

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
POLO 43

PEDRO HENRIQUE RODRIGUES BARBOSA PADRE

**MODELAGEM FÍSICA DA CONDUÇÃO ELÉTRICA CARDÍACA: UMA
ABORDAGEM ESTRUTURAL VIA CIRCUITOS RC**

FORTALEZA
2026

PEDRO HENRIQUE RODRIGUES BARBOSA PADRE

MODELAGEM FÍSICA DA CONDUÇÃO ELÉTRICA CARDÍACA: UMA ABORDAGEM
ESTRUTURAL VIA CIRCUITOS RC

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissionalizante em Ensino de Física do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Ensino de Física. Área de Concentração: Formação de professores de Física em nível de mestrado

Orientador: Prof. Dr. Humberto de Andrade Carmona

FORTALEZA
2026

PEDRO HENRIQUE RODRIGUES BARBOSA PADRE

MODELAGEM FÍSICA DA CONDUÇÃO ELÉTRICA CARDÍACA: UMA ABORDAGEM
ESTRUTURAL VIA CIRCUITOS RC

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissionalizante em Ensino de Física do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Ensino de Física. Área de Concentração: Formação de professores de Física em nível de mestrado

Aprovada em: 26/06/2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Humberto de Andrade Carmona (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Ramos Gonçalves
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Luis Gonzaga Rodrigues Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001.

Agradeço à Deus, por me iluminar e me conceder forças para percorrer esta dupla jornada de professor e mestrando, pela saúde que me sustentou ao longo do caminho e pelas pessoas que colocou em minha vida. À Nossa Senhora da Conceição, pela intercessão e pelo cuidado de cada dia.

À gestão da Escola Estadual de Educação Profissional Maria José Medeiros, nas pessoas do diretor Damilson Santos e do coordenador Rhemo Amorim, pela compreensão, pelo apoio irrestrito e pela viabilização dos meus horários, sem os quais a realização deste mestrado não teria sido possível.

Ao meu orientador, professor Humberto Carmona, pela dedicação e pela qualidade das orientações. A cada reunião, novas abordagens e novos caminhos para enxergar a Física, contribuições que impactaram diretamente minha evolução como profissional e como pesquisador.

Aos colegas que o mestrado transformou em amigos Jobson Santos, João Carlos, Franklin Ribeiro, Antônio Cartaxo, Claudia Salgado e José Anderson, pelo companheirismo, pelas trocas e por tornarem essa caminhada mais leve e significativa. Aos amigos Nathiel, Heitor, Eduardo, Vanda, Kelly e Caio, pelo apoio na jornada e na construção da ideia que resultou neste produto.

À minha família, pelo apoio incondicional em todos os momentos. Em especial à minha mãe, Roselene, que sempre acreditou no poder da educação e me incentivou a buscar a graduação e a pós-graduação como caminhos de crescimento. À minha esposa, Jaguaciara, pelo cuidado, pela paciência e pela presença constante, especialmente nos momentos mais difíceis desta jornada.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a aplicação de uma sequência didática fundamentada no uso estruturado de analogias entre circuitos elétricos e o sistema de condução elétrica cardíaca, com vistas à promoção da aprendizagem conceitual e significativa de eletricidade no Ensino Médio técnico. A proposta foi desenvolvida como produto educacional do Mestrado Profissional em Ensino de Física (MNPEF) e aplicada em duas turmas do terceiro ano da Escola Estadual de Educação Profissional Maria José Medeiros, em Fortaleza, Ceará, uma do curso técnico em Enfermagem ($n = 35$) e outra em Redes de Computadores ($n = 39$). O referencial teórico articula a aprendizagem significativa de Ausubel, a interdisciplinaridade entre Física e Biologia, a natureza dos modelos científicos e o modelo TWA (*Teaching With Analogies*) de Glynn, adotado como fundamento metodológico da sequência. O produto educacional é estruturado em seis módulos que estabelecem correspondências entre os elementos do circuito elétrico, força eletromotriz, capacitor, resistência, circuito RC e as estruturas do sistema de condução cardíaca, nó sinoatrial, membrana celular, nó atrioventricular e fibras de Purkinje, com cada módulo incluindo situação-problema, desenvolvimento conceitual, analogia biológica, limites do modelo e proposta de uso de simuladores computacionais. A pesquisa adota abordagem mista, com coleta de dados por pré-teste, pós-teste e atividades formativas avaliadas por rubrica analítica de três níveis baseada no modelo TWA. Os resultados indicam ganho de aprendizagem de +31,8% em Enfermagem e +29,1% em Redes de Computadores, com maior impacto nas questões analógicas, em especial a correspondência entre o nó sinoatrial e a fonte de FEM, com ganho de +74,3% e +58,5%, respectivamente. A análise das atividades formativas revela nível relacional predominante nas duas turmas ao longo das quatro primeiras atividades, com progressão para o nível adequado na síntese pelo eletrocardiograma na turma de Enfermagem. Os resultados confirmam que a abordagem por analogias estruturadas segundo o modelo TWA, com mediação intencional e discussão sistemática dos limites dos modelos, é capaz de promover aprendizagem conceitual significativa em eletricidade independentemente do perfil de formação técnica prévia da turma.

Palavras-chave: circuito RC; eletrofisiologia; interdisciplinaridade; aprendizagem significativa; TWA; ensino de física.

ABSTRACT

This work presents the development and application of a didactic sequence based on the structured use of analogies between electrical circuits and the cardiac electrical conduction system, aimed at promoting conceptual and meaningful learning of electricity in technical secondary education. The proposal was developed as an educational product of the Professional Master's Program in Physics Teaching (MNPEF) and applied to two third-year classes at the Escola Estadual de Educação Profissional Maria José Medeiros, in Fortaleza, Ceará — one from the Nursing technical program ($n = 35$) and one from the Computer Networks program ($n = 39$). The theoretical framework articulates Ausubel's meaningful learning theory, interdisciplinarity between Physics and Biology, the nature of scientific models, and Glynn's Teaching With Analogies (TWA) model, adopted as the methodological foundation of the sequence. The educational product is structured in six modules that establish correspondences between electrical circuit elements, electromotive force, capacitor, resistance, RC circuit and cardiac conduction structures, sinoatrial node, cell membrane, atrioventricular node, and Purkinje fibers, with each module including a problem situation, conceptual development, biological analogy, model limitations, and a proposal for computational simulator use. The research adopts a mixed-methods approach, with data collected through pre-test, post-test, and formative activities evaluated by a three-level analytical rubric based on the TWA model. Results indicate a learning gain of +31.8% in the Nursing group and +29.1% in Computer Networks, with the greatest impact on analogical questions, particularly the correspondence between the sinoatrial node and the electromotive force source, with gains of +74.3% and +58.5%, respectively. Analysis of the formative activities reveals a predominantly relational level in both groups across the first four activities, with progression to the adequate level in the ECG synthesis activity in the Nursing group. The results confirm that the structured analogies approach, based on the TWA model with intentional mediation and systematic discussion of model limitations, is capable of promoting meaningful conceptual learning in electricity regardless of students' prior technical background.

Keywords: RC circuit; electrophysiology; interdisciplinarity; meaningful learning; TWA; physics teaching

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 – Representação das linhas de campo elétrico (linhas azuis) e das superfícies equipotenciais (linhas laranjas) num campo elétrico uniforme (a), campo elétrico gerado por carga pontual (b) e num campo elétrico gerado por duas cargas de sinais contrários (c)	30
Figura 2 – Circuito com pilha, chave e capacitor: (a) chave aberta, capacitor descarregado; (b) chave fechada, capacitor carregado	34
Figura 3 – Capacitor de placas paralelas com superfície gaussiana e trajetória de integração para o cálculo do campo elétrico interno	35
Figura 4 – Associação de resistores em série: (a) três resistores em série percorridos pela mesma corrente i ; (b) resistor equivalente R_{eq}	39
Figura 5 – Associação de resistores em paralelo: (a) três resistores em paralelo submetidos à mesma diferença de potencial; (b) resistor equivalente R_{eq}	40
Figura 6 – Circuito RC com fonte de força eletromotriz, resistor e capacitor: (a) chave na posição de carga; (b) chave na posição de descarga.....	41
Figura 7 – Gráficos de carga $q(t)$ e corrente $i(t)$ em função do tempo durante o carregamento e descarregamento do capacitor em circuito RC	43
Figura 8 – Sistema de condução elétrica cardíaca: nó sinoatrial (SA), fibras de condução atrial (vias internodais), nó atrioventricular (AV), fascículo atrioventricular (feixe de His), ramos direito e esquerdo e ramos subendocárdicos (fibras de Purkinje)	44
Figura 9 – Traçado de ECG normal com identificação das ondas P, Q, R, S e T, do intervalo PR, do intervalo RR e do segmento ST. O eixo vertical representa a diferença de potencial em milivolts e o eixo horizontal representa o tempo em segundos	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Correspondência matemática entre o circuito RC e o modelo elétrico da membrana celular	51
Tabela 2 – Rubrica analítica para avaliação das respostas discursivas nas atividades formativas	57
Tabela 3 – Estrutura da sequência didática	60
Tabela 4 – Desempenho no pré-teste por turma	64
Tabela 5 – Percentual de acertos por questão no pré-teste	65
Tabela 6 – Comparação entre pré-teste e pós-teste por turma.....	67
Tabela 7 – Comparação de acertos por questão entre pré-teste e pós-teste.....	68
Tabela 8 – Distribuição por nível da rubrica analítica nas atividades formativas	72
Tabela 9 – Síntese do nível analógico predominante por atividade	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATP — Adenosina Trifosfato

AV — Atrioventricular

BNCC — Base Nacional Comum Curricular

CAPES — Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

d.d.p. — Diferença de Potencial

ECG — Eletrocardiograma

EEEP — Escola Estadual de Educação Profissional

ENEM — Exame Nacional do Ensino Médio

FEM — Força Eletromotriz

IBGE — Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INEP — Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira

LDB — Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional

MEC — Ministério da Educação

MNPEF — Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física

PhET — Physics Education Technology (Simuladores Interativos de Educação em Física)

PR — Intervalo entre onda P e complexo QRS no ECG

QRS — Complexo de despolarização ventricular no ECG (ondas Q, R e S)

RC — Circuito composto por Resistor e Capacitor

RR — Intervalo entre dois complexos QRS consecutivos no ECG

SA — Sinoatrial

SBF — Sociedade Brasileira de Física

SEDUC — Secretaria da Educação do Estado do Ceará

SEFOR — Superintendência das Escolas Estaduais de Fortaleza

SI — Sistema Internacional de Unidades

ST — Segmento entre o complexo QRS e a onda T no ECG

TWA — Teaching With Analogies (Ensino com Analogias)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	BNCC na formação científica no Ensino Médio	14
2.2	Interdisciplinaridade como integração dos saberes.....	16
2.3	Aprendizagem Significativa e construção de sentido	18
2.4	Natureza dos modelos científicos.....	20
2.5	O uso de analogias no Ensino de Ciências	22
2.6	Dissertações no MNPEF sobre Interdisciplinaridade e Analogias.....	25
3	ELETRICIDADE E CONDUÇÃO ELÉTRICA CARDÍACA.....	28
3.1	Fundamentos físicos.....	28
3.1.1	<i>Eletrostática – Estrutura conceitual</i>	<i>28</i>
3.1.2	<i>Força eletromotriz.....</i>	<i>33</i>
3.1.3	<i>Capacitores.....</i>	<i>34</i>
3.1.4	<i>Corrente elétrica, Resistores e Lei de Ohm.....</i>	<i>37</i>
3.1.5	<i>Circuito RC</i>	<i>41</i>
3.2	Fisiologia cardíaca	44
3.2.1	<i>O Sistema de Condução Elétrica Cardíaca.....</i>	<i>44</i>
3.2.2	<i>Modelo Elétrico da Membrana Celular Cardíaca</i>	<i>48</i>
3.3	Relações Estruturais entre a Física e a Biologia	50
4	OBJETIVOS	53
4.1	Objetivo Geral.....	53
4.2	Objetivos específicos	53
5	METODOLOGIA.....	54
5.1	Natureza da pesquisa.....	54
5.2	Contexto e Participantes	54
5.3	5.3 Instrumentos e Coleta de Dados	55
5.4	Procedimentos de Análise	57
5.5	O Produto Educacional e sua Aplicação.....	58
5.5.1	<i>Simuladores Computacionais Utilizados</i>	<i>59</i>
5.5.2	<i>Estrutura do Produto</i>	<i>60</i>
5.5.3	<i>Descrição da Aplicação</i>	<i>60</i>
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	64
6.1	Análise do Pré-teste	64
6.2	Análise do Pós-teste e Comparação Pré/Pós	67
6.3	Análise das atividades formativas	71

7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
	REFERÊNCIAS	79
	APÊNDICE A – PRODUTO EDUCACIONAL.....	83
	ANEXO A – ATIVIDADE 1.....	170
	ANEXO B – ATIVIDADE 2.....	171
	ANEXO C – ATIVIDADE 3.....	173
	ANEXO D – ATIVIDADE 4.....	175
	ANEXO E – ATIVIDADE 5.....	177
	ANEXO F – ATIVIDADE 6.....	179
	ANEXO G – PRÉ/PÓS-TESTE	182

1 INTRODUÇÃO

O ensino de Física no Ensino Médio brasileiro apresenta o desafio recorrente de tornar conceitos abstratos significativos para os estudantes. Temas como corrente elétrica, resistência e capacitância são frequentemente abordados de forma algorítmica, induzindo uma postura de memorização de fórmulas e estruturas de resolução voltadas à reprodução em avaliações, prática denominada *teaching to the test*, na qual a escola se aproxima de um centro de treinamento em detrimento de sua função formativa (Moreira, 2021). Compreender um conceito significa compreender a dinâmica do fenômeno que ele descreve, e sem essa compreensão as disciplinas perdem sua substância (Moreira; Massoni, 2011).

