

eman ta zabal zazu



Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea

Doktorego Tesia

**ERRESISTENTZIAK DITUZTEN KORRONTE ZUZENeko ZIRKUITUETAN
EREMU ETA POTENTZIAL KONTZEPTUEN INGURUKO IKASLEEN
ZAILTASUN ETA ARRAZOIKETAK**

Tesigilea:
Ane Leniz Ereño

**Fisica Aplikatua I Saila
Euskal Herriko Unibertsitatea**

Zuzendariak:
Jenaro Guisasola doktorea eta Kristina Zuza doktorea

Abstract

Explaining simple DC (direct current) electrical circuits with resistors is a complex subject in physics, involving physical laws, the microscopic model of matter, and coherence to link different concepts of electricity (Arons, 1990). When students reason about electrical circuits, they have to integrate and apply basic concepts like electric charge, electric potential, electric current, and electric field. Most of the previous research on the explanatory models of students about fundamentals of DC circuits has been developed at primary and secondary education levels (Fredette and Lochhead., 1980; von Rhöneck, 1981; Millar and King, 1993; Barbas and Psillos, 1997).

There are increasing studies at the last level of high school and introductory physics college courses reporting that students use electricity in a fragmented manner, without linking electronics and electrodynamics. Students tend to consider the chapters on electrostatics and DC circuits as two separate areas (Eylon & Ganiel, 1990; Bensheguir & Closset, 1996; Guruswamy et al., 1997; Bagno & Eylon, 1997; Hazelton et al., 2013) . These studies (as well as our teaching experience) highlight that many university students enrolled in their first physics course cannot conceptualize an electrical circuit as a complete system and have great difficulty in representing a real circuit schematically: their physical interpretation changes, depending how physics questions are asked and how circuits are drawn (Engehelhardt & Beichner, 2004). Often university students learn the rules for solving simple circuit exercises, but without understanding the physical meaning of what they are doing. Even when students are able to handle resistances, potential differences, and electric currents, it is as if they are simply solving a puzzle (Smith & van Kampen, 2011). In fact, in most standard courses, electrical circuits remain a separate part of the entire electromagnetism program, much more technical than formative and, moreover, not even adequately connected to the laws governing the behaviour of the electric field. Therefore, clarifying students' understanding of electrical circuits is a very relevant topic in Physics Education Research (see, for example, Shipstone et al. 1988 or Guisasola, 2014).

In previous studies, it is well established that electric potential is one of the concepts that produces the greatest difficulties for students when interpreting electrical circuits. Furthermore, students do not know how to consistently differentiate between current and potential, and do not clearly discriminate between them. Students often do not understand that the potential difference between two points in a circuit depends on its topology (von

Rhöneck, 1981; Closset, 1983; Guisasola et al., 2010). Härtel (1985) showed that students think of a DC circuit battery as a device that supplies "constant current" rather than one that keeps the potential difference between its poles constant. Several studies of students' ideas about electrical circuits found that many of the students' explanations are often based on electricity as flux, describing macro-level phenomena. These types of explanations do not refer to the nature of the charges and the electric field acting on them (Thacker et al., 1999). The above difficulties are exacerbated when university students try to relate the study of electric properties in circuits and the concepts of field and potential defined in Maxwell's equations (Guisasola et al., 2008b).

Previous studies lead us to ask what the students' learning difficulties are specifically like and their relationship with the forms of reasoning. It will be necessary to investigate what are the forms of reasoning that allow the construction of an explanatory model suitable for students of introductory physics courses. Thus, this work addresses two fundamental aspects on which the research has been based. On the one hand, the relevance of the relationships between electrostatics and electrokinetics and, in particular, between electric current, electric field and potential difference in the teaching / learning of electricity in introductory physics courses for the first year of Science and Engineering at the University. On the other hand, the influence of the forms of reasoning that students of introductory physics courses at university level use, in the construction of explanatory models about fundamentals of electrical circuits and their relationship with the concepts of electric field and potential difference.

This study has allowed us to gain deeper insight into how students make sense of dc circuit situations in which the concepts of electric field, potential difference, and current may all appear to be pertinent. After standard instruction, a small fraction of students provided error-free answers that do not focus on the relations between charge distribution, electric field, and potential difference. The vast majority of the students propose an explanatory model in one of three ways:

- (i) A relational form of reasoning that sets up a relation between current and resistance producing the electric field and/or potential difference;
- (ii) A linear causal reasoning that regards the battery as the cause of the potential difference and, this in turn, the cause of the electric field. This same line of

reasoning is followed at the microscopic level, replacing the battery with a charge density distribution in the wire of the circuit;

(iii) A simple causal line of reasoning that states that the current or the variation in charge concentrations produces the electric field and/or the potential difference. Moreover, the vast majority of the students use explanations at macroscopic level, although they study and apply to circuits Ohm's law at the microscopic level during the teaching of the electric circuit chapter. It seems that students have more difficulty describing the model of current at the microscopic level than at the macroscopic level. This might be because most traditional teaching focuses on solving problems with quantitative relationships at the macroscopic level.

The difficulties encountered could be due, as some studies have suggested (, to a failure to bring the syllabus up to date by focusing teaching on dc circuits, not just on the relations between the magnitudes of the circuit at the macroscopic level (Kirchhof's laws) but also looking into the explanatory mechanisms of the production of current at the microscopic level. The presentation, for instance, of the potential difference in a circuit as the battery's capacity to do work, as energy per unit of charge, involves an orientation that is in part mathematical (Härtel, 1985). This traditional approach sidesteps the relation between potential difference and the charge distribution throughout the circuit. This may influence students to attempt to arrive at their own tentative explanations inductively to establish the macro-micro relations in the circuit.

In the last decade, Chabay and Sherwood have proposed, for electricity introductory courses at university, a change in the syllabus that emphasizes the crucial role played by charges on the surfaces of the elements of the circuit, which makes it possible to describe circuit behavior directly in terms of charge and electric field. This approach is a more fundamental description of the circuits that allows one to unify the treatment of electrostatics and circuits. However, the new curricula proposals based on a gradient surface charge microscopic model require an elaborate mechanism underlying relational and multilevel reasoning. Our study shows aspects, little mentioned in education research at the university level, of the types of reasoning used by students when establishing macro-micro relations and possible difficulties with the multilevel reasoning processes. We find that the types of reasoning deployed by students are of low explanatory power; even those students who use a relational form of reasoning only apply it to the macroscopic level and incorrectly induce similar consequences for the microscopic level. This lack of

resources for students to develop complex reasoning may constitute a major obstacle in teaching high-demand models of reasoning, such as the gradient surface charge microscopic model. Such models represent micro-macro relations as a multilevel form of reasoning. It will, therefore, be necessary not only to change the curriculum, but also work with students explicitly on ways of scientific reasoning leading to macro-micro relations in a dc circuit. Not only explanatory mechanisms at the level of atomic dynamics should be presented to students, but also the opportunity to apply complex forms of reasoning that can stimulate discussion. We therefore suspect that this could be one of the reasons why reforms of the course content curricula of introductory electrical circuits do not progress as rapidly as research results would lead one to expect.

The types of reasoning used by students have been found to be of low explanatory power; even those students who use relational reasoning only apply it at the macroscopic level and incorrectly induce similar consequences at the microscopic level. This lack of resources they have to develop complex reasoning can be a major obstacle in teaching more complex explanatory models such as the gradient surface charge microscopic model. Those models represent macro-micro relationships with a form of multilevel reasoning. Therefore, we conclude that it will be necessary not only to change the curriculum, but also to work explicitly with students on the types of scientific reasoning that lead to macro-micro relationships in DC circuits.

Sarrera orokorra eta aurkibidea

SARRERA OROKORRA ETA AURKIBIDEA

Erresistentziak dituzten korrante zuzeneko (KZ) zirkuitu elektriko sinpleen azalpena gai korapilatsua da fisikan. Bere gain hartzen ditu lege fisikoak, materiaren eredu mikroskopikoa eta elektrizitatearen inguruko kontzeptu ezberdinak lotzeko koherentzia (Arons, 1990). Ikasleek zirkuitu elektrikoaren inguruan arrazoitzen dutenean, karga elektrikoa, potentzial elektrikoa, korrante elektrikoa eta eremu elektrikoa bezalako oinarrizko kontzeptuak bateratu eta aplikatu behar dituzte. Orain arte ikasleek korrante zuzeneko zirkuituen funtzionamendua azaltzeko dituzten azalpen ereduaren inguruan garatu diren ikerketa gehienak lehen hezkuntzan eta bigarren hezkuntzan egin dira (Fredette and Lochhead., 1980; von Rhöneck, 1981; Millar and King, 1993; Barbas and Psillos, 1997).

Geroz eta ikerketa gehiagok ondorioztatzen dute batxilergo eta unibertsitateko oinarrizko fisika ikastaroetako ikasleek elektrizitatea modu zatituan erabiltzen dutela, elektronika eta elektrodinamikaren arteko loturarik egin gabe. Ikasleek elektrostatika eta KZ zirkuituen kapituluak aparteko bi arlotzat jotzen dituzte (Eylon & Ganiel, 1990; Benscheguir & Closset, 1996; Guruswamy et al., 1997; Bagno & Eylon, 1997; Hazelton et al., 2013). Ikerketa hauek (eta baita gure irakaskuntza esperientziak ere) fisikako lehen ikasturteetan izena eman duten unibertsitateko ikasle ugari ezin dute zirkuitu elektrikoaren sistema oso gisa kontzeptualki aztertu eta zirkuitu erreal bat modu eskematikoan irudikatzeko zailtasun handiak dituzte: haien fisikaren inguruko interpretazioa aldatu egiten da, fisikaren inguruko galderak planteatzen diren eraren arabera eta baita zirkuituak irudikatzeko eraren arabera ere (Engehelhardt & Beichner, 2004). Maiz, unibertsitateko ikasleek zirkuituen inguruko ariketa sinpleak ebazteko arauak ikasten dituzte, baina egiten ari direnaren esanahi fisikoak ulertu gabe. Erresistentziak, potentzial diferentziak eta korrante elektrikoak erabiltzeko gai direnean ere, puzzle bat ebazten dabiltzala dirudi (Smith & van Kampen, 2011). Izan ere, ikastaro estandar gehienetan, zirkuitu elektrikoak elektromagnetismoaren programa osoaren aparteko zati gisa agertzen dira, hezigarri baino teknikoagoa, eta gainera, ez dira ezta modu egokian konektatzen eremu elektrikoaren portaera gidatzen duten legeekin. Beraz, zirkuitu elektrikoaren inguruan ikasleek duten ulermena argitzea garrantzi handiko gaia da fisikaren irakaskuntzaren ikerketarako (ikus, adibidez, Shipstone et al. 1988 o Guisasola, 2014).

Aurretiko ikerketetan ondo ezarrita dago ikasleengan zirkuitu elektrikoak interpretatzeko orduan zailtasun handiak eragiten dituen kontzeptuetako bat potentzial elektrikoa dela. Gainera, ikasleek ez dituzte funtsean korrante eta potentziala desberdintzen, eta ez dakite haien artean bereizten. Ikerketa desberdinetan ikusi da bi punturen arteko potentzial diferentzia zirkuituaren topologiaren araberakoa dela ez dutela ulertzen (von Rhöneck, 1981; Closset, 1983; Guisasola et al., 2010). Härtel -ek(1985) aurkitu zuen ikasleek KZ zirkuitu baten bateria “korrante konstantea” hornitzen duen gailu gisa ulertzen dutela, eta ez bere poloen arteko potentzial diferentzia konstante mantentzen duen gailu gisa. Ikasleek zirkuitu elektrikoaren inguruan dituzten ideien inguruko ikerketa ugari ikasleen azalpenetako askok elektrizitatea fluxutzat hartzen dutela aurkitu zuten, maila makroskopikoko fenomenoak azalduz. Mota honetako azalpenek ez dituzte haien gain hartzen kargaren izaera eta kargen gainean eragiten duen eremu elektrikoa (Thacker et al., 1999). Aurretik aipatu diren zailtasunak handitu egiten dira unibertsitate mailako ikasleek zirkuituen propietate elektrikoak eta Maxwell-en ekuazioetan definitzen diren eremu eta potentzial kontzeptuak erlazionatzen saiatzen direnean (Guisasola et al., 2008b).

Aurretiko ikerketek ikasleen ikasketa zailtasunak zehazki nolakoak diren eta haien arrazoiketa moduekin nola erlazionatzen diren galdetzera garamatzate. Unibertsitate mailako hastapeneko fisika ikasleentzat azalpen-eredu egokia eraikitzea ahalbidetzen duten arrazoibideak zein diren ikertu beharko da. Galdera horiei erantzuteko, honako garapena duen ikerketa hau egin dugu:

AURKIBIDEA

Sarrera Orokorra
1 Kapitulua: Arazoaren Planteamendua	12
1.1. Gaiaren egoera fisikaren irakaskuntzan: irakasteko eta ikasteko zailtasunak korronte zuzeneko zirkuitu elektrikoaren oinarriak gaian	13
1.1.1. Elektrizitatea eta zirkuitu elektrikoak ikasteko zailtasunak.....	17
<i>Ikasleek korronte zuzeneko zirkuitu elektrikoak buruz dituzten eredu alternatiboen berrikuspena</i>	23
1.1.2. Elektrizitatea eta zirkuitu elektrikoak irakasteko zailtasunak.....	38
1.2. Korronte zuzeneko zirkuitu sinple baten analisi epistemologikoa eta egungo formulazioa, unibertsitateko oinarriko fisikan	43
1.2.1. Elektrizitate estatikotik elektrizitate dinamikoaren eremu berrira: Voltatik Kirchhofferaino.....	45
1.2.2. Zirkuitu elektrikoak azaltzen dituzten ereduak	49
1.2.3. Kable eroalearen gainazaleko karga-dentsitatearen aldaketaren gaur egungo azalpen-eredua	53
1.3. Ikerketaren galderak	55
2 Kapitulua: Esparru Teorikoa eta Metodologia	57
2.1. Ikerketa gidatzen duten elementu teorikoak	58
2.2. Ikerketaren testuingurua	59
2.3. Analisi fenomenografikoa eta arrazoibideen azterketa. Analisiaren fidagarritasuna	62
2.3.1. Diseinu quasi-experimentalak	62
2.3.2. Fenomenografia	62
2.3.3. Arrazoibide kausala azalpen-kategorien justifikazioan....	67
2.3.4. Analisiaren fidagarritasuna	70
2.4. Datuak biltzeko tresnak eta diseinu esperimentalak	71
2.4.1. Lehen azterlana: egoera geldikorrean erresistentziak dituzten KZ zirkuitu elektrikoaren funtzionamenduari buruzko ikasleen azalpen-kategoriak, eremu eta potentzial elektrikoaren kontzeptuak erabiltzen dituztenean	73
2.4.2. Bigarren azterlana: egoera egonkorrean erresistentziak dituzten KZ zirkuitu elektrikoaren funtzionamenduari buruzko ikasleen arrazoibide kausalak, eremu eta potentzial elektrikoaren kontzeptuak erabiltzen dituztenean.	79
2.4.3. Hirugarren azterlana: erresistentziak dituzten egoera iragankorreko KZ zirkuitu elektrikoaren funtzionamenduari buruzko azalpen-kategoriak eta arrazoibideak, eremua eta potentzial elektrikoaren kontzeptuak erabiltzen dituztenean	84
3 Kapitulua: Emaitzak	91
3.1. Galdetegien emaitzak	93

3.2. Lehenengo azterlanaren emaitzak: Erresistentziak dituzten egoera geldikorreko KZ zirkuitu elektrikoaren funtzionamenduari buruzko ikasleen azalpen-kategoriak eremu eta potentzial elektriko kontzeptuak erabiltzen dituztenean	93
3.3. Bigarren azterlanaren emaitzak: erresistentziak dituzten egoera geldikorreko KZ zirkuitu elektrikoaren funtzionamenduari buruzko ikasleen arrazoiketa kausalak eremu eta potentzial elektriko kontzeptuak erabiltzen dituztenean.....	102
3.4. Hirugarren azterlanaren emaitzak: erresistentziak dituzten egoera iragankorreko KZ zirkuitu elektrikoaren funtzionamenduari buruzko ikasleen azalpen kategoria eta arrazoiketa kausalak eremu eta potentzial elektriko kontzeptuak erabiltzen dituztenean	112
3.4.1. Lehen atala: Ikasleen azalpen-kategoriak egoera iragankorreko erresistentziadun KZ zirkuitu elektrikoaren funtzionamenduari buruz, eremu eta potentzial elektriko kontzeptuak erabiltzen dituztenean	113
3.4.2. Bigarren atala: Ikasleen arrazoibideak egoera iragankorreko erresistentziadun KZ zirkuitu elektrikoaren funtzionamenduari buruz, eremu eta potentzial elektriko kontzeptuak erabiltzen dituztenean	118
Chapter 4: Final conclusions and further work	123
4.1. Conclusions regarding students' understanding on the fundamentals of electric current and the concepts of electric field and potential difference	125
4.2. Conclusions regarding the reasoning about electric field and potential difference in direct current circuits	126
4.3. Conclusions regarding the reasoning about electric field and potential difference in transient current circuits	128
4.4. Further work	131
Bibliografía	135
Appendices	148
Appendix I: Difficulties Understanding the Explicative Model of Simple DC Circuits in Introductory Physics Courses. In <i>Proceedings of the Physics Education Research Conference</i> (2014)	150
Appendix II: University Students Use of Explanatory Models for Explaining Electric Current in Transitory Situations. <i>Universal Journal of Physics Application</i> (2015)	155
Appendix III: Students' reasoning when tackling electric field and potential in explanation of dc resistive circuits. <i>Physical Review Physics Education Research</i> (2017)	161
Appendix IV: University students' explanations for electric current in transitory situations. <i>European Journal of Physics</i> (2019)	174
Appendix V: University students' causal reasoning dealing with RC circuits. In <i>Journal of Physics: Conference Series</i> (2019)	186

1 Kapituluua:

Arazoaren planteamendua

Kapitulu honetan, ikerketa-arazoaren planteamendua eta korronte zuzeneko zirkuituen teoriei buruzko azterketa epistemologikoa aurkezten dira, egungo formulaziora arte. Erresistentziak dituen KZ zirkuitu baten funtzionamendua azaltzen duen ereduaren azterketa historiko eta epistemologikoa XIX. mendearen amaieratik lantzen da. Korronte elektrikoko zirkuituei buruzko azalpen-ereduen bilakaera aztertzen da, eta eredu zientifikoek fisikaren irakaskuntzan duten zeregina ikertzen da.

Fisikaren irakaskuntzan gaiak duen egoerari dagokionez, lehenengo zatian gaiaren egoera jorratzen da ikasleen ikaskuntzari dagokionez; eta bigarren zatian, fisikaren irakaskuntzan duen egoera aztertzen da.

Amaitzeko, aurreko ataletatik sortutako ikerketa-galderak aurkezten dira.

1.1. GAIAREN EGOERA FISIKAREN IRAKASKUNTZAN: IRAKASTEKO ETA IKASTEKO ZAILTASUNAK KORRONTE ZUZENeko ZIRKUITU ELEKTRIKOEN OINARRIAK GAIAN

Elektrizitateari buruzko programa tradizionalan, kargaren kontzeptua eta Coulomben Legea definitzen hasten da gaia, eta, ondoren, fluxu elektrikoa eta Gaussen Legea definitzen dira. Elektrostatikaren inguruko kapituluak potentzial elektrikoa definitzen du bukaeran. Beranduago zirkuitu elektrikoak aztertu, eta ondutan korronte, potentzial eta korronte zuzeneko erresistentziadun zirkuituen kontzeptuak definitzen dira (Kirchhoffen legeak). Zirkuituen analisia termino abstraktuetan egiten da, karga eta energia kontserbazio printzipioak erabiliz; badirudi potentzial elektrikoak eta eremu elektrikoak paper marjinala jokatzen dutela. Ondorioz, itxura eman dezake, alde batetik, potentziala eta eremu elektrikoa kontzeptuak eta, bestetik, zirkuitu elektriko baten kontserbazio-printzipioak erabat desberdinak direla eta inolako loturarik ez dutela. Zirkuituen

analisiaren elektrostatikaren ikastean den ezer gutxi aplikatu daitekeela sinestera iristen dira ikasleak.

Hala ere, eta jakina denez, azterlan asko daude potentzial elektrikoaren eta gainazaleko kargen arteko erlazioari erreferentzia egiten diotenak, eta zirkuitu elektriko bateko bi punturen arteko potentzial-diferentzia kableko gainazaleko karga diferentziari lotuta dagoela azaltzen dutenak (Marcus, 1941; Rosser, 1963; Härtel, 1985; Muller, 2012). Ohiko irakaskuntzan ez denez maila atomikoan enfasirik egiten, eta eredu dinamikoan potentzial elektrikoak maila atomikoan duen papera marjinala denez edo agertzen ez denez, ikasleek aukera galtzen dute elektrostatikaren definitutako potentzial elektrikoaren kontzeptuarekin praktikatzeko KZ zirkuituen testuinguruan. Aukera ona da ikasleek uler dezaten zer lotura dagoen potentzial elektrikoaren kontzeptuaren eta zirkuituetako energia-printzipioaren artean.

Elektrizitatearen irakaskuntza tradizionalaren beste arazo gehigarri bat honako hau da: hutsean dagoen karga puntual bat edo karga banaketa baten kasurako definitzen dela potentziala eta hori hari erolaletan aplikatzeko egin behar den pausua ez dela berehalakoa ikasleentzat. Kable baten bi punturen arteko potentzial-diferentzia sortzeko mekanismo mikroskopikoa azpimarratuko duen hurbilketa batek ikasleek zirkuitu elektrikoari buruz duten ulermena eta elektrostatikako kontzeptuekin duten lotura hobetu lezake. Arrazoizkoa da onartzea gainazaleko kargak eta tentsioa ez lotzeak ikasle askori zaildu liezaiekeela potentzial elektrikoaren kontzeptua ulertzea.

Irakaskuntzak dituen zailtasunen artean dago ikusmolde alternatiboen iraunkortasuna. Izan ere, iraunkortasun hori ikasleek (baita unibertsitate mailakoetan ere) eta irakasleek artean ematen da (Pfundt & Duit, 1998). Gainera, ulermen-zailtasunak ikertzeko beharra agerian geratzen da, ikusmolde horien eragina murrizten duten estrategien ikerketa gidatzeko helburuz. Lan

honetan, ikusmolde alternatiboez hitz egiten denean, kontzeptu formalarekin (fisikan aditua den batek ulertzen duenarekin) gatazkan dauden ikasleen interpretazioetaz ari gara (Wandersee et al., 1994).

Ebidentzia zientifikoa dago (McDermott & Shaffer, 1992; Guisasola et al., 2010; Guisasola et al. 2011) teoria elektromagnetikoko hainbat gaitan (adibidez, zirkuitu elektrikoak, indukzio elektromagnetikoa, korrante elektrikoak, kapazitate elektrikoak, indar elektroeragilea, etab.) ikusmolde alternatibo batzuk ohikoak direla gai horietan heziketa formala jaso duten ikasleengan. Kulturarteko ikerketen emaitzek adierazten dute antzeko ikusmolde alternatiboak agertzen direla antzeko hezkuntza-sistemak dituzten herrialdeetan (Shipstone et al., 1988). Aipatu behar da, halaber, problema kuantitatiboak ebazteko garaian arrakasta izatea ez dela ulermen kontzeptuala neurtzeko modu fidagarria. Bigarren hezkuntzako eta unibertsitateko irakasleek berretsi dute problema kuantitatibo estandarrak ebatzi ditzaketen ikasleek askotan ez dakitela kontzeptu fisiko berberetan oinarritutako galdera kualitatibo sinpleak erantzuten (Guisasola et al., 2008b; Kim & Pak, 2002; Arons, 1982). Ebidentzia horrek azpian zailtasunak daudela iradokitzen du. Itxuraz, kontzeptu horiek ez daude behar bezala gorpuztuta fisikaren irakaskuntza tradizionalan. Ikasleek oinarritzko kontzeptuetan (adibidez, potentzial elektrikoak unibertsitateko oinarritzko fisika mailetan) dituzten zailtasunak ezagutzeak ikaskuntza-helburu batzuk modu egokiagoan lortzen lagun lezake. Bereziki, oinarritzko helburu batzuen garrantziarekin bat datoz irakasle asko (McDermott, 1990). Unibertsitateko oinarritzko fisikaren irakasgaia osatzean, ikasleek oinarritzko kontzeptu batzuk ondo ulertu beharko lituzkete, eta horiek definitu eta printzipio nabarmen garrantzitsuekin lotu ahal izango lituzkete. Era berean, irudikapen formalak (diagramak, grafikoak, ekuazioak, etab.) ezagutu beharko lituzkete, eta kontzeptu baten eta hura irudikatzeko erabilitako formalismoaren arteko erlazioa xehetasunez ulertzeko gai izan beharko lukete. Gai izan beharko lukete ereduetan edo analogietan oinarritutako lan zientifikoaren arrazoibidea

erabiltzen, hala nola arrazoiketa proportzionala, fenomeno sinpleen azterketan eta interpretazioan kontzeptu eta errepresentazio fisikoak aplikatzeko. Jakina, beharrezkoa da, halaber, unibertsitate mailako hastapeneko fisika irakasgaietako ikasleek problemak ebazten ikastea, subjektuan bertan izan beharrean algoritmoetan zentratzeko joerari ihes eginez. Nolanahi ere, literaturak agerian uzten du ikasle askorentzat hastapeneko fisika irakasgai estandarrak ez direla eraginkorrak lehen aipatutako irakaskuntza-helburuak lortzeko. Hiztegia erabiltzeko erraztasunak ez du kontzeptuzko ulermena adierazten. Problema estandarrak ebazteko zenbait prozedura jarraitzeko trebetasunak ere ez du arrazonomendu zientifikoaren garapena adierazten (Chabay & Sherwood, 2006; Viennot, 2002).

Zailtasun asko agertzen dira irakasleak esaten edo gainulertzen duena eta ikasleak irakasleak esandakotzat jotzen duena gauza bera ez denean. Sarritan, alde nabarmenak daude ikasleek fisika irakasgaietan ikasi dutela irakasleak uste duenaren eta benetan ikasleek ikasi dutenaren artean. Ikasleen ulermenari buruzko ikerketak ikerketa-oinarri bat sortzen laguntzen du, ikasleen beharrak eta trebetasunak ikaskuntza-helburuekin lotuko dituen curriculum bat garatzeko gida gisa erabil daitekeena. Curriculum egoki batek irakatsitako edukia ez ezik, irakasteko modua ere jaso beharko luke (McDermott, 1991). Fisikaren azterketaren eta erabileraren arteko zubi bat ere ekarri beharko luke curriculum honek (Méheut & Psillos, 2004).

Aurrekoa esanda, hurrengo lerroetan guri dagokigun gaia (elektrizitatea) ikasteko zailtasunetan sakontzen da, eta arreta berezia jartzen da potentzial elektrikoa ikasteko zailtasunetan eta KZ zirkuituak ikasteko zailtasunetan. Ikasleek korrante zuzeneko zirkuitu elektrikoen gainean dituzten eredu berrikuspena ere aurkezten da. Kapitulu honetako 1.1 atalarekin amaitzeko, elektrizitatea irakasteko zailtasunetan sakonduko dugu.

1.1.1. Elektrizitatea eta zirkuitu elektrikoak ikasteko zailtasunak

Fisikariek historikoki testuinguru horretan aurkitu dituzten zailtasun kopurua kontuan hartuta, ez da zaila elektrizitatearen inguruan eraikitako ezagutza guztia modu eraginkorrean transmititzeak dakarren zailtasuna aurreikustea. Are gehiago, unibertsitate mailako fisikako curriculumaren funtsezko zati bat bada ere, KZ zirkuituen irakaskuntza-ikaskuntza prozesuak arazo gehigarri ugari dakartza (Guisasola, 2014). Beraz, ez da harritzekoa elektrizitatea azken hiru hamarkadetan argitalpen gehien dituen Fisikaren Irakaskuntzako ikerketa eremuetako bat izatea.

Bi arrazoi nagusi daude elektrizitate arloan ikerketa kopuru hori egoteko: lehena da fenomeno elektrikoak eta horien propietateak fisikaren irakaskuntzaren zati garrantzitsu bat direla, hainbat mailatan. Ikasleek karga eta zirkuitu elektrikoak zer diren ikasten dute lehen hezkuntzan, eta, pixkanaka, fenomeno elektrikoak interpretatzeko ideia konplexuagoak integratzen dira. Fenomeno elektromagnetikoak interpretatzeko behar diren ereduak aztertzea ekoizpen-arlo bat da: materiaren izaera elektromagnetikotik gaur egungo teknologiaren oinarrietara doazen gaiak ulertzeko testuinguru sendo bat eskaintzen du. Materiaren egituraren izaera elektromagnetikoa interesgarria eta erabilgarria da. Baina, gainera, teoria elektromagnetikoek testuinguru ona eskaintzen dute arrazoibide zientifikoaren trebetasunak irakasteko, hala nola ereduaren eraikuntza edo fenomeno makroskopikoen deskribapenaren eta teoria mikroskopikoen eta makroskopikoen arteko erlazioa. Ikerketetan ikus daitekeenez, askotan ikasleek modu holistikoa arrazoitzeko trebetasuna izateko beharrezana dute. Psillosek (1998) zirkuitu elektriko baten osagaiak aztertzeke arrazoibide orokor baten beharra erakusten du. Viennotek (2002) azaltzen du kausazko arrazoibidea edo formularen oinarritutako arrazoibidea gainditzea ezinbesteko baldintza dela zirkuitu elektrikoak eta elektrizitatearen beste arlo batzuk ulertzeko.

Bigarren arrazoi nagusia da ikasleek askoz zailagoa aurkitzen dutela elektrizitatea ulertzea mekanika ulertzea baino. Elektrizitate-kontzeptuetarako ulermen-mailak oso idiosinkrasikoak dira. Gainera, literaturak erakusten du nahasmena dagoela elektrizitatearen kontzeptuen eta eguneroko bizitzan erabiltzen den terminologiaren artean (elektrizitatea, energia, tentsioa, energia elektrikoa, etab.). Eta hori ez da harrizkoa, kontzeptuen konplexutasuna dela eta, baina bai harrigarria, ulermen falta ia osorik mantentzen baita irakaskuntzaren ondoren (McDermott & Shaffer, 1992; Wandersee, Mintzes & Novak, 1994). Egoera hobetzeko proposamenekin egin diren ikerketek emaitza paregabeak eskaintzen dituzte (Mulhall, Mckittick & Gunstrone, 2001). Horien ondorioz, bi arazo nagusi identifika daitezke: lehena, ikasleen alde zurreko ezagutzak gogor eragiten duela erabiltzen diren irakaskuntza-estrategiekin, ikaskuntza-lorpen mota ugari eraginez (Saglam & Millar, 2005). Bigarrena, irakaskuntza-estrategiek fenomeno elektrikoaren maila makroskopikoa eta teoriaren maila mikroskopikoa konbinatu behar dituztela (Chabay & Sherwood, 2006; Young & Freedman, 2008).

Elektrizitatearen irakaskuntza eta ikaskuntzan azken hamarkadetako ikerketatildoko nagusia ikasleen ikusmolde alternatiboak aztertzea izan da (Wandersee, Mintzes & Novak, 1994; Driver et al., 1994). Badira hamarkada batzuk pentsatzen dela ikasleen aurretiko ezagutzak eta ikusmoldeek beraien ikaskuntza oztopatu eta eragiten dutela testuinguru berrietan (Ausubel, 1978; Duit & Treagust, 1998). Gainera, fisikaren ikaskuntzak kontzeptu-ulermena ez ezik, ikasleen onarpen ontologiko eta epistemologikoak ere barne hartzen ditu, ikaskuntza-prozesuei eragiten dietenak (Vosniadou, 2002). Onarpen horiek ikasleen trebetasun zientifikoak ezartzen dituzte. Ohikoak dira ebidentziarik gabeko ondorioak edo estrategia sinpleen erabilera, oro har errezeta baten aplikazio zuzen eta espezifikokoak dakartzatenak (Guisasola et al., 2008b; Viennot, 2002).

Lehen ere aipatu da fenomeno elektromagnetikoei buruzko ideia alternatiboak testuinguru akademikotik sor daitezkeela, elektromagnetismoaren kontzeptu gehienek eguneroko testuingurutik kanpo landutako ezagutza eskatzen baitute. Irakaskuntza-programa bateko fisikako edukiak eta testuliburuak testuinguru akademiko baten parte direnez, bereziki beharrezkoa da horiei eta horiek ikasleen ikaskuntzan duten eraginari buruz ikertzea. Hainbat ikerketa-proiektuk erakutsi dute kontzepzio alternatiboak ez direla ausazko ideiak, baizik eta barne-kohesioaren bat dutela, kontzepzio alternatiboko testuinguru batean egituratuta (Oliva, 1999; Watt & Taber, 1996). Azpiatal bakoitzean jarraian aurkezten diren emaitzek, gehienetan, elkarren artean zerikusia duten alderdiei egiten diete erreferentzia. Horrek adierazten digu beharrezkoa izango dela kontzeptuaren ikuspegi orokor bat izatea.

Elektrizitatearen irakaskuntzan gehien ikertutako kontzeptuetako bat potentzial elektrikoa da. Azterlan gehienek zirkuitu elektrikoaren testuinguruan kontzeptu hori nola irakasten den ikertu dute, baina 90eko hamarkadatik aurrera, elektrostatikaren testuinguruan kontzeptu hori aztertzen duten azterlan gehiago sortu ziren, eta berau zirkuitu elektrikoekin nola lotzen den. Eylonek eta Ganielek (1990) aurkitu zuten potentzial elektrikoa dela ikasleei zailtasun handienak sortzen dizkien kontzeptuetako bat zirkuitu elektrikoak interpretatzen dituztenean. Zailtasun hori egozten diote zirkuitu elektrikoak aldagai makroskopikoen arabera deskribatzen direlako (korrontea, erresistentzia, voltmetro batek neurtutako tentsioa), azalpenek eredu mikroskopikoak erabiltzen dituzten bitartean (kargak, eremuak, potentziala). Eredu horiek elektrostatikan azaldu diren kontzeptuek, zirkuitu elektrikoaren ohiko analisisa egiten denean erabiltzen diren magnitudeekin loturak eginez lan egitea proposatzen dute. Ikerketak erakusten du ideia ona izan daitekeela elektrostatikan aztertutako eremu elektrikoa edo potentzial elektrikoa eta KZ zirkuituetan ikasitakoak esplizituki lotzea. Ondo dokumentatuta dago bigarren hezkuntzako ikasleak eta unibertsitateko fisikako sarrera-ikastaroetako ikasleak ez direla gai erlazioak

ezartzeko elektrostatikako potentzial kontzeptuaren eta zirkuitu elektrikoetan duen aplikazioaren artean (Cohen, Eylon & Ganiel, 1983; Steinberg, 1992). Erlazio gabezia horrek esan nahi du potentzial elektrikoaren kontzeptua lauso mantentzen dela eta kalkuluetan komeni denean bakarrik erabiltzen dela. Ikasle askok potentzial elektriko eta potentzial-diferentzia kontzeptuak erabiltzen dituzte azalpen-ereduetan oinarritutako esanahirik gabe (McDermott & Shaffer, 1992; Shipstone et al., 1988) eta Ohmen legearen erabilera desegokian oinarrituta, zirkuitu baten bi punturen artean korrontetik ez badago, potentzial-diferentziarik ez dagoela uste dute. Horrek iradokitzen du ikasleek uste dutela potentzial-diferentzia karga-fluxuaren ondorioa dela, kausa izan ordez (Steinberg, 1992). Gainera, Cohen et al. (1983) aurkitu zuten ikasleek KZ zirkuitu bateko bateria korrontea etengabe hornitzen duen aparatu gisa ulertzen zutela, eta ez poloen arteko potentzial-diferentzia konstante mantentzen duen aparatu gisa. Ikasle askok potentzial-diferentziaren kontzeptua karga elektrikoaren kantitatearekin nahasten dute (Thacker et al., 1999). Guruswamyk eta bere kolaboratzaileek (1997) erakusten dutenez, ikasleek hari-eroale baten bidez lotuta dauden bi eroaleren arteko karga-pasabidea aztertzen dute, eroale bakoitzaren karga-kantitateari begira, eta ez haien artean dagoen potentzial-diferentzia kontuan hartuta. Bigarren hezkuntzako eta unibertsitateko ikasleekin egindako azterlan batean, Benseghir and Closset-ek (1996) erakusten dute ikasle batzuentzat bateria baten poloen arteko potentzial-diferentzia eta zirkulazioan dagoen korrontea ez daudela lotuta: potentzial-diferentzia zenbakizkoa eta bateriaren ezaugarri bat da, eta korronte elektriko ikuspuntu elektrostatiko batetik aztertzen da (kargen arteko erakarpena, karga-zeinu desberdina borne bakoitzean ...). Ikasle kopuru esanguratsu batek uste du zirkuituko puntuen artean potentzial-diferentzia dagoela, baldin eta zeinudiferentzia hautematen bada (polo positiboa eta polo negatiboa) edo puntuen artean karga-kantitatea aldatzen bada. Ikasleek uste dute potentzial-diferentzia kontzeptu abstraktu bat dela, eta nahiago dute askoz ere eskuragarriagoa den kontzeptu bat, karga elektrikoarena, alegia. Badirudi ikasleek kontzeptu horiei

esanahirik ematen ez dietenean, definizio operatiboetan babesten direla eta arrazonamenduak esanahirik gabeko formuletan oinarritzen dituztela (Viennot, 2002).

Laburbilduz, potentziala kontzeptua modu operatibo hutsean aurkezten da maiz, eta ikasleei matematika formaletarako jauzia egiteko eskatzen zaie. Pausu horretan huts egiten dute askok. Bigarren hezkuntzako eta unibertsitateko ikasleek zailtasunak dituzte potentzial elektrikoa ikasteko, zirkuitu elektrikoen eta haien balantze energetikoaren analisirik ez delako egiten. Fisikako hirugarren urteko ikasle gehienek ez dute oraindik argi ulertzen potentzial-diferentzia eta indar elektroeragilea kontzeptuen erabilgarritasuna (Guisasola & Montero, 2010). Horrek potentzial-diferentzia eta indar elektroeragileak kausa erradikalki ezberdinek eragindako ekintza mota ezberdinak neurtzen dituztela aurkezteko beharra erakusten du (Roche, 1987; Varney & Fisher, 1980).

Fisikaren Irakaskuntzako ikerketak behin eta berriz erakutsi du ikasleen beste zailtasunetako bat; korrante zuzeneko zirkuitu elektriko simple baten funtzionamendua azaltzen duen eredua ulertzea. Ikerketaren arabera, bigarren hezkuntzako eta unibertsitateko ikasleen ehuneko handi batek korrante elektrikoaren eredu bat du, non kargak potentzial elektriko desberdina duten bi punturen artean mugitzen diren (kargen fluxu-eredua). Baina karga-fluxuak zailtasun handiak ematen dizkie ikasleei. Clossetek (1983) erakutsi zuen bigarren hezkuntzako eta unibertsitateko ikasle askok zirkuitua aztertzen dutela arrazoibide sekuentzial bat erabiliz. Ikasle horien ustez, hainbat entitate daude (korrontea, elektroiak edo elektrizitatea) bateriatik ateratzen diren intentsitate eta tentsioarekin lotuta, eta zirkuituko elementu bakoitzetik igarotzeak gutxiago edo gehiago eragiten die; adibidez, "erresistentziak korrontea erabiltzen du" edo "korrontea bonbillan gastatzen da", aztertzen ari garen elementura heldu baino lehen korronteari gertatu ahal izan zaionari erreferentziarik egin gabe. Korrontea bateriaren beste polora nola "itzultzen" den ere ez dute kontsideratzen. Gainera, beste ikerketa batzuen arabera, bigarren hezkuntzako ikasleek uste dute

korrontea bonbilla batetik pasatzen denean gastatzen dela edo bateria batek ematen duen korrontea zirkuituaren topologiaren independentea dela. Bigarren hezkuntzako ikasleek zailtasunak dituzte seriean eta paraleloan konektatutako erresistentzien portaera interpretatzeko orduan, KZ zirkuitu oso batean. Ikasleei zaila egiten zaie onartzea paraleloan dauden erresistentzien kopurua handitzen denean erresistentzia osoa gutxitu egiten dela. Kosta egiten zaie, halaber, korrontearen eta erresistentzien arteko lotura ulertzea, eta erresistentzien eta potentzial-diferentziaren arteko erlazioa ulertzea (Liegeois & Mullet, 2002).

Potentzial elektrikoa eta potentzial-diferentzia bezalako kontzeptuak korronte intentsitatearekin edo energiarekin nahasten dira maiz. Kontzeptu horiek bateria baten "indarra" irudikatzeko erabiltzen dira. Gainera, ikasleek maiz ez dute ulertzen zirkuitu bateko bi punturen arteko potentzial-diferentzia haien topologiaren araberakoa dela. Smith eta van Kampenek (2011), begizta bakar batean edo gehiagotan bateriak zituzten zirkuituei buruzko ulermen kualitatiboa ikertu zuten prestakuntzan ari ziren irakasleekin. Gehienak begizta bati edo gehiagori bateriak gehitzearen ondorioak azaltzeko gai ez zirela aurkitu zuten, euren joera korronte eta erresistentzian oinarrituz arrazoitzea baitzen, tentsioan beharrear. Bateria korronte iturri konstante bat bezala ulertzen zutela ere ikusi zuten, eta erantzunak korrontearen kontserbazioarekin bat ez zetozela.

Borges eta Gilbertek (1990) egindako zirkuitu elektrikoaren azalpen-ereduei buruzko azterlanean bigarren hezkuntzako ikasleek eredu alternatiboak dituztela erakutsi zuten, hala nola "elektrizitatea fluxu gisa" edo "elektrizitatea korronte kontrajarri gisa", non korrontea osatzen duten karga elektrikoak ez diren banaka kontuan hartzen. Eredu horiek apenas aipatzen duten elektrizitatearen izaera, eta funtsean deskribatzaileak dira. Bi ereduak oso mugatuta daude korronte elektrikoak zirkuituan izango duen portaera aurreikusteko. Borges eta Gilbertek erakusten dute bigarren hezkuntzako eta unibertsitateko azken urteko ikasleek azalpen-eredu konplexuagoak dituztela. Adibidez, elektrizitatearen inguruan

pentsatzean "kargen mugimendua" edo "eremua" irudikatzen dute. Eredu hauek korrante elektrikoekin lotutako fenomeno batzuk azaltzeko gai dira, korrante intentsitatearen eta bateriaren potentzial-diferentziaren arteko erlazioa kasu. Greca eta Moreirak (1997) erakusten dute, ikasleek elektrizitateari buruz dituzten azalpen-ereduek konplexutasun handiagoa hartzen dutela irakaskuntza-urteak igaro ahala, baina ikasle gehienek eredu zientifikotik urrun jarraitzen dutela.

Ikasleek korrante zuzeneko zirkuitu elektrikoari buruz dituzten eredu alternatiboen berrikuspena

Aurreko ataletan behin baino gehiagotan aipatu den bezala, ikasleek zailtasunak izan ohi dituzte zirkuitu elektrikoaren funtzionamendua ulertzeko. Ikusi da ikasleek ereduak linealak eta sekuentzialak izateko joera dutela, sistemikoak eta aldiberekoak izan beharrean. Ikerketak erakusten du ikasle zein irakasleek zirkuitu elektrikoaren ulermena ikaskuntzaren aurrerapen akademikoarekin eta denborazkoarekin zerikusia duen ereduaren nolabaiteko progresioan garatzen dela (beste faktore batzuen artean). Halaber, zirkuitua sistema gisa kontuan hartuta arrazoitzeko beharra agertzen denean gehiengo handi bat trabatuta geratzen dela ere erakusten du, eta baita kausak eta efektuak onartzeko gure ohiko ohituratik desberdinak diren kausalitate-formak bistaritzen ere.

Ikasleek elektrizitateari eta haren osagaiei dagokienez duten ulermenari buruzko ikerketak asko eta askotarikoak izan dira azken hamarkadetan (Cohen, Eylon & Ganiel, 1983; Steinberg, 1987; Dupin & Joshua, 1989; Roche, 1989; McDermot & Shaffer, 1992; Millar & King, 1993; Viennot, 1994; Stocklmayer & Treagust, 1994; Benseghir & Closset, 1996; Duit & Rhöneck, 1998; Borges & Gilbert, 1999; Thacker, Ganiel & Boys, 1999; Chabay & Sherwood, 1999; Grotzer & Sudbury 2000; Roche, 2003; Engelhardt & Beichner, 2004; Stocklmayer 2010; Smith & van Kampen 2011; Koponen & Huttunen 2013).

Aurretiko ikerketek agerian uzten dute ikasle asko gai direla kontzeptuen definizioak formulatzeko (korrontea, tentsioa, energia, etab.) eta horiek irudikatzeko erabiltzen diren sinbolo algebraikoak manipulatzeko, baina gehienetan ez dituztela kontzeptuak elkarren artean lotzen, edo arazoak izaten dituztela benetako zirkuitu batean aplikatzean (McDermott & Shaffer 1992).

Aurreko ataletan ere aipatu da ikasleek elektrizitatearen inguruan dituzten ideiei buruzko ikerketa gehienak bigarren hezkuntzako ikasleekin egin direla, nahiz eta aipatutako batzuek, McDermott & Shaffer 1992 edo Borges & Gilbert 1999 kasu, unibertsitateko ikasleen buru-ereduak ere aztertu dituzten. Horietatik guztietatik, ikasleek (bigarren hezkuntzatik unibertsitatera, eta baita unibertsitate ondokora ere) elektrizitatearekin lotutako fenomenoak interpretatzeko erabiltzen dituzten buru-ereduak atera daitezke, eta, zehazkiago, korronte zuzeneko zirkuitu elektrikoei buruzkoak.

Normalean, ikasleen kausa-ereduek eredu sinple lineal batetik sekuentzial zikliko bateraino egiten dute aurrera. Eredu horiek erakustea helburu izan duten ikerketei erreparatzen badiegu, jarraian azalduko ditugun zirkuitu sinpleen eredu horiek bateratu ditzakegu:

Eredu unipolarra

Ikerketak (Fredette and Lochhead, 1980; Osborne, 1983; Kärrqvist, 1985; Osborne & Freyberg, 1985; McDermott & Shaffer, 1992; Borges & Gilbert, 1999; Grotzer, 2004; Clement & Steinberg, 2008) bat datoz Osbornek (1981) izendatu zuen oinarrizko eredu bat definitzean. Honakoak dira ereduaren ezaugarri nagusiak:

Eredu honen ezaugarri orokorretako bat korrontea zirkuitu elektrikoan zehar dabilen "zerbait" (fluido bat, energia edo elektrizitatea) bezala definitzen dela da. Batzuetan, zirkuituan dabilen horri energia esaten zaio, beste batzuetan

elektrizitatea edo korronte hutsa. Bateria zirkuituan zehar dabilen energiaren /
elektrizitatearen iturria da.

Iturriaren eta honek eragiten duen objektuaren arteko lotura fisikoa beharrezkoa da egunerokoan; adibidez, bonbilla bat bateria bati behar bezala lotuta dagoenean bakarrik pizten da. Korronte fluxu horrek norabide bakarreko bidea hartzen du, bateriatik bonbillara adibidez, eta, ondorioz, bonbilla piztu egiten da. Kontsumo-iturri erlazio nabaria dago (gehienetan bateria-bonbilla bezala definitzen dena): korronte bateriaren polo positibotik bonbillara irteten da, eta bertan korronte guztia kontsumitzen da. Beraz, bateria elektrizitaterako edo energiarako edukiontzia dela hartzen da aintzakotzat.

Beste ezaugarri orokor bat da zirkuituaren portaeraren barruko mekanismo edo prozesurik deskribatzen ez duela.

Eredu horren muga nagusia, bigarren kablea beharrezkoa ez dela ondorioztatzea da, ez baitu paper aktiborik zirkuituan. Itzulerako bidean korronterik ez dagoela uste da, hau da, bateriako terminalletako bat bakarrik hartzen da aktibotzat. Ikasle batzuek pentsatzen dute kable bakarrarekin nahikoa dela, beste batzuek adierazten dute bigarren kablea segurtasun kable bat dela.

Eredu horrek onartzen du kausek beti dituztela ondorioak (denbora-lehentasan gisa ezagutzen dena), eta kausa eta efektu bana daudela. Ikasleak nahiko azkar konturatzen dira disposizio lineal sinple horrek ez duela funtzionatzen bonbilla bat pizten denean. Dena dela, asko kostatzen zaie eredu sinple lineal hori alde batera uztea. Bigarren kable bat beharrezkoa dela konturatzen direnean ere (edo zehatzago, bateriarekin kontaktu positibo bat eta negatibo bat), lehen aipatu bezala, bigarren kablea lurrerako kontaktua besterik ez dela argudiatzen dute. Gainera, oso ohikoa da bonbillek elektroiak "kontsumitzen" dituztela onartzea. Eredu unipolarraren erabilera oso iraunkorra da, eta askotan agertzen da.

Aurretik aipatu bezala, Osbornek (1983) izendatu zuen eredu hori, eta Fredette & Locchheaden (1980) "pila ereduaren" antzekoa da. Kärrqvistek (1985) ere bere ikerketan aurkitutako eredurik sinpleena bezala sailkatu zuen (beste seiren artean). Borges & Gilbertek (1999) "Elektrizitatea fluido gisa" izendatu zuten eredu, eta ikusi zuten eredu horren ezaugarria nozio zientifikoaren (korrontea, energia, elektrizitatea eta tentsioa) arteko bereizketa eskasa dela. Haien ikerketan, eredu hau erabiltzen zuten subjektuek ez zuten zirkuituaren portaera deskribatzen barne mekanismo eta prozesuak erabiliz. Haien deskribapenak, batez ere, hautemandako gertakizun eta efektuen asoziazioetan oinarritzen ziren. Eredu hau, batez ere bigarren hezkuntzako ikasleetan (15 urte) aurkitu zen, eta, partzialki, gaikuntzarik gabeko profesionaletan.

Osborne & Freyberg (1985) adierazi zuten eredu hori batez ere ikasle gazteenetan dagoela eta normalean instrukzioarekin desagertu egiten dela, baina McDermoot & Shafferrek (1992) ebidentziak aurkitu zituen unibertsitateko ikasleetan. Ikasle horiek zirkuitu sinple bat marraztean (bateria, kable eta bonbilla batez osatua) ez zuten zirkuitu osoaren kontzeptua aplikatzen. Marraztutako diagrametan, ikasleen % 55 inguruk ez zuten bonbilla pizteko zirkuitua osatzen, bonbilla bateriara konektatzen zuten kablearen bidez polo batekin, eta gainerakoa nolabait osatu gabe uzten zuten.

"Causal Patterns in Simple Circuits" liburuan, Grotzerrek (2004) "Eredu Sinple Lineala" izena ematen dio. Baieztatzen du eredu horrek barneratzen duela kausek beti dituztela ondorioak (denbora-lehentasun gisa ezagutzen dena), eta kausa eta efektu bat daudela. Ikasleak beste kable bat behar dutela konturatzen direnean ere, normalean argudiatzen dute beste kablea "lurra egiteko" besterik ez dela.

Clement & Steinberrek (2008) beraien ikerketan eredu hori bera aipatzen zuten, baina "Kable Bakarra" izenarekin. Bertan, korrontea bateriatik hartzailera kable

batetik bakarrik doala definitzen zuten. Ikasleek zirkuitu itxiaren kontzeptua lantzen dutenean eredu hau murriztu egiten dela esaten zuten, kondentsadore baten kargatzea aztertzen hasten direnean berriro agertzeko joera duen arren.

Korronte kontrajarriak

Azken hamarkadetako zenbait ikerketak (Osborne, 1983; Shipstone, 1984; Kärrqvist, 1985; Osborne a& Freyberg, 1985; Borges & Gilbert, 1999; Grotzer, 2004) korronte kontrajarrien eredua definitze dute. Kärrqvistek (1985) izendatu zuen horrela, eta honakoak dira bere ezaugarri nagusiak:

Eredu honek ezaugarri komun bat du eredu unipolarrarekin: kontsumo-iturri erlazioa dago oraindik, bateria-bonbilla erlazioari estuki lotua, eta bateria korronte-edukiontzia gisa ulertzen da. Hala ere, aurreko eredua baino zertxobait landuagoa da. Korronte elektrikoa bateriaren poloetatik irteten den energia edo elektrizitatea da, baina kasu honetan bi korronte bereizten dira, bata “positiboa” eta bestea “negatiboa”, eta norabide bakarreko bideak jarraitzen dituzte.

