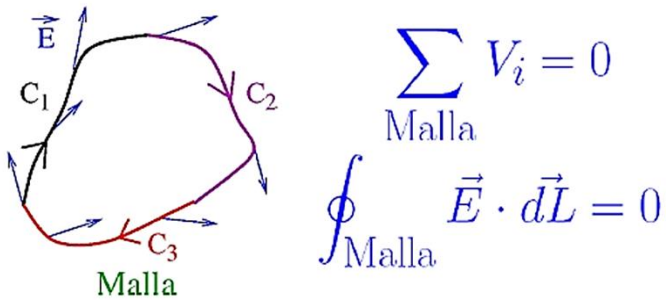
Figura 3-17: Voltaje en algunos elementos de circuito (Muñoz Castaño, 2017).



La Ley de Kirchhoff de voltajes nos dice que la suma de voltajes a lo largo de una curva cerrada (una *malla*) es cero. Esto equivale a decir que la integral de línea del campo eléctrico a lo largo de una curva cerrada es cero (Figura 3-18),

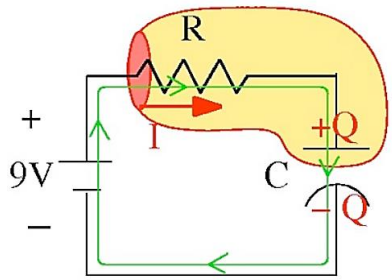
$$\oint \vec{E} \cdot \vec{dl} = 0 \quad , \quad \text{o} \quad \sum_{malla} V_i = 0 \tag{3.15}$$

Figura 3-18: Ley de Kirchhoff de voltajes (Muñoz Castaño, 2017)



Con estos elementos podemos analizar cómo es el voltaje a lo largo de una malla de un circuito. Considere por ejemplo el circuito de la Figura 3-19.

Figura 3-19: Mallas y nodos en un circuito RC (Muñoz Castaño, 2017)



La suma de voltajes a lo largo de la malla es cero, y en el nodo señalado se cumple la ley de conservación de la carga. Por lo tanto,

$$-9V + I_R R + \frac{Q}{C} = 0 \qquad , \qquad I_R = \frac{\partial Q}{\partial t} \tag{3.16}$$

cuya solución es que la corriente de la resistencia decae exponencialmente, $I = I_0 e^{-t/\tau}$, con $\tau = RC$ el tiempo característico del sistema.

3.2.7 La ley de Faraday

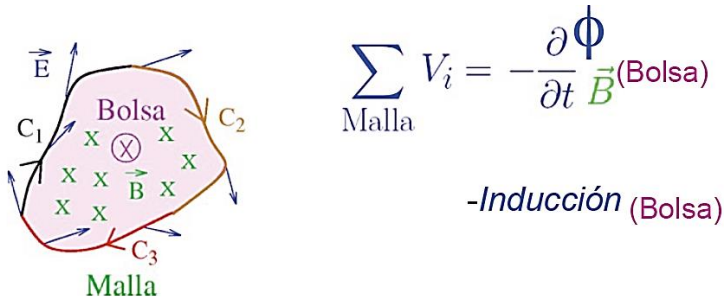
La ley de Kirchhoff de voltajes no es válida en general. En efecto, cuando hay campos magnéticos que varían en el tiempo, se cumple es la Ley de Faraday, que dice que la suma de los voltajes a lo largo de una malla es igual a menos la inducción a través de la bolsa (Ida, 2000). La bolsa de la cual se habla aquí es una superficie cualquiera limitada por la malla, de tal manera que la malla sea la boca (el borde) de la bolsa,

$$\oint_{malla} \vec{E} \cdot \overrightarrow{dl} = -\frac{d}{dt}\Phi_B(bolsa) \quad , \quad o \sum_{malla} V_i = -\text{Inducción}(bolsa) \qquad , \tag{3.17}$$

La inducción magnética se define aquí como la derivada temporal del flujo de campo magnético a través de la bolsa (ver Figura 3-20),

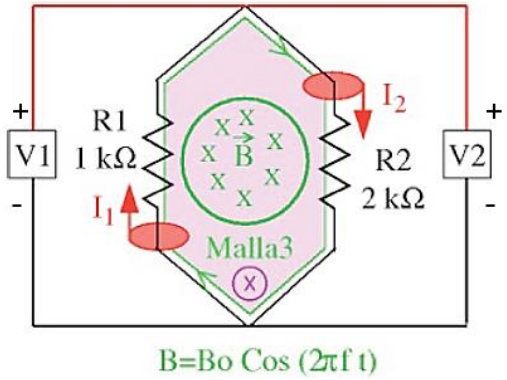
$$\text{Induccion}(bolsa) = \frac{d}{dt}\Phi_B(bolsa), \qquad \text{con } \Phi_B(bolsa) = \int_{bolsa} \vec{B} \cdot \overrightarrow{dA}. \qquad , \tag{3.18}$$

Figura 3-20: La Ley de Faraday (Muñoz Castaño, 2017)



Cualquier bolsa con estas características sirve, pues, como las líneas de campo magnético son cerradas, $\Phi_B(bolsa)$ es igual sobre todas ellas. La bolsa está orientada de acuerdo con el sentido de la mano derecha de la orientación de la malla.

Figura 3-21: Dos voltímetros en paralelo que marcan diferente (Muñoz Castaño, 2017)



La primera consecuencia de que la integral de línea a lo largo de una curva cerrada no sea cero es que los voltajes a lo largo de una malla no suman cero. En consecuencia, dos voltímetros conectados en paralelo pueden marcar diferente. Considere, por ejemplo, el circuito de la Figura 3-21, formado por un anillo de dos resistencias en serie por en medio de los cuales se introduce una bobina potente y larga que se conecta a la red eléctrica, y por dos multímetros AC conectados en paralelo. Como las resistencias están conectadas en serie, una misma corriente circula por las dos ($I_1 = I_2 = I$). Como en las mallas exteriores el campo magnético es despreciable, por lo que lo que marcan los voltímetros es $V_1 = -I_1R_1$ y $V_2 = I_2R_2$. En cambio, en la malla central sí hay inducción, y la Ley de Farday toma la forma

$$I_1R_1 + I_2R_2 = I(R_1 + R_2) = -\text{Inducción}(bolsa) \text{ , de donde } \quad I = -\frac{\text{Inducción}(bolsa)}{(R_1+R_2)} \qquad (3.19)$$

con $$\text{Inducción}(bolsa) = \frac{d}{dt}\left(\|\vec{B}\|A\right) = -2\pi f A B_0 \sin(2\pi f t), \qquad (3.20)$$

si $f = 60$Hz. Como la corriente que pasa por las resistencias es la misma, la lectura de voltaje AC en el voltímetro V2 será el doble que en el voltímetro V1. El montaje se puede construir experimentalmente con facilidad, y es una prueba irrefutable de que voltaje ya no es diferencia de potencial (Romer, 1982).

En efecto, como el campo eléctrico ya no es conservativo ($\oint \vec{E} \cdot \overrightarrow{dl} \neq 0$), ya no es posible escoger un punto de tierra y asignar de manera unívoca un potencial a cada punto del

espacio como el voltaje de una curva cualquiera que vaya desde el origen hasta ese punto, pues el voltaje en cada curva con esas características puede dar diferente.

Nótese aquí que no hemos utilizado el concepto de Fuerza Electromotriz, o FEM. En realidad este es un concepto ambiguo, pues a veces se utiliza para describir el voltaje de una batería y otras para describir la inducción de Faraday. En vez de ello, hemos preferido usar dos conceptos muy diferentes: ***voltaje***, que es campo *eléctrico* a lo largo de una *curva*, e ***inducción magnética***, que nos dice cuánto varía el flujo de campo *magnético* que atraviesa la *bolsa* limitada por la malla. De esta manera, se evitan errores conceptuales.

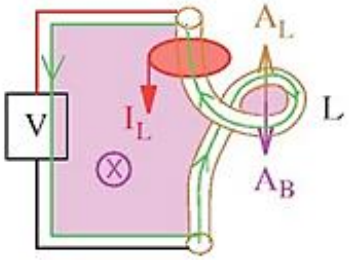
3.2.8 El voltaje sobre la bobina

La Ley de Faraday nos permite explicar también el origen del voltaje que un multímetro mide cuando se coloca en paralelo con una bobina. La corriente que circula por la bobina produce un campo magnético que a su vez produce un flujo de campo magnético a través de sus espiras. Este flujo es proporcional a la corriente,

$$\Phi_B(A_L) = L\, I_L \qquad . \tag{3.21}$$

La constante de proporcionalidad se llama *inductancia*. Para que la inductancia quede definida positiva, la superficie A_L de las espiras debe orientarse según la mano derecha de la corriente I_L.

Figura 3-22: El voltaje de la bobina (Muñoz Castaño, 2017).



Coloquemos un voltímetro en paralelo con la bobina y consideremos la malla formada por la bobina y el voltímetro. El único lugar de la malla donde el campo eléctrico es diferente de cero es al interior del voltímetro, pues de resto la malla va por dentro de un alambre conductor de conductividad muy alta. Sin embargo, el flujo de campo magnético a través de la bolsa limitada por la malla no es cero, pues incluye el flujo producido en las espiras

por la corriente que recorre la bobina. Si esta corriente varía en el tiempo, el flujo también varía en el tiempo, y tendremos una inducción diferente de cero.

Sin embargo, hay un detalle referente a los signos. La superficie de las espiras A_L en la definición de inductancia está orientada según la mano derecha de la corriente I_L, mientras que la bolsa está orientada según la mano derecha de la malla. Por lo tanto, si las orientaciones de la malla y de la corriente coinciden, el flujo sobre la parte de la bolsa que corresponde a las espiras es $\Phi_B(bolsa) = I_L\, L$. De lo contrario, las espiras en la bolsa y A_L quedan orientadas opuestas la una a la otra, y el flujo sobre la bolsa es $\Phi_B(bolsa) = -I_L\, L$. Este último es el caso de la malla en la Figura 3-22. Por lo tanto, la suma de los voltajes a lo largo de la malla es *V*, lo que marca el voltímetro, y el flujo de campo magnético en la bolsa es $\Phi_B(bolsa) = -I_L\, L$. La ley de Faraday para esta malla resulta ser

$$\mathrm{V} = L\frac{dI_L}{dt} \qquad , \tag{3.22}$$

como se esperaba. Es decir, el “voltaje de la bobina” no es un voltaje, sino una inducción. No está a lo largo del alambre, sino en el área de las espiras.

3.3 Componente Didáctico

3.3.1 Dificultades en el aprendizaje de Voltaje y Corriente eléctrica

Como hemos mencionado anteriormente, para el ingeniero electrónico los conceptos de voltaje y corriente son ejes centrales en su formación y vida profesional, pues contribuyen a la comprensión de circuitos eléctricos. No obstante, diversos estudios coinciden en la existencia de un sinnúmero de errores conceptuales en la mayoría de los niveles educativos (Carles Furió & Guisasola, 1999). Nociones elementales para la comprensión de la corriente eléctrica, como el concepto físico de campo eléctrico, no son de todo claras en los estudiantes, pues no asocian las líneas de campo con los vectores de campo correspondiente.

De acuerdo con (Bohigas & Periago, 2010; C Furió, Guisasola, Almudí, & Ceberio, 2003) la dificultad está en el paso inmediato de una visión newtoniana (Coulomb) a una, energética (campo eléctrico), sin explicar la necesidad de este cambio cualitativo. Por tal

razón, la teoría del campo eléctrico es considerada como una forma *abstracta* de explicar la interacción eléctrica, y los mismos docentes no enfatizan la necesidad de su introducción en la enseñanza. Además, los estudiantes piensan que la corriente es la causa que origina el voltaje, y no su consecuencia, por lo que usan $V = IR$ en orden inverso. Para ellos, una batería es una fuente de corriente (Cohen, Eylon, & Ganiel, 1983), y tienen una garrafal confusión entre tensión y corriente (Von Rhöneck & Völker, 1983). El voltaje aparece entonces como un concepto difícil de comprender para los estudiantes (Iona, 1983).

En este orden de ideas, una mejor comprensión de los conceptos básicos de la electrostática parece esencial para lograr adquirir una visión científica de todos los fenómenos electromagnéticos (Bohigas & Periago, 2010). Además, es de resaltar que los fundamentos teóricos de la teoría de circuitos lineales se basan en la teoría del electromagnetismo de Maxwell. En su forma más común, la teoría de circuitos se basa en las Leyes de Kirchhoff, la resistencia (o con mayor generalidad, la impedancia), la ley de Ohm y el principio de superposición. Dada una especificación de todas las fuentes en el circuito, las leyes de Kirchhoff nos proveen de un conjunto de ecuaciones lineales que se pueden resolver para obtener cualquier voltaje o la corriente en el circuito (Johnson, 2003). El problema es que estas leyes no son válidas en general cuando hay campos electromagnéticos variables, pero este hecho nunca se expone explícitamente al enseñar el tema.