O desafio do professor consiste em encontrar estratégias que permitam que os conceitos físicos alcancem os estudantes de forma significativa, conectando-se de maneira não arbitrária ao que o aprendiz já sabe, ancorados em conhecimentos prévios denominados subsunçores (Ausubel, 2003). Nesse quadro, a interdisciplinaridade entre as Ciências da Natureza surge como caminho promissor: ao articular conceitos de Física com fenômenos biologicamente familiares, amplia-se o campo de significação dos conteúdos e cria-se uma ponte entre a abstração formal e a experiência concreta do estudante, perspectiva consolidada tanto pela BNCC (Brasil, 2018) quanto pela Matriz de Referência do ENEM (Brasil, 2009).

Dentre as estratégias disponíveis para essa articulação, o uso pedagógico de analogias ocupa lugar de destaque na literatura de ensino de ciências. Para que seja eficaz, contudo, a analogia precisa ser conduzida por meio de uma sequência explícita que mapeia as correspondências entre os domínios e discute seus limites, princípio formalizado no modelo TWA (Teaching With Analogies) proposto por Glynn (1991), adotado como fundamento metodológico deste trabalho.

O análogo escolhido para o ensino de eletricidade é o sistema de condução elétrica cardíaca. Esse sistema apresenta correspondências estruturais e funcionais verificáveis com os elementos de um circuito elétrico: o nó sinoatrial como fonte de força eletromotriz, a membrana celular como capacitor, o nó atrioventricular como elemento RC temporizador e as fibras de Purkinje como rede de condutores em paralelo. A correspondência matemática, na forma da equação diferencial que descreve a dinâmica do potencial de membrana é estruturalmente idêntica à que governa o circuito RC, o que confere à proposta consistência além da ilustração.

A pesquisa foi desenvolvida em uma Escola Estadual de Educação Profissional, com turmas do terceiro ano dos cursos técnicos de Enfermagem e Redes de Computadores,

contexto que permite examinar a influência do conhecimento biológico prévio na construção das analogias. A questão orientadora é: de que modo uma sequência didática baseada no uso estruturado de analogias entre circuitos elétricos e o sistema de condução elétrica cardíaca favorece a aprendizagem conceitual e a integração interdisciplinar no ensino de eletricidade no Ensino Médio técnico?

Para respondê-la, foi desenvolvido um produto educacional na forma de guia didático para o professor de Física, estruturado em seis módulos sequenciais, uma sequência didática de 14 aulas e instrumentos de avaliação. Esta dissertação está organizada em sete capítulos: referencial teórico, análise de dissertações do MNPEF, fundamentação física e biológica, objetivos e metodologia, resultados e discussão, e conclusão.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 BNCC na formação científica no Ensino Médio

A Base Nacional Comum Curricular (BNCC) repensa o papel do ensino de Ciências da Natureza ao deslocar o foco da transmissão de conteúdo para a construção de competências voltadas à análise de fenômenos, ao desenvolvimento da argumentação científica e à interpretação e aplicação de modelos explicativos. Essa orientação implica o reconhecimento de que o aprendizado científico não se limita a um conjunto de expressões matemáticas ou definições operacionais, mas constitui um sistema estruturado de explicações construídas historicamente por meio de modelos teóricos (Brasil, 2018).

Essa perspectiva encontra respaldo na própria Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (LDB), que estabelece como finalidades do Ensino Médio, entre outras, o aprimoramento do educando como pessoa humana, incluindo a formação ética e o desenvolvimento da autonomia intelectual e do pensamento crítico, bem como a compreensão dos fundamentos científico-tecnológicos dos processos produtivos, relacionando a teoria com a prática no ensino de cada disciplina (Brasil, 1996, art. 35, incisos III e IV). O Art. 36 da mesma Lei complementa essa orientação ao determinar que o currículo do Ensino Médio deverá adotar metodologias de ensino e de avaliação que estimulem a iniciativa dos estudantes (Brasil, 1996, art. 36, inciso II). A BNCC representa, portanto, a operacionalização curricular dessas diretrizes legais, traduzindo em competências e habilidades específicas o que a LDB estabelece como princípios gerais para a etapa.

Nessa perspectiva, o documento estabelece que

[...] a BNCC da área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias — por meio de um olhar articulado da Biologia, da Física e da Química — define competências e habilidades que permitem a ampliação e a sistematização das aprendizagens essenciais desenvolvidas no Ensino Fundamental no que se refere: aos conhecimentos conceituais da área; à contextualização social, cultural, ambiental e histórica desses conhecimentos; aos processos e práticas de investigação e às linguagens das Ciências da Natureza (BRASIL, 2018, p. 547).

O documento prossegue afirmando que

[...] na área de Ciências da Natureza, os conhecimentos conceituais são sistematizados em leis, teorias e modelos. A elaboração, a interpretação e a aplicação de modelos explicativos para fenômenos naturais e sistemas tecnológicos são aspectos fundamentais do fazer científico, bem como a identificação de regularidades, invariantes e transformações. Portanto, no Ensino Médio, o desenvolvimento do pensamento científico envolve

aprendizagens específicas, com vistas a sua aplicação em contextos diversos (Brasil, 2018, p. 548).

Em síntese, a busca pelo desenvolvimento do pensamento científico no Ensino Médio deve firmar e aprofundar as aprendizagens iniciadas no Ensino Fundamental, organizando o saber em leis, teorias e modelos que permitam a interpretação de fenômenos naturais e sistemas tecnológicos. Nesse sentido, a área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias organiza-se em torno das temáticas Matéria e Energia, Vida e Evolução e Terra e Universo, com o objetivo de promover uma compreensão integrada dos processos físicos, químicos e biológicos (Brasil, 2018).

Esse panorama rompe com a fragmentação disciplinar historicamente consolidada nos currículos escolares e aponta para uma perspectiva epistemológica segundo a qual aprender ciências significa compreender como ela produz e organiza explicações sobre os mais variados fenômenos (Moreira, 2011). Nesse sentido, o reconhecimento da importância do diálogo entre diferentes saberes amplia a compreensão das relações entre ciência, sociedade e natureza, bem como das potencialidades e limitações das Ciências da Natureza.

Nessa perspectiva, a BNCC propõe que o Ensino Médio promova o protagonismo estudantil por meio de estratégias de investigação que envolvam a formulação de hipóteses, a experimentação, a análise de dados e a comunicação de resultados. Essa orientação relaciona-se diretamente com o desenvolvimento de competências específicas, como a que determina

[...] Analisar fenômenos naturais e processos tecnológicos, com base nas interações e relações entre matéria e energia, para propor ações individuais e coletivas que aperfeiçoem processos produtivos, minimizem impactos socioambientais e melhorem as condições de vida em âmbito local, regional e global (Brasil, 2018, p. 554).

Dentre as habilidades associadas a essa competência, destaca-se a EM13CNT101, que prevê

[...] Analisar e representar, com ou sem o uso de dispositivos e de aplicativos digitais específicos, as transformações e conservações em sistemas que envolvam quantidade de matéria, de energia e de movimento para realizar previsões sobre seus comportamentos em situações cotidianas e em processos produtivos que priorizem o desenvolvimento sustentável, o uso consciente dos recursos naturais e a preservação da vida em todas as suas formas (Brasil, 2018, p. 555).

A BNCC fortalece, portanto, não apenas a interdisciplinaridade entre as áreas das Ciências da Natureza, mas também a consolidação do letramento científico — entendido

como a capacidade de compreender e interpretar o mundo por meio dos conhecimentos científicos, posicionando-se de forma crítica diante de questões que envolvem ciência e tecnologia (Sasseron; Carvalho, 2011). Esse letramento se manifesta ao incentivar a construção e avaliação de modelos, a interpretação de representações gráficas e matemáticas, a argumentação fundamentada em evidências e o uso apropriado das linguagens científicas.

Esse alinhamento estende-se às avaliações externas, em especial ao Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM). A Matriz de Referência do ENEM estabelece, entre seus eixos cognitivos comuns a todas as áreas, a competência de compreender fenômenos, definida como a capacidade de construir e aplicar conceitos das várias áreas do conhecimento para a compreensão de fenômenos naturais e da produção tecnológica (Brasil, 2009). Na área de Ciências da Natureza, a habilidade H21 determina que o estudante deve ser capaz de utilizar leis físicas e/ou químicas para interpretar processos naturais ou tecnológicos inseridos no contexto do eletromagnetismo (Brasil, 2009).

2.2 Interdisciplinaridade como integração dos saberes

Frequentemente tratada apenas como uma estratégia pedagógica superficial, a interdisciplinaridade possui um fundamento epistemológico consideravelmente mais profundo. Hilton Japiassu, um dos mais importantes filósofos e epistemólogos brasileiros e referência central no estudo do tema no país, caracteriza-a a partir de;

[...] a intensidade das trocas entre os especialistas e pelo grau de integração real das disciplinas no interior de um mesmo projeto de pesquisa. Ela exige uma mudança de atitude: a passagem da consciência fragmentária para uma consciência unitária do saber (Japiassu, 1976, p. 74).

Ampliando essa definição o autor destaca que a interdisciplinaridade constitui

[...] um método de pesquisa e de ensino suscetível de fazer com que duas ou mais disciplinas interajam entre si. Esta interação pode ir da simples comunicação das ideias até a integração mútua dos conceitos, da epistemologia, da terminologia, da metodologia, dos procedimentos, dos dados e da organização da pesquisa. Ela torna possível a complementaridade dos métodos, dos conceitos, das estruturas e dos axiomas sobre os quais se fundam as diversas práticas científicas. O objetivo utópico do método interdisciplinar, diante do desenvolvimento da especialização sem limite das ciências, é a unidade do saber, unidade problemática (Japiassu, 1976, p. 74-75).

A interdisciplinaridade busca, portanto, uma comunhão entre as disciplinas rumo à unidade do conhecimento, seja pelo compartilhamento de métodos, seja pela integração conceitual entre diferentes domínios do saber. No entanto, um dos maiores desafios para a

efetivação dessa proposta, na visão do próprio autor, reside na formação acadêmica dos professores, estruturada historicamente em cadeiras excessivamente especializadas que limitam uma visão integrada do conhecimento. Japiassu alerta que

[...] a ciência atual assemelha-se a um imenso mosaico cujas peças não se ajustam mais. Cada pesquisador ocupa-se de sua pequena parcela, ignorando o que faz seu vizinho, e o resultado é uma visão despedaçada da realidade, onde o sentido do conjunto se perdeu (Japiassu, 1976, p. 19).

A fragmentação do saber decorre, desse modo, de um processo histórico de especialização das ciências que, embora tenha contribuído para avanços significativos em cada área isolada, tende a obscurecer as relações estruturais entre os diferentes domínios científicos e a dificultar a compreensão integrada dos fenômenos cotidianos.

Essa crítica é aprofundada por Edgar Morin ao propor o paradigma do pensamento complexo. Sob essa ótica, a compreensão da realidade exige uma articulação intrínseca entre os diferentes níveis explicativos, pois os fenômenos naturais não se apresentam de forma isolada, mas como sistemas interdependentes que demandam abordagens eminentemente integradoras (Morin, 2000). O pensamento complexo não nega a especialização; ele a incorpora como parte de uma visão ampliada, na qual as conexões entre os saberes tornam-se tão importantes quanto os saberes em si.

Nesse sentido, a interdisciplinaridade não pode ser entendida como mera justaposição de conteúdos de disciplinas distintas. Ela refere-se a uma integração orientada por um problema ou objeto comum de investigação, de modo que as diferentes áreas contribuam com seus conceitos, definições e modelos próprios, gerando um autêntico diálogo epistemológico e uma construção compartilhada de significados (Fazenda, 2011). Essa distinção é fundamental: a simples presença de conteúdos de mais de uma disciplina em uma mesma aula não caracteriza a interdisciplinaridade; o que de fato a define é a interação ativa entre os saberes em torno de uma problemática comum.

Tal articulação favorece a atribuição de sentido aos conteúdos, amplia os campos de aplicação do conhecimento e aproxima o estudante de uma leitura fidedigna da realidade. Sob essa perspectiva teórica, a prática interdisciplinar potencializa a ocorrência da aprendizagem significativa, na medida em que permite que conceitos novos sejam relacionados, de forma substantiva e não arbitrária, a estruturas cognitivas já estabelecidas, contextualizando-os em fenômenos concretos e integrados do mundo real (Ausubel, 2003).