Bateriaren poloetako bakoitzetik ateratzen da korrontea, eta zirkuituko elementuetan kontsumitzen da. Kargaren kontserbazioa ez da kontuan hartzen, eta bateria korronte-biltegi gisa ulertzen da. Eredu honen bi bertsio daude, batean bi korronteen talka da bonbilla pizten duena; bestean, korronte bakoitzak bere aldetik egin dezake bonbilla piztea.

Eredu horren muga nagusiak dira kargak bateriaren poloetan pilatzen direla, eta ez dela azaltzen zein rol duten elektroien eta protoien zirkuituko elementuetan elkartzen direnean (bonbillan, adibidez).

Zirkuituaren portaera-mekanismoek protoien eta elektroien arteko erakarpenak edo kontrako korronteen arteko talkak hartzen dituzte kontuan.

Kärrqvistek (1985) horrela izendatutako eredu hau Osborneren (1983) "talka egiten duten korronteen" ereduaren eta Shipstoneren (1984) "1 ereduaren" antzekoa da. Osborne & Freybergek (1985) 10 eta 13 urte bitarteko ikasleen artean eredu hau oso erabilia dela ikusi zuten, baina bigarren hezkuntzako ikasleen artean ez da hain ohikoa. Borges & Gilbertek (1999) "korronte kontrajarrien elektrizitate eredu" deitu zuten, eta baieztatu zuten eredu horretan korrontea ez dela argi eta garbi energiatik bereizten: batzuetan bi terminoak baliokide gisa erabiltzen dira. Korrontea, zirkuituko kableetan zehar, bateriaren bi terminaletatik bonbillaraino doan energia edo elektrizitate gisa ikusten da. Hau da, eredu horrek esplizituki onartzen du korrontea ez kontserbatzea. Bateria elektrizitate / energia erreserba bat da oraindik ere, eta denborarekin kontsumitzen da, bonbillan dagoen energia kontsumo baten ondorioz. Bonbilla pizteko, beharrezkoa da zirkuitu itxi bat izatea, eta korrontea zirkuituan zehar azkar bidaiatzen duela onartzen da. Zirkuituan etengailuak jokatzeko duen rola ez da argi geratzen: batzuek korrontea sortzen duela iradokitzen dute. Ikasleek batzuetan protoiak eta elektroiak aipatzen dituztela ere identifikatu zuten, elektrizitatea zirkuituan zehar mugitzen diren partikula elektrikoetan datzala iradokiz. Gertaeren denbora-sekuentzia gisa azalpenak emateko joera dago.

Grotzerrek (2003) eredu horri "eredu lineal bikoitza" deitu zion. Eredu hori, batez ere, elektrizitate estatikoak nola funtzionatzen duen ulertzen duten ikasleek erabiltzen dutela azaldu zuen. Kausalitate lineal sinplea (kausa-efektua) eta sekuentziala (denboran ordenatutako gertaerak) atxikitzen dituzte, eta gehienetan bi bide erakusten dituzte. Bideak gehigarriak bakarrik izan daitezke (elektrizitatea bi aldeetatik doa) edo korronteen erakarpenean edo talka alderdiak izan ditzakete. Horretan pentsatzeko eskatu ezean, ikasleek ez dute arazotzat jotzen bonbillan elektroiak eta protoiak pilatzea, nahiz eta eredu horrek metaketa iragartzen duen.

Sekuentziazko zirkuitu itxia

Hainbat ikerketatan (Osborne, 1983; Shipstone, 1984; Kärrqvist, 1985; MCDermott & Shaffer, 1992; Borges & Gilbert, 1999; Grotzer, 2004) da ohikoa hirugarren eredu hau, eta honako ezaugarriek definitzen dute:

Eredu honetan, eroale batean mugitzen ari diren kargatzat hartzen da korrontea. Zirkuituko elementu guztiek bi konexio dituzte eta korronteak norabide jakin batean zirkulatzen du zirkuituan, eta zirkuituak etengailua itxita dagoenean bakarrik funtzionatzen du. Korrontea ez dela kontserbatzen iradokitzen du, ziurrenik korrontearen eta energiaren arteko bereizketa faltagatik.

Ikasleek zirkuitua hutsik ikusten dute normalean, eta korronte elektrikoa bera betetzen duen substantzia dela uste dute, azkenean zirkuituko osagaietara iristen delarik. Korrontea puntuz puntu mugitzen dela eta zirkuituan aurkitzen duen osagai bakoitzari eragiten diola uste dute. Kasu honetan ere ez da betetzen karga kontserbaziorako oinarritzko printzipioa. Korrontea norabide bakarrean doa zirkuituan zehar, baina pixkanaka gastatzen doa zirkuituko osagaietatik igaro ahala. Horrela, korrontea (edo kargak) ateratzen den tokitik urrutien dauden osagaiak izango dira korronte gutxien jasotzen dutenak, eta, beraz, bonbillen kasuan, hurbilen daudenak baino gutxiago argiztatuko dira. Korronte elektrikoak edo elektroiek bateriara iritsi arte jarraitzen dute, eta han birziklatu egiten dira. Normalean, korrontea kontsumitzen dela uste dute, eta, beraz, ez dago elementu guztientzako korronte nahikorik. Kablearen tamaina handituz gero bonbillak pizteko denbora gehiago beharko dela pentsatu ohi dute.

Zirkuituaren portaera azaltzen duten mekanismoek kargen eta eroalearen egituraren arteko talkak azalpenak hartzen dituzte aintzakotzat, baita fluidoaren mugimendua eta analogia antropomorfitikoa ere, korrikalari nekatuarena kasu.

Oro har, eredu hori denboraren mendeko gertakari-sekuentzia gisa deskribatzen da. Ikasleek kausa-efektu kate sekuentziala den arrazonamendu lineala erabiltzen dute.

Kärrqvistek (1985) "Korronte Kontsumo Eredua" deitzen du, eta Shipstoneren "Sekuentzia Eredua" (1981) eta Osborneren "Indargabetze Eredua" (1983) antzekoak dira. Kasu horietan guztietan, korrontea denboraren mendeko gertakari-sekuentzia gisa deskribatzen da, zirkuituaren osagai erresistiboetatik igaro eta bateriara itzultzen den heinean kontsumitzen da.

McDermott & Shafferrek (1992) ere eredu hori aipatu zuten unibertsitateko lehenengo mailako ikasleekin egindako ikerketan. Aipatutako ikasleen ehuneko handi batek korrontea kontsumitzen dela uste zuten ebidentziak aurkitu zituzten: bateriak etengabe ekoizten du korrontea eta zirkuituko elementuek kontsumitzen dute.

Eredu hau Borges & Gilbertek (1999) "Elektrizitatea Mugimenduan dauden Karga gisa Eredua" izendatu zuen. Maila aurreratuko ikasleei, teknikari batzuei eta ingeniari gutxi batzuei, korrontea eroale batean zehar mugitzen diren karga elektrikoetan datzala iruditzen zaie. Bateria elektrizitate iturri aktibotzat jotzen dute, hau da, kargetara erreakzio kimiko baten bidez banatzen den energia ekoizten du. Nabariak dira zirkuituko elementuen bipolaritatea eta zirkuitu itxi baten beharra, korrontek zirkulatu dezan. Zirkuituaren portaera denboraren mende dauden gertakarien sekuentzia bat erabiliz azaltzen da. Ziur asko, gertakarien sekuentzia hori, kausa eta efektuen kate-arrazoiketaren ondorio da. Banakako osagaien portaeran dago enfasia, eta, beraz, eredu hori erabiltzen dutenak ez dira gai izaten zirkuitu bat sistema interaktibo gisa hautemateko.

Grotzerrek (2004) eredu hau "Eredu Sekuentzial Ziklikoa" izendatu zuen. Bere liburuan, eredu hau denboraren mendeko gertakari-sekuentzia gisa deskribatzen du.

“Korrontea zirkuituko osagaietatik igaro ahala kontsumitzen da, nahiz eta frakzio bat bateriara itzultzen den. Hau da, ikasleek kausa-efektu kate sekuentziala den arrazoiketa lineala erabiltzen dute. Gainera, nahiko ohikoa da, eta bereziki erresistentea aldaketarekiko. Unibertsitatean fisikako irakasgaietan parte hartu eta azterketak gainditu dituzten ikasleengan mantentzen da baita ere. Eredu hori gainditzeko, arreta jarri behar zaio zirkuituari sistema gisa, eta arreta zirkuituaren osagaietan modu sekuentzialean jarri beharrean, aldiberean zer gertatzen den pentsatu behar da, ”

Aldibereko zirkuitu itxia

Ikerketak (Cohen et al., 1983; Shipstone, 1984; Kärrqvist, 1985; Borges & Gilbert, 1999; Grotzer, 2004) bat datoz aldibereko zirkuitu itxiaren eredua definitzean. Honako ezaugarri nagusiak definitzen dira:

Eredu horretan ere, eroale batean elektroiak mugitzean datza korrontea. Kasu honetan, ordea, aurrekoan ez bezala, korrontea zirkuituko osagaien artean partekatzen da aldi berean. Kausalitatea zaila da ulertzen, elektroiak aldaratu egiten direlako eta aldi berean aldaratzen dutelako, korronte elektrikoa zirkuitu osoan zehar sortuz. Elektroiak aldaratu egiten dira haien artean eta, aldi berean, zirkuituan dauden gainerako elektroiak aldaratzen dituzte, eta hori da fluxuaren arrazoia eta bonbilla piztearen arrazoia. Elektroifluxua dagoen une berean (etengailua ixten den unean, zirkuitu itxiaren nozioa dakarrena) bonbillaren harizpiak berotu egiten dira eta hau piztu egiten da. Bateriak elektroiak haren polo positibotik polo negatibora garraiatzeko lana egiten du.

Zirkuituaren portaera-mekanismoak honakoa azaltzen du: zirkuitua itxita dagoenean, elektroiak elkar aldaratzen dira eta zirkuituan zehar ibiltzen dira

bateriaren polo negatiboko gehiegizko elektroiek aldaratzen dituztelako, protoi gehiegi dituen polo positiboraino.

Arrazoibidean, ez dago kausa-efektu lehentasunik: kausa ez dago efektuaren aurretik, kausa maila lokalean eta maila sistemikoan batzen da, hau da, dena batera mugitzen da.

Kärrqvistek (1985) "Korronte iturri konstantearen eredua" deitzen dio eredu horri. Korrontearen zirkulazioa modu ziklikoan deskribatzen zuen, baita zirkuitu itxi baten beharra ere. Dena den, Kärrqvisten ereduan, bateria korronte konstantearen iturri bezala ikusten da, hau da, bateriak hornitutako korrontea beti bera da, zirkuituaren ezaugarriak axola gabe. Eredua hau Cohen et al. (1983) aurkeztutakoaren antzekoa da, eta Shipstoneren (1984) "Banaketa-ereduaren" ezaugarri batzuk erakusten ditu. Shipstoneren arabera, eredu hori ikasleek zirkuituaren funtzionamenduari buruzko arau batzuk barneratzearen ondorio da.

Grotzerrek (2004) "Aldibereko Eredua Zikliko" izena ematen dio. Behin ikasleek kablea elektroiek (eta protoiak eta neutroiak) dituzten atomoz osatuta dagoela ikasten dutenean, zirkuitua piztu aurretik kable osoan elektroiek daudela ulertzen dutela aipatzen du. Elektroiek aldaratu egiten dira eta, aldi berean, zirkuituan dauden gainerako elektroiek aldaratzen dituzte, eta hori da fluxuaren arrazoia eta bonbilla piztearen arrazoia. Elektroiek bateriaren terminal negatiboan kontzentratzen dira. Elektroiek elkarrengandik aldaratzen direnez, kablea konektatu eta zirkuitua osatzean, elektroiek zirkuituan zehar ibiltzen hasten dira (bateriaren polo negatiboko gehiegizko elektroien aldarapenagatik) polo positiboraino (gehiagizko protoiak dituen). Elektroiek kabletik ibiltzen hasten direnez, dagoeneko kablean dauden elektroiek ere mugitzen hasten dira. Hau da, elektroiek bakoitza aurrekoak aldaratzen du, eta horrela hurrenez hurren. Protoiak ez dira mugitzen. Fluxua dagoen une berean, bonbillaren harizpiak berotu eta piztu egiten dira. Elektroiek kontserbatu egiten dira, bateriara itzultzen

dira, non gehiegizko protoiek erakartzen dituzten. Bateriaren kimikoek "lana" egiten dute elektroiak bateriaren terminal negatibora berriro eramateko. Ezinezkoa da osagai batek aurrekoa gabe funtzionatzea, eta, beraz, eredu hau bizikleta kate batekin konparatu ohi da. Grotzerren arabera, eredu horrek korrontea zirkuituko osagaien artean aldi berean partekatzen dela ulertzen laguntzen die ikasleei. Kausalitatea ulertzea zaila da, elektroiak aldaratu egiten direlako eta aldi berean beste elektroi batzuk aldaratzen dituztelako. Kausen eta efektuen arteko denbora-lehentasunaren ideia alde batera uztea ere eskatzen du. Aldiberekotasuna dago. Garrantzitsua da zirkuitua sistema gisa ulertzea.

Ohmen Eredua

Hainbat ikerketak (Osborne, 1983; Shipstone, 1984; Kärrqvist, 1985; Borges & Gilbert, 1999; Grotzer, 2004) bat egiten dute eredu hori definitzerakoan. Eredu hori Kärrqvistek (1985) izendatu zuen, eta ezaugarri nagusi hauek ditu:

Korrontea eroale baten barruko elektroi mugimendu gisa definitzen da. Eredu honetan, lehenengoz, elektroikontzentrazio ezberdinak jartzen dira agerian zirkuituan, eta zirkuitua sistematzat hartzen da. Korrontea kontzentrazioek emandako desoreka-erlazioaren ondorio da, kontzentrazio handiagoko eremuak baitaude. Bateria da poloetan elektroikontzentrazioen desberdintasun horiek sortzen dituen, eta horrek, aldi berean, potentzial-diferentzia bat sortzen du.

Beraz, korrante-ekoizpenaren mekanismoa zirkuituko puntuen arteko potentzial-diferentzia da.

Erabilitako arrazonamendua erlaziozkoa da, non bi aldagaien arteko erlazioaz emaitza baten kausa bezala pentsatu behar den (eta ez aldagai edo gertaera bakarra hartu kausa gisa).

Kärrqvistek (1985) Ohmen Eredua honela definitzen zuen ereduia izendatu zuen: korrontea zirkuituan zehar doa energia transmitituz. Korrontea kontserbatu egiten da, eta ondo bereizten da energiatic. Zirkuitua elkarri eragiten dion sistema oso bat bezala hertzen da, zirkuituko puntu batean aldaketa bat sartzen denean aldaketa horrek sistema osoari eragiten dio. Eredua hori Osbornek (1983) eta Shipstonek (1984) aurkitutako "Eredua Zientifikoari" dagokio. Beraien ikerketaren arabera, zenbat eta formazio handiagoa jaso orduan eta ohikoagoa da eredu hau.

Borges & Gilbertek (1999) antzeko eredu bat aipatzen dute, eta "Elektrizitatea eremu fenomeno gisa" deitzen diote. Borges & Gilbertek eredu honetan, korrontea eta energia bereizten dira, eta potentzial-diferentzia baten eraginpean elektrikoki kargatutako partikulen mugimendu bezala ulertzen da korrontea. Korrontea zirkuitu itxietan baino ez da zirkulatzen eta kontserbatu egiten da; zirkuitua osatzen duten elementuen bipolaritatea ere ezagutzen da. Bateriak bere terminalen artean potentzial-diferentzia bat mantentzen du, eta honek eremu elektriko bat sortzen du. Horrek, azken batean, karga elektrikoak eroaletik mugitzea eragiten du. Borges & Gilbertek arabera, eredu mental hau dutenek energia eraldaketei ere erreferentzia egiten diete, baina zirkuitu batean gertatzen diren prozesuak azaltzen dituzte, kargen gainean jarduten duen eremu elektriko baten terminoetan. Zirkuitua elkarri eragiten dion sistema oso bat bezala hautematen da, eta bertan aldaketa bat gertatzen denean, perturbazio elektriko bat zirkuituan zehar hedatzen da egoera geldikor berri bat ezarriz. Subjektuek oraindik ulertzen dute korrontea kargen mugimendu gisa, baina beharrezkoa denean eremuan oinarritutako azalpenak emateko gai dira. Eredua hori nahiko arrunta da fisikako irakasle eta ikasle tekniko gutxi batzuen artean. Aipatutako ikerketaren arabera, pertsona batzuek antzeko eredu mentala hartzen dute, baina desberdintasun batzuekin. Zirkuituaren portaeraren deskribapen funtzionala egiten dute, energiari eta tentsioari dagokienez. Hau da, energia-eraldaketei buruz hitz egiten dute maiz, baina ez dira horiek deskribatzeko gai

izaten. Zirkuitua modu holistikoan ikusteko gai izaten dira, ez baitute denbora-sekuentziarik erabiltzen zirkuitua deskribatzeko, eta ez dute osagai bakoitzaren portaeran jartzen fokua. Dena dela, pertsona horiek ez dute zirkuituaren funtzionamendua eremu elektrikoa erabiliz azaltzen; horregatik, ezin dute behar bezala azaldu zergatik pizten den bonbilla etengailua piztu eta berehala.

Grotzerrek (2004), eredu "Erlazio-eredu" izendatu zuen. Bere hitzetan eredu honek zientifikoki onartutako potentzial elektrikoaren kontzeptua du oinarri. Kargen diferentziala eta hauen oreka ditu ardatz. Bateriaren polo negatiboan elektroio gehiegi egoteak, elektroio kantitate txikiagoa izateak eta bateriaren polo positiboan protoi gehiegi egoteak diferentzial bat sortzen dute, eta elektroioak kontzentrazio handieneko eremuetatik elektroio kontzentrazio txikieneko eremuetara igarotzen dira. Bateriaren kimikoek "lana" egiten dute elektroioak bateriaren terminal negatibora berriro mugituz. Potentzial elektrikoaren kontzeptuak kausazko arrazoibide erlazional bat dakar, non bi aldagairen arteko erlazioari buruz pentsatu behar den emaitza baten kausa gisa (eta ez aldagai bat edo gertaera bat kausa gisa). Eredu horrek bulkada elektrikoak kabletik zergatik hedatzen diren ulertzen laguntzen die ikasleei. Gainera, zirkuituan Ohmen legea erabiliz pentsatzeko eta tentsio, erresistentzia eta azkenik korrante erabiltzeko baliagarria da. Sistema osoa hartzen du kontuan, eta aldagai ezberdinek bertan nola eragiten duten.

Hainbat ikerlanek erakutsi dute ikasleek sortzen dituzten eredu alternatiboen aniztasunaren arrazoi-tako bat honakoa izan daitekeela: behatzen dutenaren eta ematen dituzten azalpenen arteko ondorioak ezartzeko erabiltzen dituzten arrazoibideak (Barbas & Psillos, 1997). Kontuan hartu beharko litzateke zailtasun horiek ez direla berariaz elektrizitatera mugatzen, prozesu fisikoak barne hartzen dituzten beste gai batzuetan ere agertzen baitira (Driver et al., 1994; Barbas & Psillos, 1997). Bi iturri nagusi daude arazo horietarako: Lehenbizikoa, zirkuitu elektrikoak ulertzeko behar den arrazoibide sistemikoaren (osagai guztiek

elkarren artean elkar eragiten duten eta edozein perturbazio norabide guztietan hedatzen den sistema gisa ulertuta) eta arrazoiketa kausalaren artean funtsezko aldeak daudela. Bigarrenik, ulermen egokia lortzeko beharrezkoak diren elkarren segidako eredu zientifikoen mailen artean loturarik ez egotea. Zehatzago esanda, maila makroskopikoko aldagaiak erabiliz zirkuituen deskribapen kualitatiboaren eta maila mikroskopikoko ereduak deskribatutako azpiko prozesuen artean asoziaziorik ez egitea.

Atal honetan, erresistentziak dituzten korronte zuzeneko zirkuituen azalpena (eta horrek berekin dakartzan lege fisikoak, materiaren eredu mikroskopikoak eta elektrizitatearen hainbat kontzeptu elkartzeko koherentzia) ikasleengan ikasteko zailtasun iraunkorrak dituen gaia dela erakusten duten ebidentziak aurkitu ditugu. Ikasleek zirkuitu elektrikoei buruz arrazoitzen dutenean, elektrizitatearen oinarrizko kontzeptuak integratu eta aplikatu behar dituzte, hala nola karga elektrikoa, potentzial elektrikoa, korronte elektrikoa eta eremu elektrikoa. Laburbilduz, honako hau egiaztatu dugu:

i) Bigarren hezkuntzako eta unibertsitateko ikasleen ehuneko handi batek elektrizitateari buruzko ezagutza modu zatikatuan erabiltzen du, elektrostatika elektrodinamikarekin lotu gabe. Ikasleek elektrostatikako kapituluak eta korronte zuzeneko zirkuituetakoak bi eremu bereizi gisa ulertzeko joera dute (Eylon & Ganiel, 1990; Bensheguir & Closset, 1996; Bagno & Eylon, 1997; Guruswamy et al., 1997; Hazelton et al., 2013).

ii) Ondo ezarrita dago zirkuitu elektrikoekin tratatzen direnean ikasleei ikasteko zailtasunik handienak eragiten dizkien kontzeptuetako bat potentzial elektrikoa dela. Gainera, ikasleak ez dira gai korrontearen eta potentzialaren arteko aldeak modu sendoan definitzeko. Sarritan ez dute ulertzen zirkuitu bateko bi punturen arteko potentzial-diferentzia zirkuituaren topologiaren araberakoa dela (Rhöneck, 1981; Closset, 1983; Guisasola et al., 2010). Härtelek (1985) aurkitu zuen ikasleek KZ zirkuitu baten bateria "korronte konstantea" hornitzen duen tresna

gisa ulertzen dutela, poloen arteko potentzial-diferentzia modu konstantean mantentzen duen tresna gisa ordez. Ikasleek zirkuitu elektrikoei buruz dituzten ideiei buruzko hainbat azterlanek ondorioztatzen dutenez, ikasleen azalpen asko elektrizitatean oinarritzen dira fluido gisa, fenomeno makroskopikoak deskribatuz, baina ez dira kargen izaera mikroskopikoari eta horien gainean jarduten duen eremu elektrikoari buruz mintzatzen (Thacker et al., 1999).

iii) Bigarren hezkuntzako eta unibertsitateko hezkuntza-mailetakoko ikasleek erresistentziak dituzten korrante zuzeneko zirkuituen funtzionamendua azaltzeko daukaten moduari buruzko ikerketa asko daude. Ikusi da ikasle kopuru esanguratsu bat dagoela zientifikoak ez diren azalpen-ereduetan oinarritzen dena, eta horien konplexutasuna eta eredu zientifikoarekiko hurbiltasuna hezkuntza-mailaren arabera da (Fredette & Lochhead, 1980; von Rhöneck, 1981; Millar & King, 1993; Barbas & Psillos, 1997).

1.1.2. Elektrizitatea eta zirkuitu elektrikoak irakasteko zailtasunak

Ikerketa batzuen arabera, unibertsitate mailako hastapeneko fisikan sarri eten bat dago elektrostatika eta zirkuitu elektrikoaren gaiak aurkeztean (Thacker et al., 1999; Chabay & Sherwood, 2006). Elektrostatikan, karga elektrikoetan, kargen banaketak sortutako eremu elektrikoan eta potentzial elektrikoan jartzen da arreta. Ondoren, hurrengo kapituluan, baterietan, erresistentzietan, korrontean eta kondentsadoreetan enfokatzeko da. Hala ere, unibertsitate mailako sarrera-fisikako testuliburuetan oso gutxitan lantzen dira eremu elektrikoak jokatzen duen rola elektroien mugimenduan edo zirkuituko eremu elektrikoaren eta potentzial-diferentziaren arteko erlazioa. Jakina, unibertsitate mailako testuliburu gehienek esplizituki definitzen dituzte eremuaren, potentzial-diferentziaren eta korrante elektrikoaren arteko erlazioak, baina normalean enfasi handiagoa egiten da kontzeptu eta legeen arteko erlazio kuantitatiboaren komunikazioan, kontzeptu eta

lege horiek partikula mikroskopikoekin fenomeno makroskopikoak azaltzen dituen "elektroi ereduan" jokatzeko duten rolean baino.

Testuliburuetan makro-mikro erlazio hori urrats bakar batean adierazten da (Stockmayer & Treagus, 1994). Adibidez, korrante elektrikoa honela definitzen da, maila mikroskopikoan: $I = n \cdot q \cdot v_d A$. Gero II. Atalean, erresistentziak dituzten zirkuituetarako Ohmen legea $I = \Delta V / R$ definitzen da maila makroskopikoan (Tipler & Mosca, 2007), eta jarraian $I = \Delta V / R$ eta $E = \rho J$ ekuazioetan arteko erlazio matematikoa (Fishbane et al., 1993). Hala ere, azalpen-prozesuan urrats hori jauzi handia da, abstrakzio-maila nabarmen handitzen baita mundu ikusgarritik mundu abstraktu eta mikroskopikora (Stockmayer & Treagus, 1996).

Elektrizitate sarrerako-ikastaro askotan, zirkuitu elektrikoaren teoriaren muina KZ zirkuituen oinarriko lege batzuk dira, non ikasleek nagusiki modu aljebraikoan arrazoitzen ikasten duten. Zirkuituan falta diren tentsioak (V), korranteak (I) edo erresistentziak (R) aurkitzen ere ikasten dute, parametro baterako eta besterako balioak kalkulatu, aldagaien arteko elkarrekintza modu kualitatibo batean kontsideratzeko bada ere, parametro baten aldaketak beste bati nola eragiten dion aurreikusteko. Testuinguru horretan, ikasleek ematen dituzten azalpenak "azalpen homogeenak" dira, sistemaren ezaugarri diren aldagaien arteko harremanei buruzkoak soilik, eta horiek zirkuituaren egoera geldikorrean bakarrik betetzen dira, eta aldakortasun eza adierazten dute eraldaketa jakin batzuei dagokienez (Halbwachs, 1971; Barbas & Psillos, 1997). Azalpen homogeen horiek a-problematikoak dira, hau da, ez dute zirkuituaren bilakaera deskribatzen eraldaketa baten ondoren, esan nahi da, egoera iragankorretan. Beraz, azpiko prozesu dinamikoei buruzko informazio gutxi ematen dute, eta horiek dira sistema baten egoera geldikorra nola lortu den erakusten dutenak (Barbas & Psillos, 1997). A-kausalak ere badira, eta, beraz, ikasleen arrazoibide

kausaletatik urrun daude, hau da, haien azalpen-indarra erlazioen aldagaiezintasunean eta simetrian oinarritzen da. Beraz, ikasleei harremanen interpretazio kausalak eraikitzen uzten zaie, eta egoera hori Rainson et al. (1994) "formula baten kausalitatea" bezala ezaugarritu zuten.

Eredu mikroskopikoak irakasteko hainbat proposamen egin dira. Eredu horiek kausalak dira eta zirkuitu elektrikoetako egoera iragankor eta geldikorretan daude fokatuta (Chabay & Sherwood, 1995). Proposamen horiek azterketa epistemologikoan eta edukiaren azterketan edo/eta ikasleen arrazoiketaren eta ikusmoldeen emaitzetan oinarritzen dira, eta honako helburu hauek dituzte: ikasleek deskribapen makroskopikoaren eta mikroskopikoaren mailak antola ditzaten sustatzea, egoera geldikorreko legeen azpian dauden prozesuak uler ditzaten sustatzea, lege horien interpretazio kausala saihestea eta zirkuituaren ikuspegi sistemikoa eskuratzea. Irakaskuntza-proposamen horiek unibertsitate mailako hastapeneko fisika testu-liburuetan aurkitu ohi direnak baino xeheagoak eta esplizituagoak direnez, ikasleen arrazoibide kausalaren egiturarekin eta egoera iragankorren ulermenarekin zerikusia duten galdera berriak sortzen dira (Psillos, 1995; Gutwill et al., 1996). Gainera, proposamen horiek erreferentzia argiak ematen dituzte ikasleen eskaera kognitiboen izaera identifikatzeko eta ikertzeko, prozesu fisikoen eredu mikroskopikoari eta zirkuitu elektrikoaren funtzionamendua azaltzeko mekanismoen inguruneari dagokienez.

Elektrizitatearen irakaskuntzan dagoen zailtasun nagusietako bat neurketen maila makroskopikoaren eta azalpenen maila mikroskopikoaren arteko erlazioa da. Izan ere, fisikak etengabe erabiltzen ditu natura ulertzeko eraikuntza oinarritzat har daitezkeen partikulen mundu mikroskopiko ikusezina eta haien arteko harremanak. Egiturak, mugimenduak eta interakzioak barne hartzen dituen partikulen mundua kritikoa da edozein gai fisikorentzat (Harrison & Treagust, 2002; Besson & Viennot, 2004). Hau zientzialarien pentsatzeko edo arrazoitzeko modu garrantzitsu bat da, eta materiaren eredu atomikoa eta bere

propietate estrukturalak barne hartzen ditu. Horregatik, fenomeno makroskopikoen eta mundu mikroskopikoaren arteko arrazanamendua fisikan irakatsi beharreko gaitasun zientifiko garrantzitsua da. Hala ere, makro/mikro arrazanamendua eskasa eta arazotsua dela adierazi da, ikasleek partikula mikroskopikoei propietate makroskopikoak egozten dizkietelako normalean (Millar, 1990; Albanese & Vicentini, 1997).

Elektrizitatearen irakaskuntzan partikulen eredua (elektroiak) aurkezten da, partikula mikroskopikoekin fenomeno makroskopikoak azaltzeko eredu orokor gisa. Ikasleentzat, ordea, zaila da fenomeno makroskopikoak partikulen mundu mikroskopikoari lotutako azalpenarekin lotzea. Partikulak eta maila mikroskopikoan dituzten harremanak ikastea arazo dira ikasleentzat, teoria atomikoa abstraktua delako eta perspektiba oso eskematikoak erabiltzen dituelako. Adibidez, elektroiak hodi batean bola txiki gisa mugitzea korrante elektrikoa azaltzeko, edo karga puntualak edo karga idealak erabiltzea interakzio elektrostatikoak azaltzeko (Eylon & Ganiel, 1990).

Testuliburuetan, korrante elektrikoko makro/mikro erlazioen analisia urrats bakar batean egiten da (Stocklmayer & Treagust, 1994; Stocklmayer & Treagust, 1996). Pauso hori oso luzea da, abstrakzio maila nabarmen handitzen delako mundu bisualetik mundu abstraktu mikroskopikora. Beste arazo bat da partikulen ereduak fenomeno makroskopikoen erantzule bakar gisa duen erabilera mugatua. Oso fenomeno elektriko gutxi daude elektroiei (edo partikula) eredua bakarrik erabiliz azal daitezkeenak, eta fenomeno makroskopikoen azalpenak materiaren egituraren propietateekin osatu behar dira.

Elektrizitatearen irakaskuntzan, beharrezkoa da esplizituki erakustea makro/mikro erlazioak, materiaren egituraren propietateak barne. Fenomeno makroskopikoak azaltzen dituzten maila mikroskopikoko mekanismoen erabilera esplizitua, fenomeno makroskopikoen eta maila mikroskopikorako ulermenaren

arteko jauzia gainditzeko zubia izan daiteke. Bigarren hezkuntzako irakaskuntzan edo unibertsitateko sarrera-mailetan, oso garrantzitsua da ereduaren eskala baten edo bestearen azalpen-indarra. Deskribapen mikroskopiko bat konplikatuegia eta oso zaila baldin bada, alternatiba gisa deskribapen makroskopiko huts bat aurkitzeko beharra egongo da. Maila mikroskopikoak sarritan fisika kuantikoaren testuingurua behar du, eta hori ez da fisika klasikoaren curriculumaren helburua.

Zirkuitu elektrikoak modelatzean makro-mikro alderdiak esplizituki ez aipatzearen arrazoia, hein batean, elektro-ereduaren ezaugarri guztiak kontuan ez hartzea izan daiteke. Zirkuitu elektrikoaren irakaskuntzaren hurbilketa tradizionalak enfasi falta hori justifikatuko dute, kasu askotan ikasleek zenbakizko ariketetan erantzun zuzena lortzen dutela adieraziz, kontzeptuen makro-mikro alderdiak bereizteko gai izan gabe (adibidez, Kirchhoffen legeen aplikazioak erabiliz). Beraz, elektro ereduan parte hartzen duten kontzeptuen alderdi mikroskopiko eta makroskopikoaren arteko aldea nabarmentzea merezi ez duela argudia liteke.

Askotan, ordea, deskribapen makroskopiko hutsarentzat alternatiba bat aurkitu beharra dago. Maiz, maila makroskopikoetan geratzen gara, horrelako azalpenekin: "Lege honek, edo beste lege honek, gauzak horrela izan behar duela esaten digu". Horrelako azalpenak ez dira nahikoak ikasleak asetzeko, batez ere ikaskuntzan ikusmolde alternatiboak agertzen direnean. Are gehiago, gero eta adostasun handiagoa dago elektrizitatea eta KZ zirkuituak gobernatzen dituzten fenomeno mikroskopikoak ikasteak ikasleei dakartzkien onurei buruz (Hirvonen, 2007). Berez abstraktua denez, elektrizitateak oinarri bikaina ematen du ereduaren eraikuntza eta deskribapen makroskopiko eta mikroskopikoaren mailen arteko kontzeptuen lotura irakasteko. Eredu horiek, azterketa epistemologikoan edo edukiaren azterketan eta/edo ikasleen zailtasunen eta arrazoiketen azterketan oinarritzen dira. Haien helburua ikasleengan deskribapen makroskopiko eta mikroskopikoaren mailen artikulazioa sustatzea da (Härtel, 1982;

Knight, 2013; Chabay & Sherwood, 2015) Adibide dira, gainazaleko kargen gradientean oinarritutako eredu mikroskopikoa edo eremu elektrikoan oinarritutako eredu bat erabiltzen duen KZ zirkuituen teoria (Jefimenko, 1966; Sommerfeld, 2003). Ikerketa horien arabera, azalpen bat maila makroskopikokoa da magnitude fisiko jakin batzuetan zentratzen denean, adibidez, erresistentzia, korrontea eta potentzial-diferentzia (zirkuituaren ikuspuntu orokor batetik). Korronte konbentzionala eta magnitudeak aipatzen dituzte definizio operazional mailan (adibidez, Ohmen legea edo potentziala eta eremua lotzen dituen ekuazioa). Halaber, azalpena maila mikroskopikokoa dela kontsideratzen dute, elektroioi, korronte elektriko edo karga-dentsitateari dagokionez tokian tokiko mailan enfokatzan denean (Griffiths, 2005). Argi eta garbi, abantaila litzateke ikasleek zirkuituak eremu elektrikoaren arabera eta honek elektroiekin duen elkarrekintzaren arabera ulertzea, hau da, maila mikroskopikoan ulertzea ohituta baleude (maila makroskopikoan korronte konbentzionala ekarri ala ez). Aitzitik, elektostatika ikasi ondoren, askotan ikasleek egoera berri bati aurre egin behar izaten diote (adibidez, fenomeno elektrozinetikoak), fenomeno berrietara eramateaz gain (kable batean mugitzen diren kargak), eta aurre egin behar izaten diote aurretiaz duten ikuspuntuari (korrontea kable batean zehar ibiltzeko eremu elektriko baten beharra dagoela).

1994an, kablearen gainazaleko kargen gradientearen bidez kable batean korronte elektriko sortzeko mekanismoa azaltzen zuen lehen testuliburua sortu zen, unibertsitate mailako hastapeneko fisika ikasleentzat egokia zen maila batean (Chabay & Sherwood, 1994). Testuliburu berri horrek irakasle eta ikertzaileak inspiratu zituen irakaskuntzan gainazaleko kargetan oinarritutako eredu mikroskopikoak aplikatzeko aukerak aztertzerara. Besteak beste, Thacker et al-ek (1990) erakutsi zuten korronte zuzeneko zirkuituetako fenomeno makroskopikoak ulertzeak mikro mailako prozesu ezkutuak azalduko dituzten eredu mikroskopiko koherenteak erabiltzea eskatzen duela.

1.2. KORRONTE ZUZENeko ZIRKUITU BATEN FUNTZIONAMENDUAREN AZTERKETA EPISTEMOLOGIKOA ETA EGUNGO FORMULAZIOA UNIBERTSITATE MAILAKO HASTAPENeko FISIKAN

Kontzeptuak eta teoria zientifikoak ez dira modu miragarrian azaleratzen; arazoak konpontzeko prozesu neketsu baten eta hasierako hipotesien egiaztapen zorrotz baten emaitza dira (Nersseian, 1995). Zientzian, aldaketa dinamikoa eta alterazioa dira araua, eta ez salbuespena. Zientziaren historia tresna baliagarria da zientziak irakasteko, teoriak eta kontzeptuak eraikitze orduan dauden arazoak identifikatzeko, eta horien oztopo epistemologikoak gainditzeko. Gainera, zientziaren historia baliagarria izan daiteke teoria garatu zeneko gizarte-testuingurua eta eskuratutako ezagutzaren ondorio teknologikoak erakusteko (Guisasola, 2014).

Kontzeptuak eta teoriak ulertzeak, gai jakin baten ulermenaren egungo egoera ezagutzeaz gain, kontzeptu hori denborarekin nola garatu eta findu den jakitea ere eskatzen du. Are gehiago, azken hamarkadetan garatu diren hezkuntza-estandarrek kontzeptuak eta teoriak aurkezteko deia egiten dute, ikuspegi historikoa ez ezik, testuinguru zientifiko eta sozialaren irudikapen egokia ere barne hartuta (Galili & Hazan, 2001).

Zientziaren historiak eta filosofiak zientziaren irakaskuntza aberastu dezaketen alorretako batzuk honakoak dira: zientziaren historia, metodo zientifikoaren izaera eta judizio zientifikoaren baliozkotzea. Argudio askok defendatzen dute zientziaren historia curriculumean sartu behar dela, bereziki irakaskuntza-estrategietan. Baina informazio hori guztia sekuentzia didaktikoak diseinatzeko baliagarria izan dadin, beharrezkoa da azterketa historiko eta epistemologiko hori "asmo pedagogiko" batekin eta ikasleek ikasteko dituzten zailtasunen ezagutzarekin egitea. Kontzeptuen eta ereduaren esanahien arteko "etenak"

aztertzeak kontzeptu fisikoak argitzen, azaltzen eta esploratzen lagun dezake, bai eta ikasleek ikasteko dituzten zailtasunak ulertzen ere (Guisasola et al., 2008a).

Elektrizitatearen historiak ikertzaileek elektrizitatearen kontzeptuaren egungo formulaziora iristeko gairak behar izan zituzten zailtasun epistemologiko eta ontologiko garrantzitsuenak erakusten ditu. Elektrizitatearen kontzeptuak abstraktuak direnez eta ikasleek berez dituzten ideietatik nahiko urrun daudenez, perspektiba historikoa garrantzitsua izan daiteke ikasleek ikasteko dituzten zailtasunak identifikatzeko eta landutako eredu zientifikoaren konplexutasuna baloratzeko orduan. Nolanahi ere, alde nabariak daude gaur egungo ikasleen arrazoiak prozesuen eta iraganeko fisikoen zituzten artean, eta hori kontuan hartu behar da irakaskuntzan (Niaz, 1995).

Hurrengo atalean elektrodinamikaren garapena aztertuko dugu 1799an Alessandro Voltak bateria asmatu zuenetik hasita. Korrante zuzeneko zirkuitu elektrikoaren azalpen-teoriako jauzi kualitatibo garrantzitsuenak identifikatu nahi dira, Fisika klasikoko eredu zientifikoaren funtsezko kontzeptuak identifikatzeko informazioa lortu ahal izateko (Guisasola, 2014).

1.2.1. Elektrizitate estatikotik elektrizitate dinamikoaren eremu berrira: Voltatik Kirchhofferraino

XVIII. mendearen amaieran, Aepniusek elektrizitatearen izaerari fluido elektrikoaren teoriarik ekarpena egin zuenetik, zientzialarien helburua elektrizitatea urrutiko akzioaren legean oinarrituta ezartzea izan zen (zeruko mekanikari arrakastara eman baitzion honek). Coulombek (1785) legea ezarri zuenean, hain zen sinplea komunitate zientifikoan adostasuna lortu zuela. Ondorioz, fluido elektrikoaren ereduak ezarri zen. Ondorioz, urrutiko ekintzaren teoriak hartu zuen arreta guztia, harik eta, askoz beranduago, Faradayk

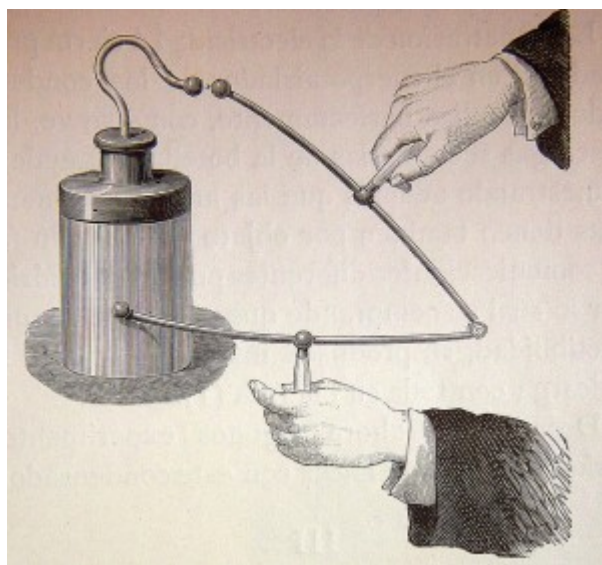
elektrizitatearen teoria azalpen konplexuagoetara gidatu zuen arte, eremu lerroen kontzeptua erabiliz (Whittaker, 1987).

Hala ere, Jean Antoine Nollet-en (baita Du Fay ere) bi fluidoen teoria elektrikoaren jarraitzaileen eta Benjamin Frankliren fluido bakarraren teoria elektrikoaren arteko eztabaidak bere horretan jarraitzen zuen. Nollet-en iritziaren arabera, bi fluidoen teoriak bi elektrizitate mota ezberdin daudela azal lezake, bata bestearengandik oso ezberdinak: beirazko elektrizitatea, beira igurtziak sortua, eta elektrizitate erresinosoa, anbar igurtziak sortua. Franklinek, aldiz, fluido elektriko bakarra zegoela argudiatzen zuen. Horretaz gain zera esaten zuen; elektrifikazio egoera txikiago batek (edo handiago batek) fluido elektrikoa kopuru normal bat baino gutxiago (edo gehiago) duen gorputz baten egoera islatzen duela. Frankliren ikuspuntuaren lehen zailtasun bat elektrizitate erresinosoa (hau da, karga negatiboa) daramaten bi gorputzen arteko aldarapena azaltzean porrot egiten zuela zen, fluido bakarraren ereduak elektrizitate hori likido falta gisa azaldu baitzuen. Zailtasun hau, beranduago, Frankliren ereduak aldatuz gainditu zen arren (Franz Ulrich Teodosio Aepinus), bi ereduaren arteko eztabaida, 1800eko hamarkadara arte luzatu zen (Binnie 2001, Furio et al. 2004).

Teoria elektrikoaren garapen egoera honetan, nagusiki fenomeno elektostatikoei erreferentzia egiten diena, eremu esperimental berri bat sortu zen, Voltaren bateria. Voltaren bateriaren garapena Luigi Galvani medikuak Bolognan aurretik egindako ikerketek eragin zuten. Galvanik, bere esperimentu elektrofisiologikoetan oinarrituta, animalien muskuluak (bereziki igel-nerbioak) prestatzean, giharra "Leyden botila" moduko bat delako ideia garatu zuen, eta nerbio eta giharren eroankortasun elektrikoa animalia-ehunetan elektrizitate mota bat egotearen ondorio dela azaldu zuen. Galvaniren esperimentuek interes handia piztu zuten, eta, azkenean, eztabaida handia eragin zuen "animalien elektrizitatearen" inguruan.

Volta, hasieran Galvaniren teoriaren alde egin ondoren, "animalien elektrizitatea" zalantzan jartzen lehenetarikoa izan zen. Voltak, igelaren uzkurdura muskularrak, "kontaktu elektriko" baten ondorio izan zitezkeela iradoki zuen. Bi metal ezberdinez osaturiko arku galbanikoak erabiltzearen ondorioa lirateke kontaktu elektriko horiek. Bere eredu elektrikoaren egokitasunaren froga esperimental eztabaidaekin bat emateko asmoz, Voltak 1799an "bateria" asmatu zuen: Londresko Royal Society-ri 1800eko martxoan bidalitako gutun ezagunean honela deitu zuen: "organo elektriko artifizia" bat.

Aurreko esperimientuen eta pila voltaikoaren ondorengo garapenaren ondorioz, fisikaren teoriaren parte bihurtu zen, "zirkuitu voltaiko itxi" batean elektrizitatea mugimendu jarraitua izatearen ideia. Zirkuitu elektrikoaren kontzeptua agertzea, baina, nolabait oztopatu egin zen elektrizitate estatikoaren ezagutza zaharraren ondorioz. Elektrizitate estatikotik elektrizitate dinamikoaren eremu berrirako trantsizio zailaren ondorioetako bat bateria "Leyden botila auto-kargagarri" gisa ulertzea izan zen, eta gainera, bateriaren poloetako batekin efektu kimiko eta magnetikoak sortzeko saiakerak ere ekarri zituen (Benseghir eta Closset 1993; Viennot 1996).



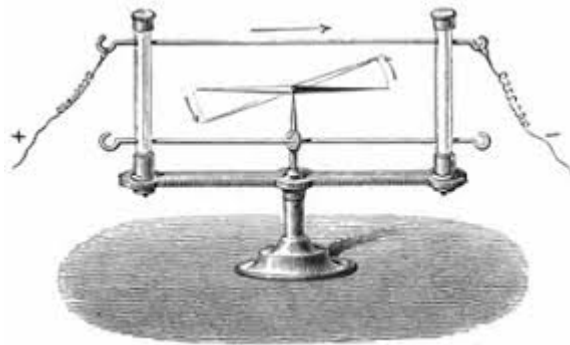
Irudia 1: Leyden botila

XIX. mendeko garai honetan egin zen pila voltaikoaren ikerketa historikoak erakusten du, garai horretan ez zela gaur egun bezain nabarmena pila baten zirkuitu itxiaren eta efektu fisiko-kimikoen arteko erlazioa, ez elektrolisiaren esperimentuetan ezta efektu magnetikoetan ere (Kipnis 2005). XIX. mendean, kontaktuaren teoriaren aurkako eztabaida luze bat eman zen, hau da, Voltaren azalpena, pilaren ekintza bi metal ezberdin kontaktuan jartzen direnean sortzen den ukipen indar baten ondorio baino ez dela dioena (Kipnis 2001; Kragh eta Bak 2000).

Efektu kimikoen adibide gisa, korrante voltaikoaren bidezko uraren elektrolisiarekin esperimentatu zen. Lehen aldiz William Nicholson eta Anthony Carlislek lortu zuten 1800ean, Voltaren aurkintza eta gutxira. Esperimentu honen aurretik txosten bat egin zen, Voltaren pilaren asmakuntzaren aurretik, marruskaduran oinarritutako sorgailu elektrostatiko indartsu batek sortutako uraren elektrolisiari buruz. Hainbat ikertzailek bateriaren polo bakar batekin efektu elektrolitikoak sortzen alferrik saiatu ondoren, De la Rivek azaldu zuen deskonposatu beharreko disoluzioak "zirkulu voltaiko itxi" baten parte izan behar duela eta, honen ondorioz, disoluzioa korrante elektrikoak zeharkatzen duela

jakinarazi zuen. De la Rivek ez zuen zalantzarik bateria batek korrante bat sortzeko "zirkulu voltaiko itxi" bat behar duela, eta honako hau gehitu zuen: "Ziurtatu nuen ezinezkoa dela deskonposizio kimikoak sortzea pilaren polo bakar bat likidoan murgilduz, eta ezinezkoa dela bi pila ezberdinen kontrako bi poloak urperatuz ere" (La Rive 1867).

Oerstedek berak, elektromagnetismoa aurkitu zuenak korrante elektriko batek eragindako orratz magnetiko baten desbideratzearen behaketaren bidez, 1820an, bere esperimenduek frogatua zirudiena jakinarazi zuen, "Orratz magnetikoa aparatu galbanikoak bere posiziotik mugitzen duela, baina zirkulu galbanikoa itxia eta ez irekia izan behar dela" (Oersted 1820; Sarton y Oersted 1928).



Irudia 2: Oersted-en orratz magnetikoa

Oerstedek elektromagnetismoaren aurkikuntza elektrizitate estatikoaren eta elektrizitate dinamikoaren ikerketen arteko bigarren trantsizio erabakigarria izan zen. Korrante elektriko batek iparrorratz baten orratzean duen eraginaren aurkikuntzak, elektrizitatea eta magnetismoa fenomeno bananduak ez direla frogatu zuen (1600 inguruan horrela uste baitzen), efektu bakar baten bi adierazpen baitira. Bateratze hau posible izan zen elektrizitate fluxu konstante bat sortzeko gai zen gailu baten (Voltaren bateria) aurkikuntzaren ondorioz eta Oerstedek espekulazio metafisikoen ondorioz. Bere buruari buruz idatzi zuen bezala, bere atxikimendua "*efektu magnetikoak efektu elektrikoaren botere*

berberak sortzen dituztela" iritziari, hain zuzen ere, "*fenomeno guztiak jatorrizko botere berak sortzen dituela*" dioen printzipio filosofikoan zuen sinesmenaren ondorioa zen (Stauffer, 1957).

1.2.2. Zirkuitu elektrikoak azaltzen dituzten ereduak

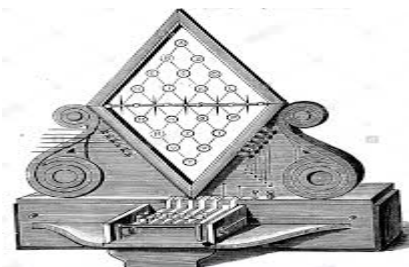
Oersteden aurkikuntzak (korrante elektrikoak sortutako orratz magnetiko baten mugimendu mekanikoari lotutakoa) ekarri zuen emaitza nagusietako bat, telegrafoaren industriaren sorrera izan zen. Oersteden aurkikuntza eta gutxira, Andre-Marie Amperek telegrafo bat sortzea proposatu zuen, alfabetoko letrak beste hainbat hari eroale eta orratz magnetikorekin (Ampere 1820, 73. or.), eta urrutiko telegrafia posible zela planteatu zen. Galdera horri erantzutea zaila izan zen. Hala ere, helburu horretarako ahaleginek zirkuitu baten korrante elektrikoaren inguruko ezagutza garrantzitsua eman zuten.

Urrutiko telegrafiaren arazoa harien eta iparrorratzen bidez argitzen saiatu zen zientzialarietako bat Peter Barlow izan zen. Izan ere, Barlowren helburu nagusia 1700eko azken hamarkadan eman zen karga elektrikoaren izaerari buruzko eztabaidari argitasun pixka bat ematea zen.

Amperek (1800) eman zion fluido elektrikoaren teoriari garrantzia Voltaren bateriaren interpretazioan, Oerstedek aurkitu eta hilabete gutxira, pila voltaikoak sortutako korrante elektrikoak bi fluidoren multzo bezala azaldu zuenean. Pila, fluido hauetako bat mutur batera eta bestea beste muturrera transmititzeko ahalmena duen tresna bat da. Ampereren arabera, bateria baten poloak kable eroale batekin konektatuta daudenean: "emaitza korrante bikoitz bat da, bata korrante positibokoa eta bestea korrante negatibokoa, ekintza elektroeragileak dauden puntuetatik kontrako norabideetan abiatuz, eta zirkuituaren kontrako aldean bilduz" (Ampere 1820, 63. or.). Oerstedek berak iradoki zuen "eroalean

eta inguruan duen espazioan gertatzen den efektuari elektrizitate gatazka" deitu beharko litzaiokeela (Oersted 1820).