3.3.2 Los libros de texto y la enseñanza de voltaje y corriente

Los libros de texto suelen ser determinantes para la forma en que se enseñan los contenidos de una asignatura, pues muchos docentes siguen literalmente un libro. Diversas investigaciones señalan que los libros de texto se encuentran bastante rezagados con respecto a las propuestas didácticas para la enseñanza de circuitos (Sangam, Jesiek, & Thompson, 2011). El resultado es que los alumnos ya graduados mantienen dos esquemas paralelos de conocimientos (Carles Furió & Guisasola, 1999). Por un lado están sus conocimientos académicos sobre leyes, teorías, fenómenos, fórmulas y métodos, que les ayudan en el medio educativo para resolver ejercicios y aprobar los exámenes. Por otro, los alumnos mantienen sus ideas previas, que les son útiles para entender la realidad y para interactuar con el medio que les rodea. Inclusive, es habitual hallar estudiantes universitarios y profesionales que han terminado sus

carreras y mantienen pensamientos erróneos sobre ciertos fenómenos científicos relacionados con circuitos. Aunque la mayoría de los errores conceptuales en el campo de la teoría de circuitos (incluyendo los de voltaje y corriente) ya han sido identificados en estudiantes de secundaria y de bachillerato, se hace necesario investigar si éstas fallas subsisten en niveles superiores como el universitario, más concretamente en estudiantes de Ingeniería (Periago & Bohigas, 2005).

En términos generales, como lo plantea (Londoño Londoño, 2014), la secuencia que tienen los libros de texto para presentar los conceptos anteriormente mencionados es la siguiente: *carga, fuerza, campo, potencial o diferencia de potencial, corriente, resistencia y potencia, distribuidos en varios capítulos o temas*. En lo que respecta a su metodología tienen casi una misma idea para el abordaje de los temas, que consiste primero en motivar con analogías y ejemplos los conceptos para luego darles definición, después expresan su significado desde lo matemático y finalizan con ejercicios de aplicación.

Diversos y numerosos trabajos en didáctica de circuitos eléctricos (Timmermann & Kautz, 2014) se centran en tratar generar una construcción intuitiva del concepto de voltaje a partir de la diferencia de potencial, haciendo símil con el potencial gravitacional. Sin embargo, como ya hemos mencionado, esto sólo es cierto para circuitos DC. En cambio, son pocos los trabajos que intentan enseñar el concepto general de voltaje, que es válido tanto en DC como en campos variables, como campo eléctrico a lo largo de una curva, o equivalentemente como trabajo por unidad de carga realizado por las fuerzas electromagnética a lo largo de una curva. A este respecto vale resaltar los trabajos de (Nicholson, 2005; Romer, 1982), que muestran cómo este concepto resuelve algunas de las paradojas que existen en su comprensión.

3.3.3 Propuestas actuales en la enseñanza de Voltaje, Corriente y Circuitos

Enunciaremos a continuación algunos trabajos recientes (a la fecha de la presente tesis) con sus propuestas o estrategias y resultados obtenidos. En las siguientes tablas se especifican sus características básicas. La Tabla 3-1 muestra una propuesta con enfoque a la implementación de tutoriales.

Tabla 3-1: Propuesta con enfoque a la implementación de tutoriales

Año	2017
Autor(es)	Peter Riegler, Andreas Simon, Marcus Prochaska, Christian Kautz, Rebekka Bierwirth, Susan Hagendorf and Gerd Kortemeyer
Tesis, artículo o libro de texto	Using Tutorials in Introductory Physics on circuits in a German university course: observations and experiences
Propuesta planteada	Describe la implementación en un curso universitario alemán de tutoriales en física introductoria desarrollados en Estados Unidos. En particular, investiga si los desafíos conceptuales que dieron lugar al desarrollo de tutoriales también se encuentran entre los estudiantes alemanes, qué obstáculos aparecen en su implementación y cómo se perciben los tutoriales en este contexto universitario.
Resultado obtenido	Se encontró que los estudiantes alemanes entran en cursos introductorios de física con un conjunto diferente de conocimientos previos que sus contrapartes estadounidenses, que junto con obstáculos de implementación y percepciones negativas por parte de los estudiantes, llevó a que la facultad descontinuara su uso después de sólo un semestre.

La Tabla 3-2 presenta una propuesta con enfoque a la implementación de estrategias didácticas basadas en aprendizaje significativo.

Tabla 3-2: Propuesta con enfoque a la implementación de estrategias didácticas

Año	2017
Autor(es)	J. A. Álvarez Salas, R. I, Hernández Molinar, M. A. Gallegos Guerrero
Tesis, artículo o libro de texto	Implementación de estrategias didácticas basadas en aprendizaje significativo en un curso de circuitos eléctricos
Propuesta planteada	Implementar acciones para lograr que sus egresados de ingeniería Mecánica y Eléctrica desarrollen habilidades, actitudes y valores que son característicos del profesionista del nuevo milenio.
Resultado obtenido	Muestra que el profesor tiene la oportunidad de utilizar estrategias educativas modernas para asegurar el desarrollo de habilidades de comunicación, manejo de roles, análisis e interpretación de resultados; pero ante todo garantizar un aprendizaje con resultados trascendentes

La Tabla 3-3 muestra una propuesta con enfoque a comparación de conceptos entre libros de texto.

Tabla 3-3: Propuesta con enfoque a comparación de conceptos entre libros de texto

Año	2017
Autor(es)	Vinit Kumar
Tesis, artículo o libro de texto	Electromagnetic response of a metal: a comparative analysis of the 'free charge model' and the 'bound charge model'
Propuesta planteada	Una manera natural de analizar la respuesta electromagnética de un metal es mediante el tratamiento de los electrones de conducción como "carga libre", como se describe en la mayoría de los libros de texto. Sin embargo, algunos libros de texto, como Feynman, discuten otro enfoque, donde los electrones de conducción se tratan efectivamente como "carga unida". Esto se debe a que se habla de una polarización oscilante de metal, cuando se aplica un campo alterno, lo que da como resultado una permitividad eléctrica no unitaria. En este trabajo, realizaron un análisis comparativo de estos dos enfoques.
Resultado obtenido	Se demuestra explícitamente que, aunque los dos modelos dan valores diferentes de algunas magnitudes como la conductividad y la permitividad, los campos eléctrico y magnético, así como la corriente total y la disipación de calor son los mismos, como se esperaba. Las discusiones presentadas en el documento dan algunas ideas útiles a la electrodinámica de los conductores.

Podemos observar que la didáctica de circuitos eléctricos es un campo de investigación prometedor y muy diversificado.

4. Diseño de la propuesta metodológica

En esta sección se muestra una secuencia didáctica de ocho unidades diseñada para la enseñanza-aprendizaje de voltaje, corriente y resolución de circuitos con leyes de Maxwell a estudiantes de tercer semestre de la asignatura circuitos I (periodo 2017-I) de la Universidad Popular del Cesar.

4.1 Descripción de la población

La propuesta va dirigida a estudiantes del tercer semestre del curso *Circuitos I* (periodo 2017-I) de la Universidad Popular del Cesar, universidad pública del orden nacional, donde predominan los estratos 1, 2 y 3.. El número de estudiantes en este curso fue de 18, y sus edades oscilan entre 19 y 23 años. De acuerdo al pensum académico del programa, para poder cursar la asignatura de *Circuitos I* son obligatorias especialmente las nociones de los cursos de cálculo integral y herramientas de software, pues en esta última se adquieren destrezas en software de simulación de circuitos y creación de interfaces gráficas para la articulación de sus diseños electrónicos. De manera paralela deben estar cursando las asignaturas de cálculo multivariable, electromagnetismo, estadística descriptiva, metodología de la investigación e inglés, junto con las de extraplan ya sea deportes o actividad cultural. La universidad cuenta con salones, laboratorios y equipos para el desarrollo de sus prácticas. El curso de *Circuitos I* se ofrece con una intensidad de seis horas semanales, de las cuales cuatro son de docencia directa y dos de prácticas o laboratorios.

Ahora, para conocer cuáles eran las ideas previas de los estudiantes se diseñó un pre-test de veintiuna preguntas, dividido en dos partes: una para los temas de cargas, fuerzas y campos, corriente eléctrica y leyes de corriente eléctrica y sus aplicaciones y

otra para voltaje, ley de Faraday y solución de circuitos RL y RLC. Cada mitad del pre-test se aplicó antes de cada sesión, y su aplicación sirvió para enfatizar algunos temas de la secuencia. Observándose las ideas principales que tenían los estudiantes.

4.2 Secuencia Didáctica: Diseño y Aplicación

La secuencia didáctica diseñada consta de ocho sesiones de dos horas cada una, que se describen a continuación, incluyendo también los hechos cualitativos que se observaron en su implementación.

Antes de plantear la propuesta se dialogó con los estudiantes sobre la importancia de la aplicación de las secciones o unidades partiendo de que muchos de los conceptos que van a ver y a desarrollar serán de gran ayuda para su ejercicio profesional. Además, que en la secuencia a realizar contribuirá para reforzar los temas que ya vieron y sentará bases fuertes para los temas siguientes de la asignatura que están cursando y en las de los siguientes semestres como por citar los campos electromagnéticos y las comunicaciones. Así mismo, se les comentó que se realizará un post-test dividido en dos partes: uno de las cuatro primeras sesiones y otro de la sesión 5 a la 8.

4.2.1 Primera sesión: cargas

La Tabla 4-1 presenta la secuencia para la unidad 1.

Tabla 4-1: Propuesta unidad 1: cargas

Tiempo estimado	Una sesión de 120 Minutos
¿Ser capaz de hacer qué cosas?	Predecir de manera cualitativa cómo se carga un material.
Saber qué cosas	Átomos, electrones, cargas eléctricas.
Que cambia en su visión del mundo	▪ Que un cuerpo se encuentra cargado cuando ha perdido o ganado electrones. ▪ Mostrar que un material está hecho de átomos unidos por electrones. ▪ En un metal, los electrones se pueden mover libremente por todo el material. En un aislante, sólo se pueden alejar un poquito de su núcleo.
Ayudas didácticas	Videos, experimentos, simulaciones
Discusión	▪ ¿Dónde hay cargas negativas y positivas? ▪ ¿Cómo se carga un material? ▪ ¿De que esta hecho un material?
Secuencia de actividades	▪ Describir el modelo atómico de Rutherford. Mostrar que un material está hecho de átomos unidos por electrones.

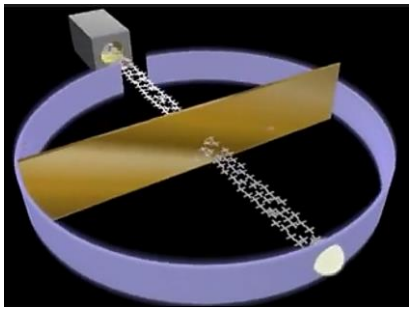
	En un metal, los electrones forman una nube, y los átomos están inmerso dentro de esa nube, y que los electrones se pueden mover libremente por todo el material. (apoyado con un video e imágenes). ▪ Mostrar que cargar es quitar o agregar electrones (apoyado con un video). ▪ Hacer en clase experimentos demostrativos de carga por frotado. ▪ Basados en el aprendizaje activo y utilizando un electroscopio indagar preconceptos acerca del comportamiento de las cargas y su posible estructura atómica.
Evaluación	Realizar un quiz donde los estudiantes expliquen los fenómenos observados y su comportamiento.
Actividad Complementaria	Los estudiantes indagan y realizan el experimento de las campanas de Franklin, pero variando el material del que está hecha la esfera del experimento.

Para empezar esta unidad partimos de un video divertido que expone una explicación de la teoría del átomo, en este caso por Cantinflas. La intención fue mostrar que mucho se habla pero poco se conoce, además de evidenciar que las explicaciones para este tema usan en su gran mayoría un lenguaje muy sofisticado o científico que dificulta la comprensión y desmotiva. En la Figura 4-1 se aprecia el video mostrado.

Figura 4-1: El átomo según Cantinflas (Delgado & Cantinflas, 1946)

Siguiendo con el contenido, se observó que les fue más interesante conocer el modelo atómico de Rutherford cuando se le explicó la forma en que lo dedujo, es decir el experimento que realizó. Para esto fue útil la animación: Rutherford's-Experiment. Ver Figura 4-2 . Igualmente, fue muy ventajoso el tema de iones para reforzar el concepto de que cargar un material consiste en *ganar o perder electrones.*

Figura 4-2: Rutherford's-Experiment (CosmoLearning, 2008)



Como parte de la práctica de cargas se realizaron experimentos de carga por frotamiento y se explicó el uso de un electroscopio. Los materiales se aprecian en la Figura 4-3 .

Figura 4-3: Práctica de cargas eléctricas (Díaz Marulanda, 2017)

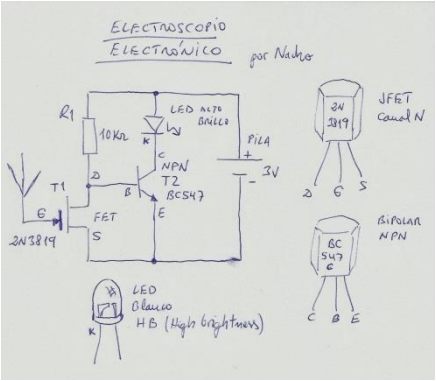
Para la experiencia de cargas se utilizaron elementos comunes, reciclables y de fácil adquisición, como tubos de PVC, pedazos de papel, botellas plásticas, bolígrafos, telas o paños. La pregunta principal de la experiencia ¿por qué se pegan los papelitos al globo?

Para el electroscopio, la pregunta principal fue: ¿qué les pasa a las laminitas de aluminio si acerco el globo cargado? Muchas fueron las respuestas y buenas discusiones se dieron al respecto. Se observó que al estudiante le es más fácil comprender la carga por inducción cuando ellos mismos experimentan con el electroscopio y ven que al acercar un objeto cargado, que separa las láminas, y tocar la antena del electroscopio con los dedos, las láminas se cierran, pero que luego, al alejar el objeto cargado, las láminas se vuelven a separar. En la Figura 4-4 se observa el electroscopio construido y a los estudiantes experimentando con él.