No contexto do ensino de Ciências da Natureza, e de forma particular na Física, essa quebra do isolamento disciplinar se faz necessária. Fenômenos complexos do mundo

vivo e inovações tecnológicas contemporâneas raramente encontram explicação satisfatória dentro das fronteiras rígidas de uma única disciplina acadêmica. Ao eleger objetos de estudo que demandam tanto o formalismo matemático e as leis de conservação da Física quanto as descrições sistêmicas e funcionais de outros campos do saber, o professor deixa de lado a ciência "em migalhas" criticada por Japiassu. Promove-se, assim, uma transição metodológica onde os modelos físicos não são ensinados como construções puramente abstratas, mas como ferramentas analíticas indispensáveis para desvelar a dinâmica e a complexidade intrínsecas à própria realidade do educando.

2.3 Aprendizagem Significativa e construção de sentido

Ao transpor a fragmentação dos conteúdos por meio do diálogo entre diferentes áreas do conhecimento, a interdisciplinaridade sustenta a aprendizagem ao priorizar problemas comuns em detrimento da mera exposição sequencial de conteúdo. Esse processo visa mitigar a memorização mecânica, convertendo-a em um evento estruturante que confere o contexto necessário para transformar a teoria em compreensão real e aplicada (Japiassu, 1976; Fazenda, 2011).

A aprendizagem significativa, teoria cognitiva proposta por David Ausubel, defende que o processo de apropriação do conhecimento ocorre de forma substantiva quando novas informações são relacionadas, de maneira não arbitrária e não literal, a conceitos preexistentes na estrutura cognitiva do estudante (Ausubel, 2003). Como o próprio autor sustenta,

[...] a aprendizagem significativa ocorre quando uma nova informação relaciona-se com um aspecto especificamente relevante da estrutura de conhecimento do indivíduo (Ausubel, 2003, p. 71).

Essa relação estabelece-se por um processo de ancoragem conceitual que modifica tanto o conteúdo novo quanto a própria estrutura cognitiva preexistente. Em contraposição à aprendizagem mecânica, caracterizada pela memorização literal, arbitrária e de curto prazo, Ausubel destaca que, no processo significativo, o conteúdo é assimilado de modo integrado e consciente, permitindo que a informação faça sentido e seja retida de forma duradoura. O autor sintetiza esse princípio afirmando que,

[...] o fator isolado mais importante que influencia a aprendizagem é aquilo que o aprendiz já sabe. Descubra isso e ensine-o de acordo (Ausubel, 2003, p. 58).

Nesse cenário, emergem os chamados subsunçores (ou conceitos subsunçores), que constituem as estruturas, conceitos ou proposições preexistentes na mente do estudante, capazes de receber, processar e estabilizar novos significados. Ausubel esclarece que

[...] o processo de aprendizagem significativa envolve a interação do novo material com ideias relevantes e inclusivas já existentes na estrutura cognitiva. Essas ideias preexistentes funcionam como subsunçores, isto é, conceitos ou proposições mais gerais e inclusivos que servem de ancoradouro para novas informações (Ausubel, 2003, p. 77).

Complementando essa definição, o autor reforça que os,

[...] subsunçores são conceitos relevantes, claros e estáveis, já presentes na estrutura cognitiva do indivíduo, capazes de interagir com o novo material potencialmente significativo (Ausubel, 2003, p. 83).

Cumprido notar que, para que esse processo de ancoragem se concretize, Ausubel (2003) estabelece duas condições simultâneas e fundamentais: o material didático deve ser potencialmente significativo (o que envolve sua logicidade intrínseca e a sua relevância psicológica face aos subsunçores do aluno) e o estudante deve manifestar uma disposição predisposta para aprender, isto é, a intenção de conectar o novo conhecimento à sua estrutura cognitiva de forma não arbitrária. A proposta interdisciplinar atua diretamente sobre essas duas vertentes, pois ao conferir contextualização ao objeto de estudo, eleva o potencial significativo do material e, simultaneamente, desperta o interesse e a disposição do educando.

Aprender significativamente implica, portanto, uma reorganização cognitiva e uma ativa construção de sentido por parte do sujeito, o que possibilita maior estabilidade temporal, retenção e, fundamentalmente, a capacidade de transferência do conhecimento para a resolução de novas situações-problema.

No ensino de Física, essa perspectiva possui implicações didáticas diretas. Conceitos estruturantes da eletrodinâmica, como resistência elétrica, capacitância e diferença de potencial, são frequentemente apresentados de forma puramente algorítmica, centrados na manipulação matemática exaustiva de equações destituídas de ancoragem em contextos explicativos reais. Quando o ensino segue essa abordagem puramente mecânica, a retenção conceitual mostra-se frágil e a capacidade de aplicação do conhecimento em cenários práticos torna-se severamente limitada.

A reversão desse quadro exige intencionalidade didática, organização sequencial do conteúdo e a instauração deliberada de relações conceituais explícitas (Moreira, 2011). Torna-se responsabilidade do professor identificar os subsunçores disponíveis na

estrutura cognitiva dos discentes e organizar o ensino de modo a construir pontes cognitivas entre o que eles já sabem e o que se pretende ensinar, utilizando, quando necessário, o que Ausubel denomina organizadores prévios.

Quando ocorre a integração interdisciplinar mediada por uma analogia estruturada, potencializa-se expressivamente o processo de construção de sentido. O fenômeno biológico familiar, o coração e seu funcionamento bioelétrico, atua como um potente subsunçor para os conceitos físicos abstratos da eletrodinâmica, conferindo ao novo conteúdo um ponto de ancoragem concreto, dinâmico e contextualizado. Assim, a aprendizagem torna-se mais estável e integrada, uma vez que cada nova ideia física se conecta de forma orgânica a uma rede conceitual de base biológica já estabelecida e compreendida pelo estudante (Ausubel, 2003).

Visto que a aprendizagem significativa decorre dessas conexões conceituais profundas, faz-se necessário discutir os modelos teóricos que alicerçam essas relações. A construção de sentido é orientada por representações que organizam e tornam comunicáveis os fenômenos do mundo natural, constituindo o núcleo tanto do fazer científico quanto do ensino de ciências.

2.4 Natureza dos modelos científicos

Nessa reflexão, é mandatório reconhecer que os modelos científicos não constituem meras cópias fiéis da realidade, mas sim representações teóricas idealizadas, formuladas com finalidades explicativas, preditivas e dedutivas. Para Mario Bunge (1981), a construção de sistemas hipotético-dedutivos é o motor da compreensão científica, de modo que um modelo não se confunde com o objeto real, mas opera como um mediador teórico. O autor caracteriza que,

[...] um modelo científico é uma representação idealizada de um objeto ou sistema real, construída com o propósito de descrevê-lo, explicá-lo ou prever seu comportamento (Bunge, 1974, p. 19).

Tal definição põe em evidência o caráter essencialmente representacional e intencional dos modelos, enfatizando que sua operação se dá por simplificação, seleção de variáveis relevantes e delimitação estrita de suas condições de validade. Compreender um modelo implica, portanto, reconhecer tanto sua potência explicativa quanto seus limites epistemológicos intrínsecos. Nessa mesma direção, Giere (1988) defende uma abordagem cognitiva da ciência, argumentando,

[...] os modelos são construções teóricas que representam o mundo por meio de relações de similaridade, e não por identidade (Giere, 1988, p. 81).

Essa perspectiva reafirma que o conhecimento científico é permanentemente mediado por representações cuja legitimidade depende do grau de aproximação e semelhança estrutural entre o modelo proposto e o fenômeno investigado.

O ensino de Ciências deve, por conseguinte, tratar os modelos como instrumentos interpretativos dinâmicos, e não como verdades dogmáticas ou absolutas. Nesse sentido, Gilbert, Boulter e Elmer (2000) debatem,

[...] modelos e modelagem ocupam posição central na prática científica e, consequentemente, devem ocupar papel central no ensino de Ciências (Gilbert; Boulter; Elmer, 2000, p. 2).

Para esses autores, transpor as práticas de modelagem para a sala de aula favorece a compreensão da própria natureza da ciência, permitindo ao estudante perceber que o conhecimento científico é construído, testado, revisado e, quando necessário, reformulado — o que constitui um dos pilares fundamentais do letramento ou alfabetização científica (Sasseron; Carvalho, 2011).

No contexto do Ensino Médio, a abordagem da natureza dos modelos científicos exige a compreensão de que modelar significa eleger, idealizar e representar aspectos da realidade orientados por objetivos explicativos específicos. Esse entendimento é crucial para evitar interpretações reificadas, nas quais o estudante confunde o modelo idealizado com o próprio fenômeno físico e concreto. A explicitação clara dos limites e das condições de aplicação de uma representação é premissa obrigatória para uma transposição didática consciente e epistemologicamente responsável (Martins, 2006).

Moreira (2021), ao discutir os desafios contemporâneos no ensino de Física e a necessidade de superar o aprendizado puramente mecânico focado em testagens, reforça esse ponto ao destacar

[...] é fundamental que o estudante compreenda que modelos são construções humanas, com domínios de validade delimitados, e não descrições literais da realidade (Moreira, 2011, p. 45).

Ao evidenciar deliberadamente esses limites em sala de aula, promove-se uma visão muito mais refinada e crítica da natureza da ciência, permitindo que o estudante compreenda o conhecimento científico como uma atividade humana viva, estruturada em representações teóricas em constante revisão e aprimoramento.

A aprendizagem de Física torna-se consideravelmente mais consistente quando organizada em torno do que Hestenes (1987) denomina "ciclo de modelagem" (*modelling cycle*). Sob esse prisma, o conhecimento científico está contido primariamente em modelos, de modo que o ensino deve priorizar a compreensão estrutural dessas construções teóricas em vez da simples e exaustiva manipulação de equações matemáticas.

Esse processo envolve etapas progressivas bem delineadas: a descrição e identificação dos objetos e seus atributos essenciais, acompanhada da seleção das variáveis relevantes; o estabelecimento de relações e representações, por meio da formulação de leis e diagramas que conferem estrutura ao modelo; e, por fim, o estudo da consistência e dos limites do sistema, validando o modelo frente ao sistema físico real (Hestenes, 1987). Ao deslocar o foco da resolução mecânica de problemas para a compreensão estrutural dos fenômenos, esse ciclo estimula no estudante o desenvolvimento de um pensamento crítico e de uma relação mais madura com o saber científico.

É precisamente nesse quadro teórico que a presente proposta se sustenta. O que se defende é que o órgão (Coração) se comporta de maneira suficientemente análoga para que os mesmos modelos matemáticos e conceitos físicos (como os de circuitos RC) descrevam satisfatoriamente ambos os sistemas com alta validade explicativa. Sob a ótica de Giere (1988), estabelece-se aqui uma relação de similaridade em que o sistema cardíaco opera como o *sistema-alvo* da modelagem, enquanto o circuito elétrico cumpre o papel de *modelo-objeto* analógico.

2.5 O uso de analogias no Ensino de Ciências

No ensino de Ciências, uma estratégia recorrente para tornar modelos complexos acessíveis e cognitivamente operáveis é o uso de analogias. Essa abordagem não se limita a uma comparação superficial, mas representa um processo explícito e sistemático de correspondências entre dois domínios conceituais. Glynn afirma

[...] ao ensinar por meio de analogias, o professor identifica explicitamente as semelhanças entre o conceito familiar (análogo) e o novo conceito (alvo), mapeia essas semelhanças, indica onde a analogia falha e tira conclusões sobre o conceito-alvo" (Glynn, 1991, p. 225).

Essa formulação evidencia que a analogia eficaz envolve movimentos estruturados: identificação do domínio-fonte, mapeamento das correspondências, explicitação dos limites e formalização conceitual. Trata-se, portanto, de uma estratégia cognitiva organizada e não de um recurso meramente ilustrativo.

Para operacionalizar esse processo em sala de aula, Glynn propõe o modelo *Teaching With Analogies* (TWA), uma estrutura de seis etapas que orienta o professor na condução do ensino por analogias de forma sistemática e pedagogicamente responsável. Essas etapas funcionam como um guia de mediação didática detalhado a seguir:

1. *Introdução do conceito-alvo*: O professor apresenta o novo conteúdo científico a ser aprendido, delimitando seus contornos e avaliando o nível de conhecimento prévio dos estudantes sobre o assunto.
2. *Apresentação do análogo familiar*: É evocado ou introduzido um conceito de domínio comum ou do cotidiano dos alunos (domínio-base), assegurando que eles compreendam bem o funcionamento desse elemento de comparação.
3. *Identificação das características relevantes de ambos os domínios*: O professor discrimina as propriedades e características fundamentais tanto do conceito-alvo quanto do conceito analógico, preparando os estudantes para associá-los.
4. *Mapeamento explícito das correspondências*: Consiste no núcleo do modelo, em que se estabelecem de forma direcionada os nexos e pareamentos funcionais entre os elementos equivalentes do análogo e do alvo.
5. *Indicação dos limites da analogia (onde ela falha)*: Etapa essencial para evitar equívocos conceituais, em que o docente aponta explicitamente onde a comparação deixa de ser válida e quais propriedades não devem ser transferidas.
6. *Elaboração de conclusões sobre o conceito-alvo*: Conclui-se o ciclo didático sintetizando o aprendizado e consolidando a compreensão do novo conceito a partir de termos puramente científicos, desvinculando-o progressivamente do suporte do análogo.

Duit reforça que o potencial das analogias está vinculado à sua explicitação metacognitiva, advertindo que

[...] as analogias são ferramentas poderosas no ensino de ciências, mas sua eficácia depende de uma orientação cuidadosa. Os alunos devem ser ajudados a compreender tanto as semelhanças quanto as limitações da analogia; caso contrário, podem surgir equívocos (Duit, 1991, p. 660).