1825ean, Barlowk, urrutiko telegrafiaren bideragarritasuna eta fenomeno magnetiko eta elektrikoen erlazioak ikusteko asmoz, korrontearen intentsitatea distantziaren karratuarekiko alderantziz proportzionala zela erakusten zuten neurketak egin zituen. Era berean, Barlowk, Bequerelen (1826) ikerketetan oinarrituz, zirkuituaren kablean zehar doan korrontea konstantea dela ezarri zuen. Beraz, George Simon Ohm zirkuitu elektrikoak gidatzen dituzten legeen eremuan 1825-1827 urteetan sartu zenean, jada egiaztatutako gertaera bat zen korrontearen intentsitatea ez zela zirkuituan zehar aldatzen (Kipnis 2005). Gauzak aldatzen hasi ziren 1830eko hamarkadan, Joseph Henryk eta Philip Ten Eyckek korrontearen intentsitatea distantziarekiko alderantziz proportzionala dela neurtu zutenean, eta ez distantziaren karratuarekiko (Schiffer 2008), eta, garrantzitsuena, Barlowren zailtasuna, distantzia batera dagoen iman baten gainean korrontearen efektua murriztea, intentsitate handiko bateria bat erabiliz gaindi zitekeela ondorioztatu zutenean (berau haril ugariko elektroimana aktibatzekeo gai denean). Ondoren, Charles Wheatstonek eta William Fothergill Cookek lehen telegrafo elektriko praktikoa patentatu zuten (Turner 1983). Hala ere, XIX. mendearen erdialdean telegrafiari buruzko txostenetan "fluido elektrikoaren disipazioaren" ideian oinarritutako azalpenak agertzen jarraitu zuten, non, adibidez, urrutiko telegrafia bat lortzeko ahaleginak oztopatzen zirela aipatzen zen, korronte galbanikoa, hasieran oso indartsua bazen ere, pixkanaka ahulagoa bihurtzen baitzen alanbrean aurrera egin ahala. Hori, zirkuituan korrontearen intentsitatea konstantea dela ezaguna zen arren. Horrek erakusten du teoria berriak antzinakoekin ordezteak, arrazoitzeko eta teoria berriek aurreikusteko eta aplikatzeko ahalmen handiagoa dutela erakusteko denbora bat eskatzen duela.



*Irudia 3: Lehen telegrafo
elektriko praktikoa*

Ohmek ekarpen garrantzitsua egin zuen zirkuitu elektrikoei buruzko azalpenetan, eroankortasun elektrikoaren lehen teoria eraikitzea ahalbidetu zuten emaitza esperimental batzuk lortu zituenean. "Matematikoki ikertutako zirkuitu galbanikoa" izeneko bere liburuan, Ohmek bere "indar elektroskopikoaren" notazioa definitu zuen: zirkuitu elektrikoaren kasurako potentzial elektrikoaren aurrekaria. Ondoren, 'tentsioa' magnitudea (alemanez idatzitako idazkietan 'spannung' hitza erabili zuen) zirkuituaren zati baten muturren "indar elektroskopikoen" arteko diferentzia bezala definitu zuen. Fourierrek bere teoriarik berea eta tenperatura bereizten dituen bezala, sistema batean aldamenean dauden bi zatien arteko bero-fluxua beraien tenperaturen proportzionala dela suposatuz, Ohmen teoriak elektrizitate kantitatea aldagai kritikoa bihurtzen du, kargaren gainazaleko dentsitateak (indar elektroskopikoa) Fourierren teoriarik tenperaturak jokatzen zuen paper bera hartuz. Indar elektroskopikoa 'tresna elektrostatikoa' batekin neurtzen zen termometro batek tenperatura neurtzen duen bezala. Ohmen ereduak paradigma elektrostatikoa zegoen kokatuta.

1847 inguruan Kichhoffek Ohmen legeen azterketari ekin zionean, elektromagnetismoa askoz landuagoa zegoen eta elektrizitatearen eta galbanismoaren arteko distantziak murriztuta zeuden, nahikoa antzekotasun zeuden eta paradigma elektrostatikoa (Alemanian are gehiago) ez zen nagusitzen zena (Varney and Fisher, 1980). Fisikari alemaniarrek, Ohmek eroankortasunari buruz eta Kohlrauschek kondentsadoreetako tentsioen neurketari buruz egindako lanak aztertu ondoren, Ohmen indar elektroskopikoa

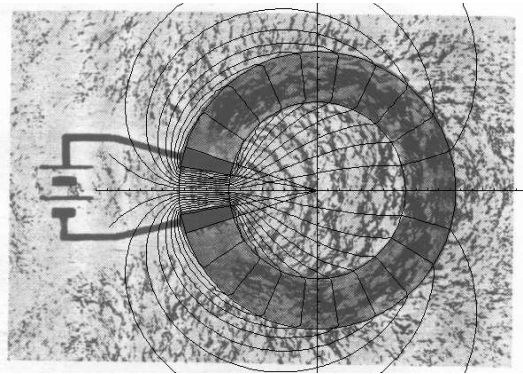
potenzial-diferentziarekin identifikatu zuen. Identifikazio hori energiaren kontzeptua sartzeak ekarri zuen aldaketaren ondorioz izan zen posible. Ikuspegi berri horrek zirkuitu elektrikoaren interpretazio global makroskopikoa ahalbidetu zuen. Helmholtzek berak Kirchhoffen lanak erabili zituen 1847an argitaratutako energiaren kontserbazioaren printzipioari buruzko bere azken lanetan. Kirchhoffek Ohmen lana zabaldu zuen hiru dimentsiotako eroaletara, bere legeak zirkuitu sareetarako azaldu zituen, eta, azkenik, erresistentzien bidez korrantea bultzatzen duen Ohmen "indar elektroskopikoa" eta Lagrange, Laplace eta Poissonen potentzial zaharra berberak direla erakutsi zuen. Baita egoera geldikorrean korrante elektrikoak Jouleren bero kantitatea minimizatzeko helburuarekin banatzen direla ere.

Urte batzuk beranduago, Wilhelm Weberrek (1852), Ampereren analisia, Faradayren esperimentuak eta Fechnerren baieztapena (korranteak, bata bestearen kontrako mugimenduan abiadura berean elektrizitate positiboaren eta negatiboaren kopuru berdinez osatuta daudela) konbinatu zituen, mugitzen ari diren partikula kargatuen artean existitzen diren indarretan oinarritutako teoria elektromagnetiko bat ondorioztatu ahal izateko. Weberrek suposatu zuen korrante elektrikoak kable erresistibo normaletan karga positibo eta negatibo kopuru berdinez osatzen zirela, abiadura berdinekin baina kontrako norabidearekin kablearekiko mugituz. Garai hartan inork ez zekien elektroien existentziaren berri, ez zuten ezta korrantea daramaten kableetako karga mugikorren jito-abiaduren balioaren ideiarik ere. Aurrerago, korrantedun metalezko kableetan elektroien negatiboak soilik mugitzen direla aurkitu zen, ioi positiboak euren kristal-sarearekiko finko mantentzen diren bitartean. Hala ere, Weberrek adierazi zuen korrantea garraiatzen duen eroale bat oro har neutrala den arren, bere gainazalean dentsitate ezberdineko kargak daramatzala (Weber, 1852). Zirkuitu elektriko baten bi punturen arteko potentzial-diferentzia gainazaleko kargen diferentzia batekin lotuta dagoela azaltzen zen lehenengo aldiz.

1.2.3. Kable eroalearen gainazaleko karga-dentsitatearen aldaketaren gaur egungo azalpen-eredua

Korronte elektrikoari buruzko azalpen-ereduek bultzada berriak jaso zituzten elektroien aurkikuntzarekin eta partikula subatomikoak dituen materiaren teoria atomikoarekin. Era berean, Faradayk hasitako eta ondoren Maxwellek 1865ean oinarritutako eremu-teoriak eredu teoriko berriak bultzatu zituen elektromagnetismoan. Esparru kontzeptual horri esker, indarrari lotutako energia kontzeptua garatu ahal izan zen, dela kontserbatzailea (energia potentziala), dela ez-kontserbatzailea (indar elektroeragilea).

1950eko hamarkadan Sommerfeldek hari eroale zuzen baten barruko eremu elektrikoaren jatorria eztabaidatu zuen. Eroaleen barruko eremua kablearen gainazalean dauden kargek sortzen dutela aurkitu zuen, eta, beraz, *gainazaleko karga* izena jarri zien (Sommerfeld, 2013). 60ko hamarkadan, Jefimenko (1966) gainazaleko kargen ereduaren aurretiko teoria bat azaldu zuen eta esperimentalki frogatu zuen existitzen zirela (Jefimenko, 1966). Oro har, kable eroalearen gainazaleko kargen dentsitate-diferentzia kableen eta osagaien barruan eremu elektriko bat eragiten duen mekanismo gisa ikus daiteke. Gainazaleko kargaren banaketak eragindako eremu elektrikoa korrontea garraiatzen duen kable baten barruan korronte elektrikoa sortzearen arrazoia da (Preyer, 2000).



1960ko eta 1970eko hamarkadetan, kable eroalearen gainazaleko kargen esanahiari eta korrante elektrikoaren fluxuarekin lotutako gainazaleko kargabanaketan magnitudeei buruzko eztabaidak aurrera egin zuen (Rosser, 1963-1970), eta zirkuitu baten kableen inguruko gainazaleko kargak erakusteko erakustaldiak eztabaidatu ziren (Moreau, 1985).

Azken bi hamarkadetan, korrante zuzeneko zirkuitu elektrikoaren azalpen-eredua finkatu egin da, kable eroalearen gainazaleko kargen dentsitate-diferentzian zentratuta, ekarpen teoriko eta esperimenteren bidez. Jacksonek (1996) hiru rol identifikatu zituen zirkuitu errealeko azaleko kargentzat: (1) zirkuituan zehar potentziala mantentzen dute, (2) eroalearen kanpoko espazioa eremu elektrikoarekin hornitzen dute, eta (3) fluxu konfinatua ziurtatzen dute, kablearekiko paraleloa den eremu elektriko bat sortuz. Azken rol hori erraz irudika daiteke, korrantea dabilen bitartean tolesten den hari zuzen bat erabiliz. Kasu honetan, feedback mekanismo sinple batek eremu elektrikoa haria tolestu ondoren ere badabilela ziurtatzen du: kargak kurbaren barneko eta kanpoko ertzetan pilatzen dira (tolestutako zatia), metatu diren gainazaleko kargak

sortutako eremu elektrikoak elektroiak kablean zehar mugitzen jarraitzera derrigortzen dituen arte. Metaketa-prozesua oso azkar gertatzen da, bat-batean, ikuspuntu makroskopiko batetik, eta osotu egiten da eremu elektriko osoak kablearen norabidea hartzen duenean eroalearen edozein puntutan (Müller, 2012). Gainera, berriki egindako ikerketek ereduaren indarra erakutsi dute, korrante-konfigurazio desberdinetarako garapen teorikoak eginez (Hernandes & Assis, 2003; Leniz, 2013).

1.3. IKERKETAREN GALDERAK

Atal honen aurrekoek nabarmendu egiten dituzte, kableko gainazaleko kargen gradientearen eredia erabiliz, korrante elektrikoaren sortzeko mekanismoa irakasteak izan ditzakeen onurak, unibertsitate mailako hastapeneko fisika ikasleentzat egokia den maila batean. KZ zirkuitu sinple batean korrantearen zirkulazioa azaltzen duen eredu horri "Gainazaleko Kargen Dentsitate-Gradiente" esaten zaio. Fisikari eta irakasleek gainazaleko kargen mekanismoa irakaskuntzan aplikatu beharko litzatekeela argudiatzen dutela erakutsi dugu, korrante elektrikoak eremu elektrikoarekin eta potentzial-diferentziarekin duen erlazioa azaltzen duelako (Härtel, 1985).

Gaur egun, Gainazaleko Kargen Dentsitate-Gradientearen eredia zirkuitu elektrikoaren jakintza irakasteko instrukzio ikuspegi gisa ikus daiteke. Chabay eta Sherwood bezalako autoreek adierazi duten bezala, ikuspegi horren gakoa zirkuituaren funtzionamenduaren eredia osatzea da, kontzeptu eta ideia abstraktuen bidez eta behaketa makroskopikoak kontuan hartuz. Gainera, ikuspegiaren ezaugarri dira maila atomikoko deskribapenak eta analisiak, baita arrazoibide kualitatiboa ere. Lan honetan, maila atomikoko deskribapenak ez dute efektu kuantikorik barne hartzen eta eredu mikroskopiko deituko ditugu.

Hala ere, ikerketa-galdera oraindik berdina da: ea Kargen Gainazaleko

Dentsitate Gradientearen ereduari oinarritutako irakaskuntza-ikuspegiak eta kontserbazio-printzipioen erabilera lortzen duten korrante zuzeneko zirkuituak hastapeneko fisikako unibertsitate-ikasleentzat ulergarriagoak izan daitezke. Hau da, ikuspegi horren azpian dagoen galdera da: zer arrazoibide-erabilera behar dituzte ikasleek fenomeno elektrikoaren erlazio makroskopikoak eta kontzeptu abstraktuekin lotutako maila mikroskopikoko azalpen teorikoak ulertzeko, hala nola eremu elektrikoa, potentzial elektrikoa edo korrante-fluxua.

Gainazaleko Kargen Dentsitate Gradientearen ereduari oinarritutako irakaskuntza-proposamena egitean, beharrezkoa da jakitea ikasleek zer ikasten duten elektrizitatearen irakaskuntza tradizionala jasotzen dutenean, besteak beste ereduaren oinarriko elementuei dagokienez, hala nola korrante-fluxua, eremu elektrikoa, potentzial-diferentzia eta haien arteko harremanak. Ezagutza hori funtsezkoa da curriculum tradizionalaren aldaketan oinarritutako irakaskuntza-ikuspegi eraginkorrak planifikatzeko, hala nola KZ zirkuitu elektrikoaren oinarriaren irakaskuntza, Gainazaleko Kargen Dentsitate Gradientearen ereduari oinarritua. Horrek guztiak ikerketa-galdera hauetara garamatza:

- 1.- Zein da unibertsitate-mailako hastapeneko fisika ikasleek korrante elektrikoaren funtzionamenduari buruz eta eremu elektrikoaren eta potentzial-diferentziaren kontzeptuei buruz duten ulermena?
- 2.- Zer arrazoibide erabiltzen dituzte unibertsitate-mailako hastapeneko fisika ikasleek eremu elektrikoa eta potentzial-diferentzia kontzeptuak erabiltzen dituztenean, KZ zirkuitu elektrikoek nola funtzionatzen duten azaltzean?
- 3.- Zer arrazoibide erabiltzen dute unibertsitate-mailako hastapeneko fisika ikasleek eremu elektrikoa eta potentzial-diferentzia kontzeptuak erabiltzen dituztenean zirkuitu sinpleetako korrante iragankorreko fenomenoak azaltzeko?

2 Kapituluua:

Esparru Teorikoa eta Metodologia

Bigarren kapitulu honetan ikerketa-lan hau gidatu duten elementu teorikoak eta metodologia jorratzen dira. Horretarako, alde batetik esparru teorikoa eta bestetik ikuspegi metodologikoa garatzen dira, bai eta ikerketaren testuinguruaren eta datuak biltzeko tresnen deskribapena ere.

Esparru teorikoaren atalak ikasleen ikusmoldeak eta zientzien ikaskuntza ezaugarritzen dituzten ikuspegi konstruktibista nagusiak ditu ardatz. Ikuspegi metodologikoari dagokionez, lan honetan ikuspegi fenomenografikoa hartu da eta azalpen-kategorietan sakondu da, zientzien psikologian eta epistemologian oinarrituta dauden arrazoiketa kausalaren teoriak erabiliz.

Kapitulu honen amaieran, datuak biltzeko eta diseinu esperimentalak egiteko erabili diren tresnak deskribatzen dira.

2.1. IKERKETA GIDATZEN DUTEN ELEMENTU TEORIKOAK

Zientzien irakaskuntzaren arloko lehen ikerketak XX. mendearen hasierakoak diren arren (*Science Education*, arloan aitzindaria den aldizkaria, 1916an argitaratzen hasi zen), zientzien ikaskuntza eta irakaskuntza ikerketarako eremu espezifikoa gisa defendatzen duen planteamendua nahiko berria da. Zientzien hezkuntzako edozein ikerketaren helburua ikasleen ikaskuntza hobetzea da, eta, ondorioz, zientzien irakaskuntza eta ikaskuntza aldatzea edo hobetzea ahalbidetuko duten ezagutza eta tresnak ematea.

Berrogeita hamarreko hamarkadaren amaierara arte, ikasgai zientifikoaren curriculumek egonkortasunaldi luzea jasan zuten. Zientzien irakaskuntza-eredua edukien transmisioan eta harreran oinarritzen zen, ia lan esperimentalik gabe eta zientziaren ikuspegi positiboarekin bat etorritik (Gil, 1986). Zientzien "irakaskuntza tradizionala", Del Valek (1985) adierazten zuen bezala, urte askoan zehar, irakasleak arbelean garatu ohi dituen azalpen magistralen bidez ikasleari ezagutzak ahoz transferituz gauzatu behar zelako ideia izan da. Horrela,

zientzien alderdi enpirikoak fenomeno bitxiei buruzko anekdotak erabiliz erakusten ziren, edo laborategiko esperientziaren bat edo beste gauzatuz, landutako eduki teorikoak ilustratzeko. Irakaskuntzaren ikuspegi horrek konnotazio asoziazionista sakonak ditu, terminoaren zentzu negatiboan, ez baititu ikasten duenarengan sortzen diren barne-antolamenduko prozesuak kontuan hartzen, gizakia kanpotik moldekatzeko eta zuzentzeko erraza dela uste baitu (Coll, 1986).

70eko hamarkadan, transmititutako informazioa jasotzearen bidez ikasteko ikuspegi berri bat sortu zen, Ausubel & Sanchezen (2002) ikaskuntza esanguratsuaren teorian oinarrituta. Ikuspegi berri horren arabera, kontzeptu berri bat ikasteko, beharrezkoa da zubi kognitibo bat eraikitzea kontzeptu berriaren eta dagoeneko ikaslearen adimenean dagoen ideia baten artean (normalean, berria baino orokorragoa eta ez hain zehatza). Zubi horri aurretiko antolatzaile deitzen zaio, eta ikaskuntza gaiaren aurretik aurkezten diren ideia orokor bat edo batzuk dira (Ausubel & Sanchez 2002). Eraitza positibo partzialak lortu zituzten eta transmisio- eta harrera-eredua hobetzen lagundu zuten irakasteko eta ikasteko tresnak diseinatzeko orduan, Novak eta bere laguntzaileak (1988) Ausubel eta beste psikologo batzuen egituraketa-ideietan oinarritu ziren.

Joan den mendeko 70eko hamarkadaren amaieran, hezkuntza zientifikoko ikerketan, irakaskuntzari buruzko teoria psikologikoaren bi ikuspegi nagusi erabiltzen hasi ziren erreferentzia teoriko gisa. Lehenengoak Piageten epistemologia genetikoan du jatorria, eta zientzia kognitiboari buruzko bere ideietan (Piaget, 1937). Ikuspegi horren arabera, ikasleek ezagutza zientifikoa ulertzeko, formakuntza eman aurretik zituzten ideiak aldatu behar dira. Beraz, ikasleek zientzien irakaskuntzari nola erantzungo dioten aurreikusteko, funtsezkoa da ikasleek ikaskuntza egoera zehatz baten inguruan duten aurretiko ezagutza ulertzea (Osborne & Wittrock, 1983; Driver & Oldham, 1986). Gaur egun aldaketa kontzeptualari buruzko hainbat ideia daude Piageten

epistemologia genetikoan jatorria dutenak. Teoria horietako batzuk ikasleen "egitura mentalak" deskribatzean zentratzen dira; beste batzuek, berriz, gizabanakoen "egitura mentaletan" aldaketak sustatzen dituzten mekanismoak jorratzen dituzte (Posner et al., 1982; Vosniadou, 1994). Ikaskuntza-ikuspegi horiek, batez ere gizabanakoen egitura mentalen aldaketetan zentratzen direnak, testuinguru sozial batean lan egiten denean gizabanakoek duten ikaskuntzaren deskribapenarekin osatu dira (Driver et al., 1994). Irakaskuntza- eta ikaskuntza-testuinguru sozialetan dagoen interes horrek teoria psikologikoaren bigarren ikuspegi bat ekarri du hezkuntza zientifikoan ikertzerantz, psikologia vygotskianoan sustraiak dituena. Teoria vygotskiar eta neo-vygotskiarrek ikaskuntza eta ezagutzaren eraikuntza gizabanakoen arteko elkarrekintza sozialetatik sortuak bezala ikusten dituzte, kulturalki sortutako tresnen bitartekaritzaren bidez, adibidez, hizkuntza eta liburuak. Ikuspegi hori ikaskuntzaren ikuspegi sozial-konstruktibistaren oinarrian dago (Tobin & Tippins, 1993). Teoria kognitibo horren funtsezko suposizio bat da kognizioa ez dagoela soilik gizabanakoaren adimenea, baizik eta batez ere ikaslearen, ikaskuntza gertatzen den ingurunearen (beste parte-hartzaile batzuk barne) eta ikaskuntza gertatzen den jardueraren artean banatutako prozesu bat dela. Ikaskuntzaren ikuspegi horiek zientzien irakaskuntzan ikerketa-ildo zabalak sortu dituzte (Pfundt & Duit, 1998), ikasleen ikasteko zailtasunak agerian uzten dituztenak. Hain zuzen ere, joan den mendeko 80ko hamarkadaren hasieratik, lehentasunezko ikerketa da ikasleek zientzietan dituzten ideiei eta irakaskuntzaren ondorioz ideia horiek duten bilakaerari buruzko ikerketa (Driver & Erickson, 1983).

Ikasleen eskema kontzeptual alternatiboak edo eredu mentaletan buruzko ikerketek eskertzen diren eremu bakoitzean dituzten aurreideiei buruzko ezagutza zehatza ezar daiteke. Ezagutza hori ezinbestekoa da ikaskuntza-egoera zehatzak behar bezala planteatzeko, irakasleei tresna kontzeptualak emateko (enfasia non egin behar den jakiteko besteak beste), eta curriculumaren helburu espezifikoak identifikatu eta garatzeko. Era berean, eskema alternatiboak aztertzearen interes nagusia zientzien ikaskuntzan orientabide berriak lantzen laguntzea da (Scott,

Asoko & Leach 2008, Guisasola et al., 2012). Ikerketa lan hau ikerketa ildo horretan sartzen da.

2.2. IKERKETAREN TESTUINGURUA

Hemen aurkezten den ikerketa Euskal Herriko Unibertsitatean (EHU) egin da, zehazkiago Gipuzkoako Ingeniaritza Eskolan (Donostia). Parte hartu dutenak ingeniaritzako lehen mailako ikasleak izan dira, Ingeniaritzaren Oinarri Fisikoen ikastaroa ikasten dutenak. Ikasle guztiek lehenago ikasi zuten fisikako ikasturte erdia batxilergoko lehen mailan eta fisikako ikasturte oso bat batxilergoko bigarren mailan, eta, gainera, gainditu zuten selektibitateko azterketa unibertsitaterako sarrera gisa. Horrek esan nahi du lehen ere bazegoela fisikako ezagutza bat aipatutako sarrera-ikastaroa hasi aurretik, hau da, ikasleek oinarrizko ezagutza zutela KZ zirkuituei dagokienez. Gainera, unibertsitatean elektromagnetismoa ikasten hasi aurretik egiten duten *Conceptual Survey of Electricity and Magnetism* (Maloney et al., 2001) testak erakusten du ezagutza egokia dutela Ohmen legea zuzenean aplikatzeko problemei dagokienez, baina ez dute erakusten zirkuitu baten funtzionamendua maila makroskopiko edo mikroskopikoetan azaltzeko eredurik duten.

Aipatutako ikasleek jaso duten irakaskuntza fisika sailean esperientzia handia duten irakasleek eman dute. Ikasleek Paul M. Fishbaneren Stephen Gasiorowiczen eta Steve Thorntonren *Physics for Scientists and Engineers: Extended Version* (2004) testu liburua jarraitu dute (euskarazko edo gaztelaniazko bertsioan).

2.3. ANALISI FENOMENOGRAFIKO ETA ARRAZONAMENDUEN ANALISIA. ANALISIAREN FIDAGARRITASUNA

Atal honetan ikerketa gidatu duen metodologia azaltzen da. Lan hau diseinu quasi-esperimental batekin definitzen dugu, non analisi fenomenografikoa eta arrazoibideen analisisa erabili diren.

2.3.1. Diseinu quasi-experimental

Diseinu quasi-esperimental bat aurkezten da hemen. Sarritan, hezkuntzan ikertzen denean, ezinezkoa da ikertzaileek benetako esperimenduak egitea. Asko jota, Campbell & Stanleyk (1963) "neurketaren nor eta nori" deitzen ziotenaren gaineko kontrola duten benetako diseinu esperimental baten antza duen zerbait erabil daiteke, baina benetako esperimentazioetan funtsezkoa den espozizioen ausazkotasunaren gaineko kontrolik gabe (noiz eta nor espozatzen den) (Cohen et al., 2007). Egoera horiek quasi-esperimentalak dira, eta egoera horietan egiten diren ikerketei diseinu quasi-esperimentalak esaten zaie.

2.3.2. Fenomenografia

Ikerketa honen lehen zatian, ikasleek "erresistentziak dituzten korrante zuzeneko zirkuitu elektrikoekin oinarriak" gaiari buruzko hainbat galdetegiri emandako erantzunen azterketa fenomenografikoa egiten da. Ikerketaren zati honek ikasleek zirkuitu horien funtzionamenduari buruz dituzten azalpen-teoriak edo ikusmoldeak aztertzen ditu, azalpen-eredu zientifiko bat ikasteko zailtasunak agerian uzten dituztenak. Sarritan, ikasleek hezkuntza formalean irakatsitako ikuskera zientifikoez bestelako ikusmoldeak izaten dituzte, eta, horregatik, "Ikuskera alternatiboak" esaten zaie (Duit, Treagust, & Mansfield, 1996). Ikasleen ikuskera alternatiboak hainbat zeregin eta testuingurutan ikertu direnez, ikuskera horien koherentzia kontuan hartu beharreko kontua da (Marton, 1981; Driver, 1986). Beraz, beharrezkoa da ikusmoldeen aldakuntza eta horien berezko ezaugarriak deskribatzen dituen ikerketa-metodologia bat erabiltzea. Horregatik

erabili da analisi fenomenografikoa, populazioak errealitateari buruz dituen azalpen-kategorien aldakuntza deskribatzeko eta azaltzeko erabiltzen den analisi-metodologia delako (Marton, 1981; Booth & Marton, 1997).

Fenomenografiak errealitatea ulertzeko eta hautemateko modu desberdinak jorratzen ditu, eta modu horiek errealitatea deskribatzen duten kategoria gisa sailka daitezke. Kategoria horiek pertsona-kopuru handi batean ikus daitezke, eta, horregatik, irudikapen horiek guztiek adimen kolektibo mota bat adierazten dute elkarrekin. *"Kategorien deskribapen bera agertzen da hainbat egoeratan. Kategorien multzoa egonkorra da eta aplikatu daitezke, baita banakoak kategoria batetik bestera hainbat aldiz mugitzen badira ere"* (Marton, 1981, 195. or.). Metodologia honen helburua errealitatearen alderdiak interpretatzen dituzten pertsonen pentsamoldeak ezartzea eta sistematizatzea da. Ikerketa mota honek, ikertzeko edo ikertzeko beste modu batzuen osagarri, esperientziak deskribatu, aztertu eta ulertu nahi ditu (gure kasuan, Fisikaren teoriak ikasteko prozesuan sortuak); hau da, esperientziak deskribatzera zuzendutako ikerketa da.

Ikuspegi fenomenografikoa duen ikerketak erakusten du fenomenoak, errealitatearen alderdi gisa ulertuta, esperimenduak (edo kontzeptualizatuak) direla kualitatiboki desberdinak diren modu kopuru nahiko mugatu batean. "Zientziaren fenomenografia" pertsonen zientzia hautemateko, esperimendatzeko eta kontzeptualizatzeko moduari buruzkoa izan liteke. Fenomenografian, arlo kontzeptuala zein esperimendatua jorratzen da, baita bizitzen denaz pentsatzen dena ere. Gainera, zer den kulturalki ikasitakoa eta inguruko munduarekin banaka erlazionatzeko garatu diren moduak zeintzuk diren ere kontsideratu daitezke.

Ikaskuntzaren teoria konstruktibistaren arabera (ikus 2.1. atala), oso garrantzitsua da ulertzea ikasleek nola pentsatzen duten irakasten zaienari buruz eta nola erabiltzen duten bakoitzak duen ezagutza. Horregatik, eduki zehatz bat ikasteko zer behar den jakin nahi badugu, arrazoi logikoengatik, ez da nahikoa

gaia ezagutzearekin. Gaiaren ezagutzaz gain, beharrezkoa da ikaskuntzaren eta, oro har, ulermenaren berri izatea. Era berean, berriaz aztertu behar da (ikasleekin) landuko den gaiaren ikaskuntza eta ulermena (kasu honetan, korrante zuzeneko zirkuituak).

Ikaskuntza edukiaren arabera deskribatu behar dela dioen argudioari dagokionez, azpimarratu behar da ikasteko prozesua eta ikaskuntzaren edukia bi alderdi desberdin direla, eta horiek batasun logiko bat osatzen dutela; ezin da prozesurik egon edukirik gabe, eta ezin da edukirik egon, jarduera mental baten terminoetan izan bada. Ikasgelan, ziurrenik, irakasleak edo testuliburu baten egileak aurkeztutako kontzeptuak eta printzipioak ulertzeko ikasleek dituzten modu ezberdinak aurki daitezke beti. Ikasgela gai berri bat lantzen ari den unean, kontzeptua edo printzipioa ikasle batzuek irakaslearen edo testuaren egilearen antzera ulertzen dute, eta beste ikasle batzuek aurrekoaren (irakaslearena edo egilearena) eta haien artean desberdinak diren beste modu batzuetan ulertuko dute. "Baimendutako" kontzepzioa / ikuspegia, zientzia modernoaren ikuspuntuarekin bat etortzea espero dena, kontzeptu edo printzipio hori ikasgelan ulertzeko modu posibletzat har daiteke, eta kasu berezitzat zientziak berak historian zehar izan dituen kontzepzio / ikuspegi desberdinen artean. Hau da, kontuan izan behar da errealitatearen alderdi jakin baten kontzepzio bat, zientifikoki zuzena den ikuspengia gisa onartua, ez dela beti gertatzen den zerbait, ezta nahitaez baliozkoa ere. Historikoki, jada zuzentzat jotzen ez diren beste ikuskera /kontzepzio menderatzaile batzuk egon dira, eta zentzuzkoa da etorkizunean beste batzuk egon daitezkeela pentsatzea (Guisasola et al. 2002). Errealitatearen hainbat alderdiren kontzepzioan /ikuskeran dauden ezberdintasunak ez dira bakarrik gizabanakoen artean edo zientziaren historiako aldi desberdinen artean aurkitzen. Errealitatearen zenbait alderdi interpretatzeko modu indibidualetan maiz gertatzen diren aldaketak aurkikuntza zientifikoaren funtsezko osagaiak dira. Errealitatearen alderdi espezifikoen kontzepzioei buruzko ikuspegia, hau da, pentsamendu- edo esperientzia-edukiak atzematea (hautematea edo kontzeptualizatzea), ikerketa

egiteko abiapuntu gisa, eta aurkikuntzak integratzeko oinarri gisa, fenomenografiaren ezaugarri nagusietako bat da. Ikusmoldeak / kontzepzioak seinalatzeaz gain, munduaren alderdi bateko zenbait kontzepzioren eta beste alderdi bateko zenbait kontzepzioren arteko erlazioak ere adierazi nahi dira. Hau da, ez da soilik ikusmoldeen /kontzepzioen zerrenda bat egitea bilatzen.

Fenomenografiaren ikuspuntutik, kontzeptu bati buruzko ikusmoldeak modu logiko batean deskriba daitezke, eta, horregatik, deskribapen kategoria berak egoera ezberdinetan agertzen dira. Hala, kategorien multzoa egonkorra da eta egoeren artean orokortu daiteke, baita gizabanakoak (ikasleak, adibidez) kategoria batetik bestera hainbat aldiz mugitzen badira ere. Edukien eta egoerentan barrena banakako egonkortasunak ikerketa enpirikoaren jomuga izan beharko luke, finkatutzat eman beharrean. Kategoriek ez dute bilatzen gizabanakoak sailkatzea; gure inguruan dagoen mundua hautemateko moduak deskribatzeko kategoriak dira. Ikerketaren logikaren ikuspegitik, pertsona talde jakin baten errealitatearen alderdi jakin baten ikusmoldeak ikertzean, arrakasta izanez gero, hainbat kontzepzio deskribatzen dira, eta aztertzen ari garen taldearen kategorietako banaketa ere identifikatzen da. Azpimarratu behar da ikuspegi fenomenografikoan, deskribapen-kategoriak emaitzatzat har daitezkeela. Egindako ikerketa baten emaitzak bi alderditan bereiz daitezke: batetik, emaitzak deskripzio kategoria gisa ikus daitezke, etorkizunean kasu zehatzen azterketan erabiliak izateko tresna abstraktutzat jotzen direnak. Bestalde, emaitzak kasu zehatzetan kategorien aplikagarritasunera bideratu daitezke. Ondorioz, bi emaitza-mota daude: deskribapen-kategoriak eta deskribapen-kategoria horietan ematen den banakoen banaketa. Lehen emaitza kualitatiboa da (ikusmoldeak/azalpen-kategoriak), eta bigarrena kuantitatiboa (zenbat pertsonak mantentzen dituzten ikusmolde / kontzepzio horiek).

Deskribapen-kategoriek pentsamendu-formak adierazten dituzte, hautemandako mundua (edo horren zatiak behintzat) ezaugarritzeko elkarrekin jartzen direnak, eta horietara iristen dira pentsamendu-formak bereiziz, bai pentsamendutik bai

pentsalariarengandik. Deskribapen-kategoriak ezartzean, munduaren hainbat alderdi ulertzeko modu posibleen konplexutasuna tematizatzea bilatzen da. Ez bakarrik azpian dauden oinarrizko kontzepzio ezberdinen metaketa, baita ezagutza proposizionalaren forma alternatibo eta kontraesankorrak ere, forma hauek zuzentzat edo okertzat hartzen diren alde batera utzita. Pentsamendu-formen sistema supraindividual hori giza pentsamenduaren deskribatzailea da, bi modutan: lehenik, pertsonak egoera zehatzetan duten pentsamoldea *deskribatzeko tresna* gisa erabil daiteke. Bigarrenik, pentsamenduaren *deskribapen* gisa ikus daiteke (Marton & Pong 2005).

Kategorien arteko egitura-harremanen kasua (ulertzeko modu desberdinak) metodologia fenomenografikoaren azpian dagoen premisa epistemologikoetako bat da. Hala, fenomenografiaren funtsezko premisa bat da deskribapen-kategoria desberdinak logikoki erlazionatuta daudela. Deskribapen-kategoriak eta horiek lotzen dituzten egiturazko erlazioak "emaitzen espazioaren" egitura dira (Akerlind, 2005). Orduan, ikertzailearen helburua ez da soilik kategoria ezberdinen multzo bat ezartzea, baita logikoki barneratzailea den egitura bat proposatzea ere, esanahi ezberdinak erlazionatuz. Emaitzen espazioak giza kolektibo baten fenomeno edo teoria bat ulertzeko moduari buruzko begirada holistikoa ematen du. Idealki, emaitzek gai jakin bat ulertzeko moduen aukera zabala adierazten dute, une jakin batean eta lagin zehatz batentzat.

Booth & Martonen (1997) arabera, irizpide multzo espezifiko bat jarraitu behar da kategoriak sortzean:

- (a) Kategoria bakoitzak lotura argia izan behar du ikerketa-fenomenoekin, eta bakoitzak zerbait esan behar digu fenomenoak esperimendatzeko modu jakin bati buruz;
- b) Kategoriek hierarkikoak izan behar dute edo, bestela esanda, aurrera egin behar da, sinpleetatik harreman konplexuetara; eta
- (c) Sailkapen-sistemak ahal bezain kopuru mugatua eta txikia izan behar du.

Garatutako kategoria sistemak arestian aipatutako irizpideak betetzen baditu, baliagarria izango da teorikoki eta pedagogikoki. Ikertzaileak prest egon behar du bere pentsamendua etengabe doitzeko ikuspegi berrien aurrean. Aztertzen ari den informazioan eta multzo gisa sortzen diren deskribapen-kategorietan mantendu behar du ikuspegia, eta ez banakako informazioan eta kategorietan, hori funtsezkoa baita talde-ulermenean arreta mantentzeko. Prozesu osoa iteratiboa eta konparatiboa da, eta horrek datuak etengabe sailkatzea eta berriro sailkatzea dakar. Garatzen ari diren datuen eta deskribapen-kategorien arteko konparazioez gain, kategorien arteko alderaketak ere egin behar dira (Akerlind, 2005).

Laburbilduz, ikerketa fenomenografikoaren helburua pertsonen fenomeno partikular bat edo inguratzen dituen munduaren alderdi bat ulertzeko dituzten modu kualitatibo desberdinak aztertzea da. "Ulertzeko modu" edo kontzepzio horiek deskribapen-kategorien bidez adierazten dira normalean, eta horiek emaitzen espazio bat osatzeko aztertzen dira erlazio logikoei dagokienez.

Lan honetan Martonek eta Boothek proposatutako irizpideei jarraituz sortu dira kategoriak. Kategoriak zuzenean atera dira galdetegietatik, datuak aurrez zehaztutako kategorietan sartzeko ahaleginik egin gabe. Kategoriak kontzepzio bat eta bestea bereizten dituzten ezaugarri bereizgarrienetan oinarritzen dira, eta hierarkikoki aurkezten dira, ulermen-mailen igoera islatuz. Kategorien deskribapenaren hierarkiak ikusmoldeen arteko lotura erakusten du, eta irakaskuntzari eta ebaluazioari buruzko erabakiak hartzeko oinarri bat ematen du.

2.3.3. Arrazoibide kausala azalpen-kategorien justifikazioan

Metodologia fenomenografikoak identifika ditzakeen azalpen-kategoriak edo errealitatearen ikusmoldeak, zientzia esperimentalen arloan, ereduaren erabileran

eta modelatzean zehazten dira. Ereduak zientzialariek erabiltzen dituzte sistemak nola egituratzen eta portatzen diren irudikatzeko (Nersessian, 2008). Ereduen hezkuntza-balioa nazioarteko komunitateak hezkuntza zientifikoaren funtsezko zati gisa onartzen du (Windschitl et al., 2008). Hala ere, errealitatea azaltzeko ikasleek eredu jakin bat erabiltzen dutela esaten dugunean, ikasle talde bat azalpen-eredu hori eraikitzaera eraman duten arrazoibideak ere izan ohi dira kontuan. Hau da, azalpen-ereduaren deskribapena hura justifikatzeko erabiltzen diren arrazoibide motekin osatzen da. Erresistentziak dituzten KZ zirkuitu elektrikoaren irakaskuntza eta ikaskuntza ereduaren oinarritutako arrazoibide zientifikoaren erabileraren adibide bat da. Beraz, garrantzitsua da korrante zuzeneko zirkuitu elektrikoak modelatzean ikasleen arrazoibide kausalari buruzko galdera planteatzea.

Ikasleek askotan fisikaren ikuspuntutik okerrak diren azalpenak ematen dituzte. Azalpen horiek, zientzia eta psikologia kognitiboaren epistemologiarekin bat etorritik, ikasleen gehiengoarentzat ezagunak diren arrazoibide kausalen ondorio gisa interpretatzen dira (Halbwachs, 1971; Grotzer, 2013). Adibidez, ikasleek arrazoiketa sinple kausala erabiltzen dute (A-k B eragiten du) arrazoibide konplexuagoa beharko lukeen murrizketa-sistema eredu bati aurre egin behar diotenean. Ikasle gehienek arrazoiketa kausalen mota erlatiboki sinpleak baino ez dituzte ezagutzen, baina zientziako kontzeptu eta teoria asko laster deskribatuko den formaren funtsean konplexuagoak diren estiloen mende daude. Lehen ere aipatu dugunez, zientziaren epistemologiaren eta psikologia kognitiboaren esparru teorikoak egokiak dira korrante zuzeneko zirkuituak menderatzean ikasleek dituzten arrazoibideak aztertzeko.

Ikasleen arrazoibide kausalak ikertzeko erabil daitezkeen hainbat elementu teoriko daude (Halbwachs, 1971; Grotzer, 2003; Perkins & Grotzer, 2005; Grotzer & Tutwiler, 2015). Arrazoibide zientifikoaren elementu teoriko horiek ez dira elkarren baztertzailak, eta haien artean osatu ere egin daitezke. Zientzialariek arrazoitzeko moduari buruzko teoria epistemologiko edo kognitibo bakar bat ez

dagoen arren, komunitate zientifikoan oso onartuta dauden arrazoibide mota batzuk laburbil daitezke. Lan honetan ikasleek hainbat galderari emandako erantzunak aztertuko dira, arrazoibide zientifikoei buruzko ikerketa epistemologikoetan oso onartuta dauden lau arrazoibide kausaletan oinarrituz.

Arrazonamendu motetako bat "arrazoiketa kausal sinplea" da, kausaren arabera erlazioa ezartzen duena C kausa jakin baten eta E efektu jakin baten artean (Halbwachs, 1971; Grotzer, 2003). Hori arrazonamendu sinple bat da, fenomenoaren oinarritzko azalpena ematen duena. Adibidez, "Korronte elektrikoak eremu elektrikoa sortzen du kablean" edo "potentzial diferentziak eremu elektrikoa sortzen du".

Bigarren arrazoibide kausal mota bat sisteman hautemandako aldaketaren kausa sistematik kanpo dagoelako printzipioan oinarritzen da, eta hainbat eragileren integrazioa da haren azalpen-ahalmena; arrazonamendu horri "arrazoibide lineal kausala" deitzen zaio. Halbwachsek (1971) arrazoibide kausal mota hau honela definitzen du: kausa-erlazio sinpleak bata bestearen jarraian lotzeko joera, ordena berri batekin harremana osatzeko, kausa-kate bat non kausa oro beste kausa baten emaitza den, edo emaitza oro beste emaitza baten kausa den. Sarritan, kausazko konexio sinple gutxi batzuk ezarri ondoren (A, B, C), arrazoiketa $A \sim B \sim C$ kausazko kate batean gertatzen da, prozesu batek hurrengo sortzen duen prozesu batean, bata bestearen segidan edo aldi berean. Adibidez, "Kableko karga dentsitate banaketak eremu elektriko bat sortzen du kablean. Eremu elektriko horrek potentzial diferentzia sortzen du zirkuituko edozein bi punturen artean, erresistentziaren arabera". Kausazko konexio sinpleen kate bat eraikitzen da A gertaeraren (karga dentsitatearen banaketaren aldaketak eremu elektrikoa sortzen du) eta B gertaeraren (eremu elektrikoak potentzial diferentzia sortzen du) inguruan. Hori zirkuituaren zati bakoitzean gertatzen da, eta, beraz, arrazonamendu lineal honek kate kausal baten forma du: karga-dentsitatearen banaketa \sim eremu elektrikoa \sim potentzialaren diferentzia.

Hirugarren arrazoibide mota bat "arrazoibidea erlazionala edo kausalitate erlazionala" da, eta emaitza sistemaren bi aldagairen (kopuru fisikoak) arteko erlazioari zor zaionean erabiltzen da. Grotzerrek (2003) aurkitu zuen harreman horiek ez direla berez azalpen bat, baina azalpen-izaera dutela, sistemak nola jokatu duen iragartzen dutelako. Adibidez, "Eremu elektrikoa elektroien kontzentrazioaren eta kablearen zabalaren arteko erlazio baten emaitza da". Azalpen honetan bi aldagairen (elektroi kontzentrazioa eta kable zabalera) arteko erlazioak eremu elektrikoaren balioa iragartzen du. Arrazoiketa erlazionalaren kasuan, emaitza batera daramaten sistemaren bi aldagairen arteko erlazioa beharrezkoa da. Aitzitik, arrazoiketa kausal sinple edo lineal kausaletan, ezaugarri nagusia bi gertaera edo gehiagoren arteko lotura da.

Azkenik, ikerketa zientifikoan, Perkins & Grotzerrek (2005) "maila anitzeko arrazoiketa" deritzen laugarren arrazoibide mota bat aurkitzen dugu maiz, non sistemaren deskribapena finagoa den, elkarri lotuta dauden deskribapen-eredu ezberdinak erabiliz; adibidez, Ohm eredu, edo gainazaleko kargen gradientearen mikro-eredua zirkuitu elektriko baten prozesuen azalpen-esparru gisa. Hau da, sistema beraren bi deskribapen korrelazionatzen ditu bi analisi-mailatan (tokiko korrante elektrikoan edo maila sistemiko globaleko korrante konbentzionalean enfokatzen da). Kasu honetan, azalpen-indarra eredu "sakonagoko" legeek hasierako ereduaren legeak ondorioztatzeko aukera ematean datza.

2.3.4. Analisiaren fidagarritasuna

Fidagarritasuna, funtsean, sendotasunaren eta errepikapenaren sinonimoa da denboran, tresnetan eta inkestatutako taldeetan. Doitasunarekin eta zehaztasunarekin du zerikusia. Ikerketek erakutsi behar dute ikerketa bera antzeko talde batean eta antzeko testuinguru batean egingo balitz, emaitzak ere

antzekoak izango liratekeela. Gure kasuan, bi fidagarritasun mota erabili ditugu: egonkortasuna eta baliokidetasuna (Cohen et al., 2007).

Egonkortasunari buruzko fidagarritasunak zerikusia du antzeko laginetan denboran zehar egindako azterketaren sendotasunarekin. Gure ikerketan, galdetegi bera (ikus hurrengo atala) unibertsitateko lehen mailako antzeko taldeetara pasatu da ikasturte desberdinetan, eta estatistikoki antzeko emaitzak erakutsi ditu.

Baliokidetasunari buruzko fidagarritasuna bi modutan lortzen da: lehena, tresna beraren forma baliokideak erabiliz (galdetegia, gure kasuan) eta antzeko datuak lortuz; eta bigarrena, ebaluatzaileen arteko fidagarritasun-koefizientea erabiliz lortzen dena. Azken hori ikertzaile bat baino gehiago ikerketa berean parte hartzen ari denean erabiltzen da, giza judizioak huts egin dezakeenez, ikertzaile guztien artean akordioak lortzen dira, eta horiek guztiek datuak modu berean erregistratzen dituztela ziurtatzen da. Gure ikerketan galdetegi baliokideak erabili dira 1. azterlanean eta 2. azterlanean (ikus hurrengo atala), eta emaitza konbergenteak lortu dira (ikus emaitzen atala). Ebaluatzaileen arteko fidagarritasun-koefizienteari dagokionez, ikerketa honetan 0.86tik 0.95era aldatu da, erabilitako diseinu esperimentalaren arabera (hurrengo atalean zehazten da), eta hori ona da% 95eko konfiantza-mailan

2.4. DATUAK BILTZEKO TRESNAK ETA DISEINU ESPERIMENTALAK

Ikerketa honetan datuak biltzeko erabiltzen den tresna, lana garatu duten ikertzaileek ikerketa galderei erantzuteko diseinatutako galdetegi original bat da. Galdetegi bakoitzaren diseinua, baliozkotasuna eta fidagarritasuna hurrengo ataletan deskribatzen dira. Erantzunak aztertzeko metodologia hau izan zen: azalpen-kategoriak eta justifikazioa arrazoitzeko moduak identifikatzea eta kontabilizatzea. Horrela, batetik, metodologia fenomenografikoari jarraitzen

diogu. Honek errealitatea hautemateko eta ulertzeko modu ezberdinak kategoria deskribatzaile hierarkiko eta elkarrekiko baztertzaila bihurtzeko erakusten digu. Metodologia hau oso maiz erabiltzen da gizabanakoek fisikako fenomenoak ulertzen dituzten forma kualitatiboki ezberdinak bilatzen dituzten ikerketetan (Borden et al., 2010; Ebenezer & Fraser, 2001). Bestetik, zientziaren epistemologia eta arrazoibide kausalaren teoria psikologikoak erabili dira, azalpen-kategoria bakoitzari lotutako arrazoibideak erakusten baitizkigute.

Ikerketa hau hiru azterlanek osatzen dute, ikerketa-galderei erantzuteko. Lehenengo azterlanean fenomenografia erabili zen analisi-metodologia gisa, eta aukera eman zigun egoera geldikorrean erresistentziak dituzten KZ zirkuitu elektrikoaren funtzionamenduari buruzko ikasleen azalpen-kategoriak ezartzeko (Leniz et al., 2014). Bigarren azterlanean, erresistentziak dituzten egoera geldikorreko KZ zirkuitu elektrikoaren funtzionamenduari buruzko kategoria edo azalpen-eredua justifikatzeko ikasleek erabiltzen dituzten arrazoibide kausalak aztertu ziren (Leniz et al., 2017). Hirugarren azterlanak ikasleen azalpen-kategoriak (Leniz et al., 2015) eta arrazoitzeko moduak (Leniz et al., 2019 August; Leniz et al., 2019) aztertzen ditu, egoera iragankorrean erresistentziak dituzten KZ zirkuitu elektrikoaren funtzionamenduari buruzkoak. Azken azterlan honen bidez, lehen bi ikerketetan lortutako emaitzen sendotasuna eta fidagarritasuna erakutsi nahi da, ikasleek elektrizitatearen kontzeptuak zirkuitu elektrikoetako korrante iragankorraren funtzionamenduaren kasuan aplikatu behar dituztenean.

Jarraian, azterlan bakoitzerako galdetegiaren diseinua aurkezten da.

2.4.1. Lehen azterlana: egoera geldikorrean erresistentziak dituzten KZ zirkuitu elektrikoaren funtzionamenduari buruzko ikasleen azalpen-kategoriak, eremu eta potentzial elektrikoaren kontzeptuak erabiltzen dituztenean

Lehenengo azterlana lehen ikerketa-galderari erantzuten saiatzen da; unibertsitateko sarrera-fisikako ikasleek korrante elektrikoaren funtzionamenduari eta eremu elektrikoa eta potentzial-diferentzia kontzeptuei buruz duten ulermenari buruzko galderari erantzuten hain zuzen. Ikerketa egiteko, galdetegi bat sortu zen, eta galderak aurretik egindako analisi epistemologikoa kontuan hartuta diseinatu ziren. Azterketa horretan ikasleek ulertu eta erabili behar duten azalpen-eredu makroskopikoaren eta mikroskopikoaren ezaugarri garrantzitsuenak jasotzen dira. Galdetegia baliozkotzeko, unibertsitatean irakasle-esperientzia handia duten fisikako bi irakaslerekin kontrastatu ziren galderak, eta haiekin eztabaidatu zen galdera horien helburuen egokitasuna, ingeniartzako eta zientzietako lehen urtean sarrera-fisikako ikastaroetan ematen den programari dagokionez. Biak bat etorri ziren helburuak programarekin koherenteak zirela esatean, baita horiek ebaluatzeko galdera egokiak zirela ere. Adostutako galdetegiarekin, atariko proba bat egin zen, eta ikasleek zailtasun batzuk aurkitu zituzten. Jarraian, elkarrizketak egin ziren 6 ikaslerekin, atariko proban hautemandako zailtasunak osatzen zituzten ulermen-zailtasunak hautemateko. Datu horiekin guztiekin, jarraian erakusten den behin betiko galdetegia zehaztu zen.

Galdetegiari Euskal Herriko Unibertsitateko lehen mailako ingeniartzako 120 ikasleek erantzun zioten. Ikasleek galderei emandako erantzunei azterketa fenomenografiko zorrotza egin zitzaion. Atariko analisi bat egin zen (40 galdetegi), eta erantzunak ikasleek emandako azalpenen arabera multzokatu ziren. Ondoren, beste ikertzaile batek zeregin bera egin zuen, eta jatorrizko kategoriak berriro definitu zituzten, adostasun batera iritsi zen arte. Kategoriak adostasunez definitu ondoren, bi ikertzailek bereizita aztertu genituen gainerako

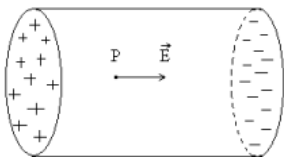
galdetegiak. Arreta ikasleen ulermenean jarri zen, ikasleen erantzuna osotasun gisa hartuz, kategoria espezifikoaren deskribapen bati dagozkion adierazpen partikularren parteen orde. Prozesu iteratibo bat erabili zen amaierako kategoriaren deskribapenak egiteko: kategoria bakoitzari esleitutako erantzunen eta kategorien arteko aldean arteko antzeko ulermena islatzen zuten (Cortazzi, 1993). Cohenen kappa fidagarritasun-koefizientea lortu zen sei galderentzat, 0,83 eta 0,95 artekoa, eta horrek adierazten du bat datorrela oso deskribatutako kategoriak ezartzeko irizpideekin. Fidagarritasunaren kappa-koefizientea hiru aste geroago ere kalkulatu zen, eta 0,88ko batez bestekoa lortu zen galdera guztietarako, eta hori % 95eko konfiantza-mailari dagokio

Jarraian, egoera geldikorrean erresistentziak dituzten korrante zuzeneko zirkuitu elektrikoetako azalpen-kategoriak aztertzeke egindako galdetegia erakusten da. Galderen zenbakiak bi digitu ditu: lehenaz azterlanaren zenbakiari dagokio, eta bigarrena galdeketaren barruan galderak duen posizioari. Hala, Q1.1 lehen azterlanaren galderari dagokio, eta lehen tokian kokatua dago. Q2.3 aldiz, bigarren azterlaneko galdera bati dagokio, eta hirugarren lekuan dago kokatuta.