Figura 4-4: Práctica el electroscopio (Díaz Marulanda, 2017)

Finalmente se les propone a los estudiantes indagar y realizar el experimento de las campanas de Franklin, variando el material de la esfera. Además, y de manera opcional, se les propone implementar y probar un electroscopio electrónico, como el que se muestra en la Figura 4-5.

Figura 4-5: Electroscopio electrónico (Salgado, 2014)



4.2.2 Segunda sesión: fuerzas y Campos

La Tabla 4-2 presenta la secuencia para la unidad 2.

Tabla 4-2: Propuesta unidad 2: fuerzas y campos

Tiempo estimado	Una sesión de 120 Minutos
¿Ser capaz de hacer qué cosas?	Predecir de manera cualitativa el comportamiento de las cargas en campos eléctricos.
Saber qué cosas	fuerza electrostáticas y campos eléctricos.
Que cambia en su visión del mundo	▪ Que las fuerzas que unen a los átomos en las sustancias son fuerza eléctricas. ▪ Que los campos son un modelo alternativo al de fuerzas retardadas a distancia: las cargas generan un campo, y ese campo hace fuerzas sobre las otras cargas.
Ayudas didácticas	Videos, experimentos, simulaciones
Discusión	▪ ¿Qué fuerzas se hacen entre las cargas?

	▪ ¿Qué es campo eléctrico? ▪ ¿Cómo se desvía una carga en un campo eléctrico? ▪ ¿Qué es campo magnético? ▪ ¿Qué ejemplos conoce?
Secuencia de actividades	▪ Describir la fuerza eléctrica: cargas que se atraen, cargas que se repelen, y cómo varía la fuerza con la distancia (Ley de Coulomb). Ejemplo: levantar papelitos. ▪ Describir la fuerza magnética. ▪ Ver el campo magnético con limaduras de hierro. ▪ Definir el campo eléctrico como fuerza sobre carga, para una carga estática. ▪ Ver las líneas de campo eléctrico producidas por cargas eléctricas estáticas, usando semillas en aceite y una raqueta eléctrica mata-insectos. ▪ Basados en el aprendizaje activo y utilizando los montajes propuestos, indagar preconceptos acerca de líneas de campo eléctrico y magnético.
Evaluación	Realizar un quiz donde los estudiantes expliquen los fenómenos observados y su comportamiento
Actividad Complementaria	Que los estudiantes realicen simulaciones de campos eléctricos con el software *cargas y campos* (PhET Interactive Simulations- University of Colorado: https://phet.colorado.edu/es/simulation/legacy/charges-and-fields) y analizar el comportamiento de las cargas.

En la aplicación de esta unidad fueron muy útiles las experiencias propuestas en la secuencias de actividades, evidenciándose mayor interés por parte de los estudiantes y una mejor conceptualización de líneas de campo eléctrico y líneas de campo magnético.

Para la práctica “miremos líneas de campo eléctrico” los materiales fueron:

- Recipiente pequeño
- Placas metálicas o tornillos
- Aceite de cocina
- Semillas (varias)
- Caimanes
- Raqueta mata mosquitos

En la Figura 4-6 se aprecian los materiales usados y la práctica de los estudiantes. La pregunta principal ¿Qué le sucederán a las semillas al encender la raqueta?

Figura 4-6: Miremos líneas de campo eléctrico (Díaz Marulanda, 2017).

Para la práctica “miremos líneas de campo magnético” los materiales fueron:

- Imanes
- Limadura de Hierro
- Hojas de papel o acetatos
- Lápiz

En la Figura 4-7 se aprecian los materiales usados y la práctica de los estudiantes. La pregunta principal fue: ¿cómo se comportará las limaduras de hierro que están encima del papel al interactuar con el imán?

Figura 4-7: Miremos líneas de campo magnético (Díaz Marulanda, 2017).

4.2.3 Tercera sesión: ¿qué es corriente eléctrica?

La Tabla 4-3 presenta la secuencia para la unidad 3.

Tabla 4-3: Propuesta unidad 3: ¿qué es corriente eléctrica?

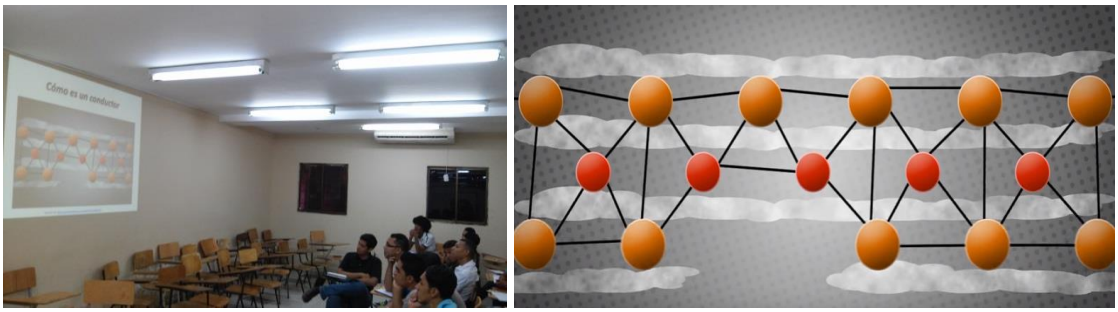
Tiempo estimado	Una sesión de 120 minutos.
¿Ser capaz de hacer qué cosas?	Predecir de manera cualitativa el movimiento de los electrones en un conductor.
Saber qué cosas	Electrones, corriente eléctrica, ley de Ohm.
Que cambia en su visión del mundo	▪ Que la corriente es un flujo de electrones y su velocidad es igual a la de un caracol. ¿Y entonces cómo al accionar un interruptor en la casa se enciende casi inmediatamente un bombillo? ▪ Que el campo eléctrico empuja los electrones y produce

	una corriente eléctrica. ▪ Que las corrientes no van por los alambres sino que atraviesan superficies. ▪ El concepto de densidad de corriente como corriente por unidad de área. ▪ Que la densidad de corriente es útil para la elección de los cables eléctricos en viviendas.
Ayudas didácticas	Videos, experimentos, simulaciones.
Discusión	▪ ¿Qué es corriente eléctrica? ▪ ¿Cómo se comportan los electrones en un conductor conectado en un circuito? ▪ ¿Hay corriente en un conductor solo con agarrarlo con la mano?
Secuencia de actividades	▪ Cómo es un conductor por dentro = un cristal de átomos unidos por orbitales electrónicos. ▪ Fuerzas sobre un electrón al interior de un conductor. ▪ Movimiento del electrón = acelera y choca. ▪ Corriente eléctrica = cuánta carga atraviesa una superficie por unidad de tiempo. ▪ Corriente de un río = caudal = cuánta agua atraviesa una red por unidad de tiempo. Ejemplos y ejercicios de reemplazo. ▪ Campo eléctrico y velocidad promedio. ▪ Densidad de corriente. ▪ Ley de ohm microscópica. ▪ Corriente en un alambre = corriente a través de la sección transversal. (por medio de un video).
Evaluación	Realizar un quiz donde los estudiantes expliquen el concepto de corriente eléctrica.
Actividad Complementaria	Los estudiantes deberán traer analogías del concepto de corriente y en lo posible hacer experimentos básicos para explicar el fenómeno.

En esta sección el eje central radica en ahondar y fortalecer el concepto de corriente eléctrica. La pregunta principal ¿Qué es corriente eléctrica? La gran mayoría manifiestan que la corriente es el flujo de carga, otros que es el voltaje sobre la resistencia, pero no sabían que el campo eléctrico el causante del movimiento de las cargas y que éstas, al atravesar superficies, generan corriente.

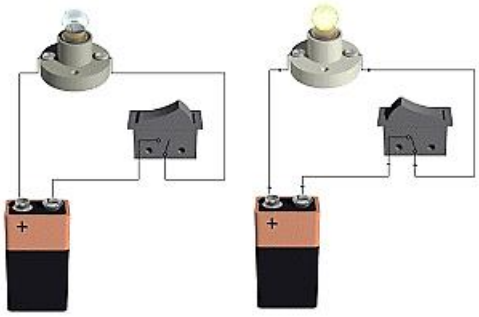
Para el abordaje empezamos en la explicación de cómo es un conductor. En la Figura 4-8 se muestra la clase implementada.

Figura 4-8: Cómo es un conductor (Díaz Marulanda, 2017; Patiño Santa, 2015)



Se resalta la importancia de cambiar el modelo mental de los estudiantes respecto a la corriente eléctrica, e ilustrarlo con ejemplos cotidianos en los cuales se suele dar una mala interpretación a los conceptos, como por ejemplo: si la corriente es un flujo de electrones y su velocidad es igual a la de un caracol, entonces ¿cómo al accionar un interruptor en la casa se enciende casi inmediatamente un bombillo?, lo que permite entender que son los campos electromagnéticos, viajando a la velocidad de la luz, los que mueven las cargas. En la Figura 4-9 se observa un montaje eléctrico común para apoyar la anterior pregunta.

Figura 4-9: Velocidad de la corriente (Luján, 2011)



No fue fundamental la parte práctica de la corriente eléctrica porque es de recordar que los estudiantes ya traen nociones de software de simulación y montajes de este tipo desde el inicio de la carrera.

4.2.4 Cuarta sesión: leyes de la corriente eléctrica y sus aplicaciones

La Tabla 4-4 presenta la secuencia para la unidad 4

Tabla 4-4: Propuesta unidad 4: leyes de la corriente eléctrica y sus aplicaciones

Tiempo estimado	Una sesión de 120 minutos.
Objetivo	Predecir de manera cualitativa el comportamiento de campos en un conductor, e introducir la conservación de la carga eléctrica.
¿Ser capaz de hacer qué cosas?	Técnicas para la resolución de circuitos DC.
Saber qué cosas	Conservación de la carga, funcionamiento de un condensador, Cómo es una ley de conservación.
Que cambia en su visión del mundo	▪ Que la carga se puede acumular. ▪ Que, si hay acumulación de carga, la corriente de entrada no es igual a la corriente de salida.
Ayudas didácticas	Videos, experimentos, simulaciones.
Discusión	▪ Cómo es una ley de conservación? Ejemplo: las personas en un salón. ▪ ¿Qué es conservación de la carga eléctrica? ▪ ¿Por qué se descarga un condensador? ▪ ¿Cómo funciona una antena? ▪ ¿Cómo se comporta la ley de Kirchhoff en una antena? ▪ ¿Qué otro métodos de resolución de circuitos DC conoce?
Secuencia de actividades	▪ Conservación del número de personas: usar como ejemplo el volumen y la superficie que encierra un salón. ▪ Ley de conservación de la carga. ▪ Carga de un condensador: entra corriente, pero no sale nada. Ejemplos de aplicación. ▪ La ley de Kirchhoff de corrientes como caso particular. Basados en el aprendizaje activo, se utiliza un circuito eléctrico básico para indagar preconceptos acerca del comportamiento de la carga y descarga de un condensador.
Evaluación	Realizar un quiz donde los estudiantes expliquen el concepto de carga y descarga del condensador.
Actividad Complementaria	Realizar simulaciones para explorar el funcionamiento de un condensador con el software Laboratorio de capacitores (PhET Interactive Simulations- University of Colorado: https://phet.colorado.edu/es/simulation/legacy/capacitor-lab) y analizar el comportamiento. Los estudiantes deberán profundizar el funcionamiento de antenas.

El eje central en esta unidad fue el corregir el modelo mental del estudiante respecto al concepto de nodo. El alumno trae consigo la explicación más generalizada de los libros de texto de eléctrica, electrónica y física universitaria, donde “un nodo es un punto donde entran y salen corrientes” (Guadarrama, Guadarrama, & Rodríguez, 2014), o “nodo es el

punto de conexión entre dos o más ramas” (Alexander & Sadiku, 2013). En su lugar, se muestra que un nodo es una superficie cerrada, y que la suma de las corrientes de entrada al nodo no necesariamente es igual a la suma de las corrientes de salida, pues se puede acumular carga en su interior. A continuación se explica la Ley de Conservación de la Carga, ilustrándola con el ejemplo de los estudiantes que entran a un salón de clases: El número de estudiantes que entran por segundo por la puerta menos el número de estudiantes que salen por segundo por la ventana es igual a la velocidad a la que aumenta la cantidad de estudiantes encerrados en el salón. La superficie cerrada que engloba el salón es el nodo, en este caso. En la Figura 4-10 se muestra la clase implementada.

Figura 4-10: Implementación propuesta 4 (Díaz Marulanda, 2017).

Posteriormente se explica la carga de un condensador, usando un nodo que engloba sólo una de las cargas, pasando entre las dos placas, y se escribe la Ley de Conservación de la Carga para ese nodo. Luego se trabaja el proceso de carga y descarga del condensador a través de software de simulación de circuitos electrónicos (Isis- Proteus 7 https://www.labcenter.com/). Las figuras Figura 4-11 y Figura 4-12 muestran estas simulaciones.