Esse alerta é especialmente relevante no contexto do modelamento biológico: ao utilizar os circuitos elétricos como domínio-fonte para a compreensão da condução elétrica cardíaca, busca-se explicitar que a analogia não implica identidade existencial entre os sistemas, mas sim similaridade estrutural entre certas relações funcionais. O interesse não é afirmar que o coração é essencialmente um circuito elétrico artificial, mas sim demonstrar que

algumas de suas relações funcionais se comportam de maneira suficientemente análoga para que os modelos matemáticos da eletricidade descrevam ambos os sistemas com validade explicativa.

A fundamentação mais rigorosa para esse uso de analogias encontra-se na Teoria do Mapeamento Estrutural, desenvolvida por Dedre Gentner, segundo o qual

[...] uma analogia é um mapeamento do conhecimento de um domínio (a base) para outro (o alvo), de modo que um sistema de relações que se aplica entre objetos na base também se aplica entre objetos no alvo (Gentner, 1983, p. 155).

Essa definição é particularmente pertinente porque desloca o foco da analogia das características superficiais e materiais para as relações estruturais. Não se transferem propriedades físicas dos objetos entre os modelos, transferem-se nexos e relações funcionais: a resistência elétrica como oposição ao fluxo de cargas corresponde à oposição biológica ao fluxo do impulso iônico; a capacitância como armazenamento temporário de carga corresponde ao atraso temporal fisiológico imposto pelo nó atrioventricular. É a estrutura relacional sistêmica que sustenta a analogia, não a semelhança literal entre os componentes isolados.

Sob a perspectiva da Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel (2003), o mapeamento estrutural proposto por Gentner (1983) assume um papel cognitivo claro: a analogia atua como um *organizador prévio*. Quando o estudante do Ensino Médio é confrontado com a complexidade da eletrofisiologia cardíaca (um conceito totalmente novo e abstrato, sem ancoragem prévia), o circuito elétrico resistivo e capacitivo, se já for de seu domínio familiar, passa a funcionar como uma ponte cognitiva. Essa estrutura conceitual intermediária serve como um elemento ancorador (*subsunçor*) provisório, cuja função é conferir os primeiros significados ao domínio-alvo, facilitando o processo de assimilação e diferenciação progressiva do conhecimento científico.

O mapeamento relacional demonstra ainda que analogias bem estruturadas permitem ao estudante formular previsões no domínio-alvo a partir de relações conhecidas no domínio-fonte, o que é relevante para o desenvolvimento do pensamento científico no Ensino Médio, pois estimula a construção de explicações baseadas em modelos. Quando o estudante compreende que a constante de tempo ($\tau = RC$), dada pelo produto entre a resistência e a capacitância, determina o tempo de carga de um capacitor, ele pode prever analogamente que um nó AV com o parâmetro τ aumentado produzirá um intervalo PR mais longo no

eletrocardiograma (ECG), sem precisar dominar previamente todos os pormenores moleculares e biofísicos da fisiologia celular envolvida.

Todavia, em estrito alinhamento com o quinto passo do modelo TWA de Glynn (1994) e com as advertências metacognitivas de Duit (1991), é imperativo discriminar as fronteiras em que essa correspondência analógica deixa de ser matematicamente e biologicamente válida. Enquanto no circuito elétrico convencional a corrente é sustentada pelo fluxo ordenado de elétrons livres em um meio condutor sólido (cobre), no sistema de condução cardíaco a corrente elétrica é de natureza iônica, propagando-se por meio do deslocamento de íons (Na^+ , K^+ , Ca^{2+}) através de membranas celulares e junções comunicantes (*gap junctions*).

Ademais, o circuito RC de laboratório é um sistema passivo que depende de uma fonte externa de tensão, ao passo que o tecido miocárdico possui automaticidade e excitabilidade intrínsecas, gerando seus próprios potenciais de ação de forma ativa. Explicitar tais diferenças em sala de aula é fundamental para mitigar a reificação do modelo e impedir a formação de concepções alternativas errôneas nos estudantes.

2.6 Dissertações no MNPEF sobre Interdisciplinaridade e Analogias

A análise das dissertações produzidas no âmbito do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) permitiu identificar trabalhos que compartilham, em diferentes graus, os fundamentos teóricos e metodológicos da presente pesquisa. Foram selecionadas cinco dissertações que articulam interdisciplinaridade, analogias e aprendizagem significativa no ensino de Física, cujas características são apresentadas a seguir.

Varela (2016), pela Universidade Federal de Santa Catarina, desenvolveu uma sequência didática para turmas de 8º ano do Ensino Fundamental articulando Física e Biologia por meio do conteúdo de visão humana. A pesquisa adotou abordagem qualitativa com aplicação de pré-teste e pós-teste, e o produto educacional consistiu em um Material de Apoio ao Professor de Ciências composto por experimentos, vídeos, textos, pôster e maquete. A autora concluiu que a abordagem interdisciplinar entre Física e Biologia favorece a aprendizagem conceitual e promove maior engajamento dos estudantes, constituindo referência metodológica para esta pesquisa no que se refere à articulação entre as duas áreas e ao uso de instrumentos de verificação antes e após a intervenção.

Rodrigues (2016), pela Universidade Federal de Goiás, elaborou um relato de experiência sobre a aplicação de um e-book interdisciplinar para o Ensino Médio, articulando conteúdos de ondulatória com ondas cerebrais e fisiologia cardíaca, com suporte de

computadores como recurso didático. O trabalho concluiu que a interdisciplinaridade mediada por Tecnologias da Informação e Comunicação amplia a contextualização dos conteúdos e favorece uma aprendizagem mais significativa. Essa dissertação constitui referência temática direta para o presente trabalho, por antecipar a pertinência do coração como análogo biológico no ensino de Física.

Cássia (2022), pela Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, desenvolveu uma sequência didática orientada pela Aprendizagem Significativa de Ausubel e pelas Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS) propostas por Moreira, aplicada em turmas de 9º ano do Ensino Fundamental com foco na dessalinização de água como fenômeno integrador entre Física, Química e Biologia, com uso de Tecnologias Digitais da Informação e Comunicação. A autora concluiu que o desenvolvimento da UEPS a partir de fenômenos físicos cotidianos favoreceu a aprendizagem significativa e afastou a aprendizagem mecânica. Essa dissertação constitui referência teórica para o presente trabalho pelo uso da Aprendizagem Significativa como fundamento da sequência didática interdisciplinar.

Souza (2016), pela Universidade Federal Rural de Pernambuco, desenvolveu uma metodologia de ensino de caráter multidisciplinar sistêmico, articulando os conceitos físicos de tensão superficial e capilaridade com contextos biológicos para o Ensino Médio. A pesquisa adotou abordagem qualitativa com estudo de caso de natureza fenomenológica, e o produto educacional incluiu roteiros e atividades investigativas. O autor concluiu que a articulação entre Física e Biologia gerou percepções e representações mais ricas dos fenômenos quando trabalhados em teia de relações interdisciplinares. Esse trabalho constitui referência metodológica para a presente pesquisa pela abordagem que articula modelos físicos e contextos biológicos de forma sistêmica.

Matos (2017), pela Universidade Federal de Santa Catarina, desenvolveu um produto educacional que utiliza três variantes do jogo de xadrez, xadrez gravidade, xadrez conservação de energia e xadrez entropia, como análogos para o ensino de conceitos físicos no Ensino Médio, potencializados por recurso de Realidade Aumentada para smartphones. A avaliação foi feita por meio de questionários com estudantes e entrevistas com professores. O autor concluiu que o caráter lúdico das variantes favoreceu o engajamento dos estudantes e que o uso estruturado de analogias demonstra potencial para o ensino de Física, embora a dimensão lúdica tenha prevalecido sobre a conceitual em turmas menos homogêneas. Essa dissertação constitui a referência mais direta para o presente trabalho no que se refere ao uso

de analogias como estratégia central de ensino de Física no âmbito do MNPEF, confirmando a viabilidade e a pertinência dessa abordagem.

Em conjunto, as dissertações analisadas evidenciam que a articulação entre Física e Biologia, mediada por estratégias didáticas estruturadas, sejam analogias, sequências didáticas, UEPS ou recursos tecnológicos, constitui uma linha de pesquisa consolidada no MNPEF, com resultados consistentemente favoráveis à aprendizagem conceitual. A presente pesquisa se insere nessa tradição ao adotar o modelo TWA como fundamento metodológico e o sistema de condução elétrica cardíaca como análogo biológico, avançando em relação aos trabalhos anteriores ao formalizar matematicamente as correspondências entre os domínios físico e biológico e ao avaliar sistematicamente o ganho de aprendizagem por meio de instrumentos pré e pós-intervenção.

3 ELETRICIDADE E CONDUÇÃO ELÉTRICA CARDÍACA

Este capítulo desenvolve, os fundamentos físicos e biológicos que serão articulados ao longo do produto educacional, partindo dos conceitos de eletrostática e avançando progressivamente até o modelo elétrico da membrana celular, com o objetivo de demonstrar que a analogia entre o circuito RC e o sistema de condução elétrica cardíaca não é uma metáfora didática conveniente, mas uma correspondência formalmente verificável entre dois sistemas governados pela mesma estrutura matemática.

3.1 Fundamentos físicos

3.1.1 *Eletrostática – Estrutura conceitual*

O átomo é constituído por partículas subatômicas que apresentam propriedades fundamentais, como massa, carga elétrica e spin. A descrição mais fundamental dessas partículas é fornecida pelo Modelo Padrão da Física de Partículas, teoria que organiza os constituintes elementares da matéria e suas interações fundamentais. No contexto do eletromagnetismo, a propriedade carga elétrica é central, pois é responsável pela interação das partículas com o campo eletromagnético (Griffiths, 2011).

A carga elétrica apresenta dois tipos fundamentais, convencionalmente denominados positiva e negativa. Experimentalmente, observa-se que todas as cargas encontradas na natureza correspondem a múltiplos inteiros de uma quantidade mínima denominada carga elementar, representada por $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$, em que C corresponde ao coulomb, unidade do Sistema Internacional (SI) para a carga elétrica (Halliday; Resnick, 2016). No átomo, os elétrons possuem carga $-e$, os prótons carga $+e$, enquanto os nêutrons são eletricamente neutros.

Quando ocorre um desequilíbrio entre o número de prótons e elétrons em um corpo, surge uma carga elétrica líquida não nula, caracterizando um corpo eletrizado. Esse desequilíbrio ocorre tipicamente pela transferência de elétrons entre materiais, por atrito, contato ou indução (Halliday; Resnick, 2016). Em escala microscópica, essa transferência está associada à formação de íons: átomos que perdem elétrons tornam-se cátions, com carga positiva, enquanto os que ganham elétrons tornam-se ânions, com carga negativa (Atkins; Jones, 2012).

As interações entre corpos carregados foram sistematizadas por Charles-Augustin de Coulomb no final do século XVIII. A expressão vetorial que descreve a força eletrostática

entre duas cargas puntiformes q_i e q_j , separadas por uma distância r , é conhecida como Lei de Coulomb,

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_i q_j|}{(r_{ij})^2} \hat{r}_{ij} \quad (3.1.1)$$

onde $\hat{r}_{ij}$ são vetores unitários que apontam de q_i para q_j e ϵ_0 , a permissividade elétrica do vácuo. A constante $1/(4\pi\epsilon_0)$ vale aproximadamente $9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$.

A Lei de Coulomb estabelece que a força eletrostática é proporcional ao produto das cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância, comportamento matemático análogo ao da lei da gravitação universal. Em sistemas com múltiplas cargas, a força resultante sobre uma dada carga é obtida pela soma vetorial das contribuições de todas as demais, princípio da superposição (Griffiths, 2011; Halliday; Resnick, 2016).

Em situações que envolvem múltiplas cargas ou distribuições contínuas, torna-se mais conveniente descrever as interações por meio do conceito de campo elétrico $\vec{E}$, grandeza vetorial que caracteriza a influência exercida por uma distribuição de cargas sobre cada ponto do espaço ao seu redor. Definido a partir de uma carga de prova positiva q_0 , o campo elétrico em um ponto P é dado por,

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (3.1.2)$$

cujas unidades no SI é newton por coulomb (N/C).

Para uma carga puntiforme Q , o campo elétrico assume a forma,

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \hat{r} \quad (3.1.3)$$

onde $\hat{r}$ é o vetor unitário radial que aponta da carga para o ponto de observação (Tipler; Mosca, 2009; Griffiths, 2011).