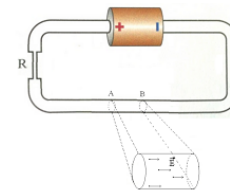
Q1.1

Zein da eremu elektrikoaren kausa A egoerane ta B egoeran?

A egoera:



B egoera:



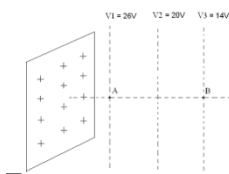
Q1.1 lehenengo galderan, eremu elektrikoaren kontzeptuari dagokionez testuinguru elektostatikotik elektroinetikorako trantsizioan ikasleek dituzten zailtasunak aztertzen dira. Horretarako, bi egoera azaltzea eskatzen zaie ikasleei. Lehenengo egoeran, eremu elektriko kontrako kargak dituzten bi plaka paraleloren artean sortzen da; ikasleek azaldu behar dute karga positiboak zilindroaren alde batean eta negatiboak beste aldean bereizteak eremu

elektrikoa sortzen duela. Bigarren egoeran, aldiz, eremu elektrikoa pila bat duen zirkuitu elektriko baten barruan sortzen da; ikasleek azaldu behar dute zergatik sortzen den eremu elektriko bat kablearen barruan, eta, azkenik, ondorioztatu behar dute bi kasuetan eremu elektrikoa karga-gradiente batek sortzen duela.

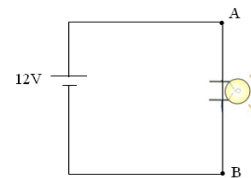
Q1.2

E_1 ikasleak baieztatzen du, A eta B puntuen arteko potentzial-diferentzia bi egoeretan honako ekuazio hau erabiliz kalkula daitekeela: $\Delta V = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$ $\Delta V = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$
 Beste ikasle bat, E_2 , ez dago ados, eta ekuazioa potentzial-diferentzia elektrostatiakoaren kasuan (2. egoera) soilik dela zuzena estean du, 1. egoerako potentzial-diferentzia Ohm-en legea erabiliz kalkulatzeko baita: $\Delta V = I R$
 Zein ikaslek du arrazoia? Azaldu zure erantzuna.

1. egoera:



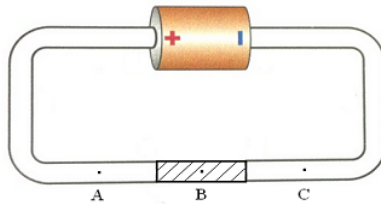
2. egoera:



Q1.2 galderan, elektrostatiakan eta elektrodinamikan potentzial-diferentzia kontzeptuan ikasleek ulertzeko duten zailtasuna aztertzen da. Galdera honekin, aztertzen da ea ikasleak gai diren potentziala kontzeptuaren definizio operatiboak erlazionatzeko testuinguru elektrostatiiko batean (1. egoera: kargatutako tamaina handiko plaka lau bat) eta testuinguru elektrozinetiko batean (2. egoera: korrante zuzeneko zirkuitu simple bat). Ikasleek gai izan behar dute justifikatzeko eremu elektrikoaren integralaren ekuazioaren bidez potentzial-diferentzia definitzea baliozkoa dela bai testuinguru elektrostatiiko batean bai KZ zirkuitu elektrikoetan.

Q1.3

Hemen aurkezten den zirkuituak batera bat du kobrezko hari baten bidez poloak konektaturik dituena. B puntuaren inguruan dagoe materiala karbonoa da; kobrea baino eroale eskasagoa. a) Erlaziona itzazu A, B eta C puntuetako intentsitatearen balioak (berdina, handiagoa edo txikiagoa). Arrazoitu zure erantzuna. b) Erlaziona itzazu A, B eta C puntuetako eremu elektrikoaren balioak (berdina, handiagoa edo txikiagoa). Arrazoitu zure erantzuna

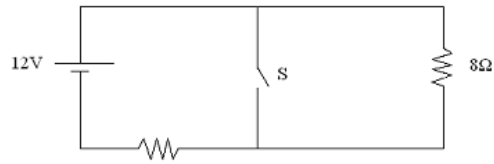


Q1.3 galdera elektrozinetikaren testuinguruan kokatzen da, eta ikasleek KZ zirkuitu batean eremu elektrikoa eta intentsitatea kontzeptuak ulertzeko dituzten zailtasunak aztertzen ditu. Horretarako, pila batez eta karbono segmentu batekin tartekatutako kobrezko hari batez osatutako zirkuitu elektrikoa erabiltzen da. Asmoa da ikertzea ea ikasleak gai diren maila makroskopikoan intentsitatearen eta eremu elektrikoaren arteko aldea justifikatzeko. Galdera horri zuzen erantzuteko, ikasleek azalpen-maila makroskopikoa zein mikroskopikoa erabil dezakete. Maila makroskopikoan, ikasleek adierazi behar dute egoera geldikorrean korrontearen intentsitatea berbera dela zirkuitu osoan eta, beraz, erresistentzian eremu elektrikoak kobrezko kablearena baino handiagoa izan behar duela elektroiti-sasoaren jito-abiadura zirkuitu osoan konstantea izan dadin. Ikuspegi mikroskopikotik, ikasleek kontuan hartu behar dute elektroien fluxuak berdina izan behar duela zirkuitu osoan: $nA u_{Cu} E_A = nA u_C E_B$. Karbonoak kobreak baino askoz elektroiti-mugikortasun txikiagoa du ($u_{Cu} > u_C$) eta mugitzen ari diren elektroien n dentsitatea eta kablearen sekzioaren A azalera berdina direnez, eremu elektrikoak magnitude handi eta uniformeak du karbonoan, eta magnitude txiki eta uniformeak kobreak; beraz, honako hau ondorioztatu behar dute: $E_A < E_B$

Q1.4

Kalkulatu ondoko eskeman adierazita datorren zirkuituko korrontea. Zirkuitua bateria bat, bi erresistentzia eta etengailu batek osatzen dute.

- a) Etengailua itxi aurretik
- b) etengailua itxi ondoren.



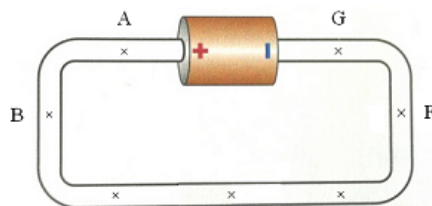
Q1.4 galderak ikasleek korronte zuzeneko zirkuitu elektriko sinpleak maila makroskopikoan ulertzen dituzten aztertzen du. Ikasleek erresistentziak dituzten KZ zirkuitu sinpleetan Ohmen legea aplikatzen dakiten aztertzen da.

Behar bezala erantzuten duten ikasleek adierazten dute, etengailua itxi aurretik, zirkuitu sinple bat dugula, 12 Vko bateriarekin eta serieran dauden bi erresistentziarekin (4Ω eta 8Ω), eta horrek esan nahi du $I = \Delta V/R$; $I = 12/12 = 1$ A korrontea duela. Aldiz, etengailua ixtean, bateria bat eta 4Ωeko erresistentzia dituen zirkuitu bat daukagu, izan ere, S etengailuak 8Ωeko erresistentziati korrontea igarotzea ekidindo du, eta Ohm-en legea aplikatzean: $I = V/R$; $I = 12 / 4 = 3$ A.

Q1.5

Azpian ikus daitekeen zirkuituko kobrezko kablean zehar korronte konstantea dago. Korrontearen inguruko hurrengo baieztapenetatik zein da zuzena? Arrazoitu zure erantzuna.

- a) Gehiegizko karga dago bateriatik gertu dagoen kablearen gainazalean, baina beste inon ez.
- b) Kablearen barruko eremu elektrikoaren magnitudea handiagoa da D puntuan A puntuan baino.
- c) Gehiegizko karga ezberdiak daude B eta D puntuetako kablearen gainazalean.



Q1.5 galderan, kargak mugitzen dituen eta korronte elektriko sortzen duen kablearen barruko eremu elektriko sortzen duen kausari buruz ikasleek duten ezagutzaren inguruan ikertzen da. Ikuspuntu mikroskopiko batetik, elektroien fluxuak zirkuitu osoan berdina izan behar duela pentsatu behar dute ikasleek.

Kontuan hartuko da ikasleek aipatzen duten eremu elektrikoa zer kargek sortzen duten, nola banatzen diren eta non kokatzen diren.

Q1.6 galderan ikasleek potentzial-diferentziaren eta eremu elektrikoaren arteko erlazioa elektrozinetika testuinguruan (erresistentziak dituen zirkuitu elektrikoa) justifikatzean emandako azalpenak aztertzen dira. Galdera honekin, ikasleak zirkuituko energia-balantzearen ekuazioak maila desberdinetan erlazionatzeko gai diren aztertzen da. Horretarako, bi ekuazio planteatzen dira (bata maila mikroskopikoan eta bestea maila makroskopikoan). Ikasleek azaldu behar dute bi ekuazioek zuzen deskribatzen dutela zirkuituko balantze energetikoa, bata maila makroskopikoan (lehen ekuazioa), fem, intentsitate eta erresistentzia kontzeptuak erabiltzen dituen. Bigarren ekuazioan (maila mikroskopikoan) eremuaren kontzeptua erabiltzen da erresistentzien arteko potentzial-diferentzia deskribatzeko, eta pila baten potentzial-diferentzia erabiltzen da pilak bere borneen artean zirkuituari ematen dion energia neurtzeko.

Q1.6

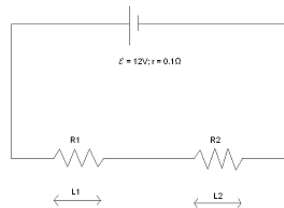
Bi erresistentzia batera bati konektatuta daude irudian agertzen den bezala. E_1 ikasleak zirkuituaren balantze energetikoa hurrengo ekuazioa erabiliz gauzatzen du:

$$\epsilon - I \cdot r - I \cdot R_1 - I \cdot R_2 = 0$$

E_2 ikasleak aldiz, zirkuituaren balantze energetikoa ondorengo ekuazioa erabiliz gauzatzen du:

$$\Delta V = E_1 \cdot L_1 + E_2 \cdot L_2$$

Bietako zeinekin zaude ados? Arrazoitu zure erantzuna.



a) E_1 ikaslearekin. b) E_2 ikaslearekin. c) Biekin. d) Bietako batekin ere ez.

2.4.2. Bigarren azterlana: egoera egonkorrean erresistentziak dituzten KZ zirkuitu elektrikoek funtzionamenduari buruzko ikasleen arrazoibide kausalak, eremu eta potentzial elektrikoa kontzeptuak erabiltzen dituztenean.

Bigarren azterlanaren helburua ikerketaren bigarren galderari erantzutea da; hau da, KZ zirkuitu elektrikoek nola funtzionatzen duten azaltzean unibertsitate mailako sarrera-fisikako ikasleek eremu elektrikoa eta potentzial-diferentzia kontzeptuak barne hartzen dituztenean erabiltzen dituzten arrazoibideak aztertzea. Horretarako, galdera irekiko beste galdetegi bat diseinatu zen, ikasleek galdetegiko erantzunei emandako azalpenean zentratzeko aukera eman duena. Bigarren azterlan honen interes nagusia ikasleek erabiltzen dituzten eredu kausalak dira, zehazki eremu elektriko eta potentzial-diferentziak erlazionatzean azalpen makroskopiko eta/edo mikroskopikoetan erabiltzen dituzten kausa-ereduak. Beraz, ikerketaren bigarren galderaren helburu orokorra bi helburutan zehaztu daiteke: i) Ikasleek eremu elektrikoa eta potentzial-diferentzia kontzeptuak erabiltzen dituztenean erabiltzen dituzten arrazoibideen ikuspegia eskuratzea; ii) Arrazoi zientifikoei buruzko azterlanen esparru teorikoaren barruan ikasleek galdetegi bati emandako erantzunak aztertzea eta interpretatzea.

Galdetegia prestatu ondoren, baliozkotu egin zen, edukiari eta helburuei dagokienez. Lehenik, Euskal Herriko Unibertsitateko Fisika Aplikatuko Saileko irakasle eskarmentudunei galdeketari erantzuteko eta iradokizunak egiteko eskatu zitzairen. Iradokizun horiek kontuan hartu ziren azken galdetegia idazterakoan. Ondoren, lehen mailako ikasleekin entsegu bat egin zen, eta hark baieztatu zuen ikasleek ez zutela arazorik galderak ulertzeko, formulatuta zeuden erari dagokionean. Amaitzeko, galdetegia Euskal Herriko Unibertsitateko ingeniarietako lehen mailako 141 ikasleek erantzun zuten, KZ zirkuitu elektrikoek buruzko azken azterketaren parte izan zelarik.

Azterlanaren fidagarritasun erlatiboari eta egonkortasunari dagokienez, galdetegi hau 1. azterlanaren helburuen baliokidea da antzeko ikasle-talde batekin, baina beste denbora-tarte batean, 1. azterlana egin eta hurrengo ikasturtean gauzatu baitzen. Era berean, erantzunen analisisan, "azalpen" gisa antzemandako iruzkinak erraz ezagut daitezkeen ezaugarriak dituzten kategorietan oinarrituta kodetu ziren, hala nola baieztapen zientifikoak eta esparru teorikoan definitutako lau arrazoibide-moten argudioak (Halbwachs, 1971; Grotzer, 2003). Horretarako, ikasle guztien erantzunak irakurri ziren eta galdera bakoitzerako deskribapen-kategoria eta arrazoibideen zirriborro bat bideratu zen. Ondoren, erantzunak berriro irakurri ziren eta erantzun bakoitza zirriborroko kategoria batean jarri zen behin-behinekoz. Bien bitartean, beste bi ikertzailek modu independentean egin zuten azken ariketa hori. Erantzunak sailkatu ondoren, ikertzaile ezberdinek emandako kategoriak alderatu ziren, eta komunztadura maila oso esanguratsua lortu zen Cohenen 0,86ko kappa fidagarritasun-koefizientearekin. Deskribapen-kategorietan edo erantzunak jartzean desadostasunak bazeuden, erantzunak hartu ziren ikasleen ulermenaren ebidentzia bakar gisa. Ikasleen ulermenean jarri zen arreta beti, eta erantzun bakoitza bere osotasunean ulertu zen, eta ez berariazko azalpen-kategoria bati dagozkion baieztapen partikularren gertaera gisa (Cohen et al., 2007).

Q2.1 galderaren helburua ikasleek eremu elektrikoa kontzeptua eta elektrostatikan landu duten kontzeptua KZ zirkuituetan erabilitako kontzeptu berarekin erlazionatzean erabiltzen dituzten arrazoibide motak aztertzea da.

Q2.1

Eremu elektrikoaren kapituluan aztertu dugu oreka elektrostatikoan dagoen kargatutako eroale zilindriko baten barruan ez dagoela karga elektrikorik (karga guztia eroalearen gainazalean dago), eta barrualdean duen eremu elektrikoa zero dela. Hala ere, korrante zuzeneko zirkuituen kapituluan aztertu dugu kable zilindriko eroalearen barruan eremu elektriko uniforme bat dagoela intentsitate konstanteko korrante bat dabilenean. Zergatik agertzen da eremu elektriko hori kablearen barruan? Azaldu zure erantzuna.

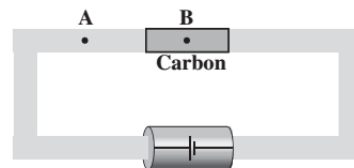
Q2.1 galderaren helburu zehatza ikasleak elektrostatikako eroale zilindriko batean eremu elektrikoaren rola eta egoera geldikorrean dagoen zirkuitu baten kablearen barruko rola bereizteko gai diren ikertzea da.

Q2.2 eta Q2.3 galderak diseinatu dira ikasleek korrante zuzeneko zirkuitu elektriko bateko karga-mugimendua hari eroalearen barruan sortzen den eremu elektrikoarekin eta zirkuituko bi punturen arteko potentzial-diferentziarekin erlazionatzean dituzten zailtasunak aztertzeko. Ikasleei korrante zuzeneko bi zirkuitu sinple aurkeztu zitzaizkien: bata, Q2.2 galderan, karbono erresistentzia batekin, eta bestea, Q2.3 galderan, hari eroalean estugune batekin ("erresistentzia" gisa jokatzeko duena).

Q2.2 galderak korrante jarraituko egoera bat aurkezten du egoera geldikorrean, testuinguru akademikoan ikasleentzat ezaguna den zirkuitu elektriko batean.

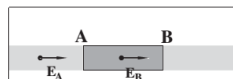
Q2.2

Hurrengo irudian erakusten den handitutako zirkuituan, karbono-erresistentzia txiki bat konektatu zaio bateriari kobrezko kable baten bidez. Zirkuitua denbora luzez egon da konektatuta, eta, beraz, zirkuituan korrantea konstantea da. Kobrea zein karbonoa eroaleak dira, baina karbonoaren eroankortasuna askoz txikiagoa da.

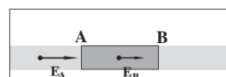


Q2.2A
Hemen proposatzen diren diagrametarik, aukeratu A eta B puntuetan eremu elektrikoak hobekien irudikatzen dituenak.

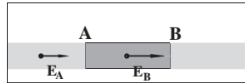
(1) E_A eta E_B berdinak dira



(2) E_A handiagoa da E_B baino



(3) E_A txikiagoa da E_B baino



(4) Ereku elektrikoko bektoreen bestelako adierazpena. Azaldu zure erantzunaren arrazoia.

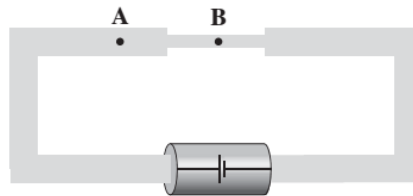
Q2.2B

Lotuta al dago A eta B puntuen arteko potentzial-diferentzia zirkuituko kargen banaketarekin? Azaldu zergatik.

Q2.3 galderak Q2.2 galderaren antzeko egoera du, baina kasu honetan erresistentzia hari eroalean zirkuituko gainerako kablea baino zati estuago batekin irudikatzen da. Bi galderetan zirkuitua oso denbora luzean zehar konektatua egon da, eta, beraz, zirkulatzen duen korrontea konstantea da.

Q2.3

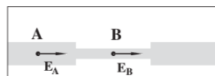
Irudiko zirkuituan bateria bati konektatutako kobrezko kable bat dugu. Kablea A eta B puntuen artean estutzen da irudian erakusten den bezala. Zirkuitua denbora luzez egon da konektatuta, eta bertatik dabilen korrontea konstantea da.



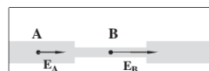
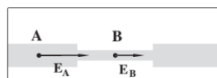
Q2.3A

Hemen proposatzen diren diagrametatik, aukeratu A eta B puntuetan eremu elektrikoak hobekien irudikatzen dituenena.

(1) E_A eta E_B berdinak dira



(2) E_A handiagoa da E_B baino



(3) E_A txikiagoa da E_B baino

(4)Eremu elektrikoko bektoreen bestelako adierazpena.
Azaldu zure erantzunaren arrazoia.

Q2.3B

Ba al dago A eta B puntuen arteko potentzial-diferentziarik? Azaldu zergatik.

Lehenengo atalean, Q2.2A eta Q2.3A, ikasleek eremu elektrikoa modu egokian irudikatzen duen diagrama identifikatu behar dute zirkuituko bi puntutan. Bigarren atalean, Q2.2B eta Q2.3B, zirkuituko bi punturen (Q2.3B) arteko potentzial-diferentziaren esanahiari buruz galdetzen zaie, eta, bereziki, potentzial-diferentziaren eta zirkuituko kableko kargen banaketaren arteko erlazioari buruz (Q2.2B).

Q2.2A eta Q2.2B galderari behar bezala erantzuteko, ikasleek azalpen-maila makroskopikoa zein mikroskopikoa erabil dezakete. Ikuspuntu makroskopikotik, kontuan hartuta ikasleek ezagutzen duten magnitudea zirkuitu elektrikoetako korrontearen intentsitate neurgarria dela, ikasleek adierazi behar dute egoera geldikorrean korrontea berbera dela zirkuitu osoan eta, beraz, erresistentzian eremu elektrikoak kobrezko kablearena baino handiagoa izan behar duela elektroiti-sasoaren jito-abiadura konstantea izan dadin ($I=Q_i$). Ikuspegi mikroskopikotik, ikasleek kontuan hartu behar dute elektroien fluxuak berdina izan behar duela zirkuitu osoan: $nA_{Cu}E_A=nA_{Cu}E_B$. Q2A galderan, karbonoak elektroien mugikortasun (u_C) askoz txikiagoa du kobreak baino (u_{Cu}), hau da, $u_{Cu}>u_C$. Eta mugitzen ari diren elektroien n dentsitatea eta kablearen sekzioaren A azalera berdinak direnez, eremu elektrikoak magnitude handia eta uniformeak izan behar du karbonoan, eta magnitude txikia eta uniformeak kobreak $E_A<E_B$. Q2.3A galderan kablearen sekzioa aldatu egiten da $A_A>A_B$ eta ondorioz $E_A<E_B$.

Bi azalpen-ereduak ikasturtean zehar aztertu dituzte ikasleek, eta espero da horiek erabiltzea galderetan dauden problemak ebazteko. Nolanahi ere, emaitzetan ikusiko den bezala, horrelako azalpenik ia ez dago erantzunetan.

Galdera sakontasun handiagoz azter daiteke gainazaleko kargen gradientearen eredu kontuan hartzen bada (ikus, adibidez, Chabay & Sherwood 2015, Cap. Or.). Hala ere, ez da horrelako azalpenik espero, gure lagineko ikasleak ez baitira eredu horren eraginpean egon.

Q2.2B eta Q2.3B galderari zuzen erantzuteko, ikasleek maila makroskopikoan azaldu dezakete eroale baten bi punturen arteko kargen zirkulazioa emateko beharrezkoa dela bi puntuen arteko potentzial-diferentzia egotea. Bateriak sortutako potentzial-diferentziaren eta zirkuitu elektrikoaren eta korrontearen zatien potentzial-diferentziaren arteko erlazioa ere ezar dezakete. Maila mikroskopikoan, ikasleek tokiko karga-kontzentrazioaren aldakuntza eta potentzial-diferentzia erlazionatu ditzakete. Elektrostatik gogora dezateke espazioko karga-banaketa ezberdinek eremu elektriko bat sortzen dutela, eta, beraz, potentzial-diferentzia.

Q2.2B galderan, potentzial elektrikoaren eta maila mikroskopikoko karga-banaketaren arteko erlazioari buruz galdetzen zaie esplizituki ikasleei; Q2.3B galdera, berriz, galdera irekiagoa da eta lotura bat ezar dezakete bai makro mailan bai mikro mailan.

2.4.3. Hirugarren azterlana: erresistentziak dituzten egoera iragankorreko KZ zirkuitu elektrikoaren funtzionamenduari buruzko azalpen-kategoriak eta arrazoibideak, eremua eta potentzial elektrikoa kontzeptuak erabiltzen dituztenean.

Hirugarren azterlanerako, bi galdetegi diseinatu ziren, unibertsitateko ikasleek korrante iragankorreko fenomenoak erresistentziak dituzten korrante zuzeneko

zirkuituetan azaltzeko erabiltzen dituzten azalpen-kategoriei eta arrazoibideei buruzko ikerketaren hirugarren galderari erantzuteko. Lehenengo galdetegiaren helburua ikasleen azalpen-patroi nagusiak identifikatzea da, korrante iragankorreko testuinguruak interpretatzen dituztenean, ikasleen erantzunen analisi fenomenografiko baten erabiliz. Bigarren galdetegiak azalpenetan sakontzen du, ikasleek beren azalpen-eredua justifikatzeko erabiltzen duten arrazoibide-mota aztertuz.

Lehenengo galdera-sortarako, bi galdera landu ziren kargen mugimendu iragankorretan korronteak lan egiteko duen mekanismoaren inguruan ikasleen ulermena ezagutzeko. Galderak formatu desberdinetan eman ziren, baina guztiak test-ondokoak izan ziren, instrukzioa jaso ondoren. Ikerketa hau Euskal Herriko Unibertsitateko (EHU) ingeniarietako lehen mailako 70 ikaslerekin baino gehiagorekin egin zen. Gainera, tesiaren egileak University of Washingtonen (UW) egindako egonaldia baliatu zen azterlanaren fidagarritasun-baliokidetasuna ebaluatzeko, galdetegiaren emaitzak unibertsitate desberdinetako ikasleen bi laginetan alderatzean. Horrela, bada, zientzia eta ingeniarietako ikasleentzako "calculus-based" elektromagnetismo ikastaroko Universty of Washington (UW) delakoaren 200 ikaslek erantzun zioten galdetegiari. Bi ikasle-taldeetan, irakaskuntza antzekoa da, eta elektromagnetismo-curriculum baliokidea dute. Emaitzen kapituluan ikusiko denez, estatistikoki antzekoak izan ziren.

Erantzunak aztertu ziren, baina ez soilik erantzunaren zuzentasuna, baizik eta ikasleen ulermena eta ikuskera alternatiboak identifikatzen. Hasteko, deskribapen-kategorien multzo bat lortu zen galdera bakoitzerako zirriborro gisa, ikasleen erantzunen lehen irakurketa batean oinarrituta, eta, erantzunak zirriborroaren kategorietan kokatu ziren. Hiru aste geroago, erantzunak berriro irakurri ziren (ikertzaile bera), eta prozesua errepikatu zen. Cohenen ebaluatzaile-artereko kappa fidagarritasun-koefizienteak 0.89ko balioa eman zuen galdera guztietan, hau da, % 95eko konfiantza-maila. Ikerketa taldeko bi ikertzailek modu independentean ezarri zituzten erantzunak kategoriatan.

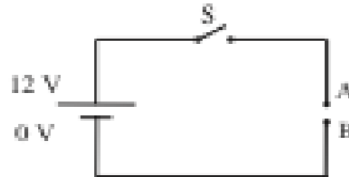
Erantzunak sailkatu ondoren, emaitzak alderatu ziren. Lortutako fidagarritasun-koefizientea 0.86 izan zen, eta horrek oso sendotasun ona adierazten du.

Q3.1 galdera aukera anitzeko galdera da, baina aukeraketaren azalpen arrazoitua ere eskatzen du. Galderak korrante zuzeneko zirkuitu batean korrantearen eta potentzial diferentziaren arteko erlazioari buruz ikasleek zer pentsatzen duten jakitea du helburu. Q3.1 galdera testuinguru akademikoan oso ezaguna da ikasleentzat. Zuzen erantzuteko, zirkuitu irekian korrantearen eta potentzial-diferentziaren arteko aldea justifikatu beharko litzateke. Baina ez dute erantzun zuzena aukeratu behar soilik, aukeraketa justifikatu ere egin behar dute.

Q3.1

Ondoren erakusten den zirkuituan. Zein da A eta B puntuen arteko potentzial-diferentzia etengailua itxi ondoren? Aukeratu erantzun zuzena (arbuia ezazu kablearen erresistentzia).

- a) 0 V
- b) +6 V
- c) Infinito
- d) +12 V
- e) Ez dago informazio nahikorik.

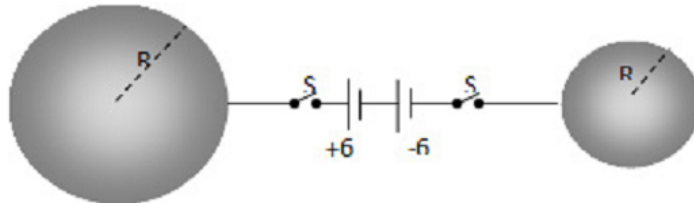


Q3.2 galderaren testuinguruak ez dakar zirkuitu elektrikorik, eta ikasleen azalpenak probatzeko diseinatutako galdera irekia da. Ikasleek sistema batean kargen mugimendu iragankorra azaltzeko erabiltzen duten azalpen-ereduari heltzeko diseinatu zen galdera hau. Galdera honen helburua, azalpe-ereduetan potentzial elektrikoa eta kargen mugimendua bezalako kontzeptuak nola erabiltzen dituzten aztertzea da.

Q3.2

Erradio ezebrdina duten bi esfera eroale bi baterietara lotu dira, beheko irudian erakusten den moduan. Bi etengailuak aldi berean ixten badira, egongo al da korrante elektrikorik? Kargatuko al dira esferak? Horrela bada, kalkula ezazu esferatako bakoitzak izango duen karga. Arrazoitu zure erantzunak.

Irudian antzematen ez den arren, kableak oso luzeak dira esferen arteko elkarrekintzak eragiteko.



Ikasleei galdetzen zaie esferak kargatzen diren ala ez, eta kargatzen direla uste badute, zergatik ere azaldu behar dute. Baita prozesuaren amaieran esfera bakoitzaren karga kalkulatu ere. Galdera honetan, kableak esferen artean eta esfera eta bateriaren poloen artean interakziorik (indukzio elektrikoa) ez egoteko bezain luzeak direla zehazten da. Bi bateriak seriean konektatuta daude, beraz esfera handia +6V poloari lotuta dago eta esfera txikia -6V poloari.

Q3.2 galderari behar bezala erantzuteko, ikasleek potentzial-diferentzia lotu behar dute esferak kargatzeko prozesuarekin, eta ulertu behar dute karga-prozesua amaituko dela baterien eta bi esferen arteko potentzial-diferentzia nulua denean. Ikasleek ikasi duten Drude ereduaren arabera, hari eroale baten bi punturen arteko kargak mugitzeko, kablearen bi punturen arteko potentzial-diferentzia egon behar da. Azalpen zuzen batean, ikasleek karga-mugimendua potentzial-diferentziarekin lotzen duen eredu teorikoa ulertu behar dute, eta gai izan behar dute potentziala kargarekin lotzen duen ekuazioa erabiltzeko, prozesuaren amaieran esferaren karga kalkulatu ahal izateko. Ikasleei zirkuitu sinpleetako kableetako gainazaleko kargen banaketa-eredua azaldu bazaie, kableko azaleko kargen gradiente-mekanismoa erabiliz azal daiteke galdera, eta eremu elektrikoaren gainjartzearekin argudiatu (Chabay & Sherwood, 2015).

Q3.2 galderari modu egokian erantzuteko beste modu bat azken oreka egoera kontuan hartzea da, korrante elektrikoa aipatu gabe. Erantzun honetan argudiatuko da oreka lortzen dela esfera handiak +6V potentziala duenean eta esfera txikiak -6V potentziala duenean. Ondoren, esfera bakoitzaren karga kantitatea kapazitatea erabiliz kalkulatu ahal izango litzateke.

Azken azterlan honen bigarren zatian, Euskal Herriko Unibertsitatean (EHU) ingeniartzako lehen mailako 112 ikasleri egin zitzaien inkesta. Idatzizko galderen bidez eta instrukzioaren ondoren jaso ziren datuak. Ikasleen erantzunak zorrotz aztertu ziren. Azterketaren helburu nagusia ez zen soilik erantzunak zuzenak edo okerrak ziren jakitea, baizik eta ikasleen arrazoibidea eta ulermena identifikatzea. Erantzunak irakurri ondoren, kategoria deskribatzaileen zirriborroa lortu zen. Geroago, erantzun bakoitzari behin-behineko kategoria bat esleitu zitzaion. Gainerako galdetegieta bezala, beste ikertzaile batzuek modu independentean esleitu zizkieten kategoriak erantzunei. Sailkapena egin ondoren, kategorizazioaren emaitzak alderatu ziren, eta, erantzun horietarako, 0,88ko Cohenen kappa koefizientea lortu zen, irizpideetan uniformetasun ona dagoela agerian uzten duena.

Bi galdera diseinatu ziren, eta horien erantzunek aurreikuspen- eta justifikazio-lana barne hartzen dute. Galderen helburu nagusia ikasleen arrazonamendua aztertzea da, zirkuitu elektrikoetako korrante elektriko iragankorreko egoeretan aplikatuta. Galderen baliozkotasunari eta fidagarritasunari heltzeko, fisikako sarrera-ikastaroetako hiru irakasleri eskatu zitzaien galderak berrikusteko eta iruzkin egokiak egiteko. Bere iruzkinak kontuan hartu ziren galderen azken bertsioan. Galdetegiak behin betiko administratu aurretik, ingeniartzako lehen mailako ikasleekin azterketa pilotu bat egin zen, eta ia ikasle guztiek galderak eta helburuak ulertu zituztela egiaztatu zen.

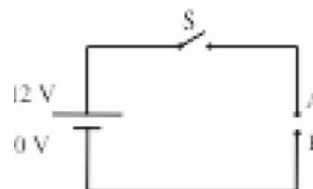
Azterlan honen lehen zatian, jarraian aurkezten den galdera bera erabili zen, baina erantzun anitzen formatuan. Galdera diseinatu zen ikasleek zirkuitu

irekietako korrante elektrikoaren intentsitatearen eta potentzial-diferentziaren arteko erlazioari buruz duten adierazpen-ezagutza aurkitzeko. Bigarren zati honetan, galdera zertxobait aldatu zen, azalpenetan oinarritutako galdera ireki bat sortzeko. Helburua ez da soilik egiaztatzea ea ikasleek zirkuitu ireki batean potentziala behar bezala kalkulatzen duten. Kasu honetan, helburua ikasleen arrazoibidea aztertzea da, zirkuitu batek egoera horretan duen portaera azaltzen dutenean.

Jarraian aurkezten diren bi galderak ikasleen azalpen-ereduari arreta jartzeko diseinatu ziren, sistema bateko kargen mugimendu iragankorra azaltzen dutenean. Q3.3 galdera Q3.4 baino esplizituagoa da kondentsadorea konektatzen duten bi kableen korrante iragankorrari buruz. Ikasleek erantzun behar dute bonbillak pizten diren ala ez eta zergatik, baina baita kondentsadorea kargatzen den ala ez. Gainera, A eta B plaken karga kalkulatzeko eskatzen zaie haien erantzuna baiezkoa bada. Garrantzitsua da azpimarratzea ikasleek erantzun guztiak arrazoitu behar dituztela

Q3.3

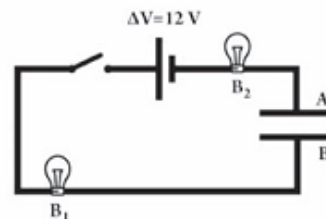
Jarraian agertzen den zirkuituan, zein da A eta B puntuen arteko potentzial-diferentzia? (Arbuia ezazu kablearen erresistentzia). Azaldu zure erantzuna.



Q3.4

Erantzun azkarreko (~1 us) bi bonbila berdin 9 nF -ko kondentsadore batekin batera konektatzen dira RC zirkuitu batean, irudian agertzen den bezala. Erantzun eta arrazoitu ondorengo galderak:

- A- Pizten al da B₁ bonbila? Zergatik?
 - Pizten al da B₂ bonbila? Zergatik?
 - B- Kargatzen al da kondentsadorea? Zure erantzuna baiezkoa bada kalkulatu A eta B plaken karga.
- Arrazoitu zure erantzunak.



Hurrengo kapituluan, deskribatutako galderen inplementaziotik lortutako datuak eta egindako azterketaren emaitzak aurkezten dira.

3 Kapituluua:

Emaitzak

Hirugarren kapitulu honetan, aurreko kapituluko azken atalean (2.4 *Datuak biltzeko tresna eta diseinu esperimentalak*) azaldu den diseinu esperimentalekin lortutako datuen emaitzak azaltzen dira.

Emaitzen azterketa hiru atal nagusitan banatuta dago, eta horiek tesi honen hiru azpi-azterlanetarako aplikatutako galdetegi bakoitzari egiten diote erreferentzia. Lehenengo atalean, lehen azterlaneko sei galderen emaitzak aurkezten dira. Emaitza horietatik ondorioztatzen dira ikasleek dituzten azalpen-kategoriak erresistentziak dauzkaten korrante zuzeneko (KZ) zirkuitu elektrikoaren funtzionamenduari buruz, egoera geldikorrean eremu eta potentzial elektrikoa bezalako kontzeptuak erabiltzen dituztenean. Bigarren atalean, bigarren azterlaneko hiru galderen emaitzak azaltzen eta aztertzen dira. Azterlanaren helburu nagusia erresistentziak dauzkaten KZ zirkuitu elektrikoaren funtzionamenduari buruz ikasleek dituzten arrazoiketa kausalak aurkitzea da, lehen atalean aipatutako kontzeptu berberak erabiltzen dituztenean eta zirkuituaren egoera geldikorrean. Amaitzeko, azken atalean, hirugarren azterlanaren emaitzak azaltzen dira, aurreko kapituluan azaldu bezala bi zatitan banatuta dagoena. Lehenengo zatian, bi galdera dituen galdetegi baten emaitzetatik, egoera iragankorrean erresistentziak dituzten KZ zirkuitu elektrikoaren funtzionamenduari buruz ikasleek dituzten azalpen-kategoriak ondorioztatzen dira, eremu eta potentzial elektriko kontzeptuak erabiltzen dituztenean. Hirugarren atalaren bigarren zatian, ikasleek egoera horretan dituzten arrazoibideak aztertzen dira.

Kapituluaren bukaeran, ondoren aurkezten diren emaitzen sozializazioa zehazten da, nazioarteko ekitaldietako ahozko komunikazioetan eta prestigiozko nazioarteko aldizkarietako artikuluetan aurkeztu dira eta.

3.1. GALDETEGIEN EMAITZAK

Ondoren aurkezten diren emaitzak sei urtez aurrera eramandako lan baten fruitua dira. Bidean, emaitza horietako batzuk aurkeztu dira Physics Education Research nazioarteko ekitaldietan egindako ahozko eta idatzizko hainbat komunikaziotan (AAPT Summer Meeting 2013, ESERA Conference 2013, AAPT Winter Meeting 2014, GIREP Conference 2014, AAPT Summer Meeting 2014, PERC Conference 2014, GIREP Conference 2017, GIREP Conference 2018).

3.2. LEHENENGO AZTERLANAREN EMAITZAK: ERRESISTENTZIAK DITUZTEN EGOERA GELDIKORREKO KZ ZIRKUITU ELEKTRIKOEN FUNTZIONAMENDUARI BURUZKO IKASLEEN AZALPEN-KATEGORIAK EREMU ETA POTENTZIAL ELEKTRIKO KONTZEPTUAK ERABILTZEN DITUZTENEAN

Aurreko kapituluko 2.4.1. atalean azaldu den bezala, lehenengo azterlanak unibertsitate-mailako sarrerako fisikako ikasleek korrante elektrikoaren funtzionamenduari eta eremu elektrikoa eta potentzial-diferentzia kontzeptuei buruz duten ulermenaren inguruan ikertzen du. Horrekin ikerketako lehen galderari erantzun nahi zaio.

Jarraian, galdetegi honetako 6 galderetako bakoitzerako lortutako emaitzak aurkezten dira taulen bidez.

I taula. Q1.1 galderaren erantzunak

Kategoriak	Emaitzak (%)
A. Zuzenak	% 46.7
A.2.1 Mikro / Makro	% 32.5
A.2.2. Mikro / Mikro	% 14.2
B. Azalpen osatugabeak	% 38.7
C. Inkoherenteak	% 8.1
D. Ez du erantzun	% 6.5

Q1.1 galderak bi atal ditu. Ikasleen erantzuna zuzena izan daiteke, maila makroskopikora bideratua edo maila mikroskopikora bideratua. Horren ondorioz, A kategoriarako bi azpikategoria sortu dira: A kategoriak erantzun zuzenak jasotzen ditu ikuspegi makroskopikotik (makro/makro) edo mikroskopikotik (mikro/mikro) edo bien konbinazio batetik (mikro/makro; makro/mikro). Ikasleen ia erdiek (% 46,7) fisikaren esparru teorikoan oinarritutako azalpena ematen dute, baina gehienek (% 32,5ek) deskribapen mikroa erabiltzen dute galderaren lehen atala erantzuteko, baina ondoren elektrozinetikarekin lotutako zatia erantzuteko deskribapen makroa baino ez dute erabiltzen (A.2.1 kategoria). Honakoa da mota honetako erantzun estandar bat:

“Karga desberdineko bi plaka daudenez, bakoitzak eremu elektriko bat sortzen du, biak noranzko berekoak. Coulomb-en legearen bidez azaltzen da, hau da, karga bakoitzak eremu bat sortzen du, eta guztien baturak $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$ ematen du bi plakek karga bera badute balio absolutuan. Zirkuitu elektrikoan, korrontea mugitzen da pilak sortutako potentzial-diferentzia dagoelako ”.

Erantzunen % 14,2k baino ez du azalpen mikroskopikoa eman egoera elektrostatikoan zein elektrozinetikoan (A.2.2 kategoria). Honako hau da erantzun estandar bat:

“Eremu elektrikoa karga positiboetatik negatiboetara doa. Kargen banaketa horren ondorioz, eremu elektrikoa sortzen da. Zirkuituaren kasuan, elektroiak mugitzen dituen eremu elektrikoa pilak sortzen du”.

Erantzunen ia % 40k (B kategoria) zuzen erantzuten diote egoera elektrostatikoari, baina ez dakite azalpenik ematen edo KZ zirkuitu elektriko batean eremu elektrikoaren existentziari buruzko bat-bateko ideiak erabiltzen dituzte. Hona hemen erantzun estandar bat:

“Eremu elektrikoa karga-diferentziaren ondorioz sortzen da. Plaka baten eta bestearen eremu elektrikoak gainjartzen dira, eta kontrako zeinukoak direnez, bakoitzaren eremu elektrikoaren modulua batu egiten da. Zirkuitu honetan, karga pilak ematen du. Erresistentziaren efektuak ez dio eragingo pilaren alde positibotik negatibora doan eremu elektrikoari”.

II taula. Q1.2 galderaren erantzunak

Kategoriak	Emaitzak (%)
A. Potentzial-diferentziaren definizioa baliozkoa da elektrostatika eta elektrozinetikaren (erlazioa ezagutzen du)	% 16.7
B. Ez du erlazioatzen, baina esparru teorikoaren elementuak erabiltzen ditu	% 75
C. Ez du ezagutzen potentzial-diferentziaren definizioaren balio/erabilpen orokorra (ez ditu bi testuinguruak definizioarekin lotzen)	% 8.3
D. Ez du erantzun	% 0

Q1.2. galderan, testuinguru elektrostatikotik elektrozinetikotik batera trantsizioa egitean potentzial-diferentziaren inguruan ikasleek dituzten zailtasunak identifikatzean, eta ondorioz ikusten da gutxiengo batek dakiela (% 16,7 A kategorian) potentzial-diferentziaren definizioa berdina dela bi testuinguruetan. Adibidez:

“Ados nago E1 ikaslearekin. Ekuazio orokorra $\Delta V = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$ da eta jakinik $V = E \cdot d$ dela, ΔV modu baten edo bestean kalkulatu dugu egoera bakoitzaren arabera.”

Hala ere, ikasleen hiru laurdenak ez du harremana azaltzen, nahiz eta ez duen fisikaren esparru teorikoarekiko azalpen inkoherenterik egiten. Horrela, ikasle askok Ohmen legea maila makroskopikoan erreplikatzeko joera dute, zirkuitua aztertzen duen lege orokorra balitz bezala. Adibidez:

“Ados nago E2 ikaslearekin, eremuaren izaera ez baita berdina. Zirkuitu ohmiko batean lege makroskopikoak erabiltzen ditugu; eremu elektriko batean, berriz, mikroskopikoak dira.”

“Ados nago E2 ikaslearekin. Bi lege desberdin erabili behar dira: potentzial diferentziarena elektrostatan eta Ohmen legea zirkuituetan”

Ikasleen% 8,3k gaizki erlazionatzen du.

III taula. Q1.3 galderaren erantzunak

Kategoriak	Emaitzak (%)
A. Erantzun zuzenak	% 5.4
B. Osatu gabeak	% 25.7
C. Gaizki aplikatutako oroitzapen memoristikoko azalpenak	% 56.7
D. Inkoherenteak	% 4.1
E. Ez du erantzun	% 8.1

Q1.3 galderari dagokionez, eremu elektriko eta intentsitatearekin lotutako fenomeno fisikoak ulertzeko ikasleek dituzten zailtasunak identifikatzean, ikusten dugu ikasle gutxik (A kategoriako % 5,4) erantzuten diotela zuzen galderari. Horiek guztiek ikuspuntu makroskopikotik azaltzen dute lehen atala; izan ere, intentsitatea maila makroskopikoan neur daitekeen magnitudea da. Bigarren zatia, berriz, eremuak mugimenduan dauden kargen mailan duen eragina adieraziz arrazoitzen dute. Adibidez:

“Hiru puntuen intentsitatea berdina da, puntu horietatik igarotzen den karga-kantitatea berdina baita. Eremua materialaren eta diametroaren arabera da. $\rho_A < \rho_B$

$$E_{II} = \frac{I \cdot \rho_A \cdot 4}{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2}; E_{VI} = \frac{I \cdot \rho_B \cdot 4}{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2}; E_{VI} = \frac{I \cdot \rho_B \cdot 4}{\pi \cdot \left(\frac{D}{4}\right)^2} \rightarrow E_{VI} > E_{IV} > E_{II}.”$$

Ikasleen laurdenak (% 25,7) zuzen erantzuten diote intentsitateari buruzko galderari maila makroskopikoan, baina huts egiten dute eremu elektrikoak jokatutako papera azaltzean edo ez dute erantzuten. Adibidez:

“Egoera geldikorrean dagoen zirkuitu batean intentsitatea berbera da zirkuitu osoan $I_A=I_B=I_C$ ”

“Intentsitatea berbera da zirkuitu osoan egoera geldikorrean, eta, beraz, eremu elektrikoa berdina izango da.”

Ikasleen erdiak baino gehiagok (% 56,7; C kategoria) memorian ikasitako elementu isolatuak erabiltzen ditu, baina gaizki aplikatzen ditu, modu ez-koherentean. Adibidez:

“Eroalea hobea bada n handitu egiten da. Ez bada oso eroalea n txikitzen da eta ondorioz: $I_A=I_C>I_B$. Eremu elektrikoa berdina izango da hiru puntuetan.”

Ikasleen% 4,1ek logikarik ez duen erantzuna ematen du, eta gainerako% 8,1ek ez dio galderari erantzuten.

IV taula. Q1.4 galderaren erantzunak

Kategoriak	Emaitzak (%)
A. Zirkuitua behar bezala aztertzen du eta Ohmen legea aplikatzen du	50,9%
B. Zirkuitua oker aztertzen du eta Ohmen legea aplikatzen du	30,0%
C. Inkoherenteak	12,7%
D. Ez du erantzun	4,3%

Q1.4 galderaren erantzunei erreparatuz, lehen mailako ikasle gehienek (% 80,9, A eta B kategoriak) Ohmen legea aplikatzen dute maila makroskopikoan zirkuitu elektriko sinpleetan. Hala ere, erantzunen erdiek bakarrik (%50,9) dakite

zirkuitua behar bezala aztertzen. Honakoa da erantzun estandarraren adibide bat:

“Zirkuitua itxi aurretik 12v-eko pila eta seriean kokatutako bi erresistentzia ditugu. Intentsitatea honakoa da: $I=12/12 = 1 A$.

Zirkuitua itxi ondoren, korrante guztia S etengailutik igarotzen da eta zirkuituak erresistentzia hau du: 4Ω , $I=12/4= 3 A$ ”

Hala ere, erantzunen heren batek (B kategoria) ez du zirkuitua behar bezala aztertzen. Adibide estandar bat da:

“Zirkuitua itxi aurretik bateria bat eta seriean bi erresistentzia ditugu. Beraz, : $I=12/12 = 1 A$.

Zirkuitua itxi ondoren bi erresistentziak paraleloan daude: $R_T= 8/3 \Omega$ eta $I = 36/8 = 4 A$.”

Gainerako erantzunak koherentzia logikorik gabeko aplikazioak dira, edo ez dute erantzuten.

V taula. Q1.5 galderaren erantzunak

Kategoriak	Emaitzak (%)
A. Karga-soberakin desberdinak daude kablearen gainazalean	14,2 %
B. Kablearen barruko eremu elektrikoaren magnitudea handiagoa da D puntuan A puntuan baino.	35,7%
D. Inkoherenteak	14,3%
E. Ez du erantzun	35,7%

Q1.5 galderari dagokionez, ikasleen gutxiengo bat baino ez da gai kargen banaketa eta sortzen duten eremu elektrikoa erlazionatzeko (% 14,2; A kategoria), hori baita elektrostatikako eremu elektrikoa definitzeko irizpidea, eta gero edozein egoeratarako orokortzen da. Horietatik erdiek galderak eskaintzen dituen erantzunetatik a) aukera aukeratzen dute, eta beste erdiek c) aukera.

Fisikako oinarrizko ikastaroetarako ohiko irakaskuntza-programan ez denez egoera horien azterketa espliziturik egiten, espero zitekeen ikasle horien erantzunak oso azalpen orokorrak izatea zirkuitu bateko karga-banaketaren eta eremu elektrikoaren ekoizpenaren arteko harremanari buruz. Adibidez:

“Izan ere, intentsitatea mugitzean ikusten da zirkuituaren amaieran protoiak galtzen doazela eta une batean elektroikopurua handitzen doala. Karga-dentsitate desberdinak daude”.

Ikasle askok (% 35,7; B kategoria) ulertzen dute elektrizitate-eremua handiagoa dela kable eroalearen erdian, baina ez dute esparru zientifikoan oinarritutako argudiorik ematen ideia hori defendatzeko. Adibidez:

“b) zuzena da, kargek zeinu berekoak izan behar baitute, eremu elektrikoa zeinu berekoa baita. Desplazamendu guztiak norabide berekoak izan behar dira”

VI taula. Q1.6 galderaren erantzunak

Kategoriak	Emaitzak (%)
A. Zuzen erlazionatzen ditu bi ekuazioak	8,3 %
B. Oker erlazionatzen ditu (deskribapen makroskopikoa bakarrik)	83,4%
D. Inkoherenteak	0%
E. Ez du erantzun	8,3%

Q1.6 galdera aztertuz, ikasleen % 8,3k badaki zirkuituaren balantze energetikoaren bi ekuazioak lotzen: bata maila makroskopikoan (lehen ekuazioa) eta bestea maila mikroskopikoan (bigarren ekuazioa). Adibidez:

“Bi ekuazioak ondo planteatuta daude, 1. Ikaslearen ekuazioa ere planteatu dezakegu, planteatu duen bezala, azken finean gauza bera baita zeinuz aldatuz. 2. ikasleak tentsioa intentsitatearekin eta

erresistentziakin berdindu du, eta horrek 1. ikaslearen emaitza bera ematen du.”

Ikasle gehienek (% 83,4; B kategoria) ulertzen dute ekuazio zuzena deskribapen makroskopikoa dela, baina ez dute ezagutzen balantze energetikoa maila mikroskopikoan, eta E1 ikaslea aukeratzen dute, hau da, a) aukera. Adibidez:

“Daukagun eredua energetikoa denez, lehen ekuazioa da zuzena. Bigarren ekuazioa, aldiz, eredu mekaniko baterako erabiltzen da, kondentsadoreak kasu.”

Galdera honetan, galdetegiko guztietan bezala, erantzun ez duten ikasleen ehunekoa oso baxua da, eta horrek erakusten du ikasleek zereginetan jarri zuten interesa handia izan zela eta planteatutako galderei erantzutea garrantzitsua iruditu zitzaizkien ikasle –kopurua handia izan zela.

Emaitzek iradokitzen dute ikasleek eredu makroskopiko bat eraiki dutela erresistentziak dituen KZ zirkuitu elektriko baten portaera azaltzeko, esperimentalki neur daitezkeen aldagaietan oinarrituta, hala nola intentsitatea, potentzial-diferentzia eta erresistentzia. Horrela, ikasleen %80 inguru Ohmen legean oinarritutako harremanak ezartzeko gai dira Q1.4 galderan.