Figura 4-11: Simulación carga del condensador (Díaz Marulanda, 2017; Labcenter Electronics Ltd, 2017)

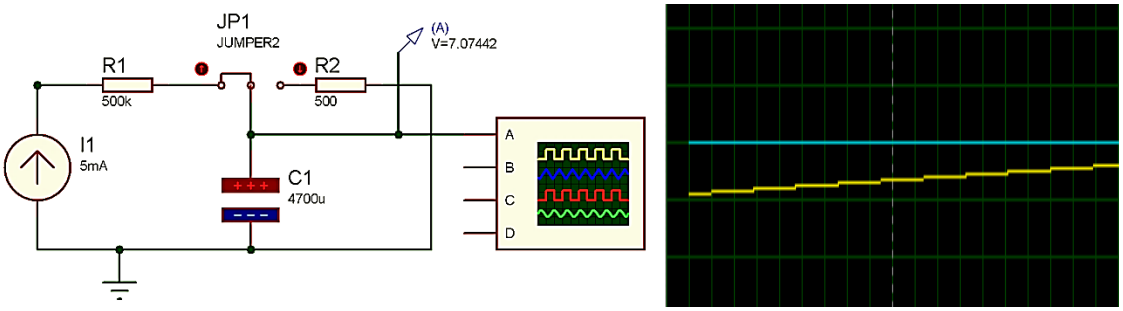
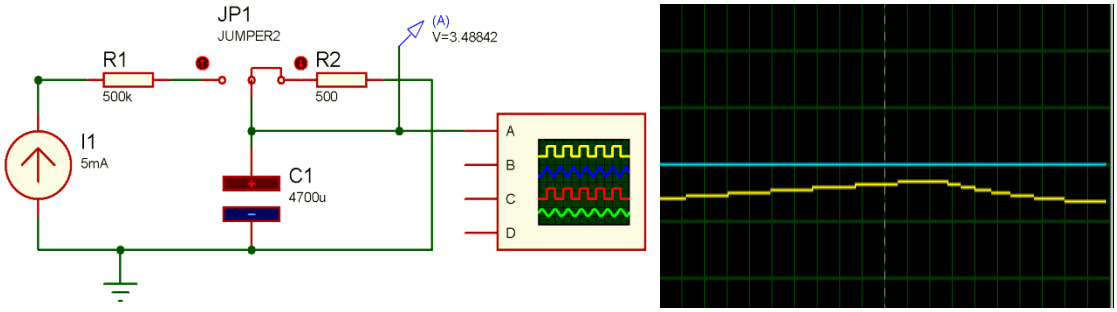


Figura 4-12: Simulación descarga del condensador (Díaz Marulanda, 2017; Labcenter Electronics Ltd, 2017).



Para ambos casos es importante resaltar que se usan fuentes de corriente, en vez de baterías, pues que aún no se ha explicado el concepto de voltaje.

4.2.5 Quinta sesión: ¿Qué es voltaje? (Parte 1)

La Tabla 4-5 presenta la secuencia para la unidad 2

Tabla 4-5: Propuesta unidad 5: ¿qué es voltaje? Parte 1

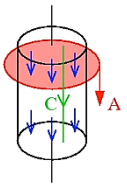
Tiempo estimado	Una de sesión 120 minutos.
¿Ser capaz de hacer qué cosas?	Solucionar circuitos DC (con resistencias) utilizando las Leyes de Kirchhoff de voltajes.
Saber qué cosas	Voltaje en elementos electrónicos básicos (Resistencias, fuentes, alambres). Leyes de Kirchhoff de voltajes y solución de circuitos DC.
Que cambia en su visión del mundo	Cómo se comporta el voltaje en resistencias.
Ayudas didácticas	Videos, experimentos, simulaciones.
Discusión	▪ ¿Qué es Voltaje? ▪ ¿Cómo se comporta el campo eléctrico en las resistencias?
Secuencia de actividades	▪ ¿Qué es voltaje? El campo eléctrico a lo largo de un alambre como origen del movimiento de los electrones. ▪ Voltaje como el trabajo que hacen las fuerzas electromagnéticas por unidad de carga cuando una carga se mueve a lo largo de una curva. ▪ Ejemplos: voltaje dentro de una resistencia, una fuente y un alambre. ▪ Voltaje a lo largo de un voltímetro y de una pila. ▪ Ley de Kirchhoff de voltajes. Circuitos sencillos. Ejemplos.
Evaluación	Realizar un quiz donde los estudiantes solucionen circuitos DC utilizando las Leyes de Kirchhoff de voltajes.
Actividad Complementaria	Los estudiantes deberán solucionar circuitos DC utilizando las Leyes de Kirchhoff de voltajes.

En el concepto de voltaje, al igual que en el de corriente, es muy común encontrar errores conceptuales. A la pregunta principal: ¿qué es voltaje? la mayoría de los estudiantes respondieron que es diferencia de potencial, que no es cierto en el caso general, motivo por el cual se debió explicar y aclarar este concepto en los alumnos. En la Figura 4-13 se muestra una ayuda didáctica hecha con materiales básicos y fáciles de adquirir para la explicación del concepto de voltaje, consistente en un tubo formado por botellas de PET, que simboliza el conductor, en cuyo interior se colocan bolas de ping-pong que simbolizan los electrones de conducción. De cada bola sobresale un hilo, que representa la fuerza ejercida por el campo eléctrico. Se observa que sólo el campo eléctrico en dirección del tubo crea una corriente de las cargas en su interior. A partir de allí se construye el concepto de voltaje como la suma de los campos eléctricos total a lo largo de la curva.

Figura 4-13: Botella para la explicación de voltaje (Díaz Marulanda, 2017).

Una vez aclarado el concepto de voltaje, se explica cómo es el voltaje en una resistencia, con la Ley de Ohm, y en una fuente de voltaje, recordando la forma de las líneas de campo eléctrico entre dos placas paralelas. Además, se enfatiza en que, por Ley de Ohm, el campo eléctrico al interior de un alambre conductor es casi cero – por muy entorchado que éste esté – pues la conductividad del conductor es muy alta. En la Figura 4-14 se muestra una de las diapositivas que se utilizan para la explicación.

Figura 4-14: Explicación de voltaje en algunos elementos electrónicos (Muñoz Castaño, 2017).



$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$
$$V = IR$$

A continuación se introduce el concepto de malla como la curva cerrada que va por dentro de los alambres y atraviesa los elementos de un circuito, y se recuerda la Ley de Kirchhoff de voltajes. Como parte final los estudiantes deberán solucionar circuitos DC utilizando la Ley de Kirchhoff de Corrientes (entendida como un caso particular de la Ley de Conservación de la Carga) y la Ley de Kirchhoff de voltajes, apoyados en los conceptos vistos.

4.2.6 Sexta sesión: ¿Qué es voltaje? (Parte 2)

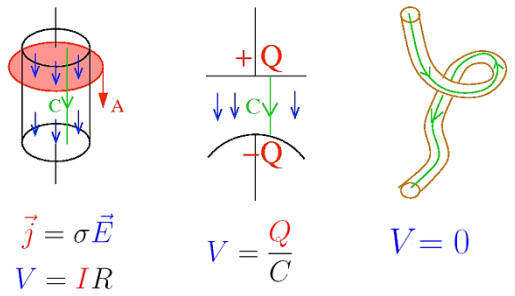
La Tabla 4-6 presenta la secuencia para la unidad 6.

Tabla 4-6: Propuesta unidad 6: ¿qué es voltaje? Parte 2

Tiempo estimado	Una sesión de120 minutos.
¿Ser capaz de hacer qué cosas?	Solucionar circuitos de resistencias y condensadores utilizando las Leyes de Kirchhoff de voltajes.
Saber qué cosas	Voltaje en elementos electrónicos básicos (Resistencias y Condensadores) Leyes de Kirchhoff de voltajes y solución de circuitos DC.
Que cambia en su visión del mundo	Cómo se comporta el voltaje en resistencias y condensadores.
Ayudas didácticas	Videos, experimentos, simulaciones.
Discusión	▪ ¿Cómo se comporta el voltaje en un circuito con resistencias y condensadores? ▪ ¿Cómo funciona un Multímetro?
Secuencia de actividades	▪ Ley de Kirchhoff de voltajes para solución de circuitos con resistencias y condensadores. ▪ Circuitos sencillos. Ejemplos. ▪ Carga y descarga exponencial. Temporización.
Evaluación	Realizar un quiz donde los estudiantes solucionen circuitos DC utilizando las Leyes de Kirchhoff de voltajes.
Actividad Complementaria	Los estudiantes deberán solucionar circuitos DC utilizando las Leyes de Kirchhoff de voltajes.

En esta segunda sesión del concepto de voltaje se profundiza voltaje, no sólo en resistencias y alambres, sino también en condensadores (Ver Figura 4-15). Se explica, entonces, cómo obtener las ecuaciones de nodo y de malla para circuitos RC, utilizando la Ley de Conservación de la Carga y la Ley de Kirchhoff de Voltajes, respectivamente. Se observa que, al comprender mejor qué es el voltaje, la corriente y la carga de cada elemento y poder identificar cuáles son las curvas y superficies cerradas que hacen las veces de mallas y nodos, los estudiantes analizan los circuitos desde otra perspectiva, dejando de lado el simple proceso mecánico, o “receta de cocina”, al que venían acostumbrados.

Figura 4-15: Explicación de voltaje en algunos elementos electrónicos (Muñoz Castaño, 2017).



Otro componente conceptual relevante fue la explicación de carga y descarga exponencial del condensador. Una pequeña limitante fue el hecho de que las ecuaciones diferenciales resultantes, aunque sencillas, son nuevas para los estudiantes, pues aún no han visto ecuaciones diferenciales. La forma de solventar el problema fue no dar tanta importancia a estas ecuaciones, sino más bien explicar el proceso después de que estas se plantean.

4.2.7 Séptima sesión: la ley de Faraday

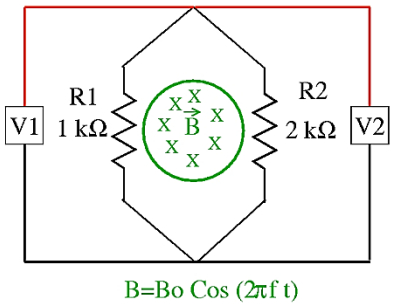
La Tabla 4-7 presenta la secuencia para la unidad 7.

Tabla 4-7: Propuesta unidad 7: la ley de Faraday

Tiempo estimado	Una de sesión 120 minutos.
¿Ser capaz de hacer qué cosas?	Predecir de manera cualitativa la inducción.
Saber qué cosas	• Qué es la ley de Faraday • Cómo es la inducción
Que cambia en su visión del mundo	▪ La suma de voltajes en un camino cerrado (malla) no es siempre cero. ▪ No siempre dos voltajes en paralelo son iguales.
Ayudas didácticas	Videos, experimentos, simulaciones.
Discusión	¿Qué es Inducción? Como se comporta el voltaje en líneas de trasmisión
Secuencia de actividades	▪ Basados en el aprendizaje activo, colocar el problema de dos voltímetros en paralelo que marcan diferente (Bobina de Thomson). ▪ Explicar la ley de Faraday. Suma de voltajes a lo largo de una malla y flujo de campo magnético a través de la bolsa, de la cual la malla es la boca. Inducción como derivada temporal de ese flujo. Uso de la Ley de Faraday para explicar el funcionamiento del montaje experimental.
Evaluación	Realizar un quiz donde los estudiantes expliquen el concepto de inducción y citen ejemplos.
Actividad Complementaria	Realizar simulaciones de la ley de Faraday con el software Laboratorio electromagnético de Faraday (PhET Interactive Simulations- University of Colorado: https://phet.colorado.edu/es/simulation/legacy/faraday) y analizar las condiciones que producen la inducción.

Esta es una de las unidades más controversiales, por la práctica que se desarrolla en clase. Este consiste en colocar dos voltímetros en paralelo a un circuito formado por dos resistencias en anillo, una de 1kΩ y otra de 2kΩ, el que se inserta una bobina de Thomson conectada a la red eléctrica, como se muestra en la Figura 4-16. La pregunta principal es: ¿cuánto marcaran los voltímetros V1 y V2?. La respuesta dada por los estudiantes fue casi inmediata: todos manifestaron que el voltaje medido por los dos voltímetros seria el mismo. Al preguntar el por qué, estos argumentaban el hecho de que se encontraban en paralelo.

Figura 4-16: Dos voltímetros en paralelo que marcan diferente (Muñoz Castaño, 2017).



Fue una bonita experiencia para los estudiantes ver que su respuesta en este caso particular no era cierta, puesto que los voltímetros marcaron diferente. Muchos reparaban el montaje como si se tratara de una “trampa o engaño”. Al final se explicó el montaje y el porqué de la medida los voltímetros.

En la Figura 4-17 se aprecian a los estudiantes observando por grupos el funcionamiento del circuito anterior y la lectura que arrojan los voltímetros.

Figura 4-17: Práctica de dos voltímetros que marcan diferente (Díaz Marulanda, 2017).

4.2.8 Octava sesión: circuitos RL y RLC

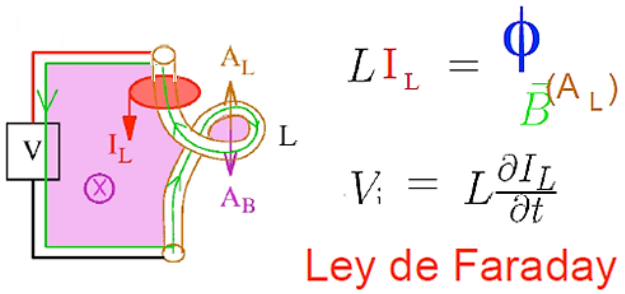
La Tabla 4-8 presenta la secuencia para la unidad 8.