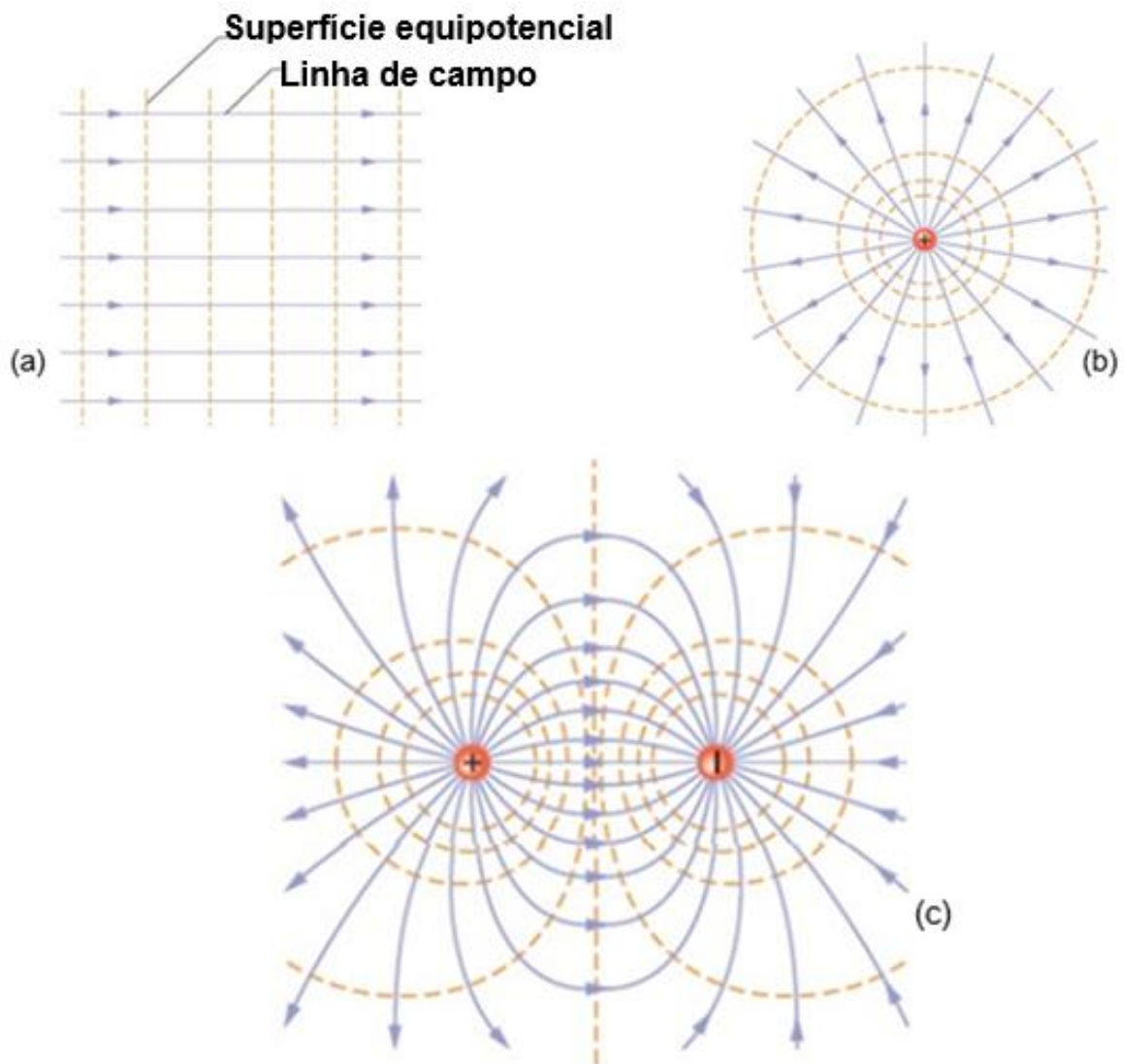
O comportamento do campo elétrico é governado pelas equações de Maxwell em regime eletrostático. A Lei de Gauss estabelece que o fluxo do campo elétrico através de uma superfície fechada é proporcional à carga total envolvida no interior dessa superfície, consequência direta da Lei de Coulomb associada ao princípio da superposição. Em sua forma diferencial, a Lei de Gauss indica que a divergência do campo elétrico em um ponto do espaço é proporcional à densidade de carga presente naquele ponto, de modo que as cargas atuam como fontes do campo. Complementarmente, em regime eletrostático, o rotacional do campo elétrico é nulo, implicando que a circulação do campo ao longo de qualquer caminho fechado é zero (Griffiths, 2011).

Essa última propriedade permite definir uma função escalar denominada potencial elétrico V , cuja variação espacial determina o campo elétrico,

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (3.1.4)$$

A diferença de potencial entre dois pontos A e B representa o trabalho por unidade de carga necessário para deslocar uma carga positiva de A até B, e sua unidade no SI é o volt (V), equivalente a joule por coulomb (Halliday; Resnick, 2016).

Figura 1 – Representação das linhas de campo elétrico (linhas azuis) e das superfícies equipotenciais (linhas laranjas) num campo elétrico uniforme (a), campo elétrico gerado por carga pontual (b) e num campo elétrico gerado por duas cargas de sinais contrários (c)



Fonte: Adaptado de Halliday & Resnick (2016, p.207)

Por sua natureza escalar, o potencial elétrico é particularmente útil na análise de circuitos, pois permite tratar diferenças de potencial, grandeza diretamente mensurável e central para a compreensão de dispositivos como pilhas, capacitores e resistores, sem a necessidade de operar com grandezas vetoriais. Para além disso, devemos estar atentos para as superfícies equipotenciais (Figura 1), que representam um conjunto de pontos no espaço nos quais o potencial elétrico assume o mesmo valor.

Nessas superfícies, a diferença de potencial

$$\Delta V = V(b) - V(a) = 0 \quad (3.1.5)$$

Dessa forma, o deslocamento de uma carga ao longo de uma mesma superfície equipotencial não resulta em realização de trabalho pela força eletrostática, uma vez que a diferença de potencial é nula. No entanto, ao haver deslocamento entre superfícies distintas ao longo de uma trajetória C , ocorre uma variação na energia potencial elétrica do sistema, grandeza expressa em joule no SI, causada pelo trabalho realizado pela força elétrica (Halliday; Resnick, 2016).

Nessas superfícies, a diferença de potencial

$$\Delta V = V(b) - V(a) = 0 \quad (3.1.5)$$

Dessa forma, o deslocamento de uma carga ao longo de uma mesma superfície equipotencial não resulta em realização de trabalho pela força eletrostática, uma vez que a diferença de potencial é nula. No entanto, ao haver deslocamento entre superfícies distintas ao longo de uma trajetória C , ocorre uma variação na energia potencial elétrica do sistema, grandeza expressa em joule no SI, causada pelo trabalho realizado pela força elétrica (Halliday; Resnick, 2016).

$$\Delta U = -W \quad (3.1.6)$$

Logo o trabalho realizado pela força será expresso por uma integral de linha (Griffiths, 2011), onde,

$$W_{A \rightarrow B} = \int_C q \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (3.1.7)$$

E assim,

$$\Delta U = -q \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (3.1.8)$$

Chegando a,

$$\Delta U = q\Delta V = q[V(B) - V(A)] \quad (3.1.9)$$

E finalmente,

$$U = qV \quad (3.1.10)$$

Indicando que a energia potencial elétrica associada a uma carga é proporcional ao potencial elétrico no ponto em que essa carga se encontra. Entretanto, se considerarmos duas cargas q_1 e q_2 separadas por uma distância r , a energia potencial de interação é obtida combinando as expressões do potencial elétrico de uma carga puntiforme com a definição de energia potencial

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r} \quad (3.1.11)$$

Importante notar que, a energia potencial elétrica depende apenas da distância entre as cargas q_1 e q_2 . Generalizando tal formalismo para sistemas de múltiplas cargas, sendo N o número de partículas carregadas, a energia é obtida somando algebricamente as interações entre os pares de carga, indicado por

$$U = \sum_{i < j} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i q_j}{r_{ij}} = \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i q_j}{r_{ij}} \quad (3.1.12)$$

o fator $1/2$ surge na segunda somatória devido estar contanto cada par duas vezes (Nussenzveig, 2013).

Em função do potencial, pode ser representada por

$$U = \frac{1}{2} \sum_i q_i V_i \quad (3.1.13)$$

onde, V_i indica o potencial na posição da carga q_i , devido as demais cargas. Portanto, para uma distribuição continua, podemos generalizar introduzindo a densidade volumétrica de carga $\rho(\vec{r})$ e substituindo a soma discreta por uma integral (Nussenzveig, 2013), de modo que,

$$U = \frac{1}{2} \int \rho(\vec{r}) V(\vec{r}) dV \quad (3.1.14)$$

De tal expressão, emerge interpretação alternativa para a energia potencial elétrica. Utilizando a Lei de Gauss na forma diferencial e realizando manipulações adequadas, se verifica,

$$U = \frac{\epsilon_0}{2} \int E^2 dV \quad (3.1.15)$$

Há uma relação entre a energia potencial e o campo elétrico, na qual a energia está distribuída no campo. Logo, se torna possível representar essa quantidade de energia por volume unidade de volume do campo (Halliday; Resnick, 2016; Griffiths, 2011),

$$u = \frac{\epsilon_0}{2} E^2 \quad (3.1.16)$$

Em resumo, a energia potencial apresenta duas interpretações equivalentes, (i) como propriedade associada à configuração espacial das cargas ou (ii) como uma quantidade distribuída no próprio campo elétrico presente no espaço. Ambas, são matematicamente consistentes e formulam diferentes perspectivas para a descrição energética dos sistemas eletrostáticos (Griffiths, 2011).

Essa segunda interpretação, energia armazenada no campo elétrico, é especialmente relevante para o desenvolvimento subsequente, pois constitui o princípio físico fundamental que governa o funcionamento dos capacitores.

3.1.2 *Força eletromotriz*

Como aplicação direta dos conceitos de potencial elétrico e energia discutidos na seção anterior, destacam-se as pilhas e baterias, dispositivos capazes de manter diferenças de potencial elétrico de forma contínua, permitindo a realização de trabalho em circuitos externos. Tais fontes de energia estão presentes em inúmeros sistemas tecnológicos e biológicos, convertendo energia química em energia elétrica e sustentando uma separação de cargas que estabelece uma diferença de potencial entre seus terminais (Halliday; Resnick, 2016, p. 371).

No contexto físico, esses dispositivos podem ser compreendidos como sistemas nos quais processos eletroquímicos internos realizam trabalho sobre as cargas elétricas, movimentando-as contra as forças eletrostáticas internas e estabelecendo assim uma diferença de potencial entre os terminais da fonte. Essa grandeza é denominada força eletromotriz (*fem*), usualmente representada por ε . Apesar da terminologia histórica, a força eletromotriz não corresponde a uma força no sentido mecânico, mas a uma grandeza escalar que representa o trabalho realizado por unidade de carga pelos agentes internos da fonte (Tipler; Mosca, 2009). Matematicamente, a força eletromotriz é definida como:

$$\varepsilon = \frac{W}{q} \quad (3.1.17)$$

em que W representa o trabalho realizado pelos agentes internos da fonte para transportar uma carga q de um terminal ao outro. No Sistema Internacional de Unidades (SI), a força eletromotriz possui a mesma unidade do potencial elétrico, o volt (V) (Halliday; Resnick, 2016).

Quando os terminais de uma pilha ou bateria são conectados a um condutor externo, surge uma diferença de potencial entre esses pontos do circuito, gerando um campo elétrico ao longo do condutor. Esse campo elétrico exerce forças sobre os portadores de carga

presentes no material condutor, produzindo um movimento coletivo dessas cargas. Como consequência, a energia química armazenada na fonte é gradualmente convertida em energia elétrica e transferida para os elementos do circuito (Nussenzveig, 2013).

Em situações ideais, nas quais as perdas internas podem ser negligenciadas, a diferença de potencial entre os terminais da fonte coincide com sua força eletromotriz,

$$\Delta V = \varepsilon \quad (4.1.18)$$

Entretanto, em dispositivos reais existem efeitos dissipativos associados à resistência interna r da pilha ou bateria. Nesse caso, parte da energia fornecida pela *fem* é dissipada internamente, de modo que a diferença de potencial disponível nos terminais externos é dada por:

$$\Delta V = \varepsilon - r \cdot i \quad (3.1.19)$$

em que i representa a corrente que percorre o circuito.

Essa expressão evidencia que a tensão disponível nos terminais decresce à medida que a corrente aumenta, comportamento observado, por exemplo, em baterias com elevada resistência interna, como as que apresentam desgaste por uso prolongado (Halliday; Resnick, 2016).

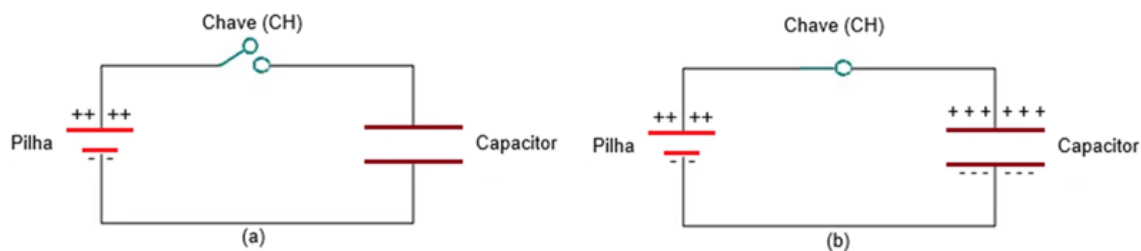
Ainda assim, a força eletromotriz permanece como a grandeza fundamental que caracteriza a capacidade de uma fonte de fornecer energia elétrica ao sistema.