Ikasleek saihestu egiten dituzte edo ez dakite azalpenak maila mikroskopikoan ezartzen, kargen mugimenduan eta haietan eragiten duten kontzeptuetan oinarrituta. Hala erakusten du elektrostatikako eta elektrozinetikako testuinguruetan eremu elektriko eta potentzial elektrikoaren erlazioetan ez dituen erantzunen ehuneko handiak (% 75 eta % 80 artean Q1.1, Q1.2 eta Q1.3 galderetan). Era berean, maila mikroskopikoko karga-dentsitateari eta eremu elektrikoari buruzko erabakiak hartu behar dituztenean (Q1.5 galdera,

erantzunen % 15ek soilik erabakitzen dute hariaren gainazaleko karga-dentsitateaz hitz egitea, nahiz eta ez dakiten erantzuna behar bezala azaltzen.

Q1.6 galderaren emaitzek berretsi egiten dituzte zirkuitua maila mikroskopikoan azaltzeko eta makro-mikro erlazioak ezartzeko aurreko zailtasunak. Emaitzek adierazten dute ikasleen % 80k baino gehiagok badakitela harremanak makro mailan ezartzen, eta erantzun zuzenak lortzen dituztela zirkuituaren balantze energetikoan (Krichhoffen 2. legea), baina ez dakite maila mikroskopikoan erlazionatzen, ezta emaitza zuzena lortzen ere.

Laburbilduz, emaitzek adierazten dute ikasle gehienek intentsitatea, potentzial-diferentzia eta erresistentzia bezalako aldagai neurgarrietan oinarritutako eredu mikroskopiko baten bidez azaltzen dutela egoera geldikorrean dagoen KZ zirkuitu baten portaera. Era berean, badakite euren artean harremanak ezartzen Ohm-en legeen (Q1.4) eta Krichhoff-en 2. legearen (Q1.6) bidez.

Ikasleen ehuneko txiki bat (% 15 inguru Q1.1, Q1.2, Q1.3 eta Q1.5 galderetan) zirkuituaren portaera maila mikroskopikoan azaltzeko gai da, hainbat aldagai erabiliz, hala nola kablearen gainazaleko karga-dentsitatea edo eremu elektrikoaren magnitudearen balioa eta honek elektroietan duen eragina korrante-intentsitatea lortzeko.

Azaleratzen diren bi kategoriak, azalpen makroskopikoa (gehiengoa) eta azalpen mikroskopikoa, sakon karakterizatu behar dira, lotutako arrazonamendu mota aztertuz, eremu eta potentzial elektriko moduko magnitudeak erabiltzen direnean. Hori izan zen jarraian deskribatzen den bigarren lanaren helburua.

3.3. BIGARREN AZTERLANAREN EMAITZAK: ERRESISTENTZIAK DITUZTEN EGOERA GELDIKORREKO KZ ZIRKUITU ELEKTRIKOEN FUNTZIONAMENDUARI BURUZKO IKASLEEN ARRAZOIKETA KAUSALAK EREMU ETA POTENTZIAL ELEKTRIKO KONTZEPTUAK ERABILTZEN DITUZTENEAN

Atal honetan, bigarren azterlaneko galderetan lortutako emaitzak azaltzen dira, hau da, aurreko kapituluko 2.4.2 ataleko azterlanaren emaitzak.

Lehen esan bezala, ikerketa honen helburua ez da zuzen edo oker erantzun duten ikasle kopurua zenbatekoa den ikustea. KZ zirkuituen portaera azaltzean ikasleen arazoibideak aztertzean zentratzen den ikerketa da. Beraz, ikasleen erantzunak azalpen-kategoriekin lotutako arazoibide-mota desberdinetan bildu dira. Azalpen-kategoriak lehenengo azterlanaren emaitzetan oinarrituta eraiki dira. Gainera, aurreko azterlanean eta bigarren azterlan honetan lortutako datuek azalpen-kategoria horiek justifikatzen dituzte. Ikasleen artean komunak diruditen arazoibide eta zailtasun kontzeptual batzuk identifikatu dira. Ikasleen ideien deskribapen hori ideia espezifiko iraunkorren kategorietan kontzentratzen da. Gainera, kategoria horiek, lau arazoibide moten arabera interpretatuko ditugu. Garrantzitsua da kontuan hartzea azalpenaren argudioak (adibidez, azalpen-kategoriak) lotura zuzena duela galdera ebazteko testuinguruan arazoitzeko moduarekin.

Ikasleek lehen galderari (Q2.1) emandako erantzunen emaitzak ehunekotan bildu dira VII. taulan.

VII taula. Q2.1 galderaren erantzunak

Arrazoiketa motak	Azalpen-kategoria	Emaitzak (%)
1.1. Kausal sinplea – mikro-maila (karga elektrikoaren eremu edo potentzialaren kontzentrazio gradientea)		% 0
1.2. Kausal sinplea – makro-maila (korriontea-eremu elektrikoa)	I. Korrionterik badago, eremu elektrikoa dago	% 39

2.1. Lineal kausala – mikro-maila (karga-kontzentrazio gradientea – potenzial diferentzia)			% 0
2.2. Lineal kausala – makro-maila (bateria – potenzial diferentzia – eremu elektrikoa)	II. Potenzial-diferentziak eremu elektrikoa sortzen du.	kablean	% 21
3.1. Erlazional kausala – mikro-maila (korrontearen eta erresistentziaren arteko erlazioak eremua edo potenzial diferentzia sortzen ditu)			% 0
3.2. Erlazional kausala – makro-maila (korrontearen eta erresistentziaren arteko erlazioak eremua edo potenzial diferentzia sortzen ditu)			% 0
Arrazoitze-ildo logikorik gabe			% 17
<hr/>			% 23
Ez du erantzun			
<hr/>			

Lehenengo kategoriako (I) azalpenek arrazoiketa kausal sinplea erabiltzen dute:

“Korrontea badago eremu elektrikoa ere egongo da”.

Hona hemen erantzun horien adibideak:

“Kablean eremu elektriko bat agertzen da, korronte elektrikoa dugulako. Egoera geldikorrean, egoera egonkorra zen.”

“Kableko korronteak eremu elektriko bat sortzen du. Egoera hau egoera elektrostatikoa ez bezalakoa da, non eremu elektrikoa zero zen, korronterik ez zegoelako.”

Azalpen horietan arrazoiketa kausal sinple bat ezartzen da kausa baten - "korronte elektrikoa" - eta efektu baten "eremu elektrikoa" artean. I. azalpen-kategorian, galderan agertzen diren ohiko entitate fisikoen (kasu honetan korronte elektrikoa) deskribapena eginez arrazoitzen da (orientazio fenomenologikoa), baina efektuarekiko lotura ez dator bat kontzeptu garrantzitsuekin edo beste lotura teoriko batzuekin. Azalpen horiek maila

makroskopikoan zentratzen dira; ez dute esplizituki aipatzen korronteak eremu elektrikoa sortzen duenean azpian dagoen mekanismoa.

Bigarren kategoriaren azalpenak (II) "*Potentzial-diferentziak eremu elektrikoa sortzen du*", kablean eremu elektrikoa egotearen arrazoia bateriak sortutako potentzial-diferentzia dela arrazoitzen du. Justifikazioak arrazoibide lineal kausal bati jarraitzen dio: bateriak potentzial-diferentzia sortzen du eta honek,aldi berean, kablean eremu elektrikoa sortzen du. Ikasleen erantzunak okerrak dira, bateria ez baita kableko eremu elektrikoaren faktore arduradun bakarra. Dena dela, hori da ikasleen erantzun guztien artean azalpen zientifikotik gertuen dagoen azalpena. Inongo azalpenek ez du esplizituki aipatzen prozesu kausalaren azpiko mekanismoa. Hona hemen erantzun mota horren adibide bat:

“Korrontea zirkulatzen ari denean, kablea potentzial-diferentzia sortzen duen bateria batera konektatuta dagoela esan nahi du. Potentzial-diferentziak eremu elektrikoa sortzen du kablearen barruan, eta horrek elektroiak mugiarazten ditu.”

Soilik hiru erantzunek ezartzen dituzte eremu elektrikoaren eta potentzial elektrikoaren arteko erlazio matematikoak. Adibidez:

“Galderak dioenez, E eremu elektrikoa zero da zilindroaren barruan egoera elektrostatikoan dagoenean. Korronteak zirkulatzen badu, ordea, ez dago orekarik, elektroiak mugimenduan daudelako. Gainera, kargak mugitzen badira, zilindroaren kontrako ertzen artean potentzial-diferentzia dago. $V_{ab} = \int \vec{E} \cdot d\vec{l}$. If Beraz, potentzial-diferentzia balego, eta potentzial-diferentzia badago, eremua ez da zero.”

Ikasleek Q2.2A eta Q2.3A galderei emandako erantzunak VIII. taulan ageri dira.

VIII taula. Q2.2A eta Q2.3A galderen erantzunak

Arrazoiketa motak	Azalpen-kategoria	Q2.2A Emaizak (%)	Q2.3A Emaizak (%)
1.1. Kausal simplea – mikro-maila (karga elektrikoaren eremu edo potentzialaren kontzentrazio gradientea)	I. Elektroien kontzentrazioak edo kontzentrazio-diferentziak zirkuituaren zati bakoitzean eremu elektrikoa sortzen du.	1.0	4.5
1.2. Kausal simplea – makro-maila (korrontea-eremu elektrikoa)	II. Korronte elektrikoak eremu elektrikoa sortzen du.	10.5	33.0
2.1. Lineal kausala – mikro-maila (karga-kontzentrazio gradientea – potentzial diferentzia)		0.0	0.0
2.2. Lineal kausala – makro-maila (bateria – potentzial diferentzia – eremu elektrikoa)		0.0	0.0
3.1. Erlazional kausala – mikro-maila (korrontearen eta erresistentziaren arteko erlazioak eremua edo potentzial diferentzia sortzen ditu)		0.0	0.0
3.2. Erlazional kausala – makro-maila (korrontearen eta erresistentziaren arteko erlazioak eremua edo potentzial diferentzia sortzen ditu)	III.a. Eremu elektrikoa materialaren eroankortasunarekiko proportzionala da. III.b. Eremu elektrikoaren balioa kablearen zabaleraren eta korrontearen arabera da.	38.0	38.5
Arrazoitze-ildo logikorik gabe		50.5	24.0
Ez du erantzun		0.0	0.0

I. azalpena erantzun minoritarioa da, eta kablearen barruko elektroikontzentrazioan oinarrituta eremu elektrikoaren balioa adierazten duten erantzunak biltzen ditu. Azalpen horretan arrazoiketa kausal simple bat sartzen da, kableko karga-kontzentrazioa eremu elektrikoaren kausa gisa postulatuena: karga-dentsitatearen banaketa \rightarrow eremu elektrikoa. Eredu horien azalpena, maila mikroskopikoan, kableko elektroien kontzentrazioan zentratzen da.

Ikasleek interpretazio okerra egiten dute eremu elektrikoaren erantzulea den karga banaketa kablearen barruan dagoela esaterakoan. Azpimarratu behar da erantzunetan ez dela azaltzen zein mekanismok sortzen duen kargen banaketa zirkuituan zehar, eta horrek era guztietako erantzunak eragiten dituela. Hau da, kontzeptuen gaizki-ulertuan oinarritutako arrazoibide mota berarekin, aukera desberdinak aukeratzen dituzte galderari erantzuteko. Hona hemen erantzun gehien antzeko batzuk:

“ $E_A = E_B$ baino txikiagoa da, A puntuko kargak B puntuan eremu elektriko handiagoa sortzen du karga gehiago dagoelako. Karbonoan karga-kontzentrazio handiagoa dago kable eroalean baino.”

“Kable zabalean (B puntua) zirkulatzen karga txikiagoa izateak esan nahi du eremu elektriko txikiagoa egongo dela”.

“Karga berak zirkulatzen du A puntutik zein B puntutik; beraz, eremu elektrikoa berdina izango da bi puntuetan.”.

II. azalpen-kategoriak eremu elektrikoaren balioa korrontearenarekin lotzen duten erantzunak batzen ditu. Kategoria honetako azalpenek arrazoibide kausal sinple bat ezartzen dute (korrontea \rightarrow eremua), orientazio fenomenologiko batekin. Azalpen hori Q2.1 galderaren I. kategorian dagoenaren antzekoa da. Azalpenek ez dute modu esplizituan identifikatzen eremu elektrikoko ekoizpenaren azpiko mekanismoa, baina gehienek (% 85) $E_A = E_B$ aukera hautatzen dute. Kategoria honetako adibide tipiko bat honako hau da:

“Zirkuituan korrontea konstantea da, eta horrek esan nahi du eremu elektrikoak berdina izan behar duela A eta B bi puntuetan.”

Arrazoibide mota honek erregela enpirikoa gehiegi orokortzea bilatzen du. Egoera geldikorrean korrontearen intentsitatea berbera dela baieztatzen du, eta eremu elektrikoaren magnitudea ere berdina dela baieztatuz orokortzen du.

III. azalpen-kategoriak eremu elektrikoaren eta materialaren eroankortasunaren arteko erlazioa ezartzen duten erantzunak jasotzen ditu Q2.2A galderarako (IIIa azalpena). Q2.3A galderaren kasuan, erabilitako analogiagatik, kablearen zabalarentzat antzeko arrazoiketa mota bat aplikatzen da (kablearen sekzioaren azalera) (IIIb azalpena). Bi kasuetan, bi aldagaien arteko arrazoiketa erlazionala erabiltzen da erantzuna azaltzeko: eroalearen eroankortasuna edo eroalearen zabalera eta korrontea erlazionatzen dira, eremu elektrikoaren magnitudeari buruzko ondorioa iristeko (Giere, 1999). Dena den, funtzionamendu erlazionalaren baitan dagoen mekanismoa ez da deskribatzen. Mekanismo erlazionalaren justifikazio falta horren ondorioz arrazoiketaren lerro erlazionalak aukera ezberdinak hartzera darama (% 56 $E_A > E_B$, % 29 $E_A < E_B$, % 15 $E_A = E_B$ Q2.2A galderan; % 62 $E_A > E_B$, % 13 $E_A < E_B$, % 25 $E_A = E_B$ Q2.3A galderan). Hona hemen erantzun horien adibideak:

“Karbonoaren eroankortasuna kobrearena baino txikiagoa da. Beraz, karbonoak kobreak baino eremu elektriko handiagoa behar du korronte bera mantentzeko”. (Q2.2A galdera)

“Kablearen alderik estuenean E eremua txikiagoa izango da, sekzio horretan karga (korronte) gutxiago dagoelako”. (Q2.3A galdera)

“ E_A E_B baino txikiagoa da, elektroiak modu progresiboan metatuko direlako sekzio estuan, eremu elektriko handiagoa sortuz”. (Q2.3A galdera)

IX. taulan ageri dira ikasleek Q2.2B eta Q2.3B galderei emandako erantzunak.

IX taula. Q2.2B eta Q2.3B galderen erantzunak

Arrazoiketa motak	Azalpen-kategoria	Q2.2B Emaizak (%)	Q2.3B Emaizak (%)
1.1. Kausal simplea – mikro-maila (karga elektrikoaren eremu edo potentzialaren kontzentrazio gradienteak)	I. Kargen banaketak potentzial-diferentzia sortzen du.	12.0	12.0
1.2. Kausal simplea – makro-maila (korrontea-eremu elektrikoa)		0.0	0.0
2.1. Lineal kausala – mikro-maila (karga-kontzentrazio gradienteak – potentzial diferentzia)	II. Karga-dentsitatearen banaketak potentzial-diferentzia sortzen duen eremu elektrikoa dakar.	8.0	7.0
2.2. Lineal kausala – makro-maila (bateria – potentzial diferentzia – eremu elektrikoa)		0.0	0.0
3.1. Erlazional kausala – mikro-maila (korrontearen eta erresistentziaren arteko erlazioak eremua edo potentzial diferentzia sortzen ditu)		0.0	0.0
3.2. Erlazional kausala – makro-maila (korrontearen eta erresistentziaren arteko erlazioak eremua edo potentzial diferentzia sortzen ditu)	III. Zirkuituko bi punturen arteko potentzial-diferentzia Ohm-en legearen bidez neurtzen da (ez dago loturarik potentzial-diferentziaren eta kableko karga-kontzentrazioaren artean).	25.0	27.0
Arrazoitze-ildo logikorik gabe		31.0	27.5
Ez du erantzun		24.0	26.5

Q2.3B galderak makro-mikro erlazio bati buruz esplizituki galdetzen ez badu ere, maila mikroskopikoan erantzuten dutenen ehunekoa antzekoa dela ikusi da Q2.3B eta Q2.2B bi galderetan. Azalpenen %12 I. kategorian daude, hau da, arrazoiketa kausal simple batean, elektroi-dentsitatean dagoen aldea potentzial-diferentziaren kausa dela ziurtatzen dutenak: karga-dentsitatearen banaketa → potentzial-diferentzia. Horrelako erantzunetan kausa bakarra dago (kargen kontzentrazioa edo kontzentrazio-diferentzia), eta horrek emaitza bat sortzen du (potentzial-diferentzia). Adibidez:

“Karga-dentsitatea gehiago aldatzeak potentzial-diferentzia handiagoa dakar”. (Q2.2B galdera)

“Bai, potentzial-diferentzia dago, karga-dentsitatea A puntutik B puntura aldatzen baita, eta kablea estutu egiten da.”. (Q2.3B galdera)

Azalpenen % 8 II. kategorian daude. Kategoria horrek arrazoibide lineal kausal bat ezartzen du, sekuentzia zehatz batekin: karga-dentsitatearen banaketa → eremu elektrikoa → potentzial-diferentzia.

Erantzun horietan, kausa-erlazio sinpleen kate bat eraikitzen da "karga-dentsitatearen banaketa", "eremu elektrikoaren existentzia" eta "potentzial-diferentziaren sorrera" gertaeren artean. Adibidez:

“Bai, karga-dentsitateak eremu elektrikoari eragin diezaioke, eta potentzial-diferentzia eremu elektrikoaren arabera da.” (Q2.2B galdera)

III. azalpen-kategoria (% 25ekoa) arrazoiketa erlazional batean oinarritzen da, non kausa Ohmen Legeak korronteen eta erresistentzi magnitudeen artean ezarritako erlazioa den, eta erlazio horrek potentzial-diferentziari eragiten dion. Adibide bat honakoa da:

“Ampere kopurua ez da aldatzen zirkuituan, baina A eta B puntuen artean erresistentzia (zabalera) aldatu egiten da, eta, beraz, potentzial-diferentzia ere aldatu egiten da Ohmen legearen arabera”. (Q2.3B galdera)

III. azalpen-kategorian, erresistentziaren eta korronte kantitatearen arteko erlazioak potentzial-diferentziaren emaitzara eramaten du (arrazoiketa

erlazionala). Harremana Ohmen legea da, eta hori ez da potentzial-diferentzia aldatzeko mekanismoaren azalpena, baina sistemaren portaera iragartzen du. Galdera guztietan lotura arrazional edo logikorik gabe teoria elektrikoaren kontzeptuak aurkezten dituzten erantzunen ehuneko esanguratsu bat dago. Are gehiago, ikasleen laurden bat inguruk ez du erantzuten. Emaidza horiek erakusten dute ikasleek zailtasun-maila handia aurkitzen dutela korrante elektrikoaren azalpen-eredua eta potentzial-diferentzia maila makroskopikoan eta mikroskopikoan erlazionatu behar dituztenean.

Emaidzek iradokitzen dute ikasleek KZ zirkuituetan eremu elektrikoa eta potentzial elektrikoa kontzeptuen rola azaltzeko ereduak eraikitzen dituztenean, arrazoibide mota espezifikokoak erabil ditzaketela, hala nola kausal sinplea, kausal lineala eta erlazional kausala. Are gehiago, emaidza horiek erakusten dute ereduaren azpiko mekanismoak ez ulertzeak ondorio desberdinak eta kontrajarriak ere ekar ditzakeela eredu bera erabiltzen denean.

Ikasleen zati batek arrazoiketa kausal sinplea erabiltzen du zirkuituaren azalpen-ereduaren eta eremu elektrikoaren edo potentzial elektrikoaren arteko loturak azaltzeko. Oso ikasle gutxi (% 5-12) ematen dituzte azalpenak maila mikroskopikoan (kargak edo elektroiak). Maila mikroskopikoan, azalpenek kausa-efektu eskema sinple bat erabiltzen dute: kargen kontzentrazioak eremu elektrikoa edo potentzial-diferentzia sortzen du. Karga-kontzentrazioa aipatzen duten ia erantzun guztiek kablearen barruan (karga-kontserbazioaren printzipioaren urraketa) edo bateriaren poloetan (azalpen osatugabea) kokatzen dituzte kargak. Arrazoiketa kausal sinplea erabiltzen duten azalpen gehienak maila makroskopikoan egiten dira, %10.5etik %39ra. Arrazoibideak dio korrantea dela eremu elektrikoaren arrazoiak: ondorio okerra. Arrazoibide mota horrek azalpen-ahalmen txikia du, eta okerra da kausa-efektu erlazioa azaltzen duen mekanismoa deskribatzerakoan.

Beste ikasle batzuek arrazoibide konplexuago batean oinarritutako azalpenak ematen dituzte, lineal kausal deritzona. Q2.1 galderan arrazoibide lineal kausalak erabiltzen dituzten azalpen guztiak maila makroskopikoan kokatzen dira. Erantzun hauek gertaera kate bat ezartzen dute: bateriak potentzial-diferentzia sortzen du eta honek eremu elektrikoa sortzen du. Maila mikroskopikoan enfokatzen diren erantzun bakanek (%7ren bueltan Q2.2B eta Q2.3B galderetan) kausa-efektu kate bat erakusten dute: bateriak karga-kontzentrazio bat sortzen du eta kontzentrazio horrek potentzial diferentzia bat sortzen du.

Mekanismo kausalaren azalpenik ez emateak, bai maila mikroskopikoan eta baita maila makroskopikoan ere, agerian uzten du azalpen-arrazoibidearen konplexutasunik eza eta gaizki ulertutako kontzeptuetan oinarritutako erantzunen aniztasuna. Ikasleen gehiengoak Q2.2 y Q2.3 galderetan erabilitakoa arrazoibide erlazionala izan da maila makroskopikoan (% 25 - % 38.5). Honek Ohm-en legean eta korrontearen kontserbazioan oinarritutako azalpen-eredu makroskopikoaren parte diren bi magnitude erlazionatzen ditu; korrontea eta erresistentzia edo materialaren eroankortasuna. Are gehiago, kausa-efektua baino erlazionalagoa den arrazoiketa-eredu bat osatzen dute, eremu elektrikoaren edo potentzial-diferentziaren balioa erlazio matematiko baten mende baitago (Ohm-en legea). Arrazoibide hau prozesu iteratibo bat da denboran zehar eta korronte eta erresistentzia aldagaien artean autoigoarria da, potentzial-diferentziarentzat emaitza zehatz bat lortzeko (Windschitl et al., 2008). Beraz, arrazoibide erlazionala konplexuagoa da eta azalpen-ahalmen handiagoa du aurretik eztabaidatutako arrazoibideek baino. Emaitza hori ez dator bat bigarren hezkuntzan egin diren aurreko ikerketekin; izan ere, horien arabera, ikasle gehienek arrazoiketa sinple kausala erabiltzen dute, eta kontzeptuen ulermen txikia dute.

Lan honen emaitzek adierazten dute erabilitako arrazoibidearen konplexutasunean nolabaiteko aurrerapena egon dela hezkuntza-maila igotzen doan heinean, eta hori bat dator aurretiko ikerketen ondorioekin (Borges &

Gilbert, 1999). Nolanahi ere, zirkuitu-eredua eremu elektrikoa eta potentziala magnitudeekin maila mikroskopikoan erlazionatzeko ikasleek dituzten zailtasunak iraunkorrak dira, eta horrek zientifikoki okerrak diren ondorioetara eramaten ditu.

Korrontearen egoera iragankorra azaltzeko beharra sortzen denean, adibidez zirkuitu bat ireki edo ixtean edota kondentsadore bat kargatzean, agerian geratzen da maila mikroskopiko eta makroskopikoen arteko erlazio egokia ezartzearen garrantzia. Egoera geldikorreko zirkuitu sinpleen funtzionamendua azaltzeko ereduan, maila anitzeko arrazoibideak paper garrantzitsua jokatzen duela suposatu genuen. Izan ere, maila makroskopikoan agertzen diren korronte intentsitatearen aldakuntza edo potentzial-diferentzia moduko alderdiak maila mikroskopikoko eremu elektrikoa eta honek elektroietan duen eraginarekin erlazionatu beharko dira. Horrenbestez, hirugarren azterlan bat egitea erabaki genuen. Hirugarren azterlan hau korronte elektrikoak egoera iragankorren duen zirkulazioa azaltzean ikasleek dituzten zailtasunak aztertzen ditu. Jarraian deskribatuko ditugu horren emaitzak.

3.4. HIRUGARREN AZTERLANAREN EMAITZAK: ERRESISTENTZIAK DITUZTEN EGOERA IRAGANKORREKO KZ ZIRKUITU ELEKTRIKOEN FUNTZIONAMENDUARI BURUZKO IKASLEEN AZALPEN KATEGORIA ETA ARRAZOIKETA KAUSALAK EREMU ETA POTENZIAL ELEKTRIKO KONTZEPTUAK ERABILTZEN DITUZTENEAN

Atal honetan hirugarren azterketaren emaitzak aurkezten dira, hau da, ikasleen azalpen-kategorien eta arrazoibideen azterketari dagozkionak, korronte zuzeneko zirkuitu elektrikoaren egoera iragankorra lantzean. Azterlanaren zati hau gauzatzeko erabilitako galderak aurreko kapituluko 2.4.3. atalean aurkeztu dira.

Lehen aipatu bezala, hirugarren azterketa honek bi zati ditu. Lehen zatiko emaitzak erresistentziak dituzten egoera iragankorreko KZ zirkuitu elektrikoaren funtzionamenduari buruzko ikasleen azalpen-kategoriei buruzkoak dira, eremu eta potentzial elektrikoaren kontzeptuak erabiltzen dituztenean. Era berean, bigarren zatiko emaitzek ikasleek zirkuitu horien funtzionamenduari eta azterlanaren lehen zatian aipatutako kontzeptuei buruz dituzten arrazoibideak jorratzen dituzte.

3.4.1. Lehen atala: Ikasleen azalpen-kategoriak egoera iragankorreko erresistentziadun KZ zirkuitu elektrikoaren funtzionamenduari buruz, eremu eta potentzial elektrikoaren kontzeptuak erabiltzen dituztenean

Aurreko kapituluaz azaldu denez, hirugarren azterlan honen lehenengo gaiaren helburua da ikasleek korrante zuzeneko zirkuitu batean korrante-intentsitatearen eta potentzial-diferentziaren arteko erlazioei buruzko gogoeta egitea. Komeni da gogoratzea lehen galdera hau oso ohikoa dela ikasleentzat testuinguru akademikoan, eta erantzun anitzeko galdera gisa eman zela.

Bi unibertsitateetako ikasle gehienek (hiru laurden baino gehiagok) aukeratu zuten erantzun zuzena. Posible da horrek esan nahi izatea ikasleek korrantea eta potentzial-diferentzia KZ zirkuituetan bereizten laguntzen dien oinarrizko ezagutza deklaratio edo ezagutza deskriptiboa eskuratu dutela. Emaitzek erakusten dute bigarren hezkuntzako ikasleek korrante eta potentzial-diferentzia kontzeptuak nahasten dituztela, baina guk lortu ditugun emaitzak hobekiak dira aurreko ikerketetakoekin alderatuta. (Dupin & Johsua, 1987).

Ikasleek Q3.1 galderari emandako erantzunak X. taulan ageri dira, ehunekoetan.

X taula. Q3.1 galderaren erantzunak. Erantzun zuzenak * ikurra du

Aukerak	UPV/EHU (Donostia) Emaitzak (%)	UW (Seattle) Emaitzak (%)
Zero	18%	9.5%
+6 V	0%	0.5%

Infinitu	0%	0.5%
+12 V*	79%	89%
Ez dago informazio nahikorik	3%	0.5%

Dena dela, UPV/EHUko ikasleek ez zuten soilik erantzun zuzena aukeratu behar; erantzuna justifikatu ere egin behar zuten. Unibertsitate honetan, erantzun zuzena aukeratu zuten ikasleen % 23k soilik justifikatzen zuten azalpen zientifiko koherente batekin. A eta B puntuen arteko potentzial-diferentzia eta bateriaren poloen artekoa berdina dela azaltzen zuten (kablearen erresistentzia kontuan hartzen ez bada). Erantzun horietako gehienek (osotasunaren % 19.5) esplizituki azaltzen dute korrante iragankor bat egongo dela oso denbora-tarte txikian. Adibidez:

“Denbora-tarte txiki batean zehar, korrante iragankorra egongo da. Egoera geldikorrean 12 V daude eta bestean 0. Ez dago erresistentziarik kablean”.

Ikasle gehienek (% 57) ez dute azaltzen zergatik aukeratu duten erantzuna. Ez dira zirkuituan gertatzen denerako azalpen bat emateko gai, askok erantzun zuzena zein den jakin arren.

UPV/EHUko ikasleen ehuneko esanguratsu batek "zero" aukera aukeratzen du (% 18). Horien heren batek azaltzen du potentzial-diferentzia zero dela, zirkuitua irekita dagoelako. Erantzun hauek korrontearen eta potentzial-diferentziaren arteko erlazioa proportzionala dela onartzen dute, Ohmen legean bezala. Hona hemen adibide bat:

“Potentzial diferentzia korrontearekiko proportzionala da. Zirkuitua zabalik dago, eta korrontea nulua da. Beraz, potentzial-diferentzia zero da”.

Akats hori bat dator Bigarren Hezkuntzako ikasleek korrante eta potentzial-diferentzia kontzeptuak nahasteko joera dutela erakusten duten aurretiko ikerketekin (Liégeois & Mullet, 2002). Aukera hau aukeratzten duten erantzunen beste heren batek A puntuko potentziala B puntuko potentzial bera dela jotzen du, eta, beraz, potentzial-diferentzia zero dela. Gainerako erantzunak ez daude justifikatuta.

Hurrengo galderan, Q3.2, ikasleek sistema batean kargen mugimendu iragankorra azaltzeko erabiltzen duten azalpen-ereduari heltzea da helburua. Galdera honen erantzunak XI. taulan daude bateratuta.

XI taula. Q3.2 galderaren erantzunak. Erantzun zuzenak * ikurra du

Azalpen-kategoria	UPV/EHU(Donostia) Emaitzak (%)	UW (Seattle) Emaitzak (%)
A.1.*- Kargen mugimendu iragankorra potentzial-diferentzia bati zor zaio, eta kargen azken kopurua potentziala edo kapazitatea kontzeptuen bidez kalkulatu da.	38%	42.5%
A.2.- Ez da aipatzen kargen mugimendu iragankorra, eta kargen azken kopurua potentziala edo kapazitatea kontzeptuen bidez kalkulatu da.	12%	0%
B.- Ez dira kargatzen. Ez da zirkuitu itxi bat.	20%	34%
C.- Justifikazio inkoherenteetan edo justifikaziorik gabeko baieztapenetan oinarritutako erantzunak.	22%	17%
D.- Ez du erantzun	8%	6.5%

Ikasleek gai horri zuzen erantzuteko modu bat da potentzial-diferentzia esferen karga-prozesuarekin erlazionatzea, eta ulertzea karga-prozesua amaitzen dela bateriaren eta bi esferen arteko potentzial-diferentzia nulua denean (A.1 kategoria aurreko taulan). Druderen ereduak, ikasleek landu duten ereduak, kable eroale baten bi punturen arteko karga mugitzeko kablearen bi punturen artean potentzial-diferentzia egon behar dela dio. Beraz, erantzun zuzena eman ahal izateko, karga-mugimendua potentzial-diferentziaren kantitatearekin lotzen duen eredu teorikoa ulertu behar dute, eta potentziala kargarekin lotzen duen ekuazioa erabiltzeko gai izan behar dute, prozesuaren amaieran esferen karga kalkulatu ahal izateko.

Galdera horri behar bezala erantzuteko beste modu bat da azken oreka egoera aintzat hartzea, korrante elektrikoa aipatu gabe. Erantzun honetan, oreka esfera handiak +6 V potentziala duenean lortzen dela arrazoitzen da, ondoren, kapazitatea erabiliz, esfera bakoitzaren karga kopurua kalkulatu da. UPV/EHUko ikasleen % 12k baino ez du erantzun hori eman, UW-en bakar batek ere ez (A.2 kategoria, XI. taulan). Horren arrazoia, galdera KZ zirkuituak ikasi ondoren jarraian galdetu izana izan daiteke, eta elektrostatika hurbileko ikaskuntza-esperientziatik urrun zegoelako, edo KZ eta elektrostatika-kontzeptuak konektatzen ez dituztelako ere izan liteke.

XI. taulan ez dira erantzun zuzenak edo okerrak bakarrik agertzen, ikasleen azalpen-kategoriak baizik.

Bi unibertsitateetan, bi azalpen-joera nagusiak berberak dira (A eta B kategoriak). A.1 kategorian (% 40 inguru), eroalearen muturren arteko potentzial-diferentzian oinarrituta kargen mugimendua kontuan hartzen duten erantzunak taldekatzen dira. Aurretik aipatu bezala, erantzun mota hori Drude-ren ereduan oinarritutako erantzun gisa interpreta daiteke. Mota honetako erantzun gehienek kausa-efektu kate bat duen arrazoibide lineal kausal bati jarraitzen diote: a) Korrante bat dago eroalearen bi punturen artean potentzial-diferentzia dagoelako, b) prozesuaren amaieran potentziala berdina izango da bi esferetan, korrantea eten egiten delako, c) esfera baten potentzialaren ekuazioa aplikatuz karga eta potentzial kontzeptuak erlazionatzen dira eta esferaren azken karga kalkulatu da. Hona hemen erantzun-kategoria horren adibide estandarrik:

“Korrantea egongo da esferen eta bateriaren poloen arteko potentzial-diferentzia berdintzen den arte. Bukaerako potentziala berbera da I esferentzat, baina zeinu ezberdinak dituzte. Gainazal unitateko karga honakoa da

$$Q_1 = q_1 / 4\pi R_1^2 \quad Q_2 = q_2 / 4\pi R_2^2.$$

Esfera baten potentzialaren ekuazioa aplikatzen

$$V = q / \pi \epsilon r$$

dugunean, eta bi esferentzat potentziala kontrako zeinukoa baina berdina izango dela kontuan hartuta, esfera bakoitzaren karga kalkula dezakegu.”.

“Kargatu egingo dira eta korrontea egongo da esferen potentzialak $V_1=6\text{ V}$ eta $V_2=-6\text{ V}$ izan arte. $C=q/\Delta V$ enez, kargaren kalkulua honakoa da

$$q=C V= 4\pi\epsilon_0 r V$$

UPV/EHU, A.2 kategoria erantzunen % 12 da, eta hori ez da UWn gertatzen. Kategoria honetan, ikasleen arrazoibidea elektrostatika kontzeptuekin bakarrik dago lotuta, oreka-egoerara iritsi aurretik gertatzen den korronte iragankorrari erreferentziarik egin gabe. Hona hemen erantzun estandar bat:

“Bi esferek bukaerako potentzial berbera edukiko dute baina kontrako zeinuekin. Ezkerreko esferak 6 V izango ditu eta eskumakoak -6 V. Kapazitatearen definizioa aplikatuz. $C=4\pi\epsilon_0 r$ eta $C=q/V$ erlazioa erabiliz, esferen karga kalkulatzeko honakoa erabiltzen dugu:

$$q=4\pi\epsilon_0 r V$$

Erantzun gehienek (% 70 bi unibertsitateetan) oker kalkulatu dute potentzialaren balioa eta azken karga. Errore horrek ikasleen maila baxua adieraz lezake ekuazio elektrostatikoak korronte iragankorreko testuinguruetan aplikatzean.

Erantzunen % 20 inguruk azaldu du esferak ez direla kargatzen zirkuitua irekita dagoelako (B kategoria). Kirchhoffen legeak aipatzen ditu gehiengoak bere erantzuna justifikatzeko. Erantzunek arrazoibide kausal sinple bat jarraitzen dute, kausa bat bere efektuarekin lotzen duena: a) zirkuitua irekita dago (kausa); b) ez dago karga-zirkulaziorik (efektua). Argi dago ikasle horiek ez dutela korronte iragankorra identifikatzen testuinguru horretan; zirkuitu itxiak korronte

geldikorreko egoeretan baino ez dituzte imajinatzen. Hona hemen erantzun mota horren adibide bat:

“Bateriaren + eta – poloak ez daude konektatuta, eta, beraz, zirkuitua ez dago osorik. Zirkuituko potentzial diferentzien batura zero da”.

C kategorian barne logikarik ez duten edo esanahirik gabeko kontzeptu fisikoak aplikatzen dituzten erantzunak sartzen dira. Horrelako erantzunek erakusten dute ez dagoela Q3.1 galderan agertzen den fenomenoaren interpretatzen duen azalpen-eredurik.

3.4.2. Bigarren atala: Ikasleen arrazoibideak egoera iragankorreko erresistentziadun KZ zirkuitu elektrikoaren funtzionamenduari buruz, eremu eta potentzial elektrikoa kontzeptuak erabiltzen dituztenean

Azterlanaren bigarren zati honetako lehen galdera Q3.1 galderaren berdina da, baina kasu honetan irekia da eta ikasleek ez dituzte bost aukera beren erantzuna emateko. Bi galderetan (Q3.3 eta Q3.4), ikasleek beren erantzunak arrazoitu behar dituzte.

Hurrengo taulan (XII. taula), erantzun zuzenak eta okerrak agertzen dira, baina baita ikasleek erabiltzen dituzten arrazoibide motak ere.

XII. taulako kategorien izenek erantzunaren baliozkotasun zientifikoari egiten diote erreferentzia, baina baita arrazoibide motari ere.

XII taula. Q3.3 eta Q3.4 galderen erantzunak

Arrazoiketa motak	Azalpen-kategoria	Q3.3 Emaizak (%)	Q3.4 Emaizak (%)
A.1. Lineal kausala	Kargen mugimendu iragankorra potentzial-diferentzia batek eragiten du, eta A eta B puntuen (plakak)	28%	7%

	azken potentziala kalkulatu da (Q3.3 eta Q3.4). Bonbillak bateriaren potentzial diferentziatik pizten dira, eta kondentsadorea kargatu da (Q3.4).		
A.2. Erlazional kausala	Ez da aipatu kargen mugimendu iragankorra, baina potentzial-diferentzia/kapazitatea kalkulatu da (Q3.3 eta Q3.4). Bonbillak piztu egiten dira, eta bukaerako kapazitantzia kalkulatu da (Q3.4).	4%	38%
B.1. Lineal kausala	Bonbillek ez dute intentsitate bera, baina korrontea dago eta kondentsadorea kargatu egiten da, ez da denbora-tarterik aipatu (Q3.4).	-	33%
B.2. Kausal sinplea	Ez dago korronte zirkuitua irekita dagoelako, eta ez da aipatu kargen mugimendu iragankorra (Q3.3). Zirkuitua itxita dagoenez, kargen mugimendu iragankorra dago, eta kondentsadorea kargatu da (Q3.4).	35%	16%
C. Justifikaziorik gabeko baieztapenetan oinarritutako erantzunak		22%	4%
D. Ez du erantzun		11%	2%

A kategoriak maila akademikorako zuzentzat jo daitezkeen erantzunak jasotzen ditu, eta B kategoriak erantzun okerrekoak. A kategoriako eta B kategoriako erantzunen artean bi arrazoibide mota aurki daitezke. 1. zenbakiak (A.1 kategoria eta B.1 kategoria) arrazoibide lineal kausalari egiten dio erreferentzia, eta 2. zenbakiak kategoria horietan aurkitutako beste arrazoibide mota batzuk jasotzen ditu (A.2 eta B.2 kategoriak).

Q3.3 eta Q3.4 galderetan, ikasleek karga-prozesuak A eta B plaken potentzial-diferentziarekin erlazionatu behar zituzten, eta ulertu behar zuten puntu horien eta bateriaren arteko potentzial-diferentziarik ez dagoenean kargatze-prozesua amaitzen dela. Behar bezala erantzuten duten ikasleen ia herenek Q3.3 galderan arrazoibide lineal kausala erabiltzen dute, eta baita gutxi batzuek ere Q3.4 galderan (A.1 kategoria). Aldez aurretik aipatu da arrazoiketa mota honek kausa eta efektu bat duela: a) kablearen bi punturen artean potentzial-diferentzia dagoenez korrontea dago, eta b) prozesua amaituko da bi muturretan potentziala

berdina izango delako eta ondorioz korrontea eten egiten delako. Kategoría honetako erantzunen adibide estandarra da hau:

“Korrontea eten egingo da bateriaren poloek eta puntuek potentzial-diferentzia bera lortzen dutenean. Bi puntuek potentzial bera izango dute, baina kontrako zeinuak”. (Q3.4 galdera)

Arrazoiketa lineal kausala ikasleen heren batek baino gehiagok jarraitzen du Q3.4 galderaren azalpenetan (B.1 kategoría). Azalpen oker hauek kausa eta efektu kate bat dute bere gain: a) korrontea polo batetik bestera doa; b) B_1 bonbilla korrontearen bidean dago (bateriaren polo positiboa); ondorioz kondentsadorea kargatu aurretik pizten da; c) B_2 bonbilla ez da pizten, edo bere intentsitatea B_1 bonbilla baino txikiagoa da, korrontea ez delako iristen. Kategoría horretako erantzun gehienek (% 80) diote bigarren bonbilla B_2 ez dela pizten. Adibide estandar bat honako hau da:

“Etengailua ixtean korrontea kondentsadorera pasatzen da bateriaren polo positibotik. B_1 bonbilla pizten da korrontea bateriaren polo positibotik kondentsadorerantz ateratzen delako. Aldiz, B_2 bonbilla ez da pizten, karga elektrikoa kondentsadorean pilatzen baita. Kondentsadorean metatutako karga honako hau izango da: $C=Q/V \rightarrow Q=C V= 9nF \cdot 12 V= 108 nC$.” (Q3.4 galdera)

Q3.4 galderan, ikasleen % 40 inguruk erantzun dute arrazoibide erlazional kausala erabiliz (A.2 kategoría). Honetan, ikasleen arrazoibidea kondentsadorearen kapazitatea kalkulatzeko ekuazio batek erlazonaturiko kopuruetan oinarritzen da (Q3.4). Azalpen horiek erantzun zuzena lortzen dute, baina ez dute azaltzen korrontea zirkuituan duen portaera azaltzen duen eredu mikroskopikorik. Hona hemen adibide bat:

“Kondentsadorea kargatu egiten da, eta bere kapazitatea $C = Q/V \rightarrow Q = C V = 9nF$ $12 V = 108 nC$ da”. Kondentsadorea kargatu egingo da, eta, beraz, korrontea egongo da eta bonbillak piztuko dira.”

Q3.3 galderan erantzunen heren batek baino gehiagok eta Q3.4 galderan erantzunen % 20k baino gehiagok oker azaltzen dute fenomenoaren arrazoiketa kausal sinple bat erabiliz (B.2 kategoria). Erantzunek kausa-efektu baten azalpen kausal sinplea jarraitzen dute: a) zirkuitua irekita/itxita dago (kausa); b) karga-mugimendua dago/ez dago karga-mugimendurik (efektua). Horrelako azalpenak erabiltzen dituzten ikasleek ez dute korronte iragankorra identifikatzen testuinguru berezi horretan; korronte-egoera geldikorra dela suposatzen dute, eta zirkuitu itxi bat baino ez dute imajinatzen. Hona hemen erantzun-mota horren adibide batzuk:

“Zirkuitua irekita dago, ez baitago osorik, bateriako poloak ez daudelako konektatuta”. (Q3.3 galdera)

“Kondentsadorea kargatzen denean, zirkuitua itxita dago eta bonbillak piztu egingo dira.” (Q3.4 galdera)

Aurreko azpiatalean aipatu bezala, ikasleek arrazoibide kausal sinplea erabiltzearen ondorioak bat datoz bigarren hezkuntzako beste ikerketa batzuekin, eta horiek erakusten dute ikasle gehienek ez dutela ulertzen potentzial-diferentzia kontzeptua, eta askotan korronte elektrikoa eta potentziala nahasten dituztela. (Dupin & Johsua, 1987; Liégeois & Mullet, 2002).

C kategorian barne logikarik gabeko erantzunak sartzen dira. Erantzun batzuek ez dute eredu fisikorik erabiltzen baldin erantzuteko. Beste batzuek kontzeptu fisikoak erabiltzen dituzte, baina esparru teorikoan esanahirik ez dutenak.

Emaitzek iradokitzen dute ikasleek ez dutela eredu bat eraiki korrante iragankorra duen zirkuitu baten portaera azaltzeko. Horietako asko (% 80 Q3.1ean eta ia % 50 Q3.2) bukaerako potentzial-diferentzia kalkulatzeko gai badira ere, ez dakite azpiko mekanismoa azaltzen.

Kasu honetan, egoera geldikorrean dauden KZ zirkuituetan bezala, ikasleek saihestu egiten dute edo ez dakite maila mikroskopikoan azalpenak ematen, kargen mugimenduan eta horietan eragiten duten kontzeptuetan oinarrituta. Gainera, ez dakite erantzuna behar bezala azaltzen, Q3.2 galderan ikus daitekeen bezala; izan ere, %40k erantzun kualitatiboa ematen du, baina %23k bakarrik egiten du kuantitatiboki.

Ikasleen arrazoibideetan zentratzen den azterlanaren bigarren zatian, ikasleen zati batek (% 30 Q3.3n eta % 20 Q3.4n) arrazoiketa kausal sinplea erabiltzen duela ikus dezakegu bere erantzuna modu desegokian azaltzeko. Ikasle horiek ez dute korrante iragankorra identifikatzen eta korrante-egoera geldikorra hartzen dute kontuan.

Q3.3ren heren batek eta Q3.4ren % 40k arrazoibide lineal kausala erabiltzen dute erantzun zuzenak (Q3.3ren kasuan) eta okerrak (Q3.4ren % 33) lortzeko. Arrazoiketa kausal sinpleak baino konplexutasun pixka bat handiagoa duen arrazoibide mota bat da hau. Ikasleek aurreko arrazoibidean baino landuagoa den kausa-efektu kate baten bidez arrazoitzen dute.

Eta, azkenik, arrazoiketa erlazional kausala dago. Q3.3 galderan gutxiengoa da, baina ikasleen ia % 40k erabiltzen du Q3.4 kasuan, aipatu den bezala; kasu honetan, arrazoibidea, konplexuagoa den arren, ekuazio baten bidez lotutako kopuruetan oinarritzen da, baina ez dute kontuan hartzen zirkuituan korranteak nola jokatzen duen azaltzen duen eredu mikroskopikorik.

Chapter 4:

Final Conclusions and Further Work

Research in teaching-learning physics is a source of information about specific students' difficulties. These difficulties are a good source of ideas and problems, demonstrations, and laboratory experiments. The findings of this research can guide the design of innovative teaching proposals in the area of circuits. This work addresses two fundamental aspects on which the research has been based:

- The relevance of the relationships between electrostatics and electrokinetics and, in particular, between electric current, electric field and potential difference in the teaching / learning of electricity in General Physics courses for the first year of Science and Engineering at the University.
- The influence of the forms of reasoning that students of introductory physics courses at university level use, in the construction of explanatory models about fundamentals of electrical circuits and their relationship with the concepts of electric field and potential difference.

The mentioned aspects are included in three research questions:

1.- What is the understanding of university-level introductory physics students about fundamentals of electric current and the concepts of electric field and potential difference?

2.- What reasoning do university-level introductory physics students use when using the concepts electric field and potential difference when explaining how DC electrical circuits work?

3.- And in relation to transient currents, what reasoning do introductory physics students use at university level when they use the concepts electric field and potential difference to explain transient current phenomena in simple circuits?

In this fourth chapter the final conclusions of the work are exposed. In it, we will try to summarize the main conclusions we have reached when trying to answer the research questions that have been put to the test with the design and evaluation of the three experimental designs. The different designs have been implemented with first-year engineering students at the UPV / EHU School of Engineering in Gipuzkoa and in the case of one of the designs with first-year students for science and engineering at the University of Washington (Seattle, USA).

The conclusions that are divided into three main sections are presented below. The three main sections refer to each of the experimental designs for the three sub-studies of this thesis, with which in turn it is intended to answer each of the research questions cited in the preceding paragraphs.

We will finish the chapter, and in turn the work, with the final conclusions and the perspectives of work that arise from the results obtained.

4.1. CONCLUSIONS REGARDING STUDENTS UNDERSTANDING ABOUT FUNDAMENTALS OF ELECTRIC CURRENT AND THE CONCEPTS OF ELECTRIC FIELD AND POTENTIAL DIFFERENCE

In the first study we have investigated the students' ideas and explanations on basic concepts of electricity (electric field and potential) when applied in electrostatic and electrokinetic contexts. Previous studies indicate that there are learning difficulties in the transition from one context to another, but no empirical evidence is provided regarding the two concepts involved in this research. The results obtained indicate that most of the students understand the meaning of Ohm's law and that they have built a macroscopic model to explain the behavior of a DC electrical circuit with resistances based on the experimentally measurable variables such as intensity, potential difference and resistance. In

these aspects, it can be considered that the regular teaching of the subject is effective in relation to the learning objective to be achieved in the curriculum. In these aspects, it can be considered that the regular teaching of the subject is effective in relation to the learning objective to be achieved in the curriculum.

However, few students are able to explain the process of electric current at the macroscopic and microscopic level with scientific meaning. Students avoid or do not know how to establish explanations at the microscopic level based on the movement of charges and the concepts that influence the movement of charges. Furthermore, it seems that the concept electric potential varies the meaning for the students according to the context. Students attribute a different meaning to this concept depending on whether it is applied in electrostatics or electrokinetics. The results indicate that the students know how to establish relationships at the macro level and obtain correct answers in the energy balance of the circuit (2nd Krichhoff's law), but they do not know how to relate it at the microscopic level, nor do they know how to obtain the correct result.

In summary, the vast majority explain the behavior of a DC circuit at steady state using a macroscopic model based on measurable variables. They know how to establish relationships between them through Ohm's laws and Krichhoff's 2nd law, but few are able to explain the behavior of the circuit at the microscopic level using variables such as density of surface-charges or the value of the electric field magnitude or electric potential and its influence on electrons.

4.2. CONCLUSIONS REGARDING THE REASONING ABOUT ELECTRIC FIELD AND POTENTIAL DIFFERNECE IN DIRECT CURRENT CIRCUITS

The second study allows us to delve deeper into how students make sense of DC circuit situations where the concepts of electric field, potential difference and current are relevant. After standard teaching, a small fraction of the students

gave correct answers, although not focused on the relationships of charges distribution, electric field and potential difference. The vast majority of students propose an explanatory model that relates electric current, field, and potential based on three types of reasoning:

- (i) A relational causal reasoning that establishes a relationship between current and resistance, which in turn produce the electric field or / and the potential difference;
- (ii) A linear causal reasoning that considers that the battery is the cause of the potential difference, and this in turn, is the cause of the electric field. This same line of reasoning is the one followed at the microscopic level, replacing the battery with a distribution of charge density in the circuit cable;
- (iii) A simple causal reasoning that states that the current or the variation of charge concentration produces electric field or / and potential difference.

The vast majority of students use explanations at the macroscopic level, although students have studied and applied Ohm's law at the microscopic level ($J = \sigma E$ where J is the current density and σ the conductivity) during the teaching of the electrical circuits chapter. Students seem to have a more difficult time describing the current model at the microscopic level than at the macroscopic level. One of the factors of this difficulty can be related to the instructional time that has been dedicated to traditional teaching which focuses on solving problems with quantitative relationships at the macroscopic level without spending time on the qualitative analysis of questions or reasoning forms.

4.3. CONCLUSIONS REGARDING THE REASONING ABOUT ELECTRIC FIELD AND POTENTIAL DIFFERENCE IN TRANSIENT CURRENT CIRCUITS

In order to draw adequate conclusions regarding the third study, it is necessary to bear in mind that the complete work is a project on explanatory models of the students with respect to DC circuits in both steady state and transient state. The two questions in the first section of this last study present transitory states and do not provide conclusive evidence on all the explanatory models of students in current processes in a transitory state. The data shows that the explanatory categories are manifested in two universities in different countries and thus provide evidence of their persistence. Some of the difficulties that are identified are new, others can be interpreted as previously documented that reappear in the first year of university physics courses (Guisasola, 2014). It has been found that there are two major explanatory trends about the current in transitory state. One of the categories explains the movement of charges qualitatively according to the potential difference, but there are fewer responses in this category when the explanation is quantitative. The explanations of the students in this category are generally accompanied by linear causal reasoning that associates the electric current between two points with the potential difference between them. This explanatory model can be seen as an application of the Drude model, which is the one explained in the teaching of the students involved in this study. Just over 10% of the responses in the UPV / EHU correctly calculate the final charge of two spheres connected to different poles of a battery but without mentioning the electric current, that is, without discussing the transient state of the current.