Tabla 4-8: Propuesta unidad 8: circuitos RL y RLC

Tiempo estimado	Una de sesión 120 minutos.
¿Ser capaz de hacer qué cosas?	Poder plantear las ecuaciones de malla y de nodo de circuitos RLC
Saber qué cosas	• Que es una bobina • Que es Inductancia
Que cambia en su visión del mundo	Que el voltaje de una bobina no está a lo largo del alambre sino a través de la bolsa del circuito cuya boca es la malla.
Ayudas didácticas	Videos, montajes con bobinas.
Discusión	¿Qué es lo que mide el multímetro sobre una bobina?
Secuencia de actividades	▪ Explicar qué es un solenoide. ▪ Mostrar, usando la Ley de Faraday, qué mide un voltímetro en paralelo con una bobina. ▪ Mostrar un circuito RL en tablero, explicar cómo funciona y explicar cómo plantear sus ecuaciones a partir de la Ley de Conservación de la Carga (que reemplaza a la ley de Kirchhoff de corrientes) y la Ley de Faraday (que reemplaza le Ley de Kirchhoff de corrientes). Explicar la convención del signo en el flujo para las bobinas. ▪ Aplicar lo anterior con un circuito RLC, pero que los estudiantes escriban las ecuaciones a partir de dibujar las mallas y nodos.
Evaluación	Realizar un quiz donde los estudiantes encuentren las ecuaciones de un circuito RLC utilizando mallas y nodos.
Actividad Complementaria	Los estudiantes deberán realizar varios ejercicios de circuitos RL y RLC.

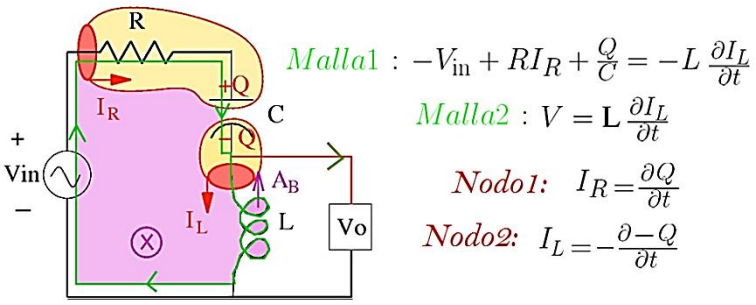
En la enseñanza tradicional de circuitos se aborda el tema de circuitos RL y RLC sin antes explicar cómo es el voltaje en una bobina, siendo este último interrogante el que causa más curiosidad en el ingeniero al ver simplemente un alambre entorchado. La pregunta principal es: ¿cómo es el voltaje en una bobina? En la Figura 4-18 se muestra una de las diapositivas mostradas para explicar el voltaje en una bobina.

Figura 4-18: Voltaje en una bobina(Muñoz Castaño, 2017)



Luego, como ejemplos de aplicación se explican primero un circuito RL y posteriormente uno RLC. En ambos casos es primordial sacar las ecuaciones a partir de las técnicas de mallas y nodos, pero teniendo presente de dónde proviene el voltaje de los elementos de la malla y el flujo de campo magnético a través de la superficie (bolsa) limitado por la malla (la boca de la bolsa). En la Figura 4-19 se muestra uno de los montajes analizados y sus ecuaciones planteadas a través mallas y nodos.

Figura 4-19: Solución de un circuito RLC (Muñoz Castaño, 2017).



Como actividad final los estudiantes realizan varios ejercicios de circuitos RL y RLC.

5. Análisis de resultados

Hoy día se considera que más allá de la especificidad teórica que caracteriza cada disciplina, línea de pensamiento y enfoque, la evaluación de conocimiento es un eje transversal constitutivo de la enseñanza y el aprendizaje (Cols, 2009). Tal medición en el contexto educativo del rendimiento académico y conceptual de los estudiantes universitarios se considerada empírica y cuantitativa. Por consiguiente la intención principal de estas evaluaciones radica en el control de los sistemas educativos y la evaluación a partir de criterios (Long, Wendt, & Dunne, 2011).

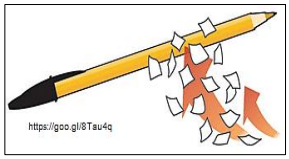
Figura 5-1: Implementación pre-test y post-test (Díaz Marulanda, 2017).

En nuestro caso la evaluación diagnóstica se realizó diseñando y aplicando una prueba de 21 preguntas de selección múltiple con única respuesta para ser solucionadas en un intervalo de 60 minutos. La prueba evalúa los conocimientos y competencias de las ocho sesiones de la secuencia didáctica. Cada ítem busca evaluar un contenido específico y todos son redactados con un vocabulario sencillo. Su redacción minimiza la cantidad de lectura, y no se emplean términos ni figuras desconocidas por los estudiantes (Cupani et al., 2016). La misma prueba es utilizada como pos-test para determinar, mediante herramientas estadísticas de análisis, si hubo una diferencia significativa en el desempeño de los estudiantes producto de la aplicación de la secuencia didáctica. En la

Figura 5-1 se aprecia su implementación. La prueba se dividió en dos partes, que se aplicaron por separado: una primera para las sesiones 1 a 4 y otra para las sesiones 5 a 8. Cada una se aplicó al iniciar y terminar el conjunto de cuatro sesiones correspondiente. A continuación se describe la prueba en su totalidad.

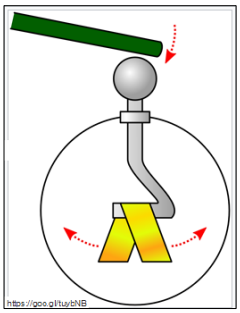
5.1 Prueba de desempeño

5.1.1 Preguntas unidad 1: Cargas



1. Un bolígrafo de plástico se carga frotándolo con un paño de seda, y queda cargado positivamente. Luego se acerca a unos papelitos que se encuentran sobre una mesa de madera. Los papelitos suben hacia el bolígrafo porque

a) los papelitos quedan cargados negativamente, por inducción.
b) los papelitos tienen más electrones que protones.
c) Los electrones del papel se ven atraídos al bolígrafo, y, por estar más cerca, la fuerza de atracción que se les hace es mayor que la de repulsión sobre los núcleos de los átomos del papel.
d) Los electrones del papel se ven repelidos por el bolígrafo, y, por estar más cerca, la fuerza de atracción que se les hace es menor que la de repulsión sobre los núcleos de los átomos del papel.



2. Un objeto cargado positivamente se acerca a un electroscopio. Desde antes de tocarlo, las laminitas del electroscopio se separan porque

a) el objeto está cargado con el mismo tipo de carga que el electroscopio.
b) el objeto y el electroscopio tienen diferentes tipos de carga.
c) los electrones del electroscopio son atraídos por el bolígrafo hacia la bola de metal, lo que deja con más protones que electrones las laminitas, que por eso quedan cargadas positivamente, y se repelen.
d) los iones de carga positiva del electroscopio son atraídos hacia la bola de mental, lo que deja con más electrones que protones las laminitas, que por eso quedan cargadas negativamente, y se repelen.

3. Un plato metálico se carga negativamente. Los electrones de más que recibe

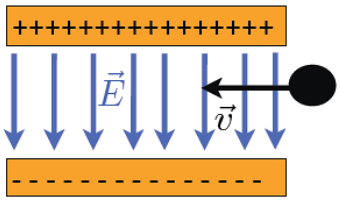
a) se distribuyen uniformemente por todo el plato.
b) se concentran en el centro del plato.
c) se concentran en el borde del plato.
d) se colocan la mitad en el centro y la otra mitad en los bordes del plato.

5.1.2 Preguntas unidad 2: Fuerzas y Campos

4. Un electrón entra a una zona donde el campo magnético es uniforme con una velocidad perpendicular al campo magnético, como muestra la figura. En estas condiciones, el electrón se mueve

a) en línea recta, acelerando.
b) en línea recta, frenando.
c) en círculos.
d) en una curva parabólica.

5. Un electrón entra a una zona entre dos placas cargadas donde el campo eléctrico es uniforme con una velocidad perpendicular al campo, como muestra la figura. En estas condiciones, el electrón se mueve



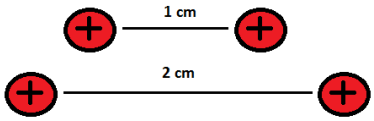
a) en línea recta, acelerando.
b) en línea recta, frenando.
c) en círculos.
d) en una curva parabólica.

6. ¿Cómo son las líneas de campo eléctrico y magnético?

a) Tanto las líneas de campo eléctrico como las del campo magnético son cerradas.
b) Las líneas de campo eléctrico salen de las cargas positivas y van a las negativas, mientras que las de campo magnético son cerradas.
c) Las líneas de campo magnético salen de las cargas positivas y van a las negativas, mientras que las de campo eléctrico son cerradas.
d) Tanto las líneas de campo eléctrico como las del campo magnético salen de las cargas positivas y van a las negativas.

7. Dos cargas positivas de igual magnitud se encuentran separadas por una distancia de 1cm, como la muestra la figura. Si ahora las cargas se separan a 2 cm, la fuerza entre ellas

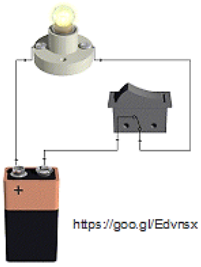
a) Aumenta al doble.
b) Se reduce a la mitad.
c) Se multiplica por cuatro.
d) Se reduce a la cuarta parte.



5.1.3 Preguntas unidad 3: ¿Qué es corriente eléctrica?

8. De acuerdo con la figura, ¿por qué el bombillo se enciende inmediatamente al accionar el interruptor?

a) Porque los electrones que salen de la pila viajan por los alambres casi a la velocidad de la luz, y llegan al bombillo.
b) Porque, al cerrar el interruptor, los electrones que salen de la pila chocan con los siguientes, y estos con los siguientes, y una onda de choques llega hasta el bombillo y empuja a los electrones que hay allí.



c) Porque los electrones que salen de la pila, al moverse, generan una onda de radio que llega a la velocidad de la luz hasta el bombillo y empuja a los electrones que hay allí.

9. Cuando hay corriente eléctrica en un alambre, los electrones se mueven dentro del alambre porque

a) hay un campo eléctrico pequeño dentro del alambre y en dirección del alambre, que los empuja.
b) hay un campo eléctrico pequeño dentro del alambre y en dirección perpendicular al alambre, que los empuja.
c) hay un campo magnético pequeño dentro del alambre y en dirección del alambre, que los empuja.
d) hay un campo magnético pequeño dentro del alambre y en dirección perpendicular al alambre, que los empuja.

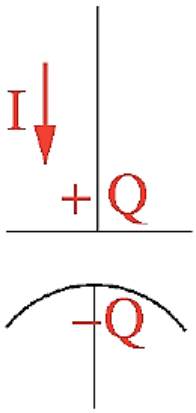
10. Cuando en un alambre de cobre la densidad de corriente supera los 10 amperios por mm2, el alambre se derrite. De acuerdo con la siguiente tabla, si quiero conectar una máquina que consume 20 amperios, necesito un cable de calibre menor o igual a

a) 6
b) 10
c) 12
d) 14

Calibre A.W.G	Diámetro mm	Sección mm^2
0	8.25	53.48
2	6.54	33.62
4	5.18	21.15
6	4.11	13.29
8	3.26	8.32
10	2.59	5.29
12	2.05	3.29
14	1.62	2.08
16	1.29	1.29
18	1.02	0.85

5.1.4 Preguntas unidad 4: leyes de la corriente eléctrica y aplicaciones

11. Un condensador se carga con una corriente $I = 3$ Amperios, como muestra la figura. En estas condiciones, es cierto que



a) la corriente que entra por el alambre es igual a la corriente que atraviesa la superficie entre las dos placas.
b) la corriente que entra por el alambre atraviesa el condensador y sale por el otro alambre.
c) la carga +Q va aumentando a un ritmo de 3 Coulombs por segundo, pero la carga –Q permanece constante.
d) la carga +Q va aumentando a un ritmo de 3 Coulombs por segundo, y la carga –Q va creciendo en -3 Coulombs por segundo.

12. Que la carga eléctrica se conserva quiere decir que, si tengo un volumen cerrado,

a) la corriente que entra al volumen es igual a la corriente que sale.
b) no puede entrar carga al volumen cerrado.

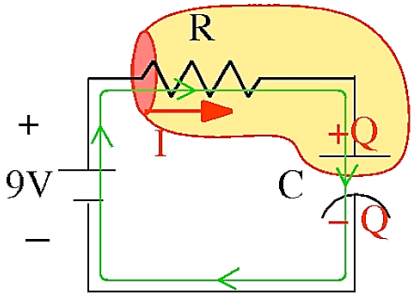
c) el ritmo al que crece la cantidad de carga encerrada en el volumen es igual a la corriente que entra menos la corriente que sale.
d) la cantidad de carga encerrada en el volumen permanece constante.

5.1.5 Preguntas Unidad 5: ¿Qué es voltaje? (Parte 1)

13. Considere un alambre de cobre, entorchado como muestra la figura. Por el alambre puede circular corriente. Piense en la curva que va por dentro del alambre. El voltaje a lo largo de esa curva es

a) siempre cero, porque el campo eléctrico dentro del alambre es muy pequeño.
b) cero, porque el alambre conecta dos puntos al mismo potencial.
c) diferente de cero cuando la corriente que circula es AC.
d) diferente de cero, cuando la resistencia del alambre es muy grande.

14. Considere la superficie cerrada que se muestra en el circuito RC de la figura. En esta superficie se cumple que



a) las corrientes que entran son iguales a las corrientes que salen.
b) la rapidez con que aumenta la carga encerrada es igual a la corriente de la resistencia.
c) la carga encerrada permanece constante.
d) es válida la ley de Kirchhoff de corrientes.