3.1.3 Capacitores

Embora pilhas e baterias mantenham diferenças de potencial por meio de processos eletroquímicos, os capacitores são capazes de armazenar energia elétrica diretamente no campo elétrico estabelecido entre dois condutores separados por uma pequena distância, preenchida pelo vácuo ou por um material isolante denominado dielétrico. Esses dispositivos constituem um exemplo concreto da interpretação da energia eletrostática como uma grandeza distribuída no próprio campo elétrico (Griffiths, 2011; Halliday; Resnick, 2016).

Estruturalmente, um capacitor é formado por dois condutores separados por um isolante. Ao serem submetidos a uma diferença de potencial, acumulam cargas de sinais opostos em suas superfícies, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Circuito com pilha, chave e capacitor: (a) chave aberta, capacitor descarregado; (b) chave fechada, capacitor carregado.



Fonte: Adaptado de Mundo Educação¹

Diferentemente das pilhas, que fornecem energia por períodos prolongados com tensão relativamente estável, os capacitores são capazes de liberar grandes quantidades de energia em intervalos de tempo muito curtos, com tensão que decresce rapidamente durante a descarga. Essa característica os torna especialmente adequados para aplicações que exigem fornecimento instantâneo de energia elevada — como o disparo de um flash fotográfico, a partida de motores elétricos ou, no contexto médico, o disparo de um desfibrilador externo (Halliday; Resnick, 2016).

A quantidade de carga armazenada por um capacitor está associada a uma grandeza denominada capacitância C , que mede a capacidade do componente de armazenar carga elétrica q para uma dada diferença de potencial V aplicada entre seus terminais,

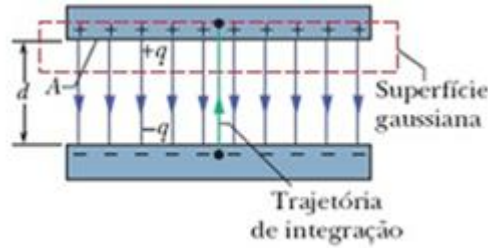
$$C = \frac{q}{V} \quad (3.1.20)$$

No SI, a unidade de capacitância é o farad (F), definido como coulomb por volt (C/V). Na prática, capacitores comuns apresentam capacitâncias da ordem de microfarads (μF) ou picofarads (pF) (Halliday; Resnick, 2016). Enquanto os utilizados em desfibriladores podem atingir dezenas de microfarads carregados a tensões da ordem de quilovolts.

A capacitância é uma propriedade geométrica do dispositivo, dependendo da área dos condutores e da distância entre eles. Um caso particularmente relevante para este trabalho é o capacitor de placas paralelas, constituído por duas placas planas de área A separadas por uma distância d , com a condição de que d seja muito menor do que as dimensões laterais das placas, o que permite desprezar os efeitos de borda (Halliday; Resnick, 2016).

¹ <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/capacitancia-um-capacitor.htm>. Acesso em 08 de março de 2026.

Figura 3 – Capacitor de placas paralelas com superfície gaussiana e trajetória de integração para o cálculo do campo elétrico interno.



Fonte: Adaptada de Halliday e Resnick (2016, p.269)

Para determinar o campo elétrico entre as placas, aplica-se a Lei de Gauss com uma superfície gaussiana conforme indicado na Figura 3. Como o campo elétrico entre as placas é uniforme e perpendicular às superfícies, o fluxo elétrico se reduz ao produto do campo pela área da superfície gaussiana,

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (3.1.21)$$

onde σ representa a densidade superficial de cargas nas placas ($\sigma = q/A$) e ϵ_0 a permissividade elétrica do vácuo. A diferença de potencial entre as placas é obtida integrando o campo elétrico ao longo da distância d ,

$$V = \int_0^d \vec{E} \cdot d\vec{l} = \vec{E} \cdot \int_0^d d\vec{l} = Ed \quad (3.1.22)$$

chegando,

$$V = \frac{qd}{\epsilon_0 A} \quad (3.1.23)$$

substituindo em (4.1.20),

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (3.1.24)$$

Esse resultado confirma que a capacitância é determinada exclusivamente pela geometria do dispositivo, ela aumenta com a área das placas e diminui com a distância entre elas (Tipler; Mosca, 2009).

Quando o espaço entre as placas é preenchido por um material dielétrico, a permissividade elétrica do meio passa a ser expressa por

$$\epsilon = \kappa \epsilon_0 \quad (3.1.25)$$

onde κ é a constante dielétrica do material, sempre maior que 1. A capacitância do sistema torna-se então,

$$C = \frac{\kappa \epsilon_0 A}{d} \quad (3.1.26)$$

Esse resultado mostra que materiais dielétricos permitem aumentar significativamente a capacidade de armazenamento de carga em um capacitor sem alterar sua geometria, propriedade amplamente explorada na fabricação de capacitores compactos de alta capacitância (Halliday; Resnick, 2016).

Do ponto de vista energético, o trabalho necessário para transportar cargas sucessivas ao capacitor durante seu carregamento resulta em energia armazenada no campo elétrico entre as placas. Essa energia U pode ser expressa por três formas equivalentes

$$U = \frac{CV^2}{2} = \frac{Q^2}{2C} = \frac{QV}{2} \quad (3.1.27)$$

Essas relações evidenciam que a energia armazenada depende tanto da capacitância C do sistema quanto da diferença de potencial V aplicada entre seus terminais e da carga q acumulada nas placas (Griffiths, 2011).

3.1.4 *Corrente elétrica, Resistores e Lei de Ohm*

Embora os capacitores permitam o armazenamento de energia potencial no campo elétrico em condições de equilíbrio, a fenomenologia dos circuitos depende do transporte efetivo de cargas através dos condutores. Esse processo, caracterizado pelo deslocamento coletivo e ordenado de portadores de carga sob a influência de um campo elétrico, define a grandeza física denominada corrente elétrica (Halliday; Resnick, 2016).

A corrente elétrica é definida como a taxa de variação da carga q que atravessa uma superfície em um determinado intervalo de tempo t ,

$$i = \frac{dQ}{dt} \quad (3.1.28)$$

No SI, a corrente elétrica é medida em ampère (A), definido como coulomb por segundo (C/s). Essa definição é macroscópica e independe do tipo de portador de carga ou do mecanismo microscópico responsável pelo transporte elétrico (Halliday; Resnick, 2016).

A origem desse fluxo parte do modelo microscópico da condução. Na ausência de um campo elétrico aplicado, os elétrons de condução de um metal apresentam movimento térmico aleatório, de modo que o fluxo líquido de carga é nulo.

Quando uma diferença de potencial é aplicada nas extremidades do condutor, estabelece-se um campo elétrico em seu interior e cada elétron passa a sofrer a ação da força elétrica. O resultado é um pequeno deslocamento médio na direção oposta ao campo,

denominado velocidade de deriva v_d , da ordem de milímetros por segundo. Considerando um condutor com n portadores de carga por unidade de volume, cada um com carga q , movendo-se com velocidade de deriva v_d , a densidade de corrente é expressa por

$$\vec{J} = nq\vec{v}_d \quad (3.1.29)$$

A corrente elétrica total i em um condutor de seção transversal uniforme A com densidade de corrente aproximadamente constante é

$$i = JA = nqv_d A \quad (3.1.30)$$

Essa expressão estabelece uma relação direta entre a corrente macroscópica observada em um circuito e o movimento microscópico das cargas no interior do material (Halliday; Resnick, 2016, p. 325; Nussenzveig, 2013, p. 99).

Um aspecto frequentemente mal interpretado merece atenção: a velocidade de deriva dos elétrons é extraordinariamente pequena e, no entanto, os dispositivos elétricos respondem praticamente de forma instantânea ao fechamento de um circuito. Essa aparente contradição é resolvida quando se considera que o que se propaga não são os elétrons individualmente, mas o campo elétrico no interior do condutor. Quando uma diferença de potencial é aplicada, o campo elétrico se estabelece ao longo de todo o condutor quase instantaneamente a uma velocidade próxima à da luz, colocando todos os elétrons livres em movimento de forma simultânea (Griffiths, 2011; Halliday; Resnick, 2016, p. 322). Esse princípio tem correspondência direta no sistema de condução elétrica cardíaca: o impulso gerado pelo nó sinoatrial não se propaga pela migração física de íons ao longo das fibras, mas pela propagação de um campo elétrico de célula em célula, que desencadeia sucessivamente os potenciais de ação ao longo das vias de condução.

Entretanto, o movimento dos portadores de carga no interior dos materiais não se dá de maneira irrestrita. No processo de condução elétrica, os elétrons sofrem sucessivas interações com os íons da rede cristalina, impurezas e defeitos estruturais presentes no material. Essas interações limitam a mobilidade dos portadores de carga e estabelecem uma oposição ao fluxo — fenômeno que se manifesta macroscopicamente por meio da resistência elétrica (Griffiths, 2011; Halliday; Resnick, 2016, p. 330).

Considerando um condutor homogêneo de condutividade σ , comprimento L e seção transversal uniforme A , submetido a uma diferença de potencial V entre suas extremidades, o campo elétrico interno tem intensidade $E = V/L$. Inserindo esse resultado na forma microscópica da Lei de Ohm ($J = \sigma E$) e utilizando a relação $i = J \cdot A$, obtém-se

$$V = \frac{L}{\sigma A} i \quad (3.1.31)$$

O fator que multiplica a corrente é a definição formal da resistência elétrica R ,

$$R = \frac{L}{\sigma A} \quad (3.1.32)$$

onde $\rho = 1/\sigma$ é a resistividade do material, grandeza que caracteriza a oposição intrínseca do material ao fluxo de cargas, independentemente da geometria do condutor. No SI, a unidade de resistência é o ohm (Ω), definido como volt por ampère. Combinando (3.1.31) e (3.1.32), encontramos,

$$U = Ri \quad (3.1.33)$$

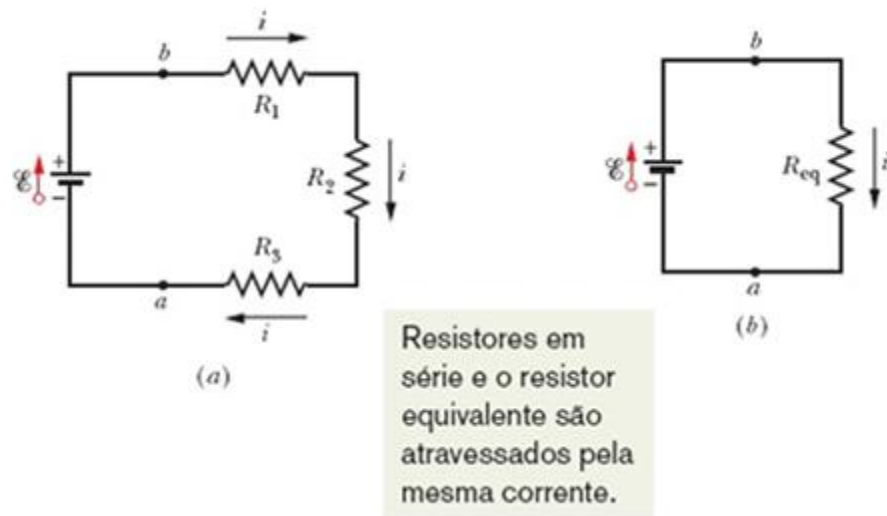
Essa relação expressa que a diferença de potencial entre os terminais de um elemento resistivo é diretamente proporcional à corrente que o percorre, sendo a resistência R o coeficiente de proporcionalidade (Griffiths, 2011; Halliday; Resnick, 2016). É importante destacar que a Lei de Ohm não é uma lei universal, ela é válida apenas para materiais ôhmicos, nos quais R permanece constante independentemente da tensão aplicada. Materiais semicondutores, diodos e os canais iônicos da membrana celular cardíaca são exemplos de elementos não-ôhmicos, nos quais a relação entre tensão e corrente é não-linear.

Na construção de circuitos elétricos resistivos, os resistores podem ser conectados em série ou em paralelo. Em ambos os casos, é possível substituir o conjunto por um único resistor equivalente R_{eq} que produz o mesmo efeito elétrico no circuito.

Na associação em série, os resistores são percorridos pela mesma corrente e a resistência equivalente é a soma das resistências individuais

$$R_{eq} = \sum_{i=1}^n R_i = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n \quad (3.1.34)$$

Figura 4 – Associação de resistores em série: (a) três resistores em série percorridos pela mesma corrente i ; (b) resistor equivalente R_{eq} .

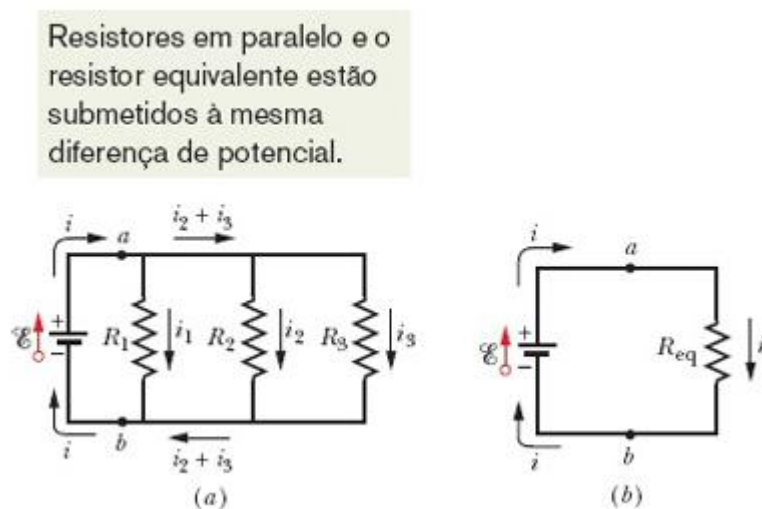


Fonte: Halliday e Resnick (2016, p. 381).