The second explanatory category does not take into account the transitory movement of charges in the circuit. The explanation is associated with simple causal reasoning that links "open circuit" to the fact that there can be no electric current in transient states. This line of reasoning is related to a supposed

dichotomy, that is; there are only two options: a) open circuit, there is no current; b) closed circuit, steady state current. It seems that students in this category have only one explanatory model for steady state current.

The objective of the second part of the third sub-study has been to characterize the forms of reasoning associated with the explanatory models already analyzed in the first part, when the first-year university students explain the electric current in transitory states of electrical circuits. This study has found three different forms of reasoning that have guided students to make decisions and develop explanations. These forms of reasoning are similar to those described by other authors, and also to those obtained in the stationary current studies of this same work. For example, the characteristics of simple causal reasoning coincide with those defined by Halbwachs (1971). Likewise, Grotzer (2003) finds this type of reasoning in high school students when they explain the electric current of a circuit in steady state. In any case, this work highlights the characteristics of simple causal reasoning that university students seem to have, in a knowledge area that has hardly been studied; the electric current in transitory state. In this study, simple causal reasoning is used by a significant proportion of the students. This type of reasoning lacks a microscopic model that explains the movement of electrons and only argues based on a macroscopic observation related to opening or closing the switch (as previously mentioned when the first part of the study has been discussed): an open switch means no current flows, and a closed switch means current flows. Causality is based on simple events that develop unidirectionally over time. The effects are consistent with the causes. This study indicates that simple causal reasoning is characteristic of a significant percentage of students in our sample when they explain transient electric current. This form of reasoning does not lead to correct conclusions and predictions about how current works in the circuit.

A second type of reasoning that almost 40% of the students in our sample uses to explain the current is relational causal reasoning. This explanation uses the capacitance equation of a capacitor ($C = Q / \Delta V$) as an explanation of the current flow. The cause is centralized in the magnitudes expressed in the equation as agents of the event (capacity, amount of charge and potential difference). Although the students arrive at a correct quantitative solution, the reasoning does not include more complex relationships, so it does not present a model that explains the numerical results they have obtained.

In this second part of the third study, the same questions were asked as in the first part, but in an open way, and the analysis focused on the students' explanation. As expected, the number of responses that focus on explanation increases compared to the first part of the study. In any case, the correct answers that mention the transient current are few, about a third of the answers argue their statements. The results indicate that although the question is reformulated with respect to the question in the first part of this third study, the low percentage of argued responses remains, indicating a persistent difficulty in the students' understanding. These results emphasize the dynamic nature of forms of reasoning and the influence of context on the activation of relevant cognitive resources. In particular, the results support the statement about the need to analyze students' reasoning in different contexts when making decisions about the coherence of their knowledge structures (DiSessa, 2004).

This study in the context of transient currents of electrical circuits provides complementary information to the two previous studies, making it possible to identify the types of reasoning used by students to explain the fundamentals of electrical circuits regardless of the type of task proposed..

In summary, the analysis of how students use different types of reasoning reveals that many of the students do not understand a microscopic model that they can

use in multilevel reasoning to give a scientific explanation of the transient current in DC circuits. The trend of reducing complexity with causal reasoning in science education has been studied in several publications (Guisasola et al., 2008; Chi et al., 2012). These studies found that certain reasoning trends impede learning. For example, when students reason about obvious events and not about multilevel processes. The “reductive” inclination in reasoning probably influences students to take the simplest concepts at the macroscopic level and the confusions about the macro-micro model are due to the lack of complexity in causal reasoning. The difficulties encountered may be due, as some studies have suggested, to the lack of updating of the traditional curriculum, which proposes a teaching of the processes of DC circuits based mainly on the relationships between magnitudes of the circuit at the macroscopic level (Kirchhof’s laws) and which only mentions in a reduced way the explanatory mechanisms of current production at the microscopic level.

4.4. FURTHER WORK

The difficulties that have been discussed in the previous sections could be due, as some studies suggest (Chabay & Sherwood, 2006; Härtel, 1982; Jefimenko, 1966), to the fact that the curricula for teaching DC circuits in introductory physics courses in high school and university focus on the macroscopic relations of the magnitudes of the circuit (Kirchhof’s laws) but not on the explanatory mechanisms of current production at the microscopic level. The presentation, for example, of the potential difference in a circuit as the capacity of the battery to do work, as energy per unit of charge, implies an orientation that is partly mathematical (Härtel, 1985). The presentation, for example, of the potential difference in a circuit as the capacity of the battery to do work, as energy per unit of charge, implies an orientation that is partly mathematical (Härtel, 1985). This traditional approach avoids the relationship between potential difference and charge distribution throughout the circuit. This may influence students to try to

induce explanations for themselves to establish macro-micro relationships in the circuit (DiSessa, 1993). In the last decades, changes are being proposed in the program of DC circuits with resistances in physics courses in high school and university, which favor the crucial role that charges on the surface of circuit elements play and that makes it possible to describe the behavior of the circuit directly in terms of charge and electric field. This is a deeper description of the circuits that allows us to unify the focus on electrostatics and electrokinetics (Carrascosa et al., 2002; Chabay & Sherwood, 2006; Hirnoven, 2007; Stocklmayer, 2010; Chabay & Sherwood, 2015).

In any case, new curriculum proposals based on the gradient surface charge microscopic model require students to apply epistemic skills that include multilevel and relational reasoning. However, this study shows data that indicates that most students have not acquired these modes of reasoning that facilitate understanding of a microscopic model of electric current and macro-micro relationships.

The types of reasoning used by students have been found to be of low explanatory power; even those students who use relational reasoning only apply it at the macroscopic level and incorrectly induce similar consequences at the microscopic level. This lack of resources they have to develop complex reasoning can be a major obstacle in teaching more complex explanatory models such as the gradient surface charge microscopic model. Those models represent macro-micro relationships with a form of multilevel reasoning. Therefore, it will be necessary not only to change the curriculum, but also to work explicitly with students on the types of scientific reasoning that lead to macro-micro relationships in DC circuits.

Students should not only be presented with explanatory mechanisms at the level of atomic dynamics, but they should also be given the opportunity to apply

complex forms of reasoning that can stimulate debate. Therefore, we suspect that this may be one of the curriculum content reforms in introductory courses on electrical circuits that do not progress as rapidly as would be expected from the research results.

Once the data from this doctoral thesis work confirm difficulties of the students not only in understanding an explanatory model of how DC circuits work, but in the use of the forms of reasoning associated with such understanding, it will be necessary to consider the design, implementation and evaluation of a teaching / learning sequence that effectively influences the difficulties detected and helps students to construct meanings of the concepts of electric field and potential at the interface between electrostatics and electrokinetics. Therefore, the logical continuation of this doctoral thesis work will be the development of this Teaching-Learning Sequence.

According to the results and the explanatory model of current in a cable, the key idea that will need to be emphasized will be that of the microscopic mechanism of production of potential difference between two points within the circuit cable, in both stationary and transient situations. In particular, this involves the relationship between the concept of electric potential studied in electrostatics (capacitors, bodies that get charged ...) with those analyzed in DC circuits. The results show that omitting an explanation of the microscopic mechanism of charge movement makes it more difficult to interpret transient states in DC circuits. Part of future work will be a Guided Problem Solving Sequence that will help students better understand DC circuits and the connection between fundamental concepts of electricity (field, potential difference) and an explanatory model of DC circuits.

There are few studies evaluating the improvement of students' understanding of electrical circuits when they follow the approach used in *Matter and Interactions* (Chabay & Sherwood, 2015). These studies indicate that the improvement

obtained by these students with the BEMA (Brief Electricity and Magnetism Assessment) multiple response questionnaire only measures the total effect of the content and teaching approach (Kohlmyer et al., 2009). In the future it will be necessary to analyze the individual elements of the teaching methodology and the reasoning difficulties of the students. The results of this study will guide the next level that involves designing, implementing and evaluating a teaching-learning sequence that will be applied in different countries in introductory physics level courses. The study will focus on a step-by-step design strategy, which gradually provides an interpretive model of electrical circuits based on concepts and conceptual changes. In particular, the microscopic model of electric current will be introduced from the beginning to provide continuity to what has been studied in electrostatics (electric charge, field, and potential), and the conceptual elements will be introduced gradually (gradient of surface charge distribution, electric field in transient situations and stationary current states). The teaching-learning sequence will take into account not only the conceptual updating of the interpretive model, but also the learning demands that teaching objectives require from both a conceptual and complexity of reasoning point of view (Leach & Scott, 2002).

New proposals based on a gradient surface charge distribution model require the movement of electrons due to the action of the electric field at the microscopic level to be related to macroscopic measures of potential difference. This relationship requires multilevel reasoning, more complex than the reasoning found in this study (linear causal, relational causal, simple causal). Furthermore, we believe that students' comprehension and reasoning difficulties can be overcome by emphasizing not only the microscopic model but also the reasoning processes that justify that model during teaching.

BIBLIOGRAFIA

- Akerlind, G. (2005). Learning about phenomenography: Interviewing, data analysis and the qualitative research paradigm. *Doing developmental phenomenography*, 63.
- Arons, A. B. (1982). Phenomenology and logical reasoning in introductory physics courses. *American Journal of Physics*, 50(1), 13–20.
- Arons, A. B. (1990). *A guide to introductory physics teaching*. New York: John Wiley & Sons.
- Albanese, A., & Vicentini, M. (1997). Why do we believe that an atom is colourless? Reflections about the teaching of the particle model. *Science & Education*, 6(3), 251-261.
- Ampère, A. M. (1825). *Mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électro-dynamiques uniquement déduite de l'expérience: dans lequel se trouvent réunis les Mémoires que M. Ampère a communiqués à l'Académie royale des Sciences, dans les séances des 4 et 26 décembre 1820, 10 juin 1822, 22 décembre 1823, 12 septembre et 21 novembre 1825*.
- Ausubel, D. P. (1978). *Educational Psychology. A cognitive view*. New York, USA: Holt, Rineheart & Winston, Inc.
- Ausubel, D. P., & Sánchez Barberán, G. (2002). *Adquisición y retención del conocimiento: una perspectiva cognitiva*.
- Bagno, E., & Eylon, B. S. (1997). From problem solving to a knowledge structure: An example from the domain of electromagnetism. *American Journal of Physics*, 65(8), 726-736.
- Barbas, A., & Psillos, D. (1997). Causal reasoning as a base for advancing a systemic approach to simple electrical circuits. *Research in science education*, 27(3), 445-459.
- Barlow, P. (1825). XIV. On the temporary magnetic effect induced in iron bodies by rotation. In a letter to JFW Herschel, Esq. Sec. RS by Peter Barlow, FRS Communicated April 14th, 1825. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, (115), 317-327.
- Benseghir, A. & Closset, J. L.. (1993). Prénance de l'explication électrostatique dans la construction du concept de circuit électrique: points de vue historique et didactique. *Didaskalia (Paris)*.

- Benseghir, A., & Closset, J. L. (1996). The electrostatics□electrokinetics transition: historical and educational difficulties. *International Journal of Science Education*, 18(2), 179-191.
- Besson, U., & Viennot, L. (2004). Using models at the mesoscopic scale in teaching physics: two experimental interventions in solid friction and fluid statics. *International Journal of Science Education*, 26(9), 1083-1110.
- Binnie, A. (2001). Using the history of electricity and magnetism to enhance teaching. *Science & Education*, 10(4), 379-389.
- Booth, S., & Marton, F. (1997). Learning and awareness. *Mahwah: Lawrence Erlbaum*.
- Borges, A., & Gilbert, J. (1999). Mental models of electricity. *International Journal of Science Education*, 21, 95–117.
- Bowden, J., Dall’Alba, G., Martin, E., Laurillard, D., Marton, F., Masters, G., ... & Walsh, E. (1992). Displacement, velocity, and frames of reference: Phenomenographic studies of students’ understanding and some implications for teaching and assessment. *American Journal of Physics*, 60(3), 262-269.
- Campbell, D. T. (1963). and JC Stanley. *Experimental and quasi-experimental designs for research*, 8-12.
- Carrascosa Alís, J., Martínez Sala, S., & Martínez-Torregrosa, J. (2002). Física y Química: 1 Bachillerato. Las causas del movimiento: Dinámica.
- Chabay, R. W., & Sherwood, B. A. (1994). Electric and magnetic interactions. *Electric and Magnetic Interactions*, by Ruth W. Chabay, Bruce A. Sherwood, pp. 672. ISBN 0-471-07847-6. Wiley-VCH, August 1994., 672.
- Chabay, R. W., & Sherwood, B. A. (1999). Bringing atoms into first-year physics. *American Journal of Physics*, 67(12), 1045-1050.
- Chabay, R., & Sherwood, B. (2006). Restructuring the introductory electricity and magnetism course. *American Journal of Physics*, 74(4), 329–336.
- Chabay, R. W., & Sherwood, B. A. (2015). *Matter and interactions*. John Wiley & Sons. Chap. 18
- Chi, M. T., Roscoe, R. D., Slotta, J. D., Roy, M., & Chase, C. C. (2012). Misconceived causal explanations for emergent processes. *Cognitive science*, 36(1), 1-61.

- Clement, J., & Steinberg, M. S. (2008). Case study of model evolution in electricity: Learning from both observations and analogies. In *Model based learning and instruction in science* (pp. 103-116). Springer, Dordrecht.
- Closset, J. L. (1983). Sequential reasoning in electricity. In G. Delacote, A. Tiberghien, & J. Schwartz (Eds.), *Research on Physics Education: Proceedings of the First International Workshop* (pp. 313–319). Paris, France: Editions du CNRS.
- Cohen, R., Eylon, B., & Ganiel, U. (1983). Potential difference and current in simple electric circuit: A study of students' concepts. *American Journal of Physics*, 51(5), 407–412.
- Cohen, L., Manion, L., & Morrison, K. (2007). *Research methods in education* (London and New York, Routledge).
- Coll, C. (1986). Bases psicológicas. *Cuadernos de pedagogía*, 139, 12-16.
- Cortazzi, M. (2001). Narrative analysis in ethnography. *Handbook of ethnography*, 384, 394.
- de la Rive, A. (1867). LIV. Michael Faraday, his life and works. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 34(232), 409-437.
- Delval, J. (1985). La enseñanza de las ciencias desde la perspectiva del que aprende. La nueva enseñanza de las ciencias experimentales.
- DiSessa, A. A. (1993). Toward an epistemology of physics. *Cognition and instruction*, 10(2-3), 105-225.
- Disessa, A. A. (2004). Metarepresentation: Native competence and targets for instruction. *Cognition and instruction*, 22(3), 293-331.
- Driver, R., & Erickson, G. (1983). Theories-in-action: Some theoretical and empirical issues in the study of students' conceptual frameworks in science.
- Driver, R., & Oldham, V. (1986). A constructivist approach to curriculum development in science. *Studies in Science Education*, 13, 105–122
- Driver, R. (1986). Psicología cognoscitiva y esquemas conceptuales de los alumnos. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 4(1), 3-15.

Driver, R., Asoko, H., Leach, J., Scott, P., & Mortimer, E. (1994). Constructing scientific knowledge in the classroom. *Educational researcher*, 23(7), 5-12.

Driver, R., Leach, J., Scott, P., & Wood-Robinson, C. (1994). Young people's understanding of science concepts: implications of cross-age studies for curriculum planning. *Studies in Science Education*, 24, 75–100.

Duit, R., Treagust, D. F., & Mansfield, H. (1996). Investigating student understanding as a prerequisite to improving teaching and learning in science and mathematics. *Improving teaching and learning in science and mathematics*, 17-31.

Duit, R., & Treagust, D. F. (1998). Learning in science: From behaviourism towards social constructivism and beyond. In B. Fraser, & K. Tobin (Eds.), *International handbook of science education* (pp. 3–25). Dordrecht, Netherlands: Kluwer.

Duit, R., & Von Rhöneck, C. (1998). Connecting Research in Physics Education with Teacher Education. *Tiberghien, A.; Jossem, El e Barajos, J.*

Dupin, J. J., & Johsua, S. (1987). Conceptions of French pupils concerning electric circuits: Structure and evolution. *Journal of research in science teaching*, 24(9), 791-806.

Dupin, J. J., & Joshua, S. (1989). Expérimentations d 'approches hypothético-déductives de la physique en classe de seconde. *Rapport de recherche*.

Ebenezer, J. V., & Fraser, D. M. (2001). First year chemical engineering students' conceptions of energy in solution processes: Phenomenographic categories for common knowledge construction. *Science Education*, 85(5), 509-535.

Engelhardt, P. V., & Beichner, R. J. (2004). Students' understanding of direct current resistive electrical circuits. *American Journal of Physics*, 72(1), 98-115.

Eylon, B., & Ganiel, U. (1990). Macro –micro relationship: the missing link between electrostatics and electrodynamics in students' reasoning. *International Journal of Science Education*, 12, 79.

Fishbane, P. M., Gasiorowicz, S., & Thornton, S. T. (1993). Physics for Scientists and Engineers Prentice Hall. *Inc., New Jersey*, 0-13.

Fishbane, P. M., Gasiorowicz, S. G., & Thornton, S. T. (2004). *Physics: For Scientists and Engineers with Modern Physics*. Prentice-Hall.

Fredette, N., & Lochhead, J. (1980). Student conceptions of simple circuits. *The physics teacher*, 18(3), 194-198.

Furió, C., Guisasola, J., & Almudí, J. M. (2004). Elementary electrostatic phenomena: historical hindrances and students' difficulties. *Canadian Journal of Math, Science & Technology Education*, 4(3), 291-313.

Galili, I., & Hazan, A. (2001). Experts' views on using history and philosophy of science in the practice of physics instruction. *Science & Education*, 10(4), 345-367.

Giere, R. N. (1999). Using models to represent reality. In *Model-based reasoning in scientific discovery* (pp. 41-57). Springer, Boston, MA.

Gil Pérez, D. (1986). La metodología científica y la enseñanza de las ciencias: unas relaciones controvertidas. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 4(2), 111-121.

Greca, I., & Moreira, M. A. (1997). The kinds of mental representation - models, propositions and images used by college physics students regarding the concept of field". *International Journal of Science Education*, 19(6), 711-724.

Griffiths, D. J. (2005). Introduction to electrodynamics. .

Grotzer, T. A., & Sudbury, M. (2000, April). Moving beyond underlying linear causal models of electrical circuits. In *annual meeting of the National Association of Research in Science Teaching, New Orleans, LA*.

Grotzer, T. A. (2003). Learning to understand the forms of causality implicit in scientifically accepted explanations. *Studies in Science Education* 39 (1)

Grotzer, T. A (2004). *Causal Patterns in Simple Circuits: Lessons to Infuse into Electricity Units to Enable Deeper Understanding*

Grotzer, T. A., & Shane Tutwiler, M. (2014). Simplifying Causal Complexity: How Interactions Between Modes of Causal Induction and Information Availability Lead to Heuristic-Driven Reasoning. *Mind, Brain, and Education*, 8(3), 97-114.

Guisasola, J., Zubimendi, J. L., Almudí, J. M., & Ceberio, M. (2002). The evolution of the concept of capacitance throughout the development of the electric theory and the understanding of its meaning by University students. *Science & Education*, 11(3), 247-261.

Guisasola, J., Almudi, J. M., Salinas, J., Zuza, K., & Ceberio, M. (2008). The Gauss and Ampere laws: different laws but similar difficulties for student learning. *European Journal of Physics*, 29, 1005.

Guisasola, J., Montero, A., & Fernández, M. (2008a). La historia del concepto de fuerza electromotriz en circuitos eléctricos y la elección de indicadores de aprendizaje comprensivo. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 30(1), 1604.

Guisasola, J., Zubimendi, J., Almudi, J. M., & Ceberio, M. J. (2008b). Dificultades Persistentes en el Aprendizaje de la Electricidad: Estrategias de Razonamiento de los Estudiantes al Explicar Fenómenos de Carga Eléctrica. *Enseñanza de las Ciencias*, 26(2), 177–192.

Guisasola, J., & Montero, A. (2010). An energy-based model for teaching the concept of electromotive force. Students' difficulties and guidelines for a teaching sequence. In G. Çakmakci, & M. F. Tasar (Eds.), *Contemporary science education research: learning and assessment* (pp. 255–258). Ankara, Turkey: Pegem Akademi.

Guisasola, J., Zubimendi, J. L., & Zuza, K. (2010). How much have students learned? Research based teaching on electrical capacitance. *Physical Review ST Physics Education Research*, 6, 020102.

Guisasola, J., Almudi, J. M., & Zuza, K. (2011). University Students' understanding of Electromagnetic Induction. *International Journal of Science Education*. <https://doi.org/10.1080/09500693.2011.624134>

Guisasola, J., Garmendia, M., Montero, A., & Barragués, J. I. (2012). Una propuesta de utilización de los resultados de la investigación didáctica en la enseñanza de la Física. *Enseñanza de las Ciencias*, 30(1), 0061-72.

Guisasola, J. (2014). Teaching and learning electricity: The relations between macroscopic level observations and microscopic level theories. In M. R. Matthews (Ed.), *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching* (pp. 129–156). New York, USA: Springer. Dordrecht

Guruswamy, C., Somers, M. D., & Hussey, R. G. (1997). Students' understanding of the transfer of charge between conductors. *Physics Education*, 32, 91.

Gutwill, J., Frederiksen, J., & Ranney, M. (1996). Seeking the causal connection in electricity: shifting among mechanistic perspectives. *International Journal of Science Education*, 18(2), 143-162.

Halbwachs, F. (1971). Causalité linéaire et causalité circulaire en physique. *Les théories de la causalité*, 19-38.

Halbwachs, F. (1971). Causalité linéaire et causalité circulaire en physique (linear causality, and circular causality in physics) *Les theories de la causalité* (pp. 39 – 111) M. Bunge, F. Halbwachs, T. S. Khun, J. Piaget, and L. Rosenfeld (Presses Universitaires de France, Paris).

Harrison, A. G., & Treagust, D. F. (2002). The particulate nature of matter: Challenges in understanding the submicroscopic world. In *Chemical education: Towards research-based practice* (pp. 189-212). Springer, Dordrecht.

Hazelton, R. L., Stetzer, M. R., Heron, P. R., & Shaffer, P. S. (2013, January). Investigating student ability to apply basic electrostatics concepts to conductors. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1513, No. 1, pp. 166-169). AIP.

Härtel, H. (1982). The electric circuit as a system: A new approach. *European Journal of Science Education*, 4(1), 45-55.

Härtel, H. (1985). The electric voltage: What do students understand? What can be done to help for a better understanding. In *Jung, W.(ed.): Rhöneck, C. von (ed.): Aspects of Understanding Electricity. Proceedings of an International Workshop. IPN-Arbeitsberichte* (Vol. 59, pp. 353-362).

Hernandes, J. A., & Assis, A. K. T. (2003). The potential, electric field and surface charges for a resistive long straight strip carrying a steady current. *American Journal of Physics*, 71(9), 938-942.

Hirvonen, P. E. (2007). Surface-charge-based micro-models—a solid foundation for learning about direct current circuits. *European journal of physics*, 28(3), 581.

Jackson, J. D. (1996). Surface charges on circuit wires and resistors play three roles. *American Journal of Physics*, 64(7), 855-870.

Jefimenko, O. D. (1966). *Electricity and Magnetism* (New York: Appleton-Century-Crofts).

Kärrqvist, C. (1985). The development of concepts by means of dialogues centered on experiments. *Aspect of Understanding Electricity*, 73-83.

Kim, E., & Pack, S. J. (2002). Students do not overcome conceptual difficulties after solving 1000 traditional problems. *American Journal of Physics*, 70(7), 759–765.

Kipnis, N. (2005). Chance in science: The discovery of electromagnetism by HC Oersted. *Science & Education*, 14(1), 1-28.

- Kipnis, N. (2001). Debating the nature of voltaic electricity. *Nuova voltiana: Studies in volta and his times*, 3, 121-151.
- Knight, R. D. (2013) *Physics a Strategic Approach*, 3rd ed. (Pearson, Boston) Chap. 30
- Kohlmyer, M. A., Caballero, M. D., Catrambone, R., Chabay, R. W., Ding, L., Haugan, M. P., & Schatz, M. F. (2009). Tale of two curricula: The performance of 2000 students in introductory electromagnetism. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 5(2), 020105.
- Koponen, I. T., & Huttunen, L. (2013). Concept development in learning physics: The case of electric current and voltage revisited. *Science & Education*, 22(9), 2227-2254.
- Kragh, H., & Bak, M. M. (2000). Christoph H. Pfaff and the controversy over voltaic electricity. *Bulletin for the History of Chemistry*, 25, 83-90.
- Leach, J., & Scott, P. (2002). Designing and evaluating science teaching sequences: An approach drawing upon the concept of learning demand and a social constructivist perspective on learning.
- Leniz A. (2013). *Rethinking DC Circuits for Teaching*, (Master Thesis in the program of Master in Nanoscience, UPV/EHU).
- Leniz, A., Zuza, K., & Guisasola, J. (2014). Difficulties Understanding the Explicative Model of Simple DC Circuits in Introductory Physics Courses. In *Proceedings of the Physics Education Research Conference* (pp. 151-154).
- Leniz, A., Zuza, K., & Guisasola, J. (2015). University Students Use of Explanatory Models for Explaining Electric Current in Transitory Situations. *Univ. J. Phys. Appl*, 9, 258-262.
- Leniz, A., Zuza, K., & Guisasola, J. (2017). Students' reasoning when tackling electric field and potential in explanation of dc resistive circuits. *Physical Review Physics Education Research*, 13(1), 010128.
- Leniz, A., Zuza, K., Sarriugarte, P., & Guisasola, J. (2019). University students' explanations for electric current in transitory situations. *European Journal of Physics*, 41(1), 015702.
- Leniz, A., Zuza, K., & Guisasola, J. (2019, August). University students' causal reasoning dealing with RC circuits. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1287, No. 1, p. 012021). IOP Publishing.

Liegeois, L., & Mullet, E. (2002). High School Students' Understanding of Resistance in Simple Series Electric Circuits. *International Journal of Science Education*, 24(6), 551–564.

Maloney, D. P., O'Kuma, T. L., Hieggelke, C. J., & Van Heuvelen, A. (2001). Surveying students' conceptual knowledge of electricity and magnetism. *American Journal of Physics*, 69(S1), S12-S23.

Marcus, A. (1941). The electric field associated with a steady current in a long cylindrical driver. *American Journal of Physics*, 9, 225–226.

Marton, F. (1981). Phenomenography—describing conceptions of the world around us. *Instructional science*, 10(2), 177-200.

Marton, F., & Pong, W. Y. (2005). On the unit of description in phenomenography. *Higher education research & development*, 24(4), 335-348.

McDermott, L. C., & Shaffer, P. S. (1992). Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity, Part I: Investigation of student understanding. *American Journal of Physics*, 60, 994–1003.

McDermott, L. C. (1991). Millikan Lecture 1990: What we teach and what is learned –Closing the gap. *American Journal of Physics*, 59(4), 301–315.

Méheut, M., & Psillos, D. (2004). Teaching-learning sequences: aims and tools for science education research. *International Journal of science Education*, 26(5), 515–535.

Millar, R. (1990). Making sense: What use are particle ideas to children. *Relating macroscopic phenomena to microscopic particles*, 283-293.

Millar, R., & King, T. (1993). Students' understanding of voltage in simple series electric circuits. *International Journal of Science Education*, 15(3), 339-349.

Moreau, W.R. & Ryan, S.J. (1985). Charge density in circuits. *American Journal of Physics* 53(6), 552–554.

Mulhall, P., Mckittick, B., & Gunstone, R. (2001). A perspective on the resolution of confusions in the teaching of electricity. *Research in Science Education*, 31, 575–587.

Muller, R. (2012). A semiquantitative treatment of surface charges in DC circuits. *American Journal of Physics*, 80, 782.

Nersessian, N. J. (1995). Should physicists preach what they practice?. *Science & Education*, 4(3), 203-226.

Nersessian, N. J. (2008). Mental modeling in conceptual change. In *International Handbook of Research on Conceptual Change* (pp. 391–416). S. Vosniadou (Ed.), Routledge, London.

Niaz, M. (1995). Chemical equilibrium and Newton's third law of motion: Ontogeny/phylogeny revisited. *Interchange*, 26(1), 19-32.

Novak, J. D. (1988). Constructivismo humano: un consenso emergente. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 6(3), 213-223.

Novak, J. D., Gowin, D. B., & Otero, J. (1988). *Aprendiendo a aprender* (pp. 117-134). Barcelona: Martínez Roca.

Oersted, M. C. (1820). Expériences sur l'effet du conflit électrique sur l'aiguille aimantée (1820). In *Annales de Chimie et de Physique* (Vol. 14, pp. 417-425).

Oliva, J. M. (1999). Algunas reflexiones sobre las concepciones alternativas y el cambio conceptual. *Enseñanza de las Ciencias*, 17(1), 93–107.

Osborne, R., & Freyberg, P. (1985). *Learning in Science. The Implications of Children's Science*. Heinemann Educational Books, Inc., 70 Court Street, Portsmouth, NH 03801..

Osborne, R. (1983). Towards modifying children's ideas about electric current. *Research in Science & Technological Education*, 1(1), 73-82.

Osborne, R. J., & Wittrock, M. C. (1983). Learning science: A generative process. *Science education*, 67(4), 489-508.

Perkins, D. N., & Grotzer, T. A. (2005). Dimensions of causal understanding: The role of complex causal models in students' understanding of science. *Studies in Science Education*, 41, 117.

Pfundt, H., & Duit, R. (1998). *Students' alternative frameworks and science education* (6^a ed.). Kiel, Germany: Institute for Science Education at the University of Kiel.

Piaget, J.: 1937, *La construction du réel chez l'enfant (The construction of reality in children)*, Neuchâtel, Switzerland: Delachaux et Niestlé.

Pintrich, P. R., Marx, R. W., & Boyle, R. A. (1993). Beyond cold conceptual change: The role of motivational beliefs and classroom contextual factors in the process of conceptual change. *Review of Educational research*, 63(2), 167-199.

Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science education*, 66(2), 211-227.

Preyer, N. W. (2000). Surface charges and fields of simple circuits. *American Journal of Physics*, 68(11), 1002-1006.

Psillos, D. (1998). Teaching introductory electricity. In A. Tiberghien, E. L. Jossem, & J. Baroja (Eds.), *Connecting research in physics education*. Boise: Ohio, USA: International Commission on Physics Education- ICPE.

Psillos, D. (1995) Adapting instruction to students' reasoning. In D. Psillos (Ed.), *European research in science education, Proceedings of the Second Ph.D. Summer School*, Thessaloniki (pp. 57–71).

Rainson, S., Tranströmer, G., & Viennot, L. (1994). Students' understanding of superposition of electric fields. *American Journal of Physics*, 62(11), 1026-1032.

Rhöneck, C. von. (1981). Student conceptions of the electric circuit before physics instruction. In W. Jung, & C. von Rhöneck (Eds.), *Proceedings of the International Workshop on Problems Concerning Students' Representation of Physics, and Chemistry Knowledge* (pp. 194–213). Pädagogische Hochschule, Ludwigsburg, Germany.

Roche, J. (2003). What is potential energy?. *European Journal of physics*, 24(2), 185.

Roche, J. (1989). Applying the history of electricity in the classroom: a reconstruction of the concept of 'potential'. *M. Shortland & A. Warwick Teaching the history of Science Oxford: Basil Blackwell*.

Roche, J. (1987). Explaining electromagnetic induction: a critical re-examination. *Physics Education*, 22, 91–99.

Rosser W G (1970) Magnitudes of surface charge distributions associated with electric current flow. *American Journal of Physics* , 38 264–6

Rosser, V. (1963). What makes an electric current flow. *American Journal of Physics*, 31, 884–885.

- Saglam, M., & Millar, R. (2005). *Diagnostic Test of Students' Ideas in Electromagnetism*. University of York, UK: Research Paper Series.
- Sarton, G., & Oersted, J. C. (1928). The foundation of electromagnetism (1820). *Isis*, 10(2), 435-444.
- Schiffer, M. B. (2008). *Power struggles: Scientific authority and the creation of practical electricity before Edison*. MIT Press.
- Scott, P., Asoko, H., & Leach, J. (2013). Student conceptions and conceptual learning in science. In *Handbook of research on science education* (pp. 45-70). Routledge.
- Shipstone, D. M. (1984). A study of children's understanding of electricity in simple DC circuits. *European journal of science education*, 6(2), 185-198.
- Shipstone, M., Von Rhöneck, C., Jung, W., Kärrqvist, C., Dupin, J., Johsua, S., & Licht, P. (1988). A study of students' understanding of electricity in five European countries. *International Journal of Science Education*, 10, 303.
- Smith, D. P., & van Kampen, P. (2011). Teaching electric circuits with multiple batteries: A qualitative approach. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 7(2), 020115.
- Sommerfeld, A. (2013). *Electrodynamics: lectures on theoretical physics* (Vol. 3). Academic Press.
- Stauffer, R. C. (1957). Speculation and Experiment in the Background of Oersted's Discovery of Electromagnetism. *Isis*, 48(1), 33-50.
- Steinberg, M. S. (1992). *What is electric potential? connecting Alessandro Volta and contemporary students in Proceeding of the Second International Conference on the History and Philosophy of Science and Science Teaching*. : Kingston.
- Steinberg, M. (1987, July). Transient electrical processes as resources for causal reasoning. In *Proceedings of the 2nd International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science & Mathematics* (Vol. 3, pp. 480-490).
- Stocklmayer, S. (2010). Teaching direct current theory using a field model. *International Journal of Science Education*, 32(13), 1801-1828.
- Stocklmayer, S. M., & Treagust, D. F. (1996). Images of electricity: How do novices and experts model electric current?. *International Journal of Science Education*, 18(2), 163-178.

Stocklmayer, S. M., & Treagust, D. F. (1994). A historical analysis of electric currents in textbooks: A century of influence on physics education. *Science & Education*, 3(2), 131-154.

Thacker, B. A, Ganiel, U., & Boys, D. (1999). Macroscopic phenomena and microscopic processes: Student understanding of transients in direct current electric circuits. *American Journal of Physics*, 67, 25.

Tipler, P. A., & Mosca, G. (2007). *Physics for scientists and engineers*. Macmillan.

Tobin, K. G. (2012). Constructivism as a referent for teaching and learning. In *The practice of constructivism in science education* (pp. 19-38). Routledge.

Turner, G. L. E., & Weston, M. (1983). *Nineteenth-century scientific instruments*. Univ of California Press.

Varney, R. N, & Fisher, L. H. (1980). Electromotive force: Volta's forgotten concept. *American Journal of Physics*, 48(5), 405–408.

Viennot, L. (2002). *Razonar en física: La contribución del sentido común*. Madrid, España: Machado Libros.

Viennot, L. (1996). *Raisonnement en physique: la part du sens commun*. De Boeck Supérieur.

Viennot, L. (1994). Recherche en didactique et nouveaux programmes d'enseignement: convergences: Exemple du programme de physique de quatrième (grade 8) 1993, en France. *Didaskalia (Paris)*.

Vosniadou, S. (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and instruction*, 4(1), 45-69.

Vosniadou, S. (2002). On the Nature of Naïve Physics. In M. Limon, & L. Mason (Eds.), *Reconsidering the Processes of Conceptual Change* (pp. 61–76). Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

Wandersee, J. H, Mintzes, J. J, & Novak, J. D. (1994). *Research on alternative conceptions in Sciences*. New York, USA: McMillan Publishing Company.

Watt, M., & Taber, K. S. (1996). An explanatory Gestalt of essence: students' conceptions of the «natural» in physical phenomena. *International Journal of Science Education*, 18(8), 939–954.

Weber, W., Fischer, O., & Merkel, F. S. (2014). *Wilhelm Weber's Werke: Vierter Band Galvanismus und Elektrodynamik*. Springer-Verlag. Weber, W. E. Wilhelm Weber's Works Translated into English.

Whittaker, E. (1989). *A History of the Theories of Aether and Electricity: Vol. I: The Classical Theories; Vol. II: The Modern Theories, 1900-1926* (Vol. 1). Courier Dover Publications.

Windschitl, M., Thompson, J., & Braaten, M. (2008). Beyond the scientific method: Model-based inquiry as a new paradigm of preference for school science investigations. *Science education*, 92(5), 941-967.

Young, H. D, & Freedman, R. A. (2008). *University Physics with Modern Physics vol. 2* (12^a ed.). New York, USA: Addison-Wesley.

APPENDICES

APPENDIX I

Leniz, A., Zuza, K., & Guisasola, J. (2014). Difficulties Understanding the Explicative Model of Simple DC Circuits in Introductory Physics Courses. In *Proceedings of the Physics Education Research Conference* (pp. 151-154).

Difficulties Understanding the Explicative Model of Simple DC Circuits in Introductory Physics Courses

Ane Leniz*, Kristina Zuza* and Jenaro Guisasola*

**Department of Applied Physics, University of the Basque Country (UPV-EHU), Plaza Europa 1, 20018 Donostia-San Sebastian, Spain*

Abstract: Research has shown [1] that understanding the relationship between electrostatics and electrodynamics requires meaningful knowledge about electric concepts. The aim of this investigation is to identify the scope of students' understanding about electric concepts related to the Drude model and the Surface Charge model. In this paper we will describe preliminary results from research at University of the Basque Country (UPV/EHU) and at University of Washington (UW). Some specific examples of the applied questions will be discussed. It will be shown that introductory physics students do not give consistent explanations about the charge movement mechanism on simple DC circuits. The results will be used to develop instructional materials further.

Keywords: physics education research, undergraduate, electric potential difference, surface charge density, electric field, understanding

PACS: 01.40.Fk, 41.20.-q

INTRODUCTION

The model currently taught in most universities and high schools (if not in all) to explain how current works in a dc circuit is the Drude model. This model states that the current in a wire is produced by a potential difference between two points of the wire and the electrons are guided by an electric field located inside the conductor with a direction parallel to the wire at any point. One could argue that students have good knowledge and understanding of the simple DC circuit system. However, it has been shown that this does not help to understand the mechanism behind the movement of charges [1]. On the other hand, new studies [2] on ways of teaching direct current circuits propose an approach based on the microscopic mechanisms that produce the charge movement. This approach, called the Surface Charge Model, introduces the mechanism of charge distribution gradient in the circuits' wire surface, giving a different potential at different points of the wire in the circuit. The Surface Charge model enables us to deal with concepts such as electric field and potential difference more exhaustively [3]. The SCM model includes a microscopic mechanism to explain the electric current in transient states, such as those introductory physics course students discuss in simple RC circuits and in charging and discharging of capacitors [4].

This paper describes preliminary results from a research at the University of the Basque Country (UPV/EHU) and at the University of Washington (UW). The aim of the investigation is to identify the scope of students' understanding on electric concepts related to the Drude model and the Surface Charge model. Few studies have focused on how students articulate levels describing direct current using both the Drude and the Surface Charge models. Within this context, this work focuses on how students explain phenomena.

RESEARCH CONTEXT

This research project involved over 110 students at the UPV/EHU in the first year Introductory Physics course for engineers. All of them had taken at least two years of physics in high school and they had passed the national university entrance exams in Spain to study science or engineering. These students took 3.5 hours of lectures and 2 hours of laboratory per week for 14 weeks (second semester) on electromagnetism. Electrostatics and electric circuits were taught for 5 or 6 weeks of this course.

Moreover, the study has also involved 470 students from UW in the E&M course calculus-based sequence for scientists and engineers. The format of this course (per week) is three 50 minute lectures, one two-hour laboratory session and one

tutorial section based on *Tutorials in Introductory Physics* [5] lasting 50 minutes in small groups.

In all cases, lectures were given by experienced teachers of the Physics Department, and the Electricity curriculum in both universities is similar to those of textbooks as for example Tipler and Mosca (2004).

Methodology

The data was collected through written questions, some of which were online questions. All questions were answered as post-test after receiving instruction.

The same investigator coded all the responses using phenomenographic methodology [6], and re-coded them again to ensure consistency between categories (intra-rater reliability Kappa coefficient 0.89). The categories were also discussed with two more investigators who agreed with the exposed code (inter-rater reliability coefficient was 0.85). When there was no agreement, a discussion was held until there was consensus.

Student reasoning was also analyzed to go into greater depth on student understanding [7].

EXAMPLES OF QUESTIONS

Students were given a variety of questions over the course to investigate their understanding of how current works in a simple dc circuit. The aforementioned questions had different formats, but all were given as post test after receiving instruction. Some of the questions were multiple-choice although a reasoned explanation of the answer was also required. Others were open-ended questions where students were asked to give an in-depth explanation of the mechanism. The questions probed student understanding of both models in different contexts. A few examples of the aforementioned questions are discussed below.

Students are shown an expanded circuit, which has a short carbon resistor connected by a copper wire to a battery. They are told that it has been connected for a long time and that there is a constant current flowing through it. In addition, they were also told that carbon has much lower conductivity than copper.

Question 1: Students are asked about the electric field at two points of the circuit: one point is located inside the carbon resistor and the other in the copper wire nearby the carbon resistor. Students are supposed to be able to compare the magnitudes of these two electric fields. One correct explanation, according to the Drude

model, is that the electric field inside the carbon resistor is larger than in the copper wire, because to maintain constant electric current through the entire circuit the electric field has to be larger in a resistor where conductivity is lower, as the area of the wire is the same throughout the circuit. The surface charge model could also be used to explain that as the surface charge gradient is higher in carbon than in copper, the electric field produced will also be larger in carbon. However, we do not expect students to use this kind of reasoning spontaneously.

Question 2: Students are shown a close-up of a carbon resistor and its surroundings. In this question, students are explicitly asked about the mechanism of current proposed by the surface charge model. They are asked about the change of surface charge density on the carbon and copper surface. One correct explanation is that if we conclude that the electric field inside the carbon resistor is larger, we need a larger change in surface charge density which is producing that larger electric field.

Question 3: Students are asked if the potential difference between two points in the circuit is related to the surface charge density. More specifically, they are asked about the potential difference between a point inside the carbon resistor and another point nearby, in the copper wire. A simple answer could be to argue that there is a relationship between potential difference and surface charge density. As students had already learned in electrostatics, all charge distribution will always be related to the potential generated between two points. The surface charge model has the advantage of explicitly demonstrating this relation.

IDENTIFICATION OF EXPLICATIVE PATTERNS

The questions described in the previous section do not ask for an answer learned by rote or based on an equation. Students have to analyze the situation and solve it according to an explicative model. In most of the answers students' responses are statements with no justification, or based on wrong learned memory routes. Other students answer correctly yet justify their response incorrectly.

Despite the curriculum similarities for students at both universities, our aim is not to compare them. In this study we hope to find out about the students' main thinking patterns when they have to interpret concepts such as potential difference, electric field and surface charge density, and see if

there are similarities in different countries. We discuss the most common tendencies in student explanations, independently of how correct their answer might be.

Regardless of the explanations given for the answer, three main alternative lines of reasoning emerge which are based on a linear or simple causal reasoning. The results obtained in each explanatory category are shown in Table 1.

Charge density variation in the wire implies field and/or potential variation (Category A)

In category A, all the answers explain that the flow of electricity through the circuit and/or the value of the electric field is proportional to the amount of charge or charge density in the wire. They justify their answer with an explanation based on a causal linear reasoning: there is a chain guiding the potential difference to the electric field, which they relate to the surface charge density. They consider that the potential difference between two points in a circuit is due to difference in charge quantity or density in the wire, but they do not justify it. Explanations like the following were common. *“Since the density is equal, the electric field magnitudes will be equal.”*(question Q1) or *“Yes, because the charge distribution affects electric fields which affects the potential difference”*(question Q2).

The battery supplies constant current (Category B)

Answers in category B indicate that the battery supplies a constant current and so, there is no accumulation of charges in the wire. The value of the electric field is proportional to current intensity. Students who use this explanation model consider a macroscopic level of analysis based on $I = \text{constant}$, in the stationary state. They do not think about the mechanism which makes $I = \text{constant}$ possible, i.e., the surface charge density gradient on the wire. They use a simple causal reasoning to argue that the battery produces an electric current, which is constant, and thus there is no charge accumulation in any part of the circuit, which implies that the surface charge density is constant in the wire. Examples of this kind of answer are the following:

“The electric fields will be the same for both because the current flowing through is constant” (question Q1). *“Since the current is constant, the*

same amount of charge flows through the resistor and the conductor” (question Q2).

Reasoning based on conductivity (Category C)

Responses in this category explain that the current through the circuit depends on the conductivity of the materials making up the circuit. This explanation states that the material conductivity influences the accumulation of charges in the wire and the value of electric field and potential. This reasoning is based on the conductivity of the circuit's materials. Students use linear causal reasoning which follows this diagram in Q2: a) Carbon has lower conductivity b) and so electrons are less free to move in the carbon, c) this implies smaller (option 1) or larger surface charge density (option 2). Some examples of this category are:

Option 1: “The carbon has lower conductivity so its charges are less free to move around than in copper, so it will become less charged as a result.”

Option 2: “The charges flowing through the carbon would slow down and thus become more packed together and dense.”

Other students use the same model based on material conductivity but with simple linear reasoning, which is less thorough than the previous model. In Q2, for example, students explain that the carbon's higher resistivity or the copper's higher conductivity produces charge to be accumulated (option 2), or implies less charge in the material (option 1). For example:

Option 1: “Since carbon has lower conductivity than copper, its surface charge density is smaller than the copper wire. There is less positive and negative charges on it.”

Option 2: If the electrons move slower through the carbon, then they must be squeezed closer together, somewhat like cars in heavy traffic.

It is important to note that, in this question, students are asked about surface charge densities we had expected, they seem unable to identify what they actually are. They tend to use the concept of charges when giving an explanation, and add the adjective “surface” because it is in the statement of the question, without understanding the meaning.

TABLE 1. Different answer category percentages for the three questions in both UPV (N=113) and UW (N=476)

	Category A		Category B		Category C		Other	
	UPV/EHU	UW	UPV/EHU	UW	UPV/EHU	UW	UPV/EHU	UW
Q1	5%	37.5%	12%	9.5%	41%	7%	42%	46%
Q2	-	-	-	11%	42%	60%	58%	29%
Q3	24.5%	33%	-	5%	6.5%	10%	69%	52%

However, the vast majority of students are not able to give a justified explanation to any of the questions.

One striking result is the high percentage of incoherently justified or unjustified answers. In the first question (Q1) almost half of them (46% at UW and 42% at UPV/EHU) did not coherently explain their answer or did not answer anything at all; in the second question (Q2), these figures stood almost one third of students at UW (29%) and more than half at UPV/EHU (58%), and in the third question (Q3), more than a half (52% at UW and 69% at UPV/EHU). As the questionnaire was part of the final evaluation, and taking into account the way students answered other questions, it does not seem that this result is due to lack of student interest. It may be due to the fact that students do not understand any explicative model to explain the relationship between electric concepts like electric field and potential difference and the movement of charges through the circuit.

DISCUSSION

Analyzing answers to the questions has revealed that there are three categories of explanations, independently of their country and professor. The model most used by students (category C) consists of supposing that the material conductivity *directly* influences microscopic properties such as electric field, potential difference and movement of charges. This overgeneralization leads students to failure when they analyze questions involving the value of field and potential difference in a circuit.

Another result is the difficulty that students have recognizing the surface charges on the wire. Students speak about the flow of charges into the wire (category A). One possible explanation is that most typical textbooks propose a model which only mentions the current flow into the wire but not the mechanism that produces the current. So students are not used to thinking about how surface charge density gradients affect the current.

The results show that the majority of students do not give consistent explanations to the charge

movement mechanism on simple DC circuits. A minority of answers explain in a scientific way the three questions (about 10% at both universities). Students' explicative models are mostly poor and the vast majority do not use not the Drude model neither any microscopic mechanism that explains the electric current in stationary states.

The results have major implications on the instruction. It is necessary to carry out additional research to identify new instructional strategies which would help students' conceptual understanding, and develop better explicative models that should link their electrostatics comprehension to the study of simple DC circuits.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank Paula Heron and Peter Shaffer for the discussion about the questions, and also Ryan Hazelton and all the members of the Physics Education Research Group at University of Washington who facilitated this research.

REFERENCES

1. J. Guisasola, Teaching and learning Electricity: The relations between macroscopic level observation and microscopic level theories. In M.R. Matthews (ed.) International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching, (Springer, Dordrecht, 2014), Chap. 5, pp. 129-156.
2. J. Guisasola, J. L. Zubimendi and K. Zuza, Phys. Rev. ST-PER **6**, 020102 (2010).
3. H. Haertel, (private communication, 2012)
4. R. W. Chabay, and B. A. Sherwood, *Matter and Interactions*, 3rd ed, (Wiley, New York, 2011).
5. R. L. C. Hazelton, M. R. Stetzer, P. R. L. Heron and P. S. Shaffer, AIP Conf. Proc. **1513**, 166 (2013).
6. L. C. McDermott, P. S. Shaffer, and the P.E.G. at the U.W., *Tutorials in Introductory Physics* (Pearson Learning Solutions, 2011).
7. F. Marton, Instructional Science **10**, 177-200 (1981).
8. F. Halbwachs, Eur. J. of Sci. Edu. **1**(2), 169-171 (1979).

APPENDIX II

Leniz, A., Zuza, K., & Guisasola, J. (2015). University Students Use of Explanatory Models for Explaining Electric Current in Transitory Situations. *Univ. J. Phys. Appl*, 9, 258-262.

University Students Use of Explanatory Models for Explaining Electric Current in Transitory Situations

Ane Leniz, Kristina Zuza, Jenaro Guisasola*

Department of Applied Physics, University of the Basque Country (UPV/EHU), Polytechnical College, Spain

Copyright © 2015 by authors, all rights reserved. Authors agree that this article remains permanently open access under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 International License

Abstract There are many studies on students' understanding of DC circuits in the steady state, but few studies have been made about students' ideas on transient states of movement of charges in a conductor. The traditional Electricity curriculum often involves situations of transient motion of charges such as the process of charging a body (conductor or dielectric), closing or opening the switch in a DC circuit or, circuits charging and discharging capacitors. In this research, we present two questions that have been used to investigate the representations of students about the movement of charges of transients in direct current, which focus on the transition between electrostatics and electrodynamics in first year university undergraduate study. The results obtained show that a significant percentage of students cannot correctly interpret simple transitory state current phenomena. Their explanations fall into two general categories. Firstly, one based on potential difference and secondly, one that excludes current flow in processes of transitory state. Some consequences for teaching are discussed.

Keywords Physics Education, University Students' Difficulties on Learning Explicative Models, DC Simple Circuit in Transitory State

1. Introduction

In many introductory physics courses on electricity, the core of the theory of electric circuits is a set of simple DC circuit laws, which relate algebraically voltages, currents and resistance. These laws are included because they are usually related to Drude's classical theory of electric conduction. The Drude model gives an adequate classical description of electric conduction in metals which leads to Ohm's law and shows that resistivity in a metal can be explained by the motion of its free electrons [1]. One might assume that all details about the simple system of DC circuit are well known and understood. However, in a DC circuit with resistors, explanations to predict relationships between variables I , V and R refer, in general, only to the steady state, and express invariance with respect to certain transformations. These

relationships do not describe how circuits behaves during transient states, and therefore, provide little understanding of the underlying dynamic processes that lead to the equilibrium state of a system [2]. Moreover, the traditional electricity curriculum at introductory physics courses often involves situations of transient motion of charges, such as the processes of charging a body (conductor or dielectric), closing or opening the switch in a DC circuit or, circuits charging and discharging capacitors.

Understanding students' ideas about how DC circuits work in physics is one important aspect of providing guided instruction and of curriculum development in electricity. There are many studies that identify which concepts and representations students learn well and with which of them students struggle within the context of DC circuits in the steady state, but few studies have been made of students' ideas on transient states of movement of charges in a conductor [3,4]. In this research, we present two questions that have been used to investigate the representations of students about the movement of charges of transients in direct current, which focus on the transition between electrostatics and electrodynamics in first year at university.

One major goal of our work was the development of a guided problem-solving (GPS) tutorial [5] to be used in an introductory electricity course to help students connect the explanatory model of direct current in simple circuits with the concepts of electrical field and potential as defined by electric theory. However, this paper mainly focuses on the students' difficulties that we have identified as a result of addressing the following research questions:

- Which type of ideas or models do students use when explaining transient state current in a conductor wire?
- To what extent do students use the Drude model to explain the movement of charges?

We will present the development of instructional strategies used to address these questions in a separate paper.