15. Las ecuaciones de malla y de nodo que rigen el comportamiento del circuito anterior son

a) $-9V + IR + \frac{Q}{C} = 0 \quad , \quad I = -\frac{dQ}{dt}$
b) $9V + IR + \frac{Q}{C} = 0 \quad , \quad I = \frac{dQ}{dt}$
c) $9V + IR = \frac{Q}{C} \quad , \quad I - \frac{dQ}{dt} = 0$
d) $-9V + IR + \frac{Q}{C} = 0 \quad , \quad I = \frac{dQ}{dt}$

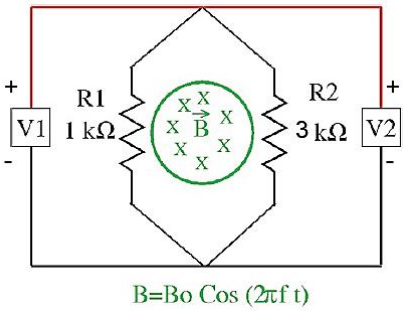
5.1.6 Preguntas unidad 6: ¿Qué es voltaje? (Parte 2)

16. En general, incluso cuando hay campos magnéticos variables en el tiempo, voltaje es

a) la diferencia de potencial eléctrico que se encuentra entre dos puntos de un circuito eléctrico.
b) el producto del flujo de carga que atraviesa un área por unidad de tiempo por la resistividad del material.
c) el trabajo por unidad de carga del campo electromagnético sobre una carga que se mueve a lo largo de una curva.
d) la diferencia de potencial entre un punto en común negativo o tierra y otro de mayor potencial positivo.

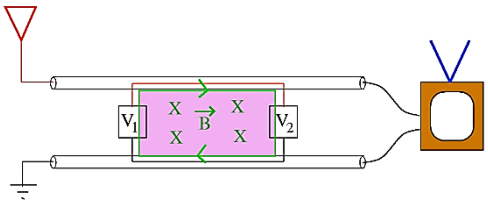
5.1.7 Preguntas unidad 7: La ley de Faraday

17. Dos voltímetros AC están conectados a dos resistencias, como se muestra en la figura. Una bobina muy larga, conectada a la red eléctrica, se inserta por el circuito, como se muestra. El voltaje que muestra los voltímetros V1 y V2 es:



a) V1=V2=0
b) V1=3 V2
c) V2=3 V1
d) V1=V2≠0

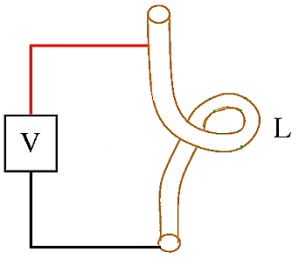
18. Una línea de trasmisión conecta la antena con un televisor, y recibe la señal del canal 7, que trabaja a 175MHz. En dos puntos diferentes se colocan dos osciloscopios V1 y V2, como muestra la figura. Los dos osciloscopios



a) muestran la misma señal, porque sus puntas están conectadas negro con negro y rojo con rojo
b) muestran señales diferentes, porque el punto más cercano a la antena del alambre superior, donde está V1, está a una diferencia de potencial mayor con respecto a tierra que el punto más alejado, donde está V2.
c) Muestran la misma señal, porque dos puntos conectados por un alambre están al mismo potencial.
d) Muestran señales diferentes, porque el campo magnético que atraviesa la superficie entre ellos varía con el tiempo.

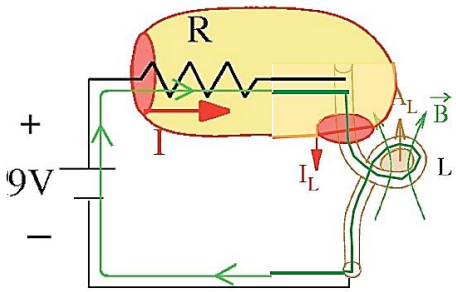
5.1.8 Preguntas unidad 8: Solución de circuitos RL y RLC

19. Un voltímetro se conecta en paralelo con una bobina a través de la cual pasa una corriente que varía en el tiempo. El voltímetro



a) marca cero, porque el voltaje a lo largo de una curva que va por dentro del alambre es cero.
b) marca cero, porque el alambre cortocircuita las puntas del voltímetro.
c) marca diferente de cero, porque el campo magnético que atraviesa las espiras de la bobina cambia con el tiempo.
d) marca diferente de cero, porque cuando un alambre se entorcha, la diferencia de potencial entre sus extremos deja de ser cero.

20. Considere el circuito de fuente de voltaje, resistencia y bobina que se muestra en la figura. Las ecuaciones de malla y de nodo que rigen el comportamiento del circuito son



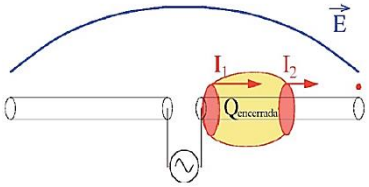
a) $9V + IR + \frac{I}{L} = 0 \quad , \quad I + I_L = 0$
b) $-9V + IR = 0 \quad , \quad I = \frac{dI_L}{dt}$

c) $-9V + IR = -L\frac{dI_L}{dt}$, $I - I_L = 0$

d) $9V + IR = 0$, $I = L\frac{dI_L}{dt}$

21. Considere una antena $\lambda/2$, como la que muestra la figura. Las corrientes I_1 e I_2 son

a) Iguales, porque son a lo largo del mismo alambre.
b) diferentes, porque el campo eléctrico que las arrastra es mayor cerca al centro que cerca al borde de la antena.
c) iguales, porque no se acumula carga en el alambre entre ellas
d) diferentes, porque están a diferente potencial.



5.2 Análisis de los resultados de la prueba

La prueba se aplicó a los 17 estudiantes del curso de *Circuitos I* (periodo 2017-I) de la Universidad Popular del Cesar, en un diseño pre-experimental con pre-test y post-test.

La Tabla 5-1 y

Tabla 5-2 muestran las respuestas de los estudiantes en ambas aplicaciones de la prueba.

5.2.1 Tablas de resultados

La Tabla 5-1 y Tabla 5-2 listan los resultados obtenidos en cada ítem por cada estudiante, tanto para el pre-test como para el post-test.

Tabla 5-1: Resultados Pre-test (Díaz Marulanda, 2017)

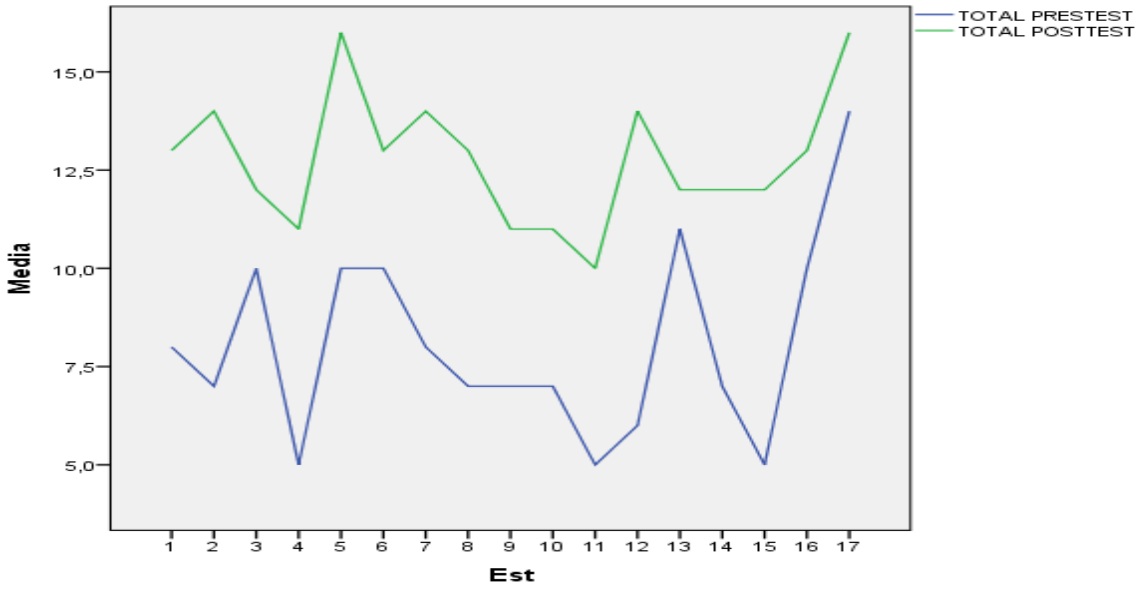
PRETEST																						
ESTUDIANTE	PREGUNTA 1	PR	PR	PR	PR	PR	PR	PR	PR	PR	PR	PR	UN	UN	UN	UN	UN	UN	UN	UN	UN	TOTAL PRESTEST
1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	8
2	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	7
3	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	10
4	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	5
5	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	10
6	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	10
7	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	8
8	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	7
9	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	7
10	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	7
11	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	5
12	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	6
13	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	11
14	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	7
15	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	5
16	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	10
17	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	14

Tabla 5-2: Resultados Post-test (Díaz Marulanda, 2017).

POST-TEST																						
ESTUDIANTE	PREGUNTA 1	PR	PR	PR	PR	PR	PR	PR	PR	PR	PR	PR	UN	UN	UN	UN	UN	UN	UN	UN	UN	TOTAL POSTTEST
1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	**13**
2	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	**14**
3	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	**12**
4	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	**11**
5	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	**16**
6	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	**13**
7	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	**14**
8	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	**13**
9	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	**11**
10	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	**11**
11	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	**10**
12	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	**14**
13	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	**12**
14	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	**12**
15	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	**12**
16	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	**13**
17	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	**16**

La Figura 5-2 muestra cómo cambia el desempeño en la prueba de cada estudiante. Se observa que los resultados del post-test corresponden mayoritariamente a un corrimiento hacia arriba de los puntajes del pre-test, lo que sugiere que sí hubo un aumento homogéneo del desempeño.

Figura 5-2: Comportamiento de la calificación promedio por estudiante (Díaz Marulanda, 2017)



5.2.2 Estadísticos descriptivos

Inicialmente, se calcularon estadísticos descriptivos como mínimos, máximos, media y desviación estándar, tanto para el pre-test como para el post-test (ver Tabla 5-3). Los valores indican un aumento considerable en el desempeño, entre 2 y 5 unidades en los primeros tres valores, además de una reducción aproximada de la dispersión de las tres medias partes de su valor inicial, a tal punto que de las 17 calificaciones del post-test se encuentran entre los 10 y 16 puntos de 21 posibles. Para un mínimo de respuestas correctas se obtuvo un aumento de 5 a 10, para un máximo de 14 a 16 y la media de 8,059 a 12,765, resaltando que ningún estudiante respondió correctamente toda la prueba.

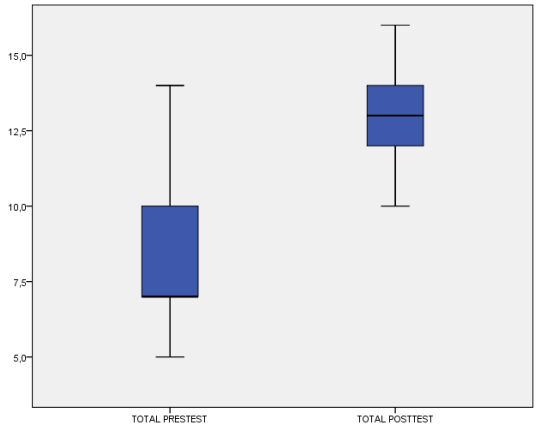
Tabla 5-3: Estadística descriptiva de los resultados del pre-test y post-test

Estadísticos descriptivos

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
TOTAL PRESTEST	17	5,0	14,0	8,059	2,4615
TOTAL POSTTEST	17	10,0	16,0	12,765	1,6781
N válido (por lista)	17				

Las diferencias entre los puntajes del pre-test y el post-test se aprecian mejor en el diagrama de caja y bigotes de la Figura 5-3, que muestra que la totalidad de los puntajes del post-test se sitúan por encima del valor del tercer cuartil del pre-test. Además, se aprecia una disminución de la dispersión, indicando que el desempeño del post-test es más homogéneo.