Já associação em paralelo, os resistores estão submetidos à mesma diferença de potencial e a resistência equivalente é obtida pelo inverso da soma dos inversos das resistências individuais

$$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots + \frac{1}{R_n} \quad (3.1.35)$$

Figura 5 - Associação de resistores em paralelo: (a) três resistores em paralelo submetidos à mesma diferença de potencial; (b) resistor equivalente R_{eq} .



Fonte: Halliday e Resnick (2016, p. 390).

Uma consequência importante da equação (4.1.35) é que a resistência equivalente de uma associação em paralelo é sempre menor do que a menor resistência individual do conjunto, o que significa que o circuito conduz mais facilmente do que qualquer um dos ramos isoladamente (Nussenzveig, 2013).

Por fim, todo condutor percorrido por uma corrente elétrica dissipa energia na forma de calor, fenômeno denominado Efeito Joule. A potência dissipada P em um elemento resistivo de resistência R percorrido por uma corrente i e submetido a uma diferença de potencial V é dada por

$$P = V \cdot i = R \cdot i^2 = \frac{V^2}{R} \quad (3.1.36)$$

onde a energia total dissipada,

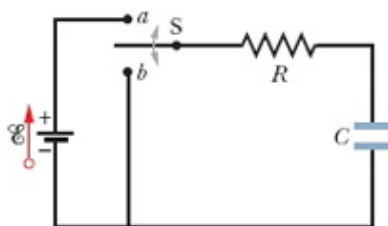
$$E = P \cdot \Delta t \quad (3.1.37)$$

representa a energia que os resistores convertem em calor.

3.1.5 Circuito RC

A construção de muitos sistemas elétricos vai além de um circuito puramente resistivo. Em diversas aplicações, surge a necessidade de incluir elementos capazes de armazenar carga e energia elétrica, como os capacitores. Nesses casos, a relação entre tensão e corrente deixa de ser puramente algébrica e passa a apresentar uma evolução temporal. Um exemplo fundamental dessa configuração é o circuito RC, formado pela associação em série de um resistor R , um capacitor C e uma fonte de força eletromotriz $\mathcal{E}$, conforme ilustrado na Figura 6 (Halliday; Resnick, 2016; Tipler; Mosca, 2009).

Figura 6 - Circuito RC com fonte de fem , resistor e capacitor: (a) chave na posição de carga; (b) chave na posição de descarga.



Fonte: Halliday e Resnick (2016, p. 401).

Embora o resistor continue obedecendo à Lei de Ohm, o capacitor introduz a possibilidade de acúmulo temporário de cargas em suas placas, modificando o comportamento da corrente elétrica ao longo do tempo. Enquanto o resistor dissipa energia elétrica na forma de calor, o capacitor armazena energia no campo elétrico estabelecido entre suas placas. Como consequência, a corrente elétrica não atinge instantaneamente seu regime estacionário após o fechamento do circuito. Em vez disso, ocorre um processo transitório no qual corrente e diferença de potencial evoluem gradualmente até alcançar o estado de equilíbrio. A descrição quantitativa desse processo conduz a equações diferenciais de primeira ordem, cujas soluções apresentam dependência exponencial com o tempo, caracterizando os processos de carga e descarga do capacitor.

Considere o circuito RC com o capacitor completamente descarregado. Ao fechar a chave na posição de carga, a corrente elétrica começa a circular pelo resistor e pelo capacitor. No instante inicial, como não há carga acumulada nas placas, a diferença de potencial entre elas é nula, de modo que toda a tensão da fonte aparece inicialmente sobre o resistor. À medida que a corrente percorre o circuito, cargas elétricas se acumulam nas placas do capacitor, produzindo uma diferença de potencial crescente que se opõe progressivamente à tensão fornecida pela fonte. Como consequência, a corrente diminui gradualmente até zero, indicando que o capacitor atingiu o estado completamente carregado (Griffiths, 2011; Tipler; Mosca, 2009).

Aplicando a Lei das Malhas ao circuito durante o processo de carga

$$\mathcal{E} - iR - \frac{q}{C} = 0 \quad (3.1.38)$$

Substituindo $i = dq/dt$,

$$\mathcal{E} = R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} \quad (3.1.39)$$

Esta é uma equação diferencial linear de primeira ordem, cuja solução descreve a evolução temporal da carga armazenada no capacitor

$$q(t) = C\mathcal{E} \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (3.1.40)$$

No instante inicial ($t = 0$), a equação (4.34) fornece $q = 0$, confirmando que o capacitor começa descarregado. Para $t \rightarrow \infty$, a carga tende a $q = C\mathcal{E}$, valor máximo previsto pela definição de capacitância. A corrente elétrica no circuito é obtida derivando a equação acima em relação ao tempo

$$i(t) = \frac{\mathcal{E}}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3.1.41)$$

A corrente atinge seu valor máximo $i_0 = \varepsilon/R$ no instante inicial e decresce exponencialmente até se tornar praticamente nula quando o capacitor está completamente carregado. A diferença de potencial entre as placas do capacitor é

$$V_C(t) = \varepsilon \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (3.1.42)$$

Indicando que V_C é nulo em $t = 0$ e cresce exponencialmente até atingir o valor da força eletromotriz da fonte (Griffiths, 2011; Halliday; Resnick, 2016).

O termo RC , presente nas expressões de carga, corrente e tensão, define uma grandeza de fundamental importância denominada constante de tempo do circuito

$$\tau = RC \quad (3.1.43)$$

A constante de tempo τ representa o intervalo de tempo necessário para que a carga no capacitor atinja aproximadamente 63% de sua carga máxima, resultado obtido substituindo $t = \tau$

$$q(\tau) = C\varepsilon \left(1 - e^{-\frac{\tau}{RC}} \right) = C\varepsilon (1 - e^{-1}) \approx 0,63 C\varepsilon \quad (3.1.44)$$

A Figura 7 apresenta o comportamento da carga e da corrente ao longo do tempo durante o processo de carga do circuito RC (Griffiths, 2011; Halliday; Resnick, 2016).

Figura 7 – Gráficos de carga $q(t)$ e corrente $i(t)$ em função do tempo durante o carregamento e descarregamento do capacitor em circuito RC.



Fonte: Halliday e Resnick (2016, p. 404).

Uma vez carregado, ao reposicionar a chave para o circuito de descarga, o capacitor começa a liberar sua energia através do resistor. Nesse caso, não há força eletromotriz externa atuando no circuito, e a Lei das Malhas se reduz a

$$R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = 0 \quad (3.1.45)$$

A solução dessa equação diferencial, com condição inicial $q(0) = q_0$, é

$$q(t) = q_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3.1.46)$$

A corrente elétrica durante a descarga é

$$i(t) = -\left(\frac{q_0}{RC}\right) e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3.1.47)$$

O sinal negativo indica que a corrente ocorre no sentido oposto ao observado durante o processo de carga. A tensão sobre o capacitor durante a descarga é expressa por

$$V_C(t) = U_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3.1.48)$$

onde U_0 é a tensão inicial entre as placas. Substituindo $t = \tau$,

$$q(t) = q_0 e^{-\frac{\tau}{RC}} = q_0 e^{-1} \approx 0,37 q_0 \quad (3.1.49)$$

Assim, após um intervalo de tempo igual a τ , tanto a carga quanto a tensão no capacitor se reduzem a aproximadamente 37% de seus valores iniciais. Quanto maior o produto RC , mais lento é o processo de carga e descarga, o capacitor leva mais tempo para armazenar e para liberar sua energia (Griffiths, 2011; Halliday; Resnick, 2016).

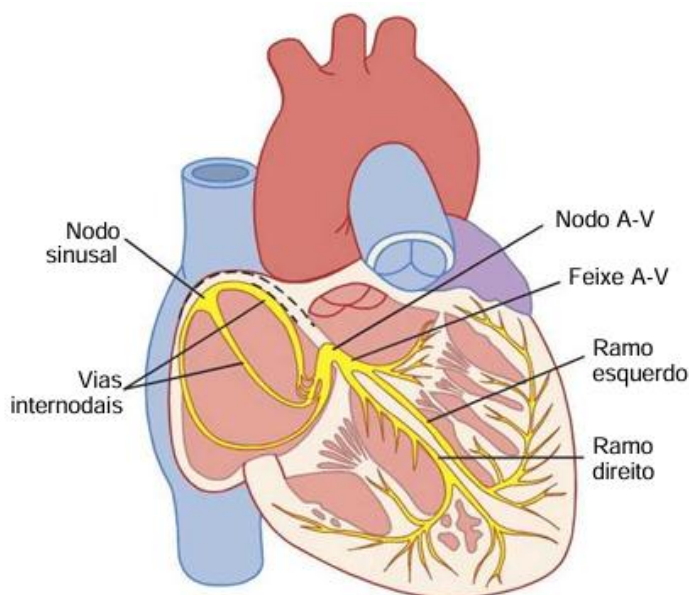
3.2 Fisiologia cardíaca

3.2.1 O Sistema de Condução Elétrica Cardíaca

O coração é dotado de um sistema especializado capaz de gerar impulsos elétricos rítmicos e conduzi-los de forma coordenada por toda a massa muscular cardíaca. Quando esse sistema funciona normalmente, os átrios se contraem aproximadamente um sexto de segundo antes dos ventrículos, intervalo que permite o enchimento ventricular antes do bombeamento, e todas as porções do ventrículo são ativadas quase simultaneamente, condição essencial para a eficiência mecânica do bombeamento (Guyton; Hall, 2017).

As estruturas que compõem esse sistema (nó sinoatrial, nó atrioventricular, feixe de His, ramos do feixe e fibras de Purkinje) estão distribuídas anatomicamente de forma a garantir uma sequência precisa de ativação elétrica, como ilustrado na Figura 8 (Silverthorn, 2017; Boron; Boulpaep, 2017).

Figura 8 – Sistema de condução elétrica cardíaca: nodo sinusal (SA), fibras de condução atrial (vias internodais), nodo atrioventricular (AV), feixe atrioventricular (feixe de His), ramos direito e esquerdo.



Fonte: Guyton e Hall (2017, p. 122)

O nó sinoatrial é uma pequena faixa de músculo cardíaco especializado, com aproximadamente 15 *mm* de comprimento, 3 *mm* de largura e 1 *mm* de espessura, localizada na parede posterolateral superior do átrio direito. Suas fibras têm diâmetro de apenas 3 a 5 μm , significativamente menores que as fibras musculares atriais circundantes, e praticamente nenhum filamento contrátil, sendo funcionalmente dedicadas à geração e propagação do impulso elétrico (Guyton; Hall, 2017).

A propriedade fundamental do nó SA é a autoexcitabilidade, suas células são capazes de despolarizar espontaneamente, sem necessidade de estímulo externo, em razão da permeabilidade inerentemente maior de suas membranas ao cálcio e ao sódio. Entre dois disparos, a entrada contínua de íons positivos eleva gradualmente o potencial de membrana, que nas células do nó SA situa-se em torno de -55 a -60 *mV*, bem menos negativo que o potencial de repouso das células ventriculares (-85 a -90 *mV*), até atingir o limiar de disparo de aproximadamente -40 *mV*, momento em que o potencial de ação é gerado e o ciclo recomeça (Guyton; Hall, 2017). Esse ciclo de despolarização espontânea e repetitiva ocorre em frequência de 70 a 80 vezes por minuto em repouso, determinando o ritmo de todo o coração.

A partir do nó SA, o impulso elétrico se propaga pelas fibras musculares atriais em velocidade de aproximadamente 0,3 *m/s*. Três faixas especializadas de tecido,

denominadas vias internodais anterior, média e posterior, conduzem o impulso do nó SA ao nó atrioventricular com velocidade de até 1 m/s . O tempo total de propagação do impulso do nó SA ao nó AV é de aproximadamente 0,03 segundos (Guyton; Hall, 2017).

O nó atrioventricular, localizado na parede posterior do átrio direito, tem função de introduzir um retardo deliberado na condução do impulso entre os átrios e os ventrículos (retardo de aproximadamente 0,13 segundos). Somado ao tempo de condução atrial, o intervalo total entre o disparo do nó SA e a ativação do músculo ventricular é de aproximadamente 0,16 segundos (Guyton; Hall, 2017).

Essa lenta condução no nó AV é explicada pelo reduzido número de junções comunicantes (*gap junctions*) entre as células dessa região, o que aumenta a resistência elétrica para a passagem de íons de uma célula à seguinte. Ele também possui capacidade de autoexcitação intrínseca, com frequência de 40 a 60 disparos por minuto quando não estimulado pelo nó SA, tal propriedade, garante, em caso de falha do marcapasso primário, a continuidade do ritmo cardíaco em frequência mais lenta (Guyton; Hall, 2017).

Após sofrer o atraso nos AV, o impulso chega ao feixe atrioventricular, denominado feixe de His, é o único caminho elétrico que atravessa a barreira fibrosa que separa átrios de ventrículos. Essa barreira, em condições normais, é eletricamente isolante, impedindo qualquer condução direta entre as câmaras superiores e inferiores por outra via. O feixe percorre o septo interventricular por 5 a 15 mm em direção ao ápice cardíaco, onde se bifurca nos ramos direito e esquerdo. Os dois ramos recebem o impulso simultaneamente e conduzem correntes independentes, um para o ventrículo direito e outro para o esquerdo, garantindo a ativação simultânea de ambas as câmaras (Guyton; Hall, 2017).

Nas extremidades dos ramos do feixe de His desdobram-se na rede de fibras de Purkinje, que reveste o endocárdio ventricular e penetra no miocárdio por cerca de um terço de sua espessura. Essas fibras são as maiores do coração, com diâmetro muito superior ao das fibras musculares ventriculares comuns, conduzindo potenciais de ação com velocidade de 1,5 a 4,0 m/s, cerca de seis vezes mais rápida que o músculo ventricular comum e até 150 vezes mais rápida que algumas fibras do nó AV (Guyton; Hall, 2017).

Essa alta velocidade de condução é explicada pela permeabilidade muito elevada das junções comunicantes nos discos intercalados entre as células de Purkinje, o que reduz drasticamente a resistência ao fluxo iônico de célula a célula. Por essa razão, o impulso percorre toda a rede de Purkinje e atinge as extremidades do sistema em apenas 0,03 segundos, ativando a massa ventricular de forma quase simultânea e garantindo a contração

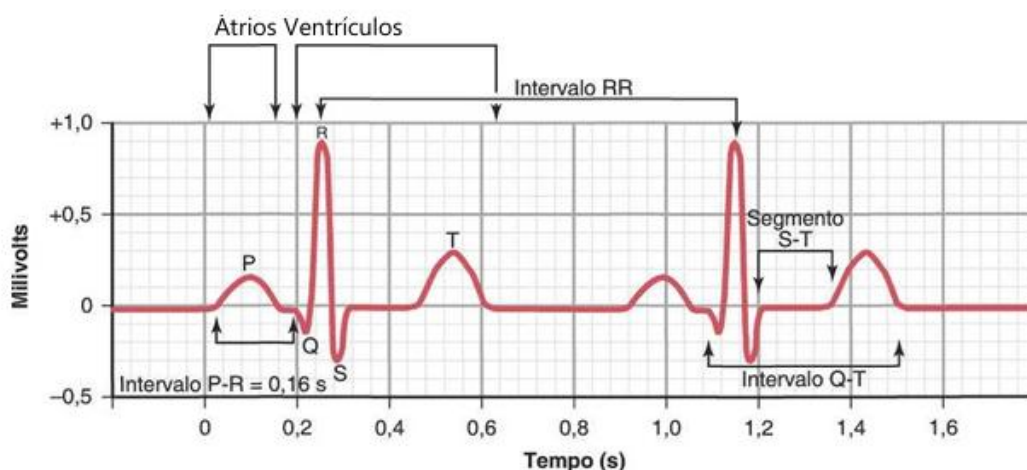
sincronizada necessária para o bombeamento eficiente (Guyton; Hall, 2017; Silverthorn, 2017).

O registro desta atividade elétrica no coração ao longo do tempo, utiliza-se do eletrocardiograma (ECG), exame médico realizado ao distribuir eletrodos na superfície do corpo. Cada evento elétrico gerado pelo sistema de condução, despolarização e repolarização das câmaras, produz correntes elétricas que se propagam pelos tecidos adjacentes e alcançam a superfície corporal, onde são captadas e registradas como variações de potencial em função do tempo (Guyton; Hall, 2017).

O traçado de um ECG normal, representado na Figura 9, é composto por ondas e intervalos que correspondem a eventos elétricos precisos do sistema de condução. A onda P representa a despolarização dos átrios, deflagrada pelo disparo do nó SA. O intervalo PR, com valor normal entre 0,12 e 0,20 segundos, corresponde ao tempo que o impulso leva para percorrer o nó AV e atingir os ventrículos, refletindo diretamente o retardo imposto por essa estrutura. O complexo QRS representa a despolarização ventricular, produzida pela rápida propagação do impulso pelas fibras de Purkinje. A onda T corresponde à repolarização ventricular, quando as células retornam ao estado de repouso. O intervalo RR, medido entre dois complexos QRS consecutivos, representa o período de um ciclo cardíaco completo, a partir do qual se calcula a frequência cardíaca dada pela eq. 3.2.1 (Guyton; Hall, 2017).

$$bpm = 60/T_{RR} \quad (3.2.1)$$

Figura 9 – Traçado de ECG normal com identificação das ondas P, Q, R, S e T, do intervalo PR, do intervalo RR e do segmento ST. O eixo vertical representa a diferença de potencial em milivolts e o eixo horizontal representa o tempo em segundos



Fonte: Guyton e Hall (2017, p. 129)

A sequência temporal registrada no ECG é, portanto, a expressão macroscópica do funcionamento coordenado do sistema de condução elétrica cardíaca, cada onda e intervalo do traçado corresponde a uma estrutura específica desse sistema, com tempo de ativação determinado pelas propriedades elétricas do tecido envolvido.

3.2.2 *Modelo Elétrico da Membrana Celular Cardíaca*

A atividade elétrica descrita no tópico anterior, geração, retardo e distribuição do impulso pelas estruturas do sistema de condução, tem como substrato fundamental as propriedades elétricas da membrana plasmática de cada cardiomiócito. Para compreender como o impulso é gerado e propagado em nível celular, é necessário analisar a membrana não apenas como uma barreira biológica, mas como um elemento com propriedades elétricas mensuráveis e formalizáveis.

A membrana plasmática é constituída por uma bicamada lipídica com proteínas associadas que, além de delimitar o meio intracelular do extracelular, atua como regulador do equilíbrio eletroquímico da célula. Entre o líquido no interior de uma célula e o fluido extracelular há uma diferença de potencial elétrico denominada potencial de membrana, cujo valor em repouso resulta da diferença de concentração iônica entre os dois meios, associada à permeabilidade seletiva da membrana aos diferentes íons (Okuno; Caldas; Chow, 1986; Guyton; Hall, 2017).

Essa separação de cargas estabelece uma diferença de potencial elétrico entre os dois lados da membrana. Do ponto de vista físico, a estrutura lipídica da membrana, com espessura de aproximadamente 7 nm , atua como um dielétrico que separa cargas de sinais opostos entre os meios extracelular e intracelular, de forma análoga a um capacitor de placas paralelas. A capacitância da membrana é descrita pela mesma relação geométrica do capacitor plano (Okuno; Caldas; Chow, 1986; Boron; Boulpaep, 2017):

$$C_m = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (3.2.2)$$

onde A é a área superficial da membrana, d é a espessura da bicamada e ε é a permissividade elétrica do material lipídico. Para células típicas, essa relação resulta em capacitância específica da ordem de $1\text{ }\mu\text{F}/\text{cm}^2$.

Para além do comportamento capacitivo, a membrana apresenta propriedades resistivas associadas ao fluxo de íons, principalmente sódio (Na^+), potássio (K^+) e cálcio (Ca^{2+}), através de canais proteicos específicos. Esses íons apresentam gradientes de

concentração distintos entre os dois meios, Na^+ e Ca^{2+} são mais abundantes no meio extracelular, enquanto K^+ predomina no meio intracelular. A abertura e o fechamento de canais iônicos determinam alterações na condutância da membrana, modificando o fluxo de íons e, conseqüentemente, o potencial elétrico celular (SILVERTHORN, 2017).

A condutância g é o inverso da resistência elétrica e expressa a facilidade com que cada espécie iônica atravessa a membrana. As correntes iônicas que atravessam a membrana podem ser descritas por uma relação diretamente análoga à Lei de Ohm. Para cada íon, a corrente é proporcional à diferença entre o potencial de membrana e o potencial de equilíbrio do íon, grandeza denominada potencial de Nernst, sendo a condutância o fator de proporcionalidade (Okuno; Caldas; Chow, 1986; Hodgkin; Huxley, 1952)

$$I_x = g_x(V_m - E_x) \quad (3.2.3)$$

onde g_x é a condutância do canal para o íon x , V_m é o potencial de membrana e E_x , o potencial de equilíbrio do íon, a diferença de potencial na qual a corrente líquida daquele íon é nula, dado o gradiente de concentração existente.

O potencial de ação, sinal elétrico que deflagra a contração cardíaca, resulta de variações temporais coordenadas na permeabilidade iônica da membrana. Quando o potencial de membrana atinge o limiar de excitação, os canais rápidos de sódio se abrem, permitindo influxo maciço de Na^+ para o interior da célula, produzindo a despolarização rápida. Em seguida, a abertura progressiva dos canais de potássio promove o efluxo de K^+ , restaurando a negatividade interna e completando a repolarização. No músculo cardíaco ventricular, a abertura dos canais lentos de sódio-cálcio prolonga o potencial de ação na forma de um platô, característica que distingue o cardiomiócito da fibra nervosa e que é essencial para a duração adequada da contração mecânica (Guyton; Hall, 2017; Okuno; Caldas; Chow, 1986).

Essa dinâmica pode ser formalizada por meio de um circuito elétrico equivalente, no qual a membrana é representada por um capacitor C_m em paralelo com resistências variáveis associadas a cada tipo de canal iônico. A corrente total que atravessa a membrana é expressa pela equação central do modelo de Hodgkin e Huxley (1952), que reúne a contribuição capacitiva e a soma das correntes iônicas (Okuno; Caldas; Chow, 1986; Keener; Sneyd, 2009)

$$I_{total} = C_m \frac{dV_m}{dt} + \sum_x I_x \quad (3.2.4)$$

onde C_m é a capacitância da membrana, $\frac{dV_m}{dt}$ é a taxa de variação temporal do potencial e $\sum I_x$ representa a soma das correntes iônicas individuais. Em condições em que a corrente líquida

aplicada externamente é nula, situação que descreve o comportamento espontâneo da célula, a equação se reduz a

$$C_m \frac{dV_m}{dt} = - \sum_x I_x \quad (3.2.5)$$

Dessa relação emergem dois corolários fundamentais. O primeiro estabelece que a taxa de variação do potencial de membrana é diretamente proporcional à corrente iônica líquida. O segundo afirma que, na ausência de corrente líquida, a derivada temporal do potencial é nula, resultando em um estado estacionário caracterizado pelo equilíbrio entre as correntes iônicas, condição que define o potencial de repouso da membrana (Boron; Boulpaep, 2017; Hodgkin; Huxley, 1952).

3.3 Relações Estruturais entre a Física e a Biologia

Os tópicos anteriores estabeleceram, de forma independente, dois sistemas: o circuito RC com seus elementos passivos e sua equação diferencial de primeira ordem, e a membrana celular cardíaca com suas propriedades capacitivas e resistivas. Aqui buscamos formalizar a correspondência matemática entre esses dois sistemas, demonstrando que ambos são governados pela mesma estrutura de equação diferencial e que essa identidade não é uma aproximação conveniente, mas uma equivalência formal verificável.

Conforme estabelecido na seção (3.1.5), a dinâmica de carga de um capacitor em circuito RC submetido a uma força eletromotriz ε é descrita pela equação diferencial de primeira ordem (4.1.38), que em termos da diferença de potencial do capacitor ($V_C = Q/C$), ficamos com

$$RC \frac{dV_C}{dt} = \varepsilon - V_C \quad (3.3.1)$$

A solução geral desta equação, com condição inicial $V_C(0) = 0$,

$$V_C(t) = \varepsilon(1 - e^{-t/RC}) \quad (3.3.2)$$

Essa solução exponencial constitui resultado clássico da teoria de circuitos elétricos lineares. A constante de tempo $\tau = RC$ determina a escala temporal da resposta, quanto maior o produto RC , mais lentamente o sistema responde a uma perturbação (Nussenzveig, 2013)

No modelo elétrico passivo da membrana, estabelecido na seção (3.2.2), a membrana é representada por um capacitor C_m em paralelo com uma resistência R_m associada

aos canais iônicos. Considerando um único canal iônico com potencial de equilíbrio E_{ion} , a corrente total através da membrana

$$I_{total} = C_m \frac{dV_m}{dt} + \frac{V_m - E_{ion}}{R_m} \quad (3.3.3)$$

Na ausência de corrente externa aplicada ($I_{total} = 0$)

$$R_m C_m \frac{dV_m}{dt} = E_{ion} - V_m \quad (3.3.4)$$

A solução desta equação, com condição inicial $V_m(0) = V_0$,

$$V_m(t) = E_{ion} + (V_0 - E_{ion})e^{-t/R_m C_m} \quad (3.3.5)$$

com,

$$\tau_m = R_m C_m \quad (3.3.5)$$

Logo as duas equações (3.3.1) e (3.3.4), são equações diferenciais lineares de primeira ordem, com solução exponencial e constante de tempo característica determinada pelo produto de uma resistência e uma capacitância. A Tabela 2 formaliza a correspondência entre os elementos dos dois sistemas.

Tabela 1 – Correspondência matemática entre o circuito RC e o modelo elétrico da membrana celular.

Grandeza	Circuito RC	Membrana celular
Capacitância	C	C_m
Resistência	R	R_m
Diferença de potencial	ε	E_{ion}
Potencial variável	V_C	V_m
Constante de