2. Context of the Research and Methodology

The current research involved more than 70 students at the

University of the Basque Country (UPV/EHU) in the first year Introductory Physics course for engineers. All of them had taken at least two years of physics in high school and had passed the national exams in Spain for admission to University to study science or engineering. Those students received 3.5 hours of lectures and 2 hours of laboratory per week during 14 weeks (second semester) on electromagnetism. Electrostatics and electric circuits were taught for 5 or 6 weeks of this course.

In addition, the study also involved more than 200 students from the University of Washington (UW) in the calculus-based E&M course for scientists and engineers. The weekly format of this course is three lectures of 50 minutes each, one two-hour laboratory and one tutorial section based on *Tutorials in Introductory Physics* [6] of 50 minutes in small groups.

In all cases, lectures were given by experienced teachers of the Physics Department, and the Electricity curriculum in both universities is similar to those given in textbooks like Tipler and Mosca (2004).

The data were collected in written questions, some of which were online. All the questions were answered as post-test after receiving instruction. The students' answers to the questions were subjected to rigorous analysis [7]. The analysis does not focus on correct or incorrect answers but on identifying students' understanding and alternative conceptions. We are aiming at a nuanced understanding of what aspects of explanatory model on currents transient state students understand reasonably well and what aspects are problematic for them. One member of the research team derived a draft set of categories of description for each question based on a reading of the students' answers, and tentatively allocated each answer to one of the draft categories. Three weeks later, the same researcher again read the students' answers and repeated the process. The intra-rater reliability Cohen's kappa coefficient was calculated for this period of time, obtaining a mean value of 0.89 for all the questions, which is satisfactory for a confidence level of 95%. The other researchers carried out the task of allocating each answer to one of established categories independently. Once the answers were classified, the allocations of answers were compared. The mean kappa reliability coefficient was 0.86 for the questions, which indicates very good consistency in the judges' criteria for setting the categories described.

3. Experimental Design and Results

Two questions were given to students over the course to investigate their understanding on the mechanism of how current works in transitory movement of charges. The questions were administered in different formats, but all of them were done post-test after receiving instruction. One of the questions was a multiple-choice question which also asked for a reasoned explanation of the answer. The second question was an open-ended question in which students were

asked to explain in depth the phenomenon presented. Although the students' curriculum at both universities is similar, it is not the aim of this study to make comparisons or rankings. What this study seeks to identify is the students' main thinking patterns when interpreting contexts of current in transitory state and whether or not there are similarities in the responses collected in the different countries. The questions and a few examples are discussed below.

The first question aims to study what students think about the relations between current and potential difference in a DC circuit (figure 1). The question Q1 is very familiar to students in the academic context.

Question Q1.- In the circuit shown below, what is the potential difference between point A and point B after the switch is closed? Choose the correct option (the resistance of the wire is ignored)

- a) 0 V
- b) +6 V.
- c) Infinity
- d) + 12 V.
- e) Not enough information to answer

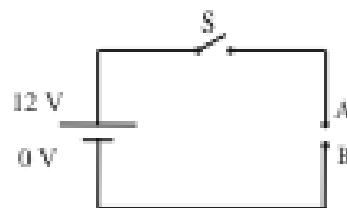


Figure 1. A battery and wires make up the circuit. The resistance of the wires is considered zero. At the UPV/EHU the question has a final statement "Explain the option you choose"

To answer Q1 correctly, students should justify the difference between the current and potential difference in the open circuit. The results are shown in table 1.

The vast majority of students (more than three-fourths) in both UPV/EHU and UW chose the correct option. This could indicate that students had learned a basic declarative or descriptive knowledge that helped them distinguish between current and potential difference in a DC circuit. The results indicate an improvement over other studies showing that secondary students confuse the concepts of current and potential difference [8].

Table 1. Result for question Q1

Options	UPV/EHU-Donostia (N=72)	UW-Seattle (N=214)
Zero	18%	9.5%
6 V	0.0%	0.5%
Infinity	0.0%	0.5%
+12 V *	79.0%	89.0%
No suf. Info.	3.0%	0.5%

The correct one is shown by *

However, in Q1, UPV/EHU students had not only to select the correct answer but also to justify their answer. In this university, we found that only 23% (N=17) of the students

who chose the correct answer justified their response with a coherent scientific explanation. They explained that the potential difference between points A and B is the same that between the battery poles (if the resistance of the wires is ignored). The majority of these answers (N=14, 19.5% of the total answers) explain explicitly that there will be a transitory current in a very brief time interval. For example: “during a very brief interval of time there will be a transient current. In stationary situation there are 12 volts and in the other 0, I consider that there is not resistance in the wire”.

The majority of the students (57%) did not explain why they had chosen their answer. They were not able to give an explanation for what happens in the circuit, although most of them knew what the correct answer was.

The option “zero” was chosen by a significant percentage of students at UPV/EHU (18.0%). A third of the subjects that chose this option explained that the potential difference is zero because the circuit was open. These answers assume that the relationship between current and potential difference is proportional as in Ohm's law. An example of this kind of answer: “the potential difference is proportional to the current. The circuit is open and the current is zero. So, the potential difference is zero”. This mistake is consistent with previous studies that showed High School students tend to confuse the concepts of current and potential difference [9]. Another third of the answers in this option assumed that the potential at point A is the same as the point B and so, the potential difference is zero. The rest of the answers were unsupported.

The context of question Q2 does not involve an electric circuit and it is an open-ended question designed to probe students' explanations (figure 2). Question Q2 was designed to address the explanatory model that students use for explaining the transitory movement of charges in the system. The aim of this question is to inquire about the students' use of concepts like electric potential and charge quantity in their explanatory model.

Question Q2.- Two conducting spheres of different radii are connected to two batteries as shown in the figure below. If both switches are closed simultaneously, will be electrical

current? Will be the spheres become charged? If so, calculate the charge on each. Explain your answers.

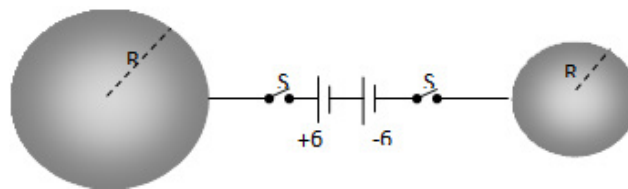


Figure 2. The system consists of a battery, wires and two conducting spheres and is similar to the system in question 1, but here the context is more relevant to the process of charging bodies (electrostatic) than the context of DC circuits (electrodynamics).

The students were asked if the spheres will charge or not, and if they do become charged, students were also asked to explain why and calculate the charge of each sphere at the end of the process. In question Q2, students were told that the wires were sufficiently long such that there are no interactions (electric induction) between spheres, and the spheres and the battery poles. The two batteries are connected in series, in a way that the big sphere is linked to the +6V pole and the small sphere is linked to the -6V.

One way of answering this question correctly, the students should relate the potential difference to the charging process of the spheres, and understand that the charging process will finish when the potential difference between the battery and the two spheres is zero (category A.1 in table 2).

Drude's model, which is the one students have learned, states that to move charges between two points of a conducting wire, a potential difference must exist between two points on the wire. In a correct explanation of question Q2, students have to understand the theoretical model that relates the movement of charges to the amount of potential difference, and they have to be able to use the equation which relates the potential with the charge, in order to calculate the charge of the sphere at the end of the process. If students had been told about surface charge distributions in simple circuit wires, the question could be explained using the mechanism of surface charge gradients and argued by electric field superposition [10]. But this is not the case.

Table 2. Categories of explanation for question Q2

Category of explanation	UPV/EHU-Donostia (N=200)	UW-Seattle (N=504)
A.1* - The transitory movement of charges is due to a potential difference and the final quantity of charges is calculated through the Potential and /or Capacitance concepts.	38%	42.5%
A.2* - The transitory movement of charges is not mentioned, and the final quantity of charges is calculated through the Potential and/or Capacitance concepts.	12%	0%
B.- They do not become charged. It is not a closed circuit.	20%	34%
C.- Answers based on incoherently justified or not justified statements	22%	17%
D.- Not answered	8%	6.5%

The correct one is shown by *

Another way of answering correctly the question is to consider the final equilibrium situation without mentioning the electric current. In this answer it is reasoned that the equilibrium is reached when the big sphere has a +6V potential, and the small sphere has a -6V potential. Later, the charge quantity of each sphere is calculated by using the capacitance. Only 12% of students at UPV/EHU and no one at UW, answer in this way (category A.2 in table 2). This could be due to the fact that the question was asked after studying DC circuits and electrostatics was far from their close experience in learning, or that they don't connect concepts from electrostatic with electric current.

As our current study differs from others in that we focus on students' understanding of the physical justification of the explanatory model for the DC circuits, in table 2 we show not only the correct or incorrect answer, but also different students' categories of explanations.

At both universities, the two main explanatory tendencies were the same (categories A and B).

In category A.1 (about 40%) are grouped those responses that account for the movement of charges based on a potential difference between the ends of the conductor. This type of response can be interpreted as an explanation based on the Drude's model. The vast majority of answers follows a linear causal reasoning [11] that has a chain of cause and effect: a) There is current because there is a potential difference between two points of the conductor, b) at the end of the process the potential in the two spheres will be the same, as the current ceases, c) applying the potential equation of a sphere, the concept of charge and potential are related, and the final charge on each sphere can be calculated. Standard examples of this category of response are:

"There will be current until the potential difference will be equal between the spheres and the poles of the battery. The final potential is equal in both spheres, but they have opposite signs. The charge per unit area is: $Q_1=q_1/4\pi R_1^2$ and $Q_2=q_2/4\pi R_2^2$. When we apply the equation $V=q/\pi\epsilon r$ which is the potential of a sphere and we take that the potential is the same in both spheres but opposite in sign, we can calculate the charge of each of the spheres."

"They will become charged and there will be current until spheres potential became: $V_1=6 V$ and $V_2=-6V$. As $C=q/\Delta V$, the calculi of charge is: $q=C V= 4\pi\epsilon_0 r V$ "

At the UPV/EHU, category A.2 emerged with 12% of answers (16%), which did not occur at UW. In this category the students' reasoning is related only with electrostatic concepts without reference to transitory current that happens before arriving to equilibrium situation. One standard example of this category is:

"Both spheres will have the same final potential, but with opposite signs. The sphere on the left side will have 6 V and the sphere on the right side will have -6 V. Applying the definition of the capacitance for a sphere: $C=4\pi\epsilon_0 r$ and the relation $C=q/V$, then solving for the charge, we obtain the final charge of each sphere: $q=4\pi\epsilon_0 r V$ "

The majority of the answers (about 70% at both universities) miscalculates the value of potential and final charge. This failure could indicate students' low level of application of electrostatic equations in the context of transitory currents.

About 20% of the answers explain that the spheres do not become charged because the circuit is open (category B). Most of them mentioned Kirchhoff's Law to justify the answer. The responses follow a simple causal reasoning [11] that relates one cause with one effect: a) the circuit is open (cause); b) there is no flow of charges (effect). It is clear that these students do not recognize the transient current in this context; they only imagine closed circuit in steady state current. One example of this kind of answer is the following: *"The + and - sides of the battery are not connected, so the circuit is not complete. The sum of the potential differences in the circuit is zero"*

In category C we included answers without internal logic or that apply physics concepts without meaning. This type of answers shows that there is not an explicative model to interpret the phenomenon given in question Q2.

4. Discussion and Implications for Future Work

When drawing conclusions it is necessary to bear in mind that this study is the initial part of a project on students' explanatory model of DC circuits in both transitory and steady state. The two questions presented describe situations in which current flow is associated with a transitory state. The two questions do not provide conclusive evidence on all university students' explanatory model about transitory state current processes, but the data show that the explanatory categories manifest themselves in two different universities (and countries) and provide further evidence of their persistence. Some of the difficulties we identify are new; others may be interpreted as previously documented difficulties that tend to arise in the first year at university [4].

We found that there are two major explanatory tendencies of current in transitory states. One category explains the movement of charges qualitatively according to the potential difference but there are fewer responses in this category when the explanation is quantitative. Namely, in Q2 about 40% of the students were able to explain it qualitatively, but only about 23% of them gave a quantitative explanation as well. Explanations of students in this category are usually accompanied by a linear causal reasoning that associates electric current between two points with the potential difference between them. This explanatory model can be regarded as an application of the Drude's model, which is explained in the instruction of the students involved in this research. A minority of answers from UPV/EHU (12%) calculate correctly the final charge of the spheres in question Q2 but without mention to the electric current. For this minority of answers, all we can say is that students didn't discuss the transient-state of current.

The second explanatory category (20% in Q1, 20-34% in Q2) does not take into account the transient motion of charges in circuits. The explanation is associated with a simple causal reasoning which links the “open circuit” to the fact that there cannot be an electric current in steady states. This line of reasoning is related to a supposed dichotomy, that is, there are only two options: a) open circuit, no current; b) closed circuit, steady-state current. It seems that students in this category have only one explanatory model for a steady-state current.

The results obtained show that a significant percentage of students cannot properly interpret simple transitory state current phenomena. This suggests several possibilities for instructional changes. According to our findings and the explanatory model of current in a wire, the key idea that will be necessary to emphasize would be the microscopic mechanism of production of potential difference between two points within the circuit wire, in both transitory current and steady situations. In particular, this involves the relationship between the concept of electric potential studied in Electrostatics (capacitors, charging bodies ...) with those analyzed in DC circuits. The results show that omitting an explanation of a microscopic mechanism of charge movement makes it harder for students to interpret transitory states in DC circuits. Part of our work will involve the development of a guided problem-solving (GPS) tutorial to help students better understand DC circuits and the connection between the fundamental concepts of electricity (field, potential difference) and an explanatory model of DC circuits.

The present study is the beginning of a project about students' model for explaining electric current in transitory and stationary situation. Regarding previous studies, this study provides new information about the students' ideas/models for explaining the electric current in transitory situations, but it will be necessary more research to confirm and develop the results obtained here, and to extend the information to electrical current in stationary situation in DC circuits. This will be the aim of our next studies.

Acknowledgements

This work is supported by the project granted by the Government of the Basque Country (Spain). We would like to thank the members of the of the Physics Education

Research Group at the University of Washington, and our colleague Paula Heron for her continued collaboration on this work.

REFERENCES

- [1] D. J. Griffiths (1999). *Introduction to Electrodynamics* (Prentice-Hall, 1999) Chapter 7, p. 289.
- [2] M.A. Heald, Electric field and charges in elementary circuits, *Am. J. Phys.*, 52, 522 (1984)
- [3] D. P. Smith and P. van Kampen, Teaching electric circuits with multiple batteries: A qualitative approach. *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res* 7, 020115 (2011)
- [4] J. Guisasola, Teaching and Learning Electricity: The Relations between Macroscopic Level Observations and Microscopic Level Theories. In *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching*, edited by M.R. Matthews (Springer, Dordrecht, 2014) vol I, chapter 5, 129-156.
- [5] K. Zuza, J.M.Almudí, A. Leniz, and J. Guisasola, “Addressing students’ difficulties with Faraday’s law: A guided problem solving approach”, *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res* 10, 010122 (2014)
- [6] L. C. McDermott, P. S. Shaffer, and the P.E.G. at the U.W., *Tutorials in Introductory Physics* (Pearson Learning Solutions, 2011)
- [7] M. Watts, G. Gould, and S. Alsop, “Questions of understanding: Categorising pupils’ questions in Science” *Social Science Research*, 79, 57 (1997)
- [8] J. Dupin and S. Joshua, Conceptions of French pupils concerning electric circuits: Structure and evaluation. *Journal of Research in Science Teaching*, 6, 791 (1987)
- [9] L.Liegeois and E. Mullet, High School Students’ Understanding of Resistance in Simple Series Electric Circuits, *International Journal of Science Education*, 24(6), 551 (2002).
- [10] R. Chabay and B. Sherwood, *Matters and Interactions vol 2*. John Willey & Sons, 3th edition, (2011).
- [11] F. Halbwachs, Reflexions sur la causalité physique (reflections on causality in physics), in *Les Théories de la Causalité*, edited by M. Bunge, F. Halbwachs, T.S. Kuhn, J. Piaget, and L. Rosenfeld (Presses Universitaires de France, Paris, 1971), pp. 19–38 and pp. 39–111.

APPENDIX III

Leniz, A., Zuza, K., & Guisasola, J. (2017). Students' reasoning when tackling electric field and potential in explanation of dc resistive circuits. *Physical Review Physics Education Research*, 13(1), 010128.

Students' reasoning when tackling electric field and potential in explanation of dc resistive circuits

Ane Leniz, Kristina Zuza, and Jenaro Guisasola

*Donostia Physics Education Research Group and Applied Physics Department,
School of Engineering Gipuzkoa (UPV/EHU), Plaza Europa 1, San Sebastian 20018, Spain*
(Received 10 February 2017; published 19 May 2017)

This study examines the causal reasoning that university students use to explain how dc circuits work. We analyze how students use the concepts of electric field and potential difference in their explanatory models of dc circuits, and what kinds of reasoning they use at the macroscopic and microscopic levels in their explanations. This knowledge is essential to help instructors design and implement new teaching approaches that encourage students to articulate the macroscopic and microscopic levels of description. A questionnaire with an emphasis on explanations was used to analyze students' reasoning. In this analysis of students' reasoning in the microscopic and macroscopic modeling processes in a dc circuit, we refer to epistemological studies of scientific explanations. We conclude that the student explanations fall into three main categories of reasoning. The vast majority of students employ an explanatory model based on simple or linear causality and on relational reasoning. Moreover, around a third of students use a relational reasoning that relates two magnitudes current and resistance or conductivity of the material, which is included in a macroscopic explanatory model based on Ohm's law and the conservation of the current. In addition, few students situate the explanations at the microscopic level (charges or electrons) with unidirectional cause-effect reasoning. This study looks at a number of aspects that have been little mentioned in previous research at the university level, about the reasoning types students use when establishing macro-micro relationships and some possible difficulties with complex reasoning.

DOI: [10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.010128](https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.010128)

I. INTRODUCTION

The explanation of simple dc electric circuits with resistors is a complex topic in physics, which involves physical laws, microscopic model of matter, and coherence in linking different concepts of electricity. When students reason about electric circuits, they have to integrate and apply basic concepts such as electric charge, electric potential, electric current, and electric field. Previous research on students' understanding of dc resistive circuits has been developed with primary and secondary students' models of current [1–4]. It is also consistently reported that many students at the secondary and university levels use electricity in a fragmented way, without linking electrostatics and electrodynamics. Students tend to regard chapters of electrostatics and dc circuits as two separate areas [5–9]. Therefore, clarifying students' understanding of electric circuits is one of the most important topics in physics education research [10].

Regarding previous studies, it is well established that electric potential is one of the concepts giving students the

greatest learning difficulties when interpreting electric circuits. Moreover, students are unable to define consistently current and potential differences, and they do not get to discriminate clearly between them. In addition, students frequently do not understand that the potential difference between two points in a circuit depends on its topology [2,11,12]. Härtel [13] found that students conceive the battery of a dc circuit as a device that supplies “constant current” rather than one that constantly maintains the potential difference between its poles. Several studies on students' ideas about electrical circuits found that many students' explanations are usually based on electricity, as flow, describing macrolevel phenomena, but their explanations are not concerned with the microlevel nature of charges and the electric field acting on them [14].

Some studies point out that, often, there is a discontinuity in the presentation of the electrostatics and electric circuit topics in standard introductory physics courses [14,15]. In electrostatics, the attention is focused on electric charges, on the electric field produced by distributed charges, and on electric potential. Then, in the next chapter, the instruction is focused on batteries, resistors, current, and capacitors. However, the role played by the electric field on the movement of electrons in the wire or the relations between electric field and potential difference through the circuit are rarely dealt with in textbooks at the introductory level. Of course, the vast majority of textbooks at the university level

Published by the American Physical Society under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International license. Further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the published article's title, journal citation, and DOI.

explicitly define the relationships between field, potential difference, and electric current, but more emphasis is often placed on the communication of quantitative relations among concepts and laws than the role played by the concepts and laws in the electron model that explain macroscopic phenomena with microscopic particles. In textbooks, this macro-micro relationship is explained in a single step [16]. For example, the electric current is defined as $I = n q v_d A$, at the microscopic level. Next, in Sec. II, the Ohm's law for resistive circuits is defined as $I = \Delta V/R$, at the macroscopic level [17], followed by the mathematical relationship between equations $I = \Delta V/R$ and $\vec{E} = \rho \vec{J}$ [18]. However, this step in the explanation process is a major leap as the level of abstraction increases considerably from the visible world to the abstract and microscopic level [19]. This downplaying the aspects macro-micro in modeling electric circuits may in part be due to not taking into account all the characteristics of the electron model. Traditional approaches of teaching electric circuits may justify this lack of emphasis by stating that in many instances students can obtain a correct answer in numerical exercises without being able to distinguish between the macro-micro aspects of the concepts (for example, using the application of Kirchhoff's laws). Therefore, it might be argued that it is not worthwhile to emphasize the subtle difference between the microscopic and macroscopic aspects of the concepts involved in electron models.

While proposals for not addressing the distinction between macro and micro characteristics of the model have some merit, we feel the arguments for making such distinctions are stronger. First, it is common practice in the teaching of thermodynamics to make a distinction between state variables at the macroscopic level and their interpretation at the microscopic level. For example, the variable "temperature" of a gas. The instructor usually draws a distinction between its macroscopic definition at the phenomenological level and the statistical notion of temperature related to the average kinetic energy of particles at the microscopic level. This microscopic definition of temperature is necessary to understand the internal heat energy of a gas as the kinetic energy of a perfect gas. Hence, it is difficult to argue that it is too demanding to distinguish between the macroscopic and microscopic aspects of the concepts, including in the electron model. On the other hand, there is often a need to find an alternative to a purely macroscopic description. We are often left at the macroscopic scale, with explanations such as "this law, or this other law, tells us that things have to be this way." These types of explanations are insufficient to satisfy students, especially when alternative conceptions appear on the way of learning.

Moreover, there has been a growing consensus that students benefit from being exposed to microlevel phenomena that govern electricity and dc circuits [20,21]. Being inherently abstract, electricity provides an excellent

foundation for teaching model building and concept linking between macroscopic-level and microscopic-level descriptions. These models, such as the gradient surface charge-based micromodel or dc circuit theory using a field model [22,23] are based on epistemological and content analysis and/or students' difficulties and reasoning and they aim to promote students' articulation of the macroscopic and microscopic levels of description [24–26]. These studies consider that an explanation is at the macroscopic level when it is focused on the physical quantities, such as resistance, current, and potential difference from the overall perspective of the circuit. They mention the conventional current and the quantities at the level of operational definitions (for example, Ohm's law or the formula that relates potential and field). They also consider that the explanation is at the microscopic level when it is focused at the local level in terms of electrons, electron current, or charge density [27]. It would clearly be advantageous if students were already used to seeing circuits as being driven by an electric field that acts on electrons at the microscopic level (whether or not this results in a conventional current at the macroscopic level). Instead, after covering electrostatics, students are often confronted with a new situation (e.g., electrokinetic phenomena) that not only leads to new phenomena (charges of movement in a wire) but also challenges their view that an electric field is required for a current to flow in a wire.

Our study addresses students' types of reasoning in the scientific explanation of dc resistive circuits. In particular, we analyze the kinds of reasoning that students use at the macroscopic and microscopic levels in their explanations, when tackling electric and potential difference concepts in the explanation of dc circuits. This study is part of a broader research project whose aim is to design, implement, and assess a teaching-learning sequence on electrical circuits for foundation level courses on physics at university.

The study presented here adds to prior research on the examination of students' reasoning on explanations of dc circuits in introductory physics courses for science and engineering. Using an open-ended questionnaire, we show in detail the reasoning that students receiving traditional instruction at the university level follow on microscopic modeling of physical processes for dc resistive circuits. We are particularly interested in the causal models that students use relating electric fields and potential difference quantities and macroscopic-microscopic explanations. The overall aims of this study are the following:

- (i) to acquire a vision of students' reasoning when they use the concepts of electrical field and potential difference when explaining how dc circuits work;
- (ii) to analyze and interpret students' responses to the questionnaire within the framework of studies on scientific reasoning;
- (iii) to identify specific cues that will help to understand students' difficulties in learning explanatory scientific models of dc electrical circuits.

This paper is organized as follows. First the theoretical framework that underpins this work will be discussed in Sec. II. This is followed (Sec. III) by a description of the research methodology, which includes a description of the data collection, questionnaire, and analysis procedure. In Sec. IV, each of these questions is analyzed as well as its relationship with the objectives of the study. The questionnaire results are shown in Sec. V, where examples are presented of student responses according to the epistemological framework selected. In Sec. VI we consider to what extent the types of reasoning are appropriate in order to interpret the results and we summarize our conclusions and potential implications for teaching.

II. THEORETICAL FRAMEWORK

Scientific reasoning is characterized by the use of models and modeling. Models are used by scientists as representations of how systems are structured and behave [28]. The educational value of models and modeling is accepted as an essential part of science education by the international community [29]. This emphasis on student modeling of concepts has been shown to result in deeper understanding. However, when we refer to students' types of reasoning in scientific explanation, we have in mind more than just fostering the process of building models; we want to analyze students' different types of reasoning that support the model. The teaching of resistive electrical circuits is an example of using scientific reasoning based on models. So, it is important to pose the question about students' causal reasoning during the modeling of dc resistive circuits. Students often provide explanations that are incorrect from the standpoint of physics.

These explanations are interpreted, according to the epistemology of science and cognitive psychology, as a consequence of the narrow range of types of causal models with which most students are familiar [30,31]. For instance, students use simple causal reasoning (A affects B) when faced with constraint system models such as Ohm's law or the gradient surface charge model, which would require a more complex reasoning. Most students are only familiar with relatively simple types of causal models, but many concepts and theories in science depend on styles that are substantially more complex in ways that we will define shortly. We consider the frameworks of the epistemology of science and cognitive psychology as suitable for an analysis of students' explanation in the domain of dc circuits.

There are several theoretical frameworks that can be used to investigate students' causal reasoning [30–33]. These frameworks about scientific explanations are not mutually exclusive and may even complement each other. Although there is no single epistemological or cognitive theory about how scientists reason, some types of reasoning can be summarized that are widely accepted by the research community. In this article, we analyze the students' answers to the questionnaire according to four types of

causal reasoning that are widely accepted in epistemological studies of scientific explanations.

One of the types of reasoning that is termed “simple causal reasoning,” establishes a causal relationship between a certain cause C and a certain effect E [30,31]. This is simple causality offering an elementary explanation of the phenomenon. For example, “the electrical current produces the electric field in the wire” or “the potential difference generates the electric field.” A second type of causal reasoning is based on the principle that the cause of the change observed in a system is to be found outside the system and the integration of the various agents constitutes its explanatory power; this is referred to as “linear causal reasoning.” Halbwachs [30] defines this type of causal reasoning as the tendency to juxtapose a number of simple causal relations to form a new ordered relation, a causal chain in which every cause is the result of another cause, or every result is the cause of another result. Often, after establishing a few simple causal links (A , B , C), the reasoning operates in a causal chain $A \sim B \sim C$ with one process producing the other either successively or simultaneously. For example, “the charge density distribution in the wire generates an electric field in the wire. This electric field produces the potential difference in each part of the circuit, depending on the resistance.” A chain of simple causal links is constructed between the event A , the charge density distribution produces electric field and event B , the electric field produces potential difference. This happens in each part of the circuit and so this linear reasoning has the form of a causal chain: charge density distribution \sim electric field \sim potential difference.

A third type of reasoning, “relational reasoning or relational causality”, is used where the outcome is due to the relationship between two variables (physical quantities) of the system. Grotzer [31] finds that these relationships are not an explanation by themselves but have an explanatory character due to the prediction of how the system will behave. For example, “the electric field is the result of the relationship between the concentration of electrons and the width of the wire.” In this explanation, the relationship between two variables (concentration of electrons and width of the wire) predicts the value of the electric field. In the case of relational reasoning, one needs the relationship between two variables of the system that leads to a result. Conversely, in the simple causal or linear causal reasoning, the principal characteristic is the link between two or more events.

Finally, in scientific inquiry we frequently find a fourth type of reasoning that Perkins and Grotzer [32] call “multilevel reasoning,” where the description of the system is more refined, using different models of description that are interrelated; for example, Ohm's model, or the gradient surface charges micromodel as a framework for explaining the electric circuit processes. Thus, they correlate two different descriptions of the same system at two different

levels of analysis (focuses on electron current at the local level, or on conventional current at the global systemic level). In this case the explanatory strength lies in the fact that the laws of the “deeper” model allow of the laws of the initial model to be deduced.

III. THE STUDY

To address the objectives of the study, we gave 141 students at the University of the Basque Country (Spain) a questionnaire (see Appendix) on dc resistive circuits as part of their first-year final exam. They had taken two years of physics at high school and received 3.5 h of lectures on electromagnetism and spent 2 h in the laboratory per week for 14 weeks in their second semester. Experienced teachers from the Department of Physics gave the lectures. The program electric current and direct current circuits were taught for two weeks of this course. The students used the textbook “Physics for scientists and engineers” by Tipler and Mosca [17]. The lectures, which include problem-solving exercises, dealt with current and the motion of charges, resistance, batteries, and Ohm’s Law, combinations of resistors, Kirchhoff’s rules, and RC circuits. Traditional teaching presented the current as the movement of electrons through the wire and defines current at the microscopic level. In the following, Ohm’s law is defined for resistive circuits at the macroscopic level and the equation $J = \sigma E$ at the microscopic level. The traditional teaching in the Physics Department also analyzed how to use Kirchhoff’s rules to calculate the energy balance in the circuit at the macroscopic level, and examples similar to those appearing in textbooks were given [17]. Situations where it is useful to take into account energy supplied by the battery and the energy consumed by resistors were presented and analyzed at the macroscopic level and with experimental data.

Once the questionnaire had been prepared, it was validated in terms of contents and aims. First, experienced members of the Applied Physics Department answered the questionnaire and made suggestions that were considered in the final draft of the questionnaire. Second, we carried out a dry run with first-year course students, which confirmed that students had no problem understanding how the questions were formulated. Finally, these questions were included in the first-year students’ end of term examination.

In order to characterize the responses, the comments recognized as “an explanation” were coded, based on categories with easily recognizable features, such as scientific statements and argumentation from the four types of reasoning defined in the theoretical framework [30,31]. This involved one member of the research team reading the students’ answers and deriving a draft set of description categories for each question. The same researcher then reread the students’ answers and tentatively allocated each answer to one of the draft categories. The other researchers

carried out the latter task independently. Once the answers had been classified, answer allocations were compared and a very significant degree of agreement was reached with a Cohen’s kappa reliability coefficient average of 0.86. Any disagreements about category description or answer allocations were resolved by referring to the answers as the only evidence of students’ understanding. The focus was on the students’ understanding, taking the students’ answer as a whole, rather than on the occurrence of particular statements corresponding to a specific category of explanation [34]. An iterative process was used to produce the final-category descriptions that reflected similar understanding among answers allocated to each category and the differences between the categories [35].

IV. EXPERIMENTAL DESIGN

In this section, we describe the three questions completed by the students (see Appendix). Question Q1 sets out to explore the types of reasoning that students have in relating the concept of field that they have worked on in electrostatics with the same concept used in dc circuits. The aim of this question is to inquire if students are able to distinguish between the role of electric field in a cylindrical conductor in electrostatics and the role into the wire of a circuit in stationary state.

Questions Q2 and Q3 set out to explore the difficulties students have in relating the movement of charges in a dc electric circuit with the electric field that is generated inside the conductor wire, and with the potential difference between the two points of the circuit. The students are presented with two simple dc circuits; one of them, in question Q2, with a carbon resistance, and the other, in question Q3, with a narrowing of the conductor wire (which acts as “resistance”). Question Q2 presents a situation of direct current in a static state in a simple dc circuit, which is familiar for the students in an academic context. Question Q3 presents a similar situation to that in Q2, but in this case the resistance is represented by a cable that is narrower than in the rest of the circuit. In both questions, the circuit has been connected for a long period, and therefore the current circulating through it is constant. In the first section, Q2A and Q3A, the students need to identify the diagram that correctly represents the electric field at two points of the circuit. In the second section, Q2B and Q3B, they are asked about the meaning of the potential difference between two points of a circuit (Q3B) and, in particular, about the relation between the potential difference and the distribution of the charges in the cable of the circuit (Q2B).

The students, in order to respond correctly to Questions Q2A and Q2B, can use a macroscopic or microscopic explanatory level. At the macroscopic level, the students must indicate that in the steady state the current is the same throughout the circuit and therefore the electric field in the resistance must be greater than in the copper cable so that

the speed of the sea of electrons will be constant throughout the circuit. From a microscopic perspective, the students must bear in mind that the flow of electrons must be equal throughout the circuit: $nAu_{Cu}E_A = nAu_C E_B$. In question Q2A, carbon possesses much less mobility of the electrons u_C than copper u_{Cu} ($u_{Cu} > u_C$) and since the density of mobile electrons n and the area A of the cable section are equal, the electric field tends towards a uniform large magnitude throughout the carbon and uniform small magnitude throughout the copper $E_A < E_B$. In question Q3A, the cable section varies $A_A > A_B$ and so $E_A < E_B$. Both explanatory models have been studied by the students during the course and are the ones the students are expected to use to solve the problem in the question. However, as we shall see from the results, explanations of this type are practically nonexistent in their responses.

The analysis of the question can be made in greater depth if one takes into account the gradient surface charges model (see, for example, Chabay and Sherwood [26], Chap. 19, or Härtel [36]). However, we do not expect this type of explanation, as the students in the sample have not been exposed to this model.

In questions Q2B and Q3B, in order to answer correctly, students can explain at the macroscopic level that for the circulation of charges between two points of a conductor, there needs to be a potential difference between the two points. They can also establish a relation between the potential difference generated by the battery and the potential difference in the different parts of the circuit and the current. At the microscopic level, students can relate the variation of concentration of charges at the local level and the potential difference. They can remember from electrostatics that different distributions of charges in the

space produce an electric field and so, a potential difference. In question Q2B, the students are explicitly asked to relate the electrical potential with the distribution of charges at the microlevel, while in question Q3B the question is more open ended and they can establish a relation at the macro- or microlevel.

V. RESULTS AND DISCUSSION

In this section, we give the results obtained for all three questions. As we commented before, the aim of the analysis is not to see how many students answered correctly and how many did not. It is a research focused on the analysis of students' reasoning to explain the behaviour of dc circuits. Thus, students' responses have been grouped into different types of reasoning linked with categories of explanations. We identify some ways of reasoning and conceptual difficulties, which seem to be common in many students. This description of students' ideas will concentrate on some persistent specific categories of ideas and how we might interpret them through the lens of four types of reasoning. It is important to notice that the argumentation of the explanation (i.e., the explanatory category) is directly related to the form of reasoning in the context of solving the question.

The results of the students' answers to the first questions are given as percentages in Table I.

Explanations in the first category (I) use a simple causal reasoning: "If there is current, there is an electric field." Examples of this type of response are

"An electric field appears in the cable because we have an electric current. In the electrostatic state the situation was stationary".

TABLE I. Types of reasoning and explanations in question Q1, which asks about the concept of electric field in electrostatics and dc circuit contexts.

Type of reasoning	Category of explanation	Percentage ($N = 141$)
1.1. Microlevel simple causal (gradient of concentration of charges-electric field or potential difference)		0.0
1.2. Macrolevel simple causal (current-electric field)	I. If there is a current, there is an electric field	39.0
2.1. Microlevel linear causal (gradient of concentration of charges-potential difference)		0.0
2.2. Macrolevel linear causal (battery-potential difference-electric field)	II. The potential difference generates the electric field in the cable.	21.0
3.1. Microlevel relational causal (relation between current and resistance produces field or potential difference)		0.0
3.2. Macrolevel relational causal (relation between current and resistance produces field or potential difference)		0.0
No logical line of reasoning		17.0
No answer		23.0

“The current in the wire produces an electric field. This situation is different from electrostatic situation, where the electric field was zero because there is not current”.

In these explanations, a simple causal reasoning is established between a cause, “electric current” and an effect, “electric field”. In the category of explanations I, the cause is a description of the physical entities presented in the question (phenomenological orientation), in this case the electric current, but the relation with the effect is not linked to relevant concepts or with other theoretical connections. These explanations focus at the macroscopic level; they fail to mention explicitly the mechanism that underlies the current producing the electric field.

Explanation II “the potential difference generates the electric field,” states that the cause of the existence of the electric field in the cable is the potential difference generated by the battery. The justifications follow a linear causal reasoning: the battery generates potential difference and this in turn generates the electric field in the cable. The students’ explanations are incorrect as the battery is not the only factor that is responsible for the electric field in the conductor wire. However, this is the explanation that is closest to the scientific one among the students’ explanations. No explanation explicitly mentioned the underlying mechanism of the causal process. An example of this type of response is

“When there is a current flowing, it means that the cable is connected to a battery that generates a potential difference. The potential difference produces the electric field inside the cable, which makes the electrons move.”

Just three responses establish mathematical relations between the electric field and electric potential. As an example,

“As the question states, the electric field E is zero in the cylinder when it is in an electrostatic situation. Nevertheless, if current flows then it is no longer in equilibrium since there are electrons in movement. Also, if the charges move there is a potential difference between the opposite ends of the cylinder. Then: $V_{ab} = \int \vec{E} \cdot d\vec{l}$. If there is a potential difference, the field is other than zero”

The students’ answers to questions Q2A and Q3A are shown in Table II.

Explanation I is very much a minority response and includes those responses that explain the value of the electric field based on the concentration of electrons inside the wire. This explanation includes a simple causal line of reasoning that postulates the concentration of electrons in the wire as the cause of the electric field: *charge density distribution*→*electric field*. This model focuses

TABLE II. Explanation categories to the relations between current and electric field in the first part of questions Q2A and Q3A.

Type of reasoning	Category of explanation	Q2A percentage ($N = 141$)	Q3A percentage ($N = 141$)
1.1. Microlevel simple causal (gradient of concentration of charges-electric field or potential difference)	I. The concentration or difference of concentration of electrons in each part of the circuit produces the electric field	1.0	4.5
1.2. Macrolevel simple causal (current-electric field)	II. The electric current generates electric field	10.5	33.0
2.1. Microlevel linear causal (gradient of concentration of charges-potential difference)		0.0	0.0
2.2. Macrolevel linear causal (battery-potential difference-electric field)		0.0	0.0
3.1. Microlevel relational causal (relation between current and resistance produces field or potential difference)		0.0	0.0
3.2. Macrolevel relational causal (relation between current and resistance produces field or potential difference)	III.a. The electric field is proportional to the conductivity of the material	38.0	
	III.b. The electric field value depends on the width of the cable and the current		38.5
No logical line of reasoning		50.5	24.0
No answer		0.0	0.0

its explanation at the microscopic level—on the concentration of electrons in the wire. The students make an erroneous interpretation that the distribution of the charges responsible for the electric field is to be found inside the wire. It should be stressed that these responses do not explain what the mechanism is that generates the distribution of the charge throughout the circuit and this leads to responses of all kinds. That is to say, with the same reasoning based on the misunderstanding of the concepts, they choose different options for the question. Most of the responses are like the examples shown below:

“ E_A is less than E_B because the charge at A produces a larger electric field at B because it is a larger charge. There is a greater concentration of charges in the carbon than in the conductor cable.”

“A smaller charge flowing in the thick wire (B point) means there will be less electric field.”

“The same charge flows through point A and point B therefore the electric field is the same at both points.”

Category of explanation II brings together those responses that relate the value of the electric field with that of the current. The explanations in this category focus on establishing a simple causal reasoning (current→field) with a phenomenological orientation. This explanation is similar to the one we find in explanation I of question Q1. The explanations do not explicitly identify the underlying mechanism of the current that produces the electric field, but the vast majority (85%) choose the option $E_A = E_B$. This example is typical of this category:

“The current in the circuit is constant, which means that the electric field must be equal at the two points A and B.”

This type of reasoning pursues an overgeneralization of the empirical rule that states that in a steady state the amperage of the current is the same, then generalizes by stating that the magnitude of the electric field is likewise the same.

Explanation category III includes responses that set up a relation between the electric field and the conductivity of the material for question Q2A (explanation IIIa). For question Q3A, due to the analogy used, a similar type of reasoning is applied to the variable “cable width” (area of the cable section) (explanation IIIb). In both cases a relational reasoning is used to explain the response in terms of the relation between two variables: either conductivity or width and current, to arrive at a conclusion about the magnitude of the electric field [37]. However, the underlying mechanism of the functional relation is not described. This lack of justification of the relational mechanism leads the relational line of reasoning to choose different options (56% $E_A > E_B$, 29% $E_A < E_B$, 15% $E_A = E_B$ in Q2A; 62% $E_A > E_B$, 13%

$E_A < E_B$, 25% $E_A = E_B$ in Q3A). Examples of this type of response are

“The conductivity of carbon is less than that of copper. So the carbon needs a larger electric field than copper to maintain the same current.” (question 2A)

“The E field in the smaller portion of the wire will be smaller because there is a smaller charge (current) in that portion.” (question 3A)

“ E_A is less than E_B because the electrons will accumulate progressively in the narrow section, thus creating a larger electric field.” (question 3A)

The students' answers to questions Q2B and Q3B are shown in Table III.

Although question Q3B does not explicitly ask for a macro-micro relation in the answer, we have observed that the percentage of responses at the microscopic level is similar both in question Q3B and in Q2B. 12% of explanations are in category I, which consists in a simple causal reasoning that claims that the difference in the electron density is the cause of the potential difference: charge density distribution→the potential difference. In this kind of answer there is a single cause (concentration or concentration difference of charges) that produces a result (potential difference). For example,

“A bigger change in charge density means a larger potential difference.” (question 2B)

“Yes, there is a potential difference because the charge density changes from point A to point B. The cable gets narrower.” (question 3B)

Around 8% of the explanations are in explanation category II, which exhibits a linear causal reasoning in which a sequence is established: from charge density distribution→electric field→the potential difference. In these responses, a chain of simple causal links is constructed between the event “charge density distribution,” the event “existence of electric field” and the event “generation of potential difference.” For example,

“Yes, the charge density can affect the electric field and the potential difference depends on the electric field.” (question 2B)

Explanation category III (around 25%) is based on a relational reasoning, where the cause is the relation established by Ohm's law between the magnitudes current and resistance to affect the potential difference. For example,

“The amperage does not change in the circuit but between points A and B the resistance (width) changes, therefore, the potential difference also changes according to Ohm's law.” (Question 3B)

TABLE III. Categories of explanation to the definition of potential difference in Q3B and its relation to charges distributions in Q2B.

Type of reasoning	Category of explanation	Q2B percentage ($N = 141$)	Q3B percentage ($N = 141$)
1.1. Microlevel simple causal (gradient of concentration of charges-electric field or potential difference)	I. The distribution of the charges generates potential difference	12.0	12.0
1.2. Macrolevel simple causal (current-electric field)		0.0	0.0
2.1. Microlevel linear causal (gradient of concentration of charges-potential difference)	II. Charge density distribution implies electric field that generates the potential difference	8.0	7.0
2.2. Macrolevel linear causal (battery-potential difference-electric field)		0.0	0.0
3.1. Microlevel relational causal (relation between current and resistance produces field or potential difference)		0.0	0.0
3.2. Macrolevel relational causal (relation between current and resistance produces field or potential difference)	III. The potential difference between two points of the circuit is measured by Ohm's law (There is no relation between the potential difference and the concentration of charges in the cable)	25.0	27.0
No logical line of reasoning		31.0	27.5
No answer		24.0	26.5

In explanation category III the relationship between the resistance and current quantities leads to the outcome of change of potential difference (relational reasoning). The relationship is Ohms' law, which is not an explanation of the mechanism of the potential difference change, but rather predicts the behavior of the system.

In all of the questions there is a significant percentage of responses that present concepts of electrical theory without a rationale or a logical connection. Moreover, around one-quarter of the students did not answer. These results show the high degree of difficulty students encounter when they have to relate the explanatory model of electric current with the concepts of electric field and potential difference at macroscopic and microscopic levels.

The results suggest that when students construct models to explain the role of electric field and potential difference concepts in the working of dc circuits, they can use specific types of reasoning such as simple causal, linear causal, or relational. Further, these results show that the lack of comprehension of the mechanisms underlying the model can lead to different and even opposite conclusions even when using the same model.

A fraction of the students use a simple causal reasoning to explain the relations between the explanatory model of the circuit and the electric field or the potential difference. Very few students, around 5%–12%, situate the explanations at the microscopic level (charges or electrons). At the microscopic level, the explanations use a simple cause-effect scheme: the concentration of charges produces the electric field or the potential difference. Almost all answers

that mention the concentration of charges situated the charges inside the wire (violation of the principle of conservation of charge) or at the poles of the battery (incomplete explanation). Most of the explanations that use simple causal reasoning are made at the macroscopic level, from 10.5% to 39%. The reasoning claims that the current is the cause of the electric field. The reasoning describes a physical regularity in a simplistic manner: “the electric current,” to arrive at an incorrect conclusion. This type of reasoning has very little explanatory power and fails to describe the mechanism that explains the cause-effect relation.

Some other students presented explanations based on a more complex form of reasoning, namely, linear causal. In question Q1, all explanations that use linear causal reasoning are situated at the macroscopic level. These responses set up a chain of events: the battery produces a potential difference and this produces the electric field. The very few responses that focus on the microscopic level (around 7% in questions Q2B y Q3B) exhibit a cause-effect chain: the battery produces a concentration of charges and this concentration produces a potential difference. The omission of any explanation of the causal mechanism at both the microscopic and macroscopic levels reveals the lack of complexity in the explanatory reasoning and the diversity of responses grounded in poorly understood concepts.

The reasoning used by the majority of the students in Q2 and Q3 is a relational reasoning at the macroscopic level (25%–38.5%), which relates two magnitudes (current and resistance or conductivity of the material) that are included

in a macroscopic explanatory model based on Ohm's law and the conservation of the current. These explanations explicitly state that the underlying mechanism is the mathematical relation between the variables current and resistance. Further, they constitute a model of reasoning that is more relational than cause effect, as the value of the electric field or of the potential difference depends on a mathematical relation (Ohm's law). This reasoning is an interactive process in time and is auto-adjustable between the variables' current and resistance to obtain a concrete result of the potential difference [29]. Thus, the relational form of reasoning is more complex and has more explanatory power than the two forms of reasoning previously discussed. This result differs from those of previous studies with secondary-level students, which found that the vast majority of the students used a simple causal form of reasoning with little comprehension of the concepts involved [3,4]. The results of this study appear to indicate a certain progression in the complexity of the reasoning deployed as one goes higher up the educational levels, which is consistent with the conclusions of the study conducted by Borges and Gilbert [38]. However, students' difficulties to link the model of the circuit with the magnitudes of electric field and potential at the microscopic level still persist, which leads them to conclusions that are scientifically incorrect.

VI. CONCLUSIONS

This study has allowed us to gain deeper insight into how students make sense of dc circuit situations in which the concepts of electric field, potential difference, and current may all appear to be pertinent. After standard instruction, a small fraction of students provided error-free answers that do not focus on the relations between charge distribution, electric field, and potential difference. The vast majority of the students propose an explanatory model in one of three ways:

- (i) A relational form of reasoning that sets up a relation between current and resistance producing the electric field and/or potential difference;
- (ii) A linear causal reasoning that regards the battery as the cause of the potential difference and, this in turn, the cause of the electric field. This same line of reasoning is followed at the microscopic level, replacing the battery with a charge density distribution in the wire of the circuit;
- (iii) A simple causal line of reasoning that states that the current or the variation in charge concentrations produces the electric field and/or the potential difference. Moreover, the vast majority of the students use explanations at macroscopic level, although they study and apply to circuits Ohm's law at the microscopic level ($J = \sigma E$, where J is the current density and σ is the conductivity) during the teaching of the electric circuit chapter. It seems that

students have more difficulty describing the model of current at the microscopic level than at the macroscopic level. This might be because most traditional teaching focuses on solving problems with quantitative relationships at the macroscopic level.

The difficulties encountered could be due, as some studies have suggested [15,23,24], to a failure to bring the syllabus up to date by focusing teaching on dc circuits, not just on the relations between the magnitudes of the circuit at the macroscopic level (Kirchhoff's laws) but also looking into the explanatory mechanisms of the production of current at the microscopic level. The presentation, for instance, of the potential difference in a circuit as the battery's capacity to do work, as energy per unit of charge, involves an orientation that is in part mathematical [13]. This traditional approach sidesteps the relation between potential difference and the charge distribution throughout the circuit. This may influence students to attempt to arrive at their own tentative explanations inductively to establish the macro-micro relations in the circuit [39].

In the last decade, Chabay and Sherwood have proposed, for electricity introductory courses at university, a change in the syllabus that emphasizes the crucial role played by charges on the surfaces of the elements of the circuit, which makes it possible to describe circuit behavior directly in terms of charge and electric field. This approach is a more fundamental description of the circuits that allows one to unify the treatment of electrostatics and circuits [15,26]. However, the new curricula proposals based on a gradient surface charge microscopic model require an elaborate mechanism underlying relational and multilevel reasoning. Our study shows aspects, little mentioned in education research at the university level, of the types of reasoning used by students when establishing macro-micro relations and possible difficulties with the multilevel reasoning processes. We find that the types of reasoning deployed by students are of low explanatory power; even those students who use a relational form of reasoning only apply it to the macroscopic level and incorrectly induce similar consequences for the microscopic level. This lack of resources for students to develop complex reasoning may constitute a major obstacle in teaching high-demand models of reasoning, such as the gradient surface charge microscopic model. Such models represent micro-macro relations as a multilevel form of reasoning. It will, therefore, be necessary not only to change the curriculum, but also work with students explicitly on ways of scientific reasoning leading to macro-micro relations in a dc circuit. Not only explanatory mechanisms at the level of atomic dynamics should be presented to students, but also the opportunity to apply complex forms of reasoning that can stimulate discussion. We therefore suspect that this could be one of the reasons why reforms of the course content curricula of introductory electrical circuits do not progress

as rapidly as research results would lead one to expect. There are few studies on evaluating the improving students' understanding of electric circuits following the "matter and interaction" approach [26]; Kohlmyer *et al.*'s work indicates that the higher performance obtained by students who follow this approach on the BEMA postquestionnaire measures only the total effect of content and pedagogy [[40], p. 020105-9]. In the future it will be necessary to analyze the individual elements of teaching methodology and the difficulties of reasoning of students.

The findings of this study will guide the next stage of our work that involves designing, implementing, and evaluating a teaching-learning sequence (TLS) in classroom environments for different countries in introductory university physics courses. The study will focus on a step-by-step design strategy that gradually provides an interpretative model of electrical circuits based on concepts and conceptual changes. In particular, the microscopic model of electric current will be introduced from the beginning to provide continuity with the studied theory of electrostatics (electric charge, field, and potential) and, conceptual elements (gradient of surface-charge distribution, electric field in the transient, and steady states of current) will be gradually introduced. The TLS design takes into account not only the conceptual updating of the interpretative model, but also the learning demands that require the teaching objectives from the point of view of both conceptual and reasoning complexity [41].

ACKNOWLEDGMENTS

We thank the Spanish Government MINECO/FEDER Project EDU2015-65359-P for financial support. We would like to thank Dr. Jaume Ametller for his critical reading and his suggestions.

APPENDIX

Q1. In the chapter about electric fields, we studied how in the interior of a charged cylindrical conductor in electrostatic equilibrium there is no electric charge (all of the charge is on the surface of the conductor) and hence the electric field inside is zero. However, in the chapter on dc electrical circuits we studied that there is a uniform electric field inside the cylindrical conductor cable when a current is circulating with constant amperage.

Why does this electric field appear inside the cable? Explain your answer.

Q2. In the expanded circuit shown in Fig. 1, a short carbon resistor is connected to a battery by copper wire. The circuit has been connected for a long time, and there is a constant current flowing through the circuit. Copper and carbon are both conductors, but carbon has much lower conductivity than copper.

Q2A. Choose the diagram below which best represents the electric field at points A and B.

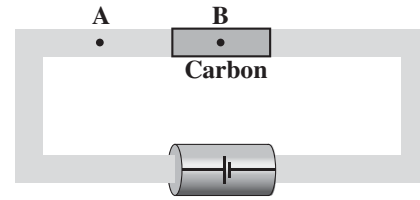


FIG. 1. A simple circuit with a carbon resistor.

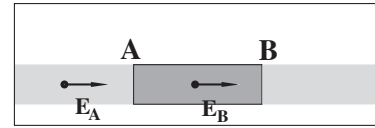


FIG. 2. The electric field at a point outside the resistor is equal to the electric field at a point inside the resistor.

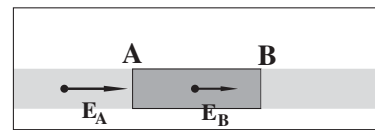


FIG. 3. The electric field at a point outside the resistor is greater than the electric field at a point inside the resistor.