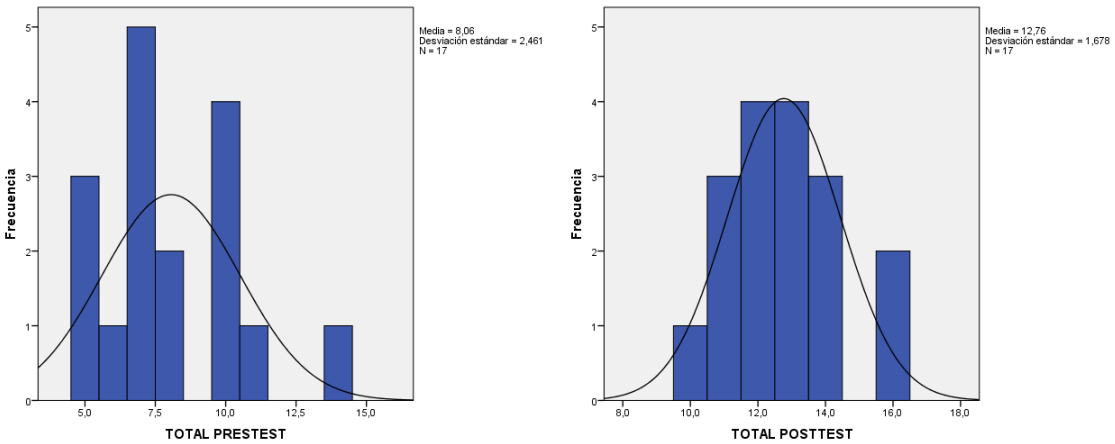
Figura 5-3: Diagrama de caja y bigotes, Pre-test Vs Post-test



5.2.3 Pruebas de normalidad

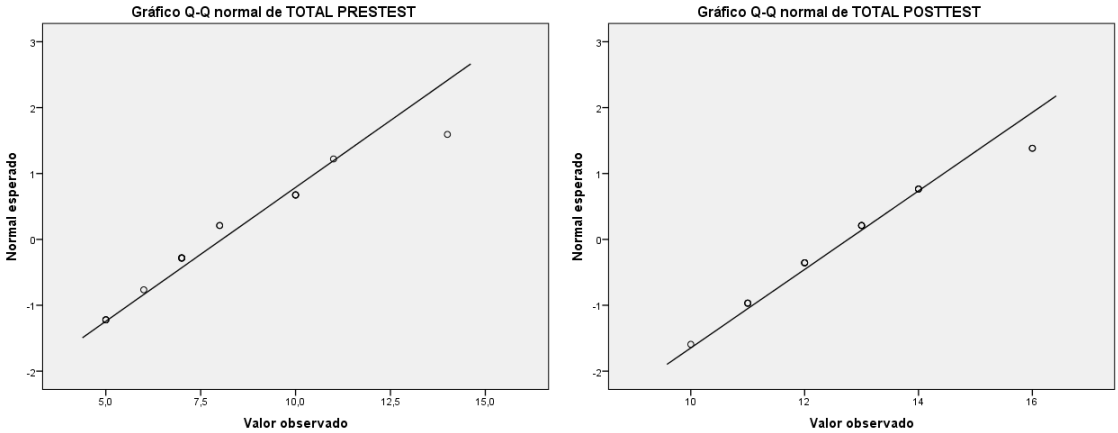
Con el fin de determinar si se utilizan pruebas paramétricas o no paramétricas, se realizaron pruebas de normalidad basadas en análisis de los histogramas del pre-test y pos-test. (Ver Figura 5-4).

Figura 5-4: Histograma de los resultados pre-test y post-test



Los histogramas de ambas aplicaciones de la prueba parecen ser compatibles con una distribución normal. En la Figura 5-5 que se muestra a continuación se puede observar la probabilidad acumulada para los dos histogramas (puntos) comparada con la que se esperaría si la distribución fuese gaussiana (líneas rectas). El ajuste es bastante bueno, sirviendo como soporte que sí se distribuyen normalmente.

Figura 5-5: Gráfico Q-Q normal pre-test y post-test



Para precisar de mejor manera si las distribuciones son normales o no se suele usar el test de Kolmogorov-Smirnov – si el tamaño de la muestra es mayor o igual a 50 – o el test de Shapiro-Wilk – si es menor de 50. Como el tamaño muestral en este trabajo es de 17, se emplea el test de Shapiro Wilk. Los resultados se pueden apreciar en la Tabla 5-4. Como el test arroja un nivel de significancia superior 0.05 para las dos aplicaciones, tanto los datos del pre-test como los del post-test se pueden considerar normales.

Tabla 5-4: Pruebas de normalidad por Shapiro Wilk

Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov[a]			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	Gl	Sig.
TOTAL PRESTEST	,196	17	,082	,911	17	,104
TOTAL POSTTEST	,150	17	,200*	,938	17	,291

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

5.2.4 Comparación de medias

A continuación se realizó una comparación estadística de muestras relacionadas con el fin de determinar si existe alguna diferencia significativa entre el pre-test y el pos-test, o si por el contrario que sus diferencias se pueden explicar sólo por el azar.

Como los puntajes en ambas aplicaciones del test se distribuyen de manera normal, podemos efectuar una prueba paramétrica tipo t-student, que nos ayudaría a detectar diferencias más sutiles. Estos resultados se muestran en la Tabla 5-5. Se observa que el nivel de significancia (es decir, la probabilidad de que la diferencia entre las medias de las dos aplicaciones se deba simplemente al azar) es menor al uno por mil, lo que conlleva a aceptar aceptación de una certeza del 99.99% de que existe una diferencia significativa entre los valores medios de los dos conjuntos de datos. Indicando que si hubo un proceso de aprendizaje en los estudiantes.

Tabla 5-5: Resultados de la estadística relacionada por t-student

Prueba de muestras emparejadas

		Diferencias emparejadas					T	gl	Sig. (bilateral)
		Media	Desviación estándar	Media de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	TOTAL PRETEST - TOTAL POSTTEST	-4,7059	1,9926	,4833	-5,7304	-3,6814	-9,737	16	,000

5.2.5 Análisis de resultados con énfasis en voltaje

Visto el análisis del resultado total obtenido en el pretest Vs posttest se mostrará la evaluación de siete preguntas relacionadas al concepto de voltaje. En la Tabla 5-6 se muestran los estadísticos descriptivos obtenidos.

Tabla 5-6: Estadística descriptiva pre-test y post-test con énfasis en voltaje

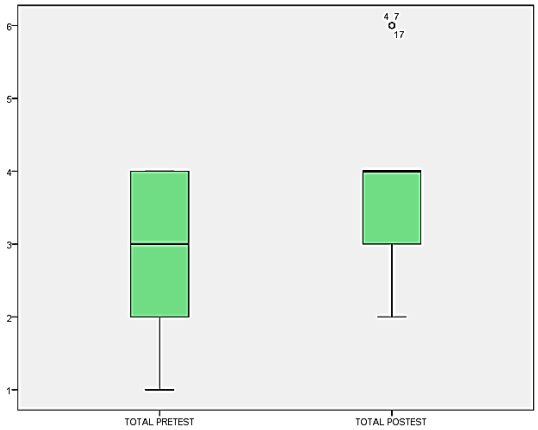
Estadísticos descriptivos

	N	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	Percentiles		
						Percentil 25	Percentil 50 (Mediana)	75º
TOTAL PRETEST	17	2,941	,9663	1,0	4,0	2,000	3,000	4,000
TOTAL POSTEST	17	4,00	1,118	2	6	3,00	4,00	4,00

Los datos muestran un aumento significativo en el desempeño, entre 1 y 2 unidades en los valores mínimo y máximo, porcentualmente entre un 14,28% y 28,57% de aumento en el post-test. De las 17 calificaciones del post-test se encuentran entre los 2 y 6 puntos de 7 posibles. Para un mínimo de respuestas correctas se obtuvo un aumento de 1 a 2, para un máximo de 4 a 6 y la media de 2,941 a 4,00 resaltando que ningún estudiante respondió correctamente toda la prueba.

Las diferencias entre los resultados del pre-test y el post-test se aprecian mejor en el diagrama de caja y bigotes de la Figura 5-6, muestra que la mediana del post-test se sitúa igual al valor del tercer cuartil del pre-test. Además, se aprecia una disminución del rango intercuartílico, indicando que el desempeño del post-test es más homogéneo. En el posttest se observan tres notas atípicas obtenidas sobre un valor de 6 de 7 posibles.

Figura 5-6: Diagrama de caja y bigotes, Pre-test Vs Post-test, Voltaje.



Para conocer mejor si las distribuciones son normales o no, se utilizó el test de Shapiro-Wilk teniendo en cuenta que el tamaño de la muestra analizada es menor a 50. Los resultados se pueden apreciar en la Tabla 5-7.

Tabla 5-7: Pruebas de normalidad

Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov[a]			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
TOTAL PRETEST	,216	17	,033	,856	17	,013
TOTAL POSTEST	,324	17	,000	,833	17	,006

a. Corrección de significación de Lilliefors

El test arroja un nivel de significancia inferior a 0.05 en ambas aplicaciones, por lo tanto los datos del pre-test como los del post-test no se pueden considerar normales. Obligando hacer una prueba de los rangos con signo de Wilcoxon. Ver Tabla 5-8.

Tabla 5-8: Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon

Estadísticos de prueba[a]

	TOTAL POSTEST - TOTAL PRETEST
Z	-2,672[b]
Sig. asintótica (bilateral)	,008

a. Prueba de Wilcoxon de los rangos con signo

b. Se basa en rangos negativos.

El análisis da una significancia por debajo del 5% dando a entender que la diferencia y el desempeño no fue por puro azar, todo lo contrario, demuestra que si aprendieron y la diferencia significativa fue notoria.

5.3 Descripción cualitativa del efecto de la secuencia didáctica

La implementación de la secuencia didáctica tuvo muchos efectos positivos. Por mencionar que la motivación y participación de los estudiantes no fue obligada a tal punto de que no se querían perder ni una clase. Al comienzo fue bueno aclararles lo que se pensaba hacer pues ellos venían con otro ritmo de trabajo y que además verían conceptos interesantes que le ayudarían a su formación como profesional. El explicarles cada secuencia en un lenguaje familiar y el demostrarles prácticas junto con la teoría o el concepto dado, ayudo a que la participación fuera más fluida y aumentó el interés, por ejemplo, si la clase pasaba de las dos horas querían quedarse sin importar que tuvieran en otra asignatura. Cuando se iba avanzando en las unidades lo que más repetían era: “ojalá me hubiesen explicado electro así” o “profe usted porque no da electro” haciendo referencia al curso de electromagnetismo. Algo interesante eran como se motivaban para crear los conceptos y varias veces entre ellos discutían sanamente las preguntas que se les proyectaban, muchos de estos perdieron el miedo de esbozar sus propias ecuaciones

y definiciones a todos sus compañeros utilizando el tablero, que si se equivocaban tenían la oportunidad de corregir sin que nadie los señalara y que veían en el profesor una ayuda. La verdad es que fue un experiencia enriquecedora y más, en los temas que se propusieron, a sabiendas que estos no son tan amigables para muchos estudiantes, porque siempre tienden hacer engorrosos al habérseles enseñado con solo formulismos, pero en fin, se puede concluir que esta metodología para enseñar a través de experiencias demostrativas es propicia para contrastar los conceptos errados de los estudiantes y de gran ayuda y motivación para que estos los corrijan.

6. Conclusiones y recomendaciones

Este trabajo presenta el diseño y la implementación de una secuencia didáctica para la enseñanza de los conceptos de voltaje y corriente y para la resolución de circuitos a través de las leyes de Maxwell dirigida a los estudiantes del curso de *Circuitos I* (periodo 2017-I) de la Universidad Popular del Cesar. El objetivo principal consiste en reforzar y aclarar conceptos básicos en la formación de un ingeniero electrónico, buscando cambiar su visión del funcionamiento de los circuitos eléctricos y sentar bases sólidas para temas siguientes del mismo curso y para asignaturas futuras. La propuesta se desarrolla con utilizando la orientación de aprendizaje activo, donde el estudiante propone y construye sus propias ideas y conceptos de los fenómenos y prácticas realizadas en cada sesión.

La secuencia didáctica propuesta consta de ocho sesiones de 120 minutos. Como la intensidad horaria del curso es de tres sesiones semanales de 2 horas, la secuencia tuvo una duración aproximada de tres semanas. Las actividades llevadas a cabo incluyen material audiovisual, prácticas o experimentos cualitativos (como los campos eléctricos visualizados con semillas y una raqueta contra insectos, experimentos de carga electrostática, el electroscopio o el montaje con una bobina de Thomson de dos voltímetros en paralelo que marcan diferente), simulaciones interactivas para ciencias y matemáticas (PHET-Universidad de Colorado), software especializado en simulación de circuitos electrónicos Proteus-7 (cargas y campos, carga de un condensador, inducción) y clases magistrales.

La secuencia se implementó con los 17 estudiantes del curso Circuitos I, semestre 2017-I. Para su evaluación se desarrolló una prueba de 21 preguntas de selección múltiple que se aplicó en un diseño pre-experimental con pre-test y post-test. El análisis estadístico de los resultados muestra un incremento estadísticamente significativo de los estudiantes

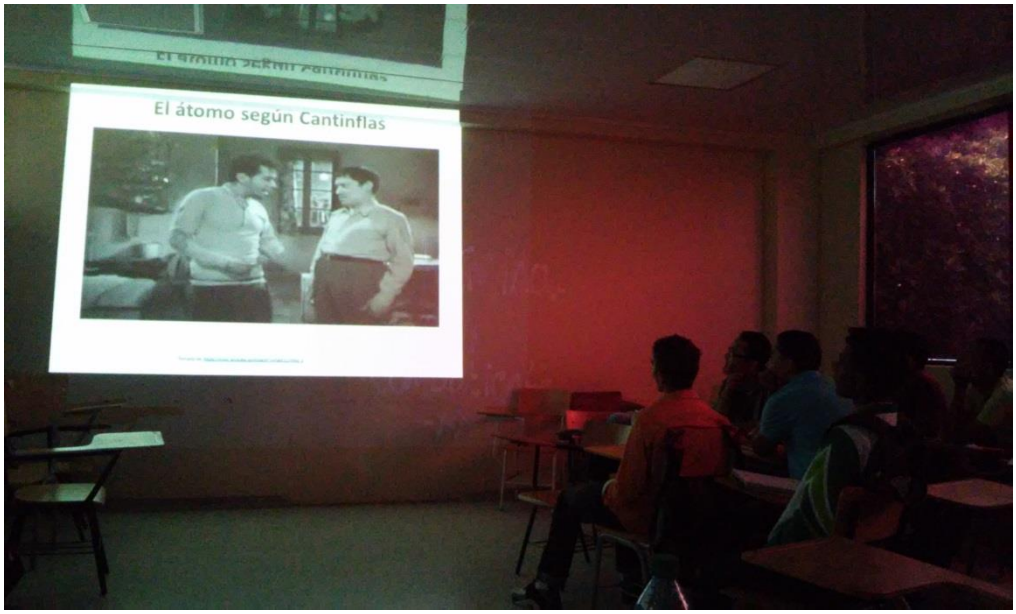
(con una certeza del 99.99%), al punto de que la totalidad de los puntajes del post-test se sitúan por encima del tercer cuartil de los puntajes del pre-test. En resumen, de acuerdo a lo arrojado por todos los análisis estadísticos realizados se confirma que la secuencia didáctica mejoró efectivamente el desempeño de los estudiantes.