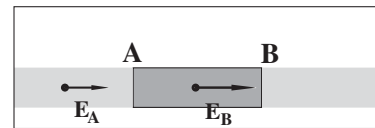


FIG. 4. The electric field at a point outside the resistor is less than the electric field at a point inside the resistor.

- (1) E_A is equal to E_B (see Fig. 2).
- (2) E_A is greater than E_B (see Fig. 3).
- (3) E_A is less than E_B (see Fig. 4).
- (4) A different set of electric field vectors (please describe):

Explain the reasoning you used to answer the previous question.

Q2B. Is the potential difference between points A and B related to the charge distribution? Explain why or why not.

Q3. A circuit consists of a battery connected to a copper wire (see Fig. 5). The wire is narrowed in a part of the circuit, as shown below. The circuit has been connected for

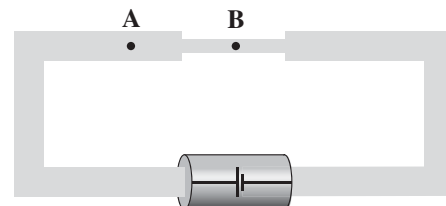


FIG. 5. A simple circuit with a "resistor" (a thin section of the wire).

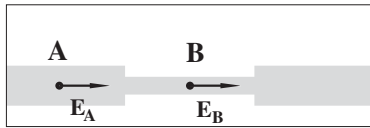


FIG. 6. The electric field at a point outside the thin section is equal to the electric field at a point inside the thin section.

a long time, and there is a constant current flowing through the circuit.

Q3A. Choose the diagram below which best represents the electric field at points *A* and *B*.

- (1) E_A is equal to E_B (see Fig. 6).
- (2) E_A is greater than E_B (see Fig. 7).
- (3) E_A is less than E_B (see Fig. 8).
- (4) A different set of electric field vectors (please describe):

Explain the reasoning you used to answer the previous question.

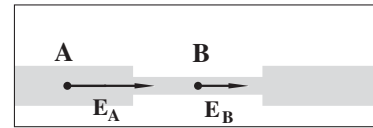


FIG. 7. The electric field at a point outside the thin section is greater than the electric field at a point inside the thin section.

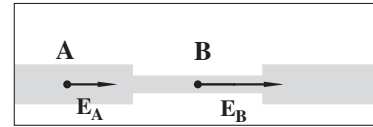


FIG. 8. The electric field at a point outside the thin section is less than the electric field at a point inside the thin section.

Q3B.- Is there a potential difference between points *A* and *B*? Explain why or why not.


-
- [1] N. Fredette and J. Lochhead, Student conceptions of simple circuits, *Phys. Teach.* **18**, 194 (1980).
 - [2] C. von Rhöneck, Student conceptions of the electric circuit before physics instruction, in *Proceedings of the International Workshop on Problems Concerning Students' Representation of Physics, and Chemistry Knowledge*, edited by W. Jung, H. Pfundt, and C. von Rhöneck (Pädagogische Hochschule, Ludwigsburg, 1981), pp. 194–213.
 - [3] R. Millar and T. King, Students' understanding of voltage in simple series electric circuits, *Int. J. Sci. Educ.* **15**, 339 (1993).
 - [4] A. Barbas and D. Psillos, Causal Reasoning as a base for advancing a systemic approach to simple electrical circuits, *Res. Sci. Educ.* **27**, 445 (1997).
 - [5] B. Eylon and U. Ganiel, Macro–micro relationship: the missing link between electrostatics and electrodynamics in students' reasoning, *Int. J. Sci. Educ.* **12**, 79 (1990).
 - [6] E. Bagno and B. S. Eylon, From problem solving to a knowledge structure: An example from the domain of electromagnetism, *Am. J. Phys.* **65**, 726 (1997).
 - [7] R. L. C. Hazelton, M. R. Stetzer, P. R. L. Heron, and P. S. Shaffer, Investigating student ability to apply basic electrostatics concepts to conductors, *AIP Conf. Proc.* **1513**, 166 (2013).
 - [8] A. Bensheguir and J. L. Closset, The electrostatics-electrokinetics transition: historical and educational difficulties, *Int. J. Sci. Educ.* **18**, 179 (1996).
 - [9] C. Guruswamy, M. D. Somers, and R. G. Hussey, Students' understanding of the transfer of charge between conductors, *Phys. Educ.* **32**, 91 (1997).
 - [10] See, for example, R. Duit, W. Jung, and C. von Rhöneck, Aspects of Understanding Electricity, in *Proceedings of an International Workshop*, edited by V. Schmidt and K. Kiel (Ludwigsburg, Germany, 1984); M. Shipstone, C. von Rhöneck, W. Jung, C. Kärrqvist, J. J. Dupin, S. Johsua, and P. Licht, A study of students' understanding of electricity in five European countries, *Int. J. Sci. Educ.* **10**, 303 (1988); J. Guisasaola, Teaching and learning electricity: The relations between macroscopic level observations and microscopic level theories, in *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching*, edited by M. R. Matthews (Springer, New York, 2014), pp. 129–156.
 - [11] J. L. Closset, Sequential reasoning in electricity, in *Research on Physics Education: Proceedings of the First International Workshop* edited by G. Delacote, A. Tiberghien, and J. Schwartz (Editions du CNRS, Paris, France, 1983), pp. 313–319.
 - [12] J. Guisasaola, J. L. Zubimendi, and K. Zuza, How much have students learned? Research based teaching on electrical capacitance, *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.* **6**, 020102 (2010).
 - [13] H. Härtel, The electric voltage: What do students understand? What can be done to help for a better understanding? in *Aspects of Understanding Electricity: Proceedings of an International Workshop* edited by R. Duit, W. Jung, and C. von Rhöneck (IPN-Kiel, Ludwigsburg 1985), pp. 353–362.
 - [14] B. A. Thacker, U. Ganiel, and D. Boys, Macroscopic phenomena and microscopic processes: Student understanding of transients in direct current electric circuits, *Am. J. Phys.* **67**, S25 (1999).
 - [15] R. W. Chabay and B. A. Sherwood, Restructuring the introductory electricity and magnetism course, *Am. J. Phys.* **74**, 329 (2006).

- [16] S. M. Stockmayer and D. F. Treagust, A historical analysis of electric current in textbooks: a century of influence on physics education, *Sci. & Educ.* **3**, 131 (1994).
- [17] P. A. Tipler and G. Mosca, *Physics for Scientists and Engineers*, 5th ed. (W. H. Freeman and Company, New York, 2004).
- [18] P. M. Fishbane, S. Gasiorowics, and S. T. Thornton, *Physics for Scientists and Engineers*, 2nd ed. (Prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey, 1996).
- [19] S. M. Stockmayer and D. F. Treagust, Images of electricity: How novices and experts model electric current?, *Int. J. Sci. Educ.* **18**, 163 (1996).
- [20] P. E. Hirvonen, Surface-charge-based micro-models- a solid foundation for learning about direct current circuits, *Eur. J. Phys.* **28**, 581 (2007).
- [21] S. M. Stockmayer, Teaching direct current theory using a field model, *Int. J. Sci. Educ.* **32**, 1801 (2010).
- [22] A. Sommerfeld, *Electrodynamics* (Academic, New York, 1952).
- [23] O. D. Jefimenko, *Electricity and Magnetism* (Appleton-Century-Crofts, New York, 1966).
- [24] H. Härtel, The electric circuit as a system: A new approach, *Eur. J. Sci. Educ.* **4**, 45 (1982).
- [25] R. D. Knight, *Physics a Strategic Approach*, 3rd ed. (Pearson, Boston, 2013) Chap. 30.
- [26] R. W. Chabay and B. A. Sherwood, *Matter and Interactions*, 4th ed. (Wiley, New Jersey, 2015), Chap. 18.
- [27] D. J. Griffith, *Introduction to Electrodynamics*, 4th ed. (Pearson Education Ltd., Harlow, 2014).
- [28] N. J. Nersessian, Mental modeling in conceptual change, in *International Handbook of Research on Conceptual Change*, edited by S. Vosniadou (Routledge, London, 2008), pp. 391–416.
- [29] M. Windschitl, J. Thompson, and M. Braaten, Beyond the scientific method: Model-based inquiry as a new paradigm of preference for school science investigations, *Sci. Educ.* **92**, 941 (2008).
- [30] F. Halbwachs, *Causalité linéaire et causalité circulaire en physique (linear causality, and circular causality in physics)* *Les theories de la causalité*, edited by M. Bunge, F. Halbwachs, T. S. Khun, J. Piaget, and L. Rosenfeld (Presses Universitaires de France, Paris, 1971), pp. 39–111.
- [31] T. A. Grotzer, Learning to understand the forms of causality implicit in scientific explanations, *Stud. Sci. Educ.* **39**, 1 (2003).
- [32] D. N. Perkins and T. A. Grotzer, Dimensions of causal understanding: The role of complex causal models in students' understanding of science, *Stud. Sci. Educ.* **41**, 117 (2005).
- [33] T. A. Grotzer and M. S. Tutwiler, Simplifying causal complexity: How interactions between modes of causal induction and information availability lead to heuristic-driven reasoning, *Mind, Brain, and Educ.* **8**, 97 (2014).
- [34] L. Cohen, L. Manion, and K. Morrison, *Research Methods in Education* (Routledge Taylor and Francis Group, London, 2007).
- [35] M. Cortazzi, *Narrative Analysis* (Palmer Press, London, 1993).
- [36] H. Härtel, Constant electric current, and the distribution of surface charges available at: http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel/PUB/voltage_IRL.pdf (2005). This is a revised part of a full paper, published under the title "A Qualitative Approach to Electricity" at the Institute for Research on Learning, Report No. IRL87-000, (1987).
- [37] R. N. Giere, Using models to represent reality, in *Model-Based Reasoning in Scientific Discovery*, edited by L. Magnani, N. J. Nersessian, and P. Thagard (Kluwer and Plenum Publishers, New York, 1999), pp. 41–57.
- [38] A. T. Borges and J. K. Gilbert, Mental models of electricity, *Int. J. Sci. Educ.* **21**, 95 (1999).
- [39] A. A. DiSessa, Toward an epistemology of physics, *Cognit. Instr.* **10**, 105 (1993).
- [40] M. A. Kohlmyer, M. D. Caballero, R. Catrambone, R. W. Chabay, L. Ding, M. P. Haugan, M. J. Marr, B. A. Sherwood, and M. F. Schatz, Tale of two curricula: The performance of 2,000 students in introductory electromagnetism, *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.* **5**, 020105 (2009).
- [41] J. Leach and P. Scott, Designing and evaluating science teaching sequences: An approach drawing upon the concept of learning demand and a social constructivist perspective on learning, *Stud. Sci. Educ.* **38**, 115 (2002).

APPENDIX IV

Leniz, A., Zuza, K., Sarriugarte, P., & Guisasola, J. (2019). University students' explanations for electric current in transitory situations. *European Journal of Physics*, 41(1), 015702.

University students' explanations for electric current in transitory situations

Ane Leniz¹ , Kristina Zuza, Paulo Sarriugarte and Jenaro Guisasola

Department of Applied Physics, Engineering School of Gipuzkoa, University of the Basque Country (EHU-UPV), Spain

E-mail: aneleniz@gmail.com, kristina.zuza@ehu.eus, paulo.sarriugarte@ehu.eus and jenaro.guisasola@ehu.eus

Received 24 April 2019, revised 13 September 2019

Accepted for publication 2 October 2019

Published 27 November 2019



CrossMark

Abstract

This study deals with analysing students' causal reasoning when tackling electric current in transitory situations in introductory physics courses. We emphasise the types of reasoning students use in explanations at macroscopic and microscopic levels, as this knowledge is helpful for designing and implementing novel teaching approaches, which help articulate macroscopic and microscopic levels of description. Two open-ended questions were used to analyse students' reasoning, with emphasis on explanations. As seen in the obtained results, an important percentage of students are not able to correctly interpret phenomena in simple transitory current states. Their explanations can be categorised into two general categories. The first one is based on relational causal reasoning and the second one is a form of reasoning that excludes current flow in transitory state processes. We look at several aspects that have barely been mentioned in previous research at university level related to the topic of transitory current in circuits, such as possible difficulties with complex reasoning and the type of reasoning students use when they establish macro-micro relationships.

Keywords: transitory current, circuits, electricity, students difficulties, students reasoning

1. Introduction

There are many studies that identify which are the concepts and representations students learn well and which are those they struggle with within the context of direct current (dc) electric circuits in a steady state [1]. Some studies point out that there is often discontinuity in how

¹ Author to whom any correspondence should be addressed.

electrostatic and electric circuit topics are presented in standard introductory physics courses [2, 3]. Although in the vast majority of university textbooks the relationships between field, potential difference and electric current are explicitly defined, in many cases a greater emphasis is placed on the quantitative relations among variables, such as resistance, current and potential difference in a steady state, than on the role played by the concepts and laws which explain macroscopic phenomena using microscopic particles in the electron-transport model. Some diagnostic tests and research show that students find it hard to understand models explaining phenomena occurring in dc electric circuits [4, 5]. Students are particularly unable to define current and voltage consistently both at macroscopic level and at the level of electron transport, and they cannot discriminate distinctly between them. Also, they often have difficulties to understand that in a circuit the potential difference between two points depends on its topology [6–8].

In a previous study [9], we showed that in order for students to be able to understand phenomena occurring in electric circuits in qualitative terms and to build a scientific model, they need to develop robust multilevel reasoning that relates observed macroscopic phenomena and electron-transport model. Multilevel reasoning refers to a deeper explicative level, where the description of the system is more refined, using models of description that are interrelated [10]. For example atomic theory, or quantum mechanics as a frame to explaining atomic model. They correlate two different descriptions of the same system at two different levels of analysis. The explanatory strength lies in the fact that laws of the ‘deeper’ model allow the deduction of the laws of the initial model. In the present study, we chose the topic of transients in dc electric circuits because we argue that the electric circuits requires multilevel reasoning to develop solid understanding of microscopic models that explain macroscopic phenomena. We suggest that in order to understand transients it is necessary to describe the underlying dynamic processes that lead a system to the equilibrium state [11]. These phenomena are familiar to students because the traditional electricity curriculum in introductory physics courses frequently involves transient current situations, for example the processes of charging a conductor or a dielectric body, opening or closing the switch in a dc electric circuit or, circuits charging and discharging capacitors. We want to enquire whether students have developed multilevel reasoning allowing them to explain macroscopic observations using models at microscopic level.

There are several reasons for our general interest in characterising physics students’ forms of reasoning at introductory levels in college or university. From a constructivist perspective of learning science [12, 13], a first reason is that the forms of reasoning that students use when facing standard academic tasks, guide and limit the explanatory and predictive models [14, 15]. Knowledge of such forms of reasoning is critical to designing educational interventions that foster meaningful learning. A second reason is that it will be useful to find out how the particular characteristics of electrical circuit theory influence the type of reasoning. These characteristics can help us enrich the pedagogical knowledge of faculty members. We are sure that the results of our study do have important implications for the teaching and learning of electrical circuits in introductory university courses. In electricity, it is not possible to visualise the processes directly; everything that is actually seen is an indirect manifestation of a microscopic process.

The research question in the study is: what reasoning do university students use when explaining transitory current phenomena in simple DC circuits?

Regarding the question, this study will focus on a deeper description of students’ understanding as data on which teachers can base their decisions regarding when to intervene to assist student learning.

Our study included two questions on transients in dc electric circuits, asked to first-year university students. The study was conducted among Spanish engineering students who had completed at least two years of calculus-based physics at high school (16–18 years old), including topics on electrostatic and electric circuits.

2. Forms of reasoning in scientific explanations

One of the main assumptions of the epistemology of science is that mental models, as internal representations of real worlds, have played a central role in different explanations of conceptual development and reasoning in scientific domains [16–18]. Forms of reasoning are expected to support a model construction and prediction in situations where they are involved, from logical reasoning in everyday situations to solving complex problems in knowledge-rich scientific domains [19]. Although research on forms of reasoning is extensive and varied, a consensus view has been reached on the most common forms used in the scientific domain [15, 19–22].

A set of causal reasoning that include different assumptions about the nature and characteristics of causality has been identified. A first type of reasoning is *simple causal reasoning* that establishes a causal relationship between a cause and an effect [19, 20]. It is an event-based causality as opposed to a process causality. In this type of reasoning the causes and effects are obvious and perceptible as opposed to non-obvious and imperceptible causes and effects. One example of this might be ‘the potential is zero because the circuit is open’. A second type of causal reasoning is called *linear causal reasoning* [19]. It is defined as a tendency to juxtapose several cases of simple causal reasoning to form a new relationship; a causal chain in which every cause is the result of another cause. Frequently, after establishing a few simple causal relationships (A, B, C), the reasoning comprises a $A \sim B \sim C$ causal chain in which one process successively produces the next. This type of reasoning prioritizes unidirectionality as opposed to bidirectionality. Priority is given to spatial and temporal contiguity between causes and effects as opposed to the spatial or temporal gaps of the triggers of the causal impact. One example of this type of reasoning would be the following: ‘the battery produces a potential difference and there is current between two points of a circuit because there is a potential difference’. A chain of simple causal relationships has been built between event A (the battery produces potential difference) and event B (potential difference produces current).

A third type of reasoning is *relational reasoning or relational causality*. It is used when the result is caused by two variables or physical quantities of the system. They are usually causes based on few variables and they do not consider more complex interactions. Grotzer [20] states that these relationships are not an explanation themselves but are predictive. One example of this type of reasoning is ‘the electric capacitance is the result of the relationship between the quantity of charge and the potential difference’. In this explanation, the relation between the two variables predicts the value of the electric capacitance. As in the case of the other two types of reasoning above, the main characteristic lies in the relationship between two or more events. In the case of relational reasoning, a relationship between two system variables is needed, which is what leads to a result.

Finally, there is a fourth type of reasoning in scientific research, called *multilevel reasoning* by Perkins and Grotzer [21]. In this case, the description of the system is more sophisticated and different description models are interrelated. This type of reasoning considers both deterministic causality (effects must consistently follow causes) and probabilistic causality with statistical correlation patterns and support mechanisms [23]. One example

might be to use the Ohm model or the microscopic surface-charge gradient model as a framework to explain the processes of an electric circuit. In other words, two different descriptions of the same system are correlated at different analysis levels. Here, the explanatory force focuses on the fact that the laws of the most detailed model allow to deduce the laws of the initial model.

In this research, we have focused on students' forms of reasoning when explaining the causality of transient currents in dc electrical circuits, based on the forms of causality described above.

3. Context and methodology

The current research involved 112 engineering students at the University of the Basque Country (UPV/EHU) in the first-year Introductory Physics course. At high school, all the students had taken three semesters of physics (mechanics, electromagnetism and modern physics) plus they had to pass the Spanish university entrance exam. This implies that the students already have basic knowledge regarding dc circuits. However, the 'Conceptual Survey of Electricity and Magnetism' test [24] that the students take at the start of the semester at University shows that they have good knowledge regarding problems that directly apply Ohm's law, but they do not demonstrate a model explaining how current works in the circuit at macroscopic and/or microscopic level. The lectures were done by faculty from the physics department. The curriculum about electricity is similar to textbooks such as Tipler and Mosca [25].

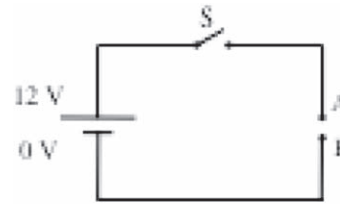
Data was gathered as a post-test from written questions after instruction. The students' answers went through rigorous analysis [26], not focusing on correct or incorrect answers but on identifying students' reasoning and understanding. After reading students' answers, a draft set of categories of description was developed by one member of the research team. Then, each of the answers was provisionally assigned to one of the categories. The other researchers allocated separately each answer to one of the categories established. Once the answers had been classified, we compared the result of our categorisations. For the questions analysed, the mean kappa reliability coefficient is an evidence of quite a good uniformity in the judges' criteria for setting categories, as it was 0.88.

4. Experimental design and results

We designed two questions which answers include prediction and justification tasks (see figure 1). The inclusion of these types of tasks created an opportunity to explore students' reasoning applied to situations of transient electric current in a circuit. To address the problems of validity and reliability we asked three teachers of introductory physics courses to review the questions and provide comments. Their comments were used to write the final version of the questions. A pilot study was conducted with first-year engineering students of physics and it revealed that in general, students understood the questions and their purpose.

In another study [27] on students' difficulties in understanding the relationships between electrostatics and electrokinetics, question Q1 was set in multiple-choice format. The question was designed to find out the declarative knowledge of the students about the relationship between current intensity and potential difference in open circuits. In multiple-choice question Q1 they were given five possible answers related to the potential difference between points A and B (see question Q1 in figure 1): (a) 0 V; (b) +6 V; (c) infinity; (d) + 12 V; (e) not enough information to answer. Most students (more than three-quarters) choose the correct option. This might indicate that students had learned a basic declarative or descriptive knowledge that

Q1.- In the circuit shown below, what is the potential difference between point A and point B after the switch is closed? (the resistance of the wire is ignored)
Explain your answer



Q2.- Two equal rapid response bulbs ($\sim 1\mu\text{s}$) are connected in an RC circuit together with a 9 nF capacitor as seen in the figure. Answer and reason the next questions:

A.- Does bulb B_1 switch on? Why?

. - Does bulb B_2 switch on? Why?

B.- Does the capacitor get charged? If your answer is positive,

calculate the charge in plate A and B

Explain your answers

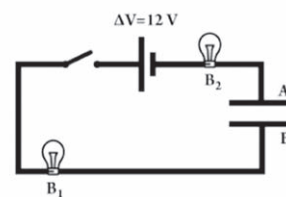


Figure 1. In question Q1, the students are asked to reason and calculate the potential in plates A and B. In question Q2, the students are asked to reason if each bulb is switched on and calculate the charges in plates A and B if they consider they will get charged.

helped them distinguish between current and potential difference in DC circuits. However, more than half of the students who responded correctly did not explain why they chose that option. About 20% of the answers mentioned that there will be a transitory current in a very brief time interval but without argumentation. We believe that one of the possible reasons for the low percentage of students that justify the answer may be because the question is multiple choice and does not sufficiently highlight the need to justify the answer. In the present study we have modified the question Q1 as an open-ended question focused on explanation. The objective of the present study goes beyond checking whether students calculate the difference in potential properly in an open circuit. We want to look into the students' reasoning to explain the behaviour of the circuit in these situations. So, we present here the questions from figure 1.

Questions Q1 and Q2 were designed to pay attention to students' explanatory model when they explain the transitory movement of charges in the system. Question Q2 is more explicit than question Q1 about transitory current through the two wires that connect the capacitor. The students were asked if the bulbs would switch on and why, but also if the capacitor gets charged. They were also asked to calculate charge in plates A and B if their answer was positive. Students were asked to provide reasoning for all their responses.

In the following table (table 1) we show both correct and incorrect answers, but also the different types of reasoning students' use, because unlike other studies this one focuses on students' understanding of the physical explanation for the DC circuit explanatory model. The types of students' reasoning that we founded match the types of reasoning described in the previous section. The names of the categories in table 1 make reference both to the scientific validity of the answers and the form of reasoning. Category A includes answers that can be

Table 1. Types of reasoning for question Q1 and Q2. The correct answer for the academic level of teaching is labelled by the letter A.

Type of reasoning	Category of explanation	Q1 ($N = 112$)	Q2 ($N = 112$)
A.1.- Linear causal	The transitory movement of charges is caused by a potential difference and the final potential of points (plates) A and B is calculated (Q1 and Q2). Bulbs switch on because the potential difference of battery and the capacitor gets charged (Q2).	28%	7%
A.2.- Relational causal	The transitory movement of charges is not mentioned, but the final potential difference/capacitance is calculated (Q1 and Q2). Bulbs switch on and the final capacitance is calculated (Q2).	4%	38%
B.1- Linear causal	Bulbs do not have same intensity, but there is current, and the capacitor becomes charged. Time interval is not mentioned (Q2)	—	33%
B.2- Simple causal	The circuit remains open so there is no current, and the transitory movement of charges is not mentioned. (Q1) Because the circuit is closed there is a movement of charges and the capacitor is charged (Q2)	35%	16%
C.- Answers based on non-justified statements		22%	4%
D.- Not answered		11%	2%

considered correct for the academic level of the course and category B corresponds to incorrect answers. Within the answers of category A and category B, two types of reasoning have been found. The number 1 (category A.1 and category B.1) refers to a linear causal reasoning and the number 2 includes other types of reasoning that we found in each category (category A.2 and B.2).

In questions Q1 and Q2, the students were to relate the charging process to the potential difference for the points or plates A and B and understand that when there is not potential difference between the points and the battery the charging process will finish. Almost one third of students' explanations follow *linear causal reasoning* in question Q1 and a few students do in Q2 (category A.1). This reasoning has a chain of cause and effect: (a) as there is a potential difference between two points in the wire there is current and (b) when the process finishes the potential in the two ends will be the same, as the current ceases. We reproduce below standard examples of this category:

'The current will stop when the battery poles and the point reach the same potential difference. Both points will have equal potential but opposite signs.'
(student 42, question Q2)

The linear causal reasoning is followed by more than a third of the students' explanations in question Q2 (category B.1). These incorrect explanations include a chain of cause and

effect: (a) current flows from one pole to the other; (b) bulb B1 is in the way of the current (pole positive of the battery), so it switches on before capacitor gets charged; (c) bulb B2 does not switch on or its intensity is less than bulb B1 because current does not arrive. Most answers in this category (80%) state that the second bulb B2 does not light up. One standard example of this type of answer is:

‘When the switch is closed, the current passes to the condenser from the positive pole of the battery. Bulb B1 is turned on because the current leaves the positive pole of the battery towards the condenser. In contrast, bulb B2 does not light up since the electric charge accumulates in the capacitor. The charge accumulated in the capacitor will be:

$$C = \frac{Q}{\Delta V}; Q = C \cdot \Delta V = 9 \text{ nF} \cdot 12 \text{ V} \\ = 108 \text{ nC} \text{ (student 83, Q2)}$$

In question Q2, around 40% of students’ answers use a *relational causal reasoning* (category A.2). In this one, the students’ reasoning is based on the quantities related by an equation for calculating the capacitance of capacitor (Q2). These explanations get a correct answer, but they do not include a microscopic model that explains the behaviour of the current in the circuit. A standard example of this is

‘The capacitor is charged, and the capacitance is: $C = \frac{Q}{\Delta V}$; $Q = C\Delta V = 9 \text{ nF} \cdot 12 \text{ V} = 108 \text{ nC}$. The capacitor is charged and so, it will be current, and the bulbs switch on’ (student 34, Q2)

More than one third of answers to question Q1 and about 20% to question Q2, incorrectly explain the phenomena using *simple causal reasoning* (category B.2). The answers follow a simple causal explanation (one cause, one effect): (a) the circuit is open/closed (cause); (b) there is flow/no flow of charges (effect). Students using these explanations do not recognise the transient current in this particular context; they assume a steady state current and only imagine a closed circuit. Some examples of this type of answer are found below:

‘The circuit is open as it is not completed because the poles of the battery are not connected.’ (student 14, question Q1)

‘When the capacitor is charged, the circuit is closed and the bulbs will light up’ (student 67, question Q2)

The conclusions from students using simple causal reasoning coincide with other studies conducted in secondary education that show that most students do not understand the concept of potential difference and that they often confuse electrical current and potential [28, 29].

In category C, the answers included lacked internal logic. Some answers do not use a physics model to answer the question. Other answers use physics concepts but lack meaning from the theoretical framework.

5. Discussion, conclusions and implications

The primary objective of our work has been to characterise the forms of reasoning used by university students of introductory physics courses, when explaining the electric current in transient state in electric circuits. Our study found three distinct forms of reasoning that guided study participants to make decisions and develop explanations (table 1). These forms

of reasoning are similar to those described by other authors and to those that we obtained for the topic of electric circuits in a steady state [9]. For example, the characteristics of simple causal reasoning coincide with the reasoning defined by Halbwachs [19] when he explains spontaneous forms of causality in the scientific domain. Likewise, Gortzer [20] finds this type of reasoning in high school students when they explain the electric current of a circuit in a steady state. However, our work highlights the characteristics of the simple causal reasoning that university students seem to have on a very little researched subject, transient electric current in electric circuits.

In our study, the simple causal reasoning is used by a significant proportion of students (category B.2, table 1). This type of reasoning lacks a microscopic model that explains electron movement and only argues based on a macroscopic observation related to opening or closing the switch: an open switch implies that no current circulates, and a closed switch implies that current circulates. Causality is based on simple events that develop unidirectional over time. The effects are consistent with the ‘causes’. Our research indicates that simple causal reasoning appears to be characteristic of a significant percentage of students in the sample, when they explain the transient electric current. However, this form of reasoning does not lead to correct conclusions and predictions about how the current works in the circuit.

A second form of reasoning that almost 40% of the students in the sample use to explain the current flow in question Q2 (category A.2, table 1), is relational causal reasoning. This explanation uses the capacitance equation of a capacitor as an explanation of current flow. The cause is centralised in the magnitudes expressed in the equation as agents of the event. The reasoning is based on the ‘formula’. Although the students reach the correct solution, the reasoning does not include more complex interactions or emergent effects, so it does not present a microscopic model that explains the numeric results they obtained.

When students use linear causal reasoning, different results are obtained, depending on the complexity of the phenomenon being presented. In question Q1, students who perform causal linear reasoning correctly explain that the potential difference between the points is equal to the potential difference between the battery terminals using a macroscopic model that does not explain the electron movement in the wire. This lack of a microscopic model means that when students apply this reasoning in question Q2 (category B.1), the explanation is not correct. Question Q2 explicitly asks about the current through the bulbs and in this case, multilevel reasoning is needed that relates the microscopic model and the macroscopic phenomenon.

In this study, question Q1 is an open-ended question focus on explaining the answer unlike the previous study [27]. As expected, the number of students’ answers focused on the explanation increases in relation to the previous study. However, the correct answers that mention the transient current is low, only 28% of answers argue their statement. These results indicate that, although the question is reformulated, the low percentage of argued answers is maintained, which indicates a persistent difficulty of understanding in students.

These results underline the dynamic nature of the forms of reasoning and the influence that context can have on the activation of relevant cognitive resources [13, 30] In particular, our results support statements about the need to analyse students’ reasoning in different contexts when they make judgements about the coherence of their knowledge structures [31]. In addition, this study in the context of transient currents in electrical circuits provides complementary information to the study conducted for steady-state currents [9], making it possible to identify the types of reasoning used by students to account for the functioning of electrical circuits regardless of the type of task proposed.

Our analysis of how students use different kinds of reasoning reveals that many of the students do not understand a microscopic model that they can use in multilevel reasoning to give a scientific explanation of the transients in dc circuits. The tendency to reduce complexity in causal reasoning in science education has received considerable attention in literature [32, 33]. These studies found that certain reasoning tendencies impeded learning. For example, when students reason about obvious events and not about multilevel processes. The ‘reductive’ bias in reasoning probably causes students to adopt the simplest concepts at the macroscopic level and confusions about the micro-macro model are due to a lack of complexity in causal reasoning.

The difficulties encountered may be due, as some studies have suggested to a failure to update the traditional curriculum, which proposes a teaching of the DC circuits based mainly on the relationships between the magnitudes of the circuit at the macroscopic level (Kirchhoff Laws) and which only briefly mentions the explanatory mechanisms of current production at the microscopic level [34]. Moreover, new curricular proposals based on the Gradient Surface Charge micro-model [35, 36] require that the movement of electrons be related due to the action of the electric field at the microscopic level with the macroscopic measures of potential difference. This relationship requires multilevel reasoning, more complex than the reasoning found in our study (linear causal, relational causal, simple causal).

However, we believe that students’ comprehension and reasoning difficulties can be overcome if emphasis is put not only on a microscopic model, but also on the reasoning processes that justify such a model during instruction. Our future work will focus on design and evaluation of didactic materials that, besides the standard macroscopic model, will allow students to understand a microscopic model of the current in a circuit and to perform multilevel reasoning to help them argue their explanations.

Acknowledgments

We thank the Spanish Government MINECO/FEDER project EDU2015–65359-P and to Basque Government project PIBA2018-16 for financial support.

ORCID iDs

Ane Leniz  <https://orcid.org/0000-0003-0210-4439>

References

- [1] Guisasola J 2014 Teaching and learning electricity: the relations between macroscopic level observations and microscopic level theories *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching* ed M R Matthews vol I (Dordrecht: Springer) ch 5, pp 129–56
- [2] Chabay R W and Sherwood B A 2006 Restructuring the introductory electricity and magnetism course *Am. J. Phys.* **74** 329
- [3] Benseguir A and Closset J L 1996 The electrostatics-electrokinetics transition: historical and educational difficulties *Int. J. Sci. Educ.* **18** 179
- [4] Maloney D, O’Kuma T L, Hieggelke C J and Van Heuvelen A 2001 Surveying students’ conceptual knowledge of electricity and magnetism *Am. J. Phys.* **69** 12–23
- [5] Thacker B A, Ganiel U and Boys D 1999 Macroscopic phenomena and microscopic processes: student understanding of transients in direct current electric circuits *Am. J. Phys.* **67** S25
- [6] Shipstone M, von Rhöneck C, Jung W, Kärrqvist C, Dupin J J, Johsua S and Licht P 1988 A study of students’ understanding of electricity in five European countries *Int. J. Sci. Educ.* **10** 303

- [7] Smith D P and van Kampen P 2011 Teaching electric circuits with multiple batteries: a qualitative approach *Phys. Rev. Spec. Top. Phys. Educ. Res.* **7** 020115
- [8] Guisasola J, Zubimendi J L and Zuza K 2010 How much have students learned? Research based teaching on electrical capacitance *Phys. Rev. Spec. Top. Phys. Educ. Res.* **6** 020102
- [9] Leniz A, Zuza K and Guisasola J 2017 Students' reasoning when tackling electric field and potential in explanation of dc resistive circuits *Phys. Rev. Spec. Top. Phys. Educ. Res.* **13** 010128
- [10] Halbwachs F 1971a Reflexions sur la causalité physique (reflections on causality in physics) ed M Bunge et al *Les Theories de la Causalité* (Paris: Presses Universitaires de France) pp 25–39
- [11] Heald M A 1984 Electric field and charges in elementary circuits *Am. J. Phys.* **52** 522
- [12] Driver R and Erickson G 1983 Theories-in-action: some theoretical and empirical issues in the study of students' conceptual frameworks in science *Stud. Sci. Educ.* **10** 37–60
- [13] Redish E F 2004 *Teaching Physics With the Physics Suite* (New York: Wiley) pp 30–1
- [14] Driver R, Newton P and Osborne J 2000 Establishing the norms of scientific argumentation in classrooms *Sci. Educ.* **84** 287–312
- [15] Grotzer T A and Tutwiler M S 2014 Simplifying causal complexity: how interactions between modes of causal induction and information availability lead to heuristic-driven reasoning *Mind, Brain, Educ.* **8** 97
- [16] Greca I and Moreira M A 2000 Mental models, conceptual models, and modelling *Int. J. Sci. Educ.* **22** 1–11
- [17] Nersessian N J 2008 Mental modeling in conceptual change *International Handbook of Research on Conceptual Change* ed S Vosniadou (London: Routledge) 2008, pp 391–416
- [18] Matthews M R 1994 *Science Teaching: the Role of History and Philosophy of Science* (New York: Routledge)
- [19] Halbwachs F 1971b Causalité linéaire et causalité circulaire en physique (linear causality, and circular causality in physics) ed M Bunge et al *Les theories de la causalité* (Paris: Presses Universitaires de France) pp 39–111
- [20] Grotzer T A 2003 Learning to understand the forms of causality implicit in scientific explanations *Stud. Sci. Educ.* **39** 1
- [21] Perkins D N and Grotzer T A 2005 Dimensions of causal understanding: the role of complex causal models in students' understanding of science *Stud. Sci. Educ.* **41** 117
- [22] Chi M T H 2000 Self-explaining expository texts: the dual processes of generating inferences and repairing mental models *Advances in Instructional Psychology*. ed R Glaser (Hillsdale, NJ: Erlbaum) pp 161–238
- [23] Grotzer T, Kamarainen A, Tutwiler M S, Metcalf S and Dede C 2013 Learning to reason about ecosystems dynamics over time: the challenges of an event-based causal focus *BioScience* **63** 288–96
- [24] Maloney D, O'Kuma T, Hieggelke C and van Heuvelen A 2001 Surveying students' conceptual knowledge of electricity & magnetism *Am. J. Phys.* **69** S12
- [25] Tipler P A and Mosca G 2004 *Physics for Scientists and Engineers* (New York: W.H. Freeman and Company) 5th edn
- [26] Watts M, Gould G and Alsop S 1997 Questions of understanding: categorising pupils' questions in science *Soc. Sci. Res.* **79** 57
- [27] Leniz A, Zuza K and Guisasola J 2015 University students use of explanatory models for explaining electric current in transitory situations *Universal J. Phys. Appl.* **9** 258–62
- [28] Dupin J and Joshua S 1987 Conceptions of French pupils concerning electric circuits: structure and evaluation *J. Res. Sci. Teach.* **6** 791
- [29] Liegeois L and Mullet E 2002 High school students' understanding of resistance in simple series electric circuits *Int. J. Sci. Educ.* **24** 551
- [30] Hammer D, Elby A, Scherr R E and Redish E F 2005 Resources, framing, and transfer *Transfer of Learning: Research and Perspectives* ed J P Mestre (Charlotte, NC: Information Age Publishing)
- [31] DiSessa A A 2004 Meta representation: native competence and targets for instruction *Cogn. Instr.* **22** 293–331
- [32] Guisasola J, Almudi J M, Salinas J, Zuza K and Ceberio M 2008 The Gauss and Ampere laws: different laws but similar difficulties for student learning *Eur. J. Phys.* **29** 1005–16
- [33] Chi M T, Roscoe R D, Slotta J D, Roy M Y and Chase C C 2012 Misconceived causal explanations for emergent processes *Cogn. Sci.* **36** 1–61

-
- [34] Chabay R and Sherwood B 2001 *Matters and Interactions* vol 2 3th edn (New York: Wiley)
- [35] Hirvonen P E 2007 Surface-charge-based micro-models a solid foundation for learning about direct current circuits *Eur. J. Phys.* **28** 581–92
- [36] Stocklmayer S 2010 Teaching direct current theory using a field model *Int. J. Sci. Educ.* **32** 1801–28

APPENDIX V

Leniz, A., Zuza, K., & Guisasola, J. (2019, August). University students' causal reasoning dealing with RC circuits. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1287, No. 1, p. 012021). IOP Publishing.

University students' causal reasoning dealing with RC circuits

A. Leniz, K. Zuza and J. Guisasola

*Donostia Physics Education Research Group, Department of Applied Physics,
University of the Basque Country (UPV/EHU), Plaza Europa 1, 2008 Donostia-San
Sebastian, Spain*

Abstract. This study examines university students causal reasoning when tackling electric current in transitory situations. A questionnaire with emphasis on explanations was used to analyse students' reasoning. The results obtained show that a significant percentage of students cannot correctly interpret simple transitory state current phenomena. Their explanations fall into two general categories: one based on potential difference and one that excludes current flow in processes of transitory state. We look at a number of aspects that have been little mentioned in previous research, for example, the reasoning university students use when establishing macro-micro relationships and some difficulties with complex reasoning.

1. Introduction

Despite the fact that there are many studies that identify which concepts and representations students learn well and with which of them students struggle within the context of DC circuits in the steady state, few studies have been made of students' ideas on transient states of movement of charges in a conductor [1, 2]. In this research, we present two of the questions that have been used to investigate the representations of students about the movement of charges of transients in direct current, which focus on the transition between electrostatics and electrodynamics in first year at university. This study adds to prior research the examination of student reasoning on explanations of electric current in transitory situations in introductory physics courses for science and engineering. We are particularly interested in the causal models students use relating potential difference quantities and macroscopic-microscopic explanations. hat this study seeks to identify is the students' main thinking patterns when interpreting contexts of current in transitory state.

2. Theoretical framework

Scientific reasoning is characterized by the use of models, which are in turn used as a representation of how systems behave and structure [3]. Partly, that's the reason why the international community accepts as an essential part of education of science the educational value of models and modelling [4]. It has been probed that emphasizing students' models results in a better comprehension on their behalf. The teaching of electric circuits is an example of scientific reasoning based in models, so it is important to question students' causal reasoning.

The reason why students explanations are incorrect is that those explanations are interpreted as a consequence of a narrow range of causal models most of students become familiar with [5,6]. Most students are used to relatively simple causal models, however, most concepts and scientific theories depend on substantially much complex styles.

Science epistemology and cognitive psychology frameworks are suitable for the analysis of students' explanations in electric circuits field and electric current in transitory situations. There are several theoretical frameworks that can be used to investigate students' reasoning [5–8]. The international community



extensively accepts some reasoning types as scientific reasoning, although it is true that there is not a unique epistemological or cognitive theory. In this article, students' answers are analyzed according to four types of causal reasoning that are widely accepted in scientific reasoning epistemological studies. The first type is the *simple causal reasoning*, which explains that an event A influences another B, although the effect A is not affected. It is a one-way reasoning. Often cause A is not analyzed correctly or correlation is confused with causality. This reasoning describes in a generalized way a regularity. For example, when a circuit is connected to a battery the bulb is illuminated. The bacterium produces light in the bulb [5,6]. A second type of reasoning is the so-called linear causal reasoning that explains that multiple phenomena that happen intentionally or not, become causes and effects successively. The behavior of the phenomenon is parallel to the result, there is no differentiation between phenomenon and result. Halbwachs [5] defines lineal causal reasoning as a tendency to juxtapose a number of simple causal reasoning to form a new relation; a causal chain in which every cause is the result of other cause. Often, after establishing a few simple causal relationships (A, B, C), the reasoning operates in a causal chain A~B~C in which a process produces the next one in a successive way. One example of this type of reasoning would be the following: "the surface charge distribution of charge density in a wire generates an electric field in the wire. This electric field in turn produces a potential difference in each part of the circuit, depending on the resistance". A simple causal reasoning chain has been constructed between the event A (the charge density distribution produces electric field) and the event B (the electric field produces potential difference).

A third type of reasoning is the *relational reasoning or relational causality*. It is used when the result is due to two variables or physical quantities of the system. Grotzer [6] affirms that this relations are not an explanation by themselves, but they have a predictive nature. One example of this type of reasoning is the following one: "the electric field is the result of the relation between the concentration of electrons and the width of the wire". In this explanation the relationship between both variables predicts the value of the electric field. While in the case of the previous two reasoning the principal characteristic is the relation between two or more events, in relational reasoning a relation between two variables of the system is needed, which brings to a result. Last but not least, we find the fourth type of reasoning in scientific research called by Perkins and Grotzer [7] *multinivel reasoning*. In this case the description of the system is more refined and different models of description are interrelated. One example could be to use Ohms' model or the model of gradient of surface charge distribution as the framework to explain the processes of an electric circuit. That is, two different descriptions of the same system are correlated at different levels of analysis. In this case the explicative power relays on the fact that the laws of the deepest model allow to deduce the laws of the initial model.

3. Context and methodology

3.1. Academic context and Sample

The current research involved about 200 students at the University of the Basque Country (UPV/EHU) in the first year Introductory Physics course for engineers. All of them had taken at least two years of physics in high school and had passed the national exams in Spain for admission to University to study science or engineering. Those students received 3.5 hours of lectures and 2 hours of laboratory per week during 14 weeks (second semester) on electromagnetism. Electrostatics and electric circuits were taught for 5 or 6 weeks of this course. In all cases, lectures were given by experienced teachers of the Physics Department, and the Electricity curriculum in both universities is similar to those given in textbooks like Tipler and Mosca (2004).

The data were collected in written questions. All the questions were answered as post-test after receiving instruction. The students' answers to the questions were subjected to rigorous analysis [9]. The analysis does not focus on correct or incorrect answers but on identifying students' understanding and reasoning. We are aiming at a nuanced understanding of what aspects of explanatory model on currents transient state students understand reasonably well and what aspects are problematic for them. One member of the research team derived a draft set of categories of description for each question based on a reading of the students'

answers, and tentatively allocated each answer to one of the draft categories. Three weeks later, the same researcher again read the students' answers and repeated the process. The other members of the research team carried out that task independently, and once the answers had been classified all the results were compared. Disagreements about answer allocation were resolved referring to the answers as the only evidence of students' understanding. It was reached a significant degree of agreement with a Cohen's kappa reliability coefficient average of 0.85.

3.2. Experimental design

Two questions were given to students over the course to investigate their understanding on the mechanism of how current works in transitory movement of charges. The questions were administered in different formats, but all of them were done post-test after receiving instruction. The question Q1 is a multiple-choice question, which also asked for a reasoned explanation of the answer. Question Q1 presents an RC circuit made up with two capacitors in series connected to the battery and two bulbs located in the wires that connect each pole of the battery with each capacitor. Several alternative responses are presented for the transient state until the capacitors are charged: a) when closing the circuit none of the bulbs will bright; b) when closing the circuit only the bulb connected between the positive pole of the battery and the capacitor brights; c) when closing the circuit only the bulb connected between the positive pole of the battery and the capacitor brights; d) when closing the circuit the two bulbs will bright.

The question Q2 shows an RC open circuit, made up of a battery, a bulb, a capacitor and a switch, which is very familiar to students in the academic context. Students have to describe what happens in the transitory between the circuit is close and the capacitor is charged.

Q2.- In the circuit shown below, after the switch is closed, describe:

- What happens to the brightness of bulb
- What is the potential difference between plates of capacitor?

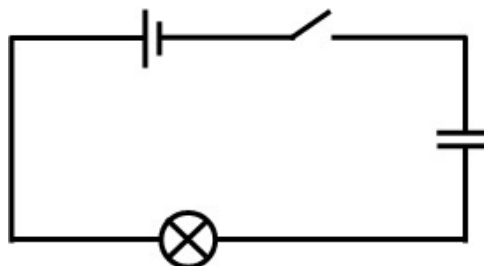


Figure 1. A battery, bulb, capacitor and wires make up the circuit. The resistance of the wires is considered zero.”

4. Results

In question Q1 around a third of the students indicate the correct option (d), although only half of them adequately explain their choice. This minority of students shows a lineal causal reasoning when connecting to the process of charge of the capacitors with the current circulation due to a potential difference in the different sections of the circuit. This reasoning associates the current to the potential difference in different parts of the circuit and, it is able to relate the current throughout all the circuit. Almost half of the students reason explaining that only the light bulb connected to the positive pole shines because from where the electric current begins to circulate (option b) . This simple causal reasoning that attributes the effect of the brightness of the bulb to a single cause, the current begins to

circulate from the positive pole, does not take into account the role of the negative pole of the battery and does not explain what happens in that part of the circuit .

In question Q2, the 38% of students answered correctly that there is a transitory movement of charges through the switch until the potential between the plates of capacitor becomes the same as the potential difference of the battery. Another 12% of students explained that, after very a small period of time, the potential difference capacitor will be the same as that of the battery, but they did not reason about the current and the brightness of the bulb.

Table 1. Answers to question Q2 at University of the Basque Country. Categories of explanation for students' answers.

Type of reasoning	UPV/EHU (N=200)
A.1.* Lineal causal (the transitory movement of charges is due to a potential difference, the final potential of capacitor is calculated and the bulb brights is mentionned)	38%
A.2.* Relational causal (the transitory movement of charges is not mentioned, but the final potential of points A and B is calculated)	12%
B. Dichotomic simple causal (Ohm's law. They do not become charged. It is not a closed circuit)	20%
C. Answers based on incoherently justified or not justified statements	22%
D. Not answered	8%

The correct one is shown by *

In category A.1 (about 40%) are grouped those responses that account for the movement of charges based on a potential difference between the ends of the conductor. This type of response can be interpreted as an explanation based on the Drude model. The vast majority of answers follow a linear causal reasoning [5] that has a chain of cause and effect: a) There is current because there is a potential difference between two points of the conductor, b) at the end of the process the potential in the two ends will be the same, as the current ceases. Standard examples of this category of response are:

“There will be current until the potential difference will be equal between the points and the poles of the battery. The final potential is equal in both points, but they have opposite signs.”

“There will be current until points' potential became: $V_+=12\text{ V}$ and $V_-=0\text{V}$. “

Category A.2 emerged with 12% of answers (16%). In this category the students' reasoning is related only with the relation between the variable charge and potential. To reason in this way they propose the equation of the capacitance: $C = \frac{q}{V}$ without reference to transitory current that happens before arriving to equilibrium situation. One standard example of this category is:

“Both plates will have the same final potential, but with opposite signs. The plate positive will have 6 V and the plate negative will have -6 V. Applying the definition capacitance: $C = \frac{q}{V}$, and then solving for the charge, we obtain the final charge of the capacitor.”

About 20% of the answers explain that the points do not become charged because the circuit is open (category B). Most of them mention Kirchhoff's Law to justify the answer. The responses follow a simple causal reasoning [5] based in a dichotomy that relates one cause with one effect: a) the circuit is open (cause); b) there is no flow of charges (effect). It is clear that these students do not recognize the transient current in this context; they only imagine closed circuit in steady state current. One example of this kind of answer is the following: *“The + and – sides of the battery are not connected, so the circuit is not complete. The sum of the potential differences in the circuit is zero”*

In category C we included answers without internal logic or that apply physics concepts in a wrong way. Some of the answers do not use a physics model to answer the question. Other answers use physics concepts but without meaning from the theoretical framework. Those type of answers show that in this category there is not an explicative model to interpret the phenomenon given in question Q2.

5. Conclusions

The results obtained show that a significant percentage of students cannot properly interpret simple transitory state current phenomena. Moreover, the percentages of correct answer are similar in both questions Q1 and Q2, which indicates the consistency of the types of responses.

We found that there are two major explanatory tendencies of current in transitory states. One category explains the movement of charges qualitatively according to the potential difference. Explanations of students in this category are usually accompanied by a linear causal reasoning that associates electric current between two points with the potential difference between them. This explanatory model can be regarded as an application of the Drude model, which is explained in most textbooks.

The second explanatory category does not take into account the transient motion of charges in circuits. The explanation is associated with a simple causal reasoning which links the “open circuit” to the fact that there cannot be an electric current in steady states. This line of reasoning is related to a supposed dichotomy, that is, there are only two options: a) open circuit, no current; b) closed circuit, steady-state current. It seems that students in this category have only one explanatory model for a steady-state current.

According to our findings and the explanatory model of current in a wire, the key idea that will be necessary to emphasize would be the microscopic mechanism of production of potential difference between two points within the circuit wire, in both transitory current and steady situations. In particular, this involves the relationship between the concept of electric potential studied in Electrostatics (capacitors, charging bodies ...) with those analysed in DC circuits. The results show that omitting an explanation of a microscopic mechanism of charge movement makes it harder for students to interpret transitory states in DC circuits.

6. References

- [1] Smith D. P. and van Kampen P. 2011 Teaching electric circuits with multiple batteries: A qualitative approach. *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res* **7**, 020115
- [2] Guisasola J. 2014 Teaching and Learning Electricity: The Relations Between Macroscopic Level Observations and Microscopic Level Theories. In *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching*, edited by M.R. Matthews (Springer, Dordrecht) vol I, chapter 5, 129-156
- [3] Nersessian N. J. 2008 Mental modeling in conceptual change, in *International Handbook of Research on Conceptual Change*, edited by S. Vosniadou (Routledge, London), pp. 391–416
- [4] Windschitl M., Thompson J. and Braaten M. 2008 Beyond the scientific method: Model-based inquiry as a new paradigm of preference for school science investigations, *Sci. Educ.* **92**, 941

- [5] Halbwachs F. 1971 *Causalité linéaire et causalité circulaire en physique (linear causality, and circular causality in physics)* *Les theories de la causalité*, edited by Bunge M., Halbwachs F., Khun T. S., Piaget J. and Rosenfeld L. (Presses Universitaires de France, Paris), pp. 39–111
- [6] Grotzer T. A. 2003 Learning to understand the forms of causality implicit in scientific explanations, *Stud. Sci. Educ.* 39, 1
- [7] Perkins D. N. and Grotzer T. A. 2005 Dimensions of causal understanding: The role of complex causal models in students' understanding of science, *Stud. Sci. Educ.* 41, 117
- [8] Grotzer T. A. and Tutwiler M. S. 2014 Simplifying causal complexity: How interactions between modes of causal induction and information availability lead to heuristic- driven reasoning, *Mind, Brain, and Educ.* 8, 97
- [9] Watts M., Gould G. and Alsop S. 1997 Questions of understanding: Categorising pupils' questions in Science *Social Science Research*, 79, 57