¿Por qué es difícil entender conceptos o temas de electromagnetismo? Según lo visto en este trabajo, una causa podría ser el no utilizar ejemplos tangibles para el estudiante, pues lo que no se ve es más complicado de analizar. En efecto, pareciera que no es tan fácil generar modelos mentales en el estudiante con sólo mostrar dibujos en el tablero o en diapositivas de algo que ellos hasta el momento es desconocido para ellos, sino que se requiere de modelos y experimentos demostrativos que ilustren cómo funciona el fenómeno de manera cualitativa, y es allí donde el profesor debe ser creativo y ayudar. En efecto, la experiencia de las semillas en aceite y una raqueta mata-mosquitos hace aparecer las líneas de campo eléctrico más reales que cualquier dibujo en tablero, y el montaje con una bobina Thomson y dos resistencias en el que dos voltímetros en paralelo marcan diferente es más efectivo para derribar la idea de que voltaje es diferencia de potencial que cualquier análisis matemático en clase. Explicar con formulaciones matemáticas o procedimientos mecánicos para la solución de circuitos tampoco ayuda, sino que es más fácil derivar las expresiones matemáticas cuando ya se entiende a qué corresponden los términos que contienen. Retar al estudiante para que el mismo construya los conceptos no es fácil, pero se pude lograr cuando se le pregunta por sus conceptos y deducciones en el instante mismo en el que se encuentra realizando experimentos que, como los anteriores, evidencian la falsedad de una creencia fuertemente arraigada.

A partir de este trabajo se podrán desarrollar temas en circuitos II como fasores o en circuitos III conceptos de circuitos acoplados magnéticamente, además de ser un gran aporte principalmente a los estudiantes del programa de ingeniería electrónica de la Universidad Popular del Cesar al contar con una secuencia didáctica bien estructurada para la enseñanza de los conceptos de voltaje, corriente y aplicaciones de las leyes de Maxwell en la resolución de circuitos. También sirve como base para renovar y mejorar el contenido programático de la asignatura circuitos I al demostrarse una mayor comprensión de los conceptos en los estudiantes que participaron en el desarrollo de la secuencia.

A. Anexo: Galería de imágenes

Algunas imágenes de la secuencia implementada.


El átomo según Cantinflas

Cómo es un conductor

e la corriente eléctrica y
aplicaciones

¿Qué es Voltaje?
Parte 1

Bibliografía

Acevedo Díaz, J. A. (2004). El papel de las analogías en la creatividad de los científicos: La teoría del campo electromagnético de Maxwell como caso paradigmático de la historia de las ciencias.

Alexander, C. K., & Sadiku, M. N. O. (2013). *Fundamentos de circuitos eléctricos (5a. ed.):* . Retrieved from https://books.google.com.co/books?id=g1pEDAAAQBAJ

Almudí, J. M. (2002). *"Campos magnéticos producidos por cargas móviles: dificultades de aprendizaje y propuesta constructivista de enseñanza en primer curso universitario de física general*. Universidad del País Vasco.

Arca, A. (2006). Principio del galvanómetro astático.

Becquerel, E. (1865). *Resúmen de la historia de la electricidad y del magnetismo, y de las aplicaciones de estas ciencias á la quimica, á las ciencias naturales y á las artes*. Imprenta Nacional. Retrieved from https://books.google.com.co/books?id=xhER0eQ9zYgC

Beltrán, M. B. U., & Fernández, L. H. C. (2003). Estudio histórico-epistemológico del modelo atómico de Rutherford. *Tecné, Episteme Y Didaxis: Revista de La Facultad de Ciencia Y Tecnología*, (14), 88–98.

Bohigas, X., & Periago, M. C. (2010). Modelos mentales alternativos de los alumnos de segundo curso de Ingeniería sobre la Ley de Coulomb y el Campo Eléctrico. *Revista Electrónica de Investigación Educativa*, *12*(1), 1–15.

Cano Vásquez, J. A., Gómez Toro, J. D., & Cely Rueda, I. L. (2009). La enseñanza del concepto de corriente eléctrica desde un enfoque historico epistemológico.

Cohen, R., Eylon, B., & Ganiel, U. (1983). Potential difference and current in simple electric circuits: A study of students' concepts. *American Journal of Physics*, *51*(5), 407–412.

Cols, E. B. (2009). Introducción: La evaluación de los aprendizajes como objeto de estudio y campo de prácticas. *Archivos de Ciencias de La Educación*, *3*(3), 11–14.

CosmoLearning. (2008). Rutherford's-Experiment. Retrieved November 19, 2017, from https://cosmolearning.org/videos/rutherfords-experiment/

Cuéllar Fernández, L., Gallego Badillo, R., & Pérez Miranda, R. (2008). El modelo atómico de E. Rutherford. *Enseñanza de Las Ciencias*, *26*(1), 43–52.

Cupani, M., Ghio, F. B., Leal, M. F., Giraudo, G. M., Castro Zamparella, T., Piumatti, G., … Farías, A. N. (2016). Desarrollo de un banco de ítems para medir conocimiento en estudiantes universitarios. *Revista de Psicología (Santiago)*, *25*(2), 1–18.

Delgado, M. M., & Cantinflas. (1946). *Teoria del Atomo según Cantinflas*. *Youtube*. México. Retrieved from https://www.youtube.com/watch?v=FedCC2mWe_o

Díaz Marulanda, L. A. (2017). Varias. valledupar.

Fernández, M., Moriel, A., & Recio, J. (2017). Materia y Electricidad. Retrieved November 19, 2017, from http://www.quimicaweb.net/grupo_trabajo_fyq3/tema7/index7.htm

Fowler, R. J. (1992). *Electricidad: principios y aplicaciones*. Reverté. Retrieved from https://books.google.com.co/books?id=LdzhG3XZd2IC

Furió, C., & Guisasola, J. (1999). Concepciones alternativas y dificultades de aprendizaje en Electrostática. *Enseñanza de Las Ciencias*, *17*(3), 441–452.

Furió, C., Guisasola, J., Almudí, J. M., & Ceberio, M. (2003). Learning the electric field concept as oriented research activity. *Science Education*, *87*(5), 640–662.

Geek3. (2010). Field of a positive and a negative point charge. Retrieved from https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Geek3/VectorFieldPlot

Geiger, H., & Marsden, E. (1909). On a diffuse reflection of the α-particles. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, *82*(557), 495–500.

Gribbin, J. (2005). *Historia de la Ciencia 1543-2000.* Barcelona: Crítica.

Guadarrama, R. B., Guadarrama, V. R. B., & Rodríguez, M. E. R. (2014). *Circuitos Eléctricos: Teoría y Práctica*. Grupo Editorial Patria. Retrieved from https://books.google.com.co/books?id=vzfABgAAQBAJ

Harman, P. M. (1982). *Energy, force and matter: the conceptual development of nineteenth-century physics*. Cambridge University Press.

Ida, N. (2000). *Engineering electromagnetics* (Vol. 2). Springer.

Iona, M. (1983). Would You Believe...? The Concept of Voltage. *Physics Teacher*, *21*(6), 405–406.

Johnson, D. H. (2003). Origins of the equivalent circuit concept: the voltage-source equivalent. *Proceedings of the IEEE*, *91*(4), 636–640.

Labcenter Electronics Ltd. (2017). Simulación carga del condensador. Retrieved November 21, 2017, from https://www.youtube.com/watch?v=u7HBKp5B388

Laín Entralgo, P. (1978). *Historia de la medicina*. Barcelona (España): Salvat Editores.

Londoño Londoño, F. (2014). *Propuesta didáctica para promover el aprendizaje de los conceptos básicos de la electricidad, fundamentada en las instalaciones eléctricas domiciliarias*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Retrieved from http://www.bdigital.unal.edu.co/12919/1/2806932.2014.pdf

Long, C., Wendt, H., & Dunne, T. (2011). Applying Rasch measurement in mathematics education research: Steps towards a triangulated investigation into proficiency in the multiplicative conceptual field. *Educational Research and Evaluation*, *17*(5), 387–407.

Luján, R. (2011). Circuitos eléctricos (pila + bombilla). Retrieved November 21, 2017, from http://misjuegospuntocom.blogspot.com.co/2011/02/circuitos-electricos-pila-bombilla.html

Marimar. (2017). Montaje de Faraday para inducción magnética. Retrieved November 18, 2017, from https://espaciociencia.com/ley-de-faraday-induccion-electromagnetica/

Martín Blas, T., & Serrano Fernández, A. (2017). Electrostática. Retrieved November 19, 2017, from http://acer.forestales.upm.es/basicas/udfisica/asignaturas/fisica/electro/fuerza_electr.html

Muñoz Castaño, J. D. (2017). corriente eléctrica, corriente en un alambre y nodo. Presentaciones Prof. José Daniel Muñoz Castaño.

Nicholson, H. W. (2005). What does the voltmeter read? *American Journal of Physics*, *73*(12), 1194–1196.

Patiño Santa, L. F. (2015). Introducción a los Metales. U. EAFIT. Medellín. Colombia. Retrieved November 21, 2017, from https://www.youtube.com/watch?v=qSnrRfgnoSk

Paul, C. (2015). Pila eléctrica de Volta. Retrieved November 18, 2017, from https://abcienciade.wordpress.com/2015/11/19/de-la-pila-de-volta-al-disco-de-arago-segunda-parte/

Penagos, W. M. M. (2015). Educación en ciencias: experiencias investigativas en el contexto de la didáctica, la historia, la filosofía y la cultura.

Peña, J. Z. (2015). Implicaciones didácticas de la inclusión de la historia y filosofía de las ciencias en la enseñanza de las ciencias: Una interpretación histórica del electromagnetismo. *Educación En Ciencias: Experiencias Investigativas En El Contexto de La Didáctica, La Historia, La Filosofía Y La Cultura*, 35–58.

Pereyra, J. (2015). ¿Podría el sistema solar ser un átomo gigante?

Periago, M. C., & Bohigas, X. (2005). Persistencia de las ideas previas sobre potencial

eléctrico, intensidad de corriente y ley de Ohm en los estudiantes de segundo curso de Ingeniería. *Revista Electrónica de Investigación Educativa*, *7*(2).

Píñar Gallardo, I., & Merlo, M. (2015). Física y Química 3.° ESO DIGITAL. Retrieved November 18, 2017, from https://www.blinklearning.com/Cursos/c392159_c15880299__Los_primeros_modelos_atomicos.php

Posada, F. (2015). Corriente y circuitos eléctricos. Retrieved November 19, 2017, from http://corrienteycircuitoselectricos2015.blogspot.com.co/

Purcell, E. M. (1988). *Electricidad y magnetismo* (Vol. 2). Reverté.

Romer, R. H. (1982). What do "'voltmeters'"measure?: Faraday's law in a multiply connected region. *American Journal of Physics*, *50*(12), 1089–1093.

Rutherford, E. (1911). LXXIX. The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, *21*(125), 669–688.

Rutherford, E. (1914). LVII. The structure of the atom. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, *27*(159), 488–498.

Salgado, N. (2014). Sencillo electroscopio electrónico. Retrieved November 19, 2017, from https://cotidianaplace.blogspot.com.co/2014/01/sencillo-electroscopio-electronico.html

Sangam, D., Jesiek, B. K., & Thompson, J. (2011). An analysis of DC circuit theory content in an engineering textbook: Presentation features, conceptual content, and use of analogies. In *Frontiers in Education Conference (FIE), 2011* (p. F1D–1). IEEE.

Santander, M. (2006). Las contribuciones de Gauss a la Física: Un panorama.

Spiridonov, V. (2010). Electrons flow. Retrieved November 19, 2017, from https://www.youtube.com/watch?v=KprFTxjQAoE

Statistics, S. of M. and, & University of St Andrews, S. (2002). Gustav Robert Kirchhoff. Retrieved April 29, 2017, from http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Kirchhoff.html

Thomson, J. J. (1904). XXIV. On the structure of the atom: an investigation of the stability and periods of oscillation of a number of corpuscles arranged at equal intervals around the circumference of a circle; with application of the results to the theory of atomic structure. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, *7*(39), 237–265.

Timmermann, D., & Kautz, C. (2014). Investigating student learning of the voltage and potential concepts in Introductory electrical engineering. In *Frontiers in Education Conference (FIE), 2014 IEEE* (pp. 1–4). IEEE.

Tomé López, C. (2017). Balanza de torsión de Coulomb. Retrieved November 18, 2017, from https://culturacientifica.com/2016/03/01/la-ley-de-la-fuerza-electrica-1-la-distancia/

Von Rhöneck, C., & Völker, B. (1983). Semantic structures describing the electric circuit before and after instruction. In *Proceedings of the International Workshop on Research in Physics Education. France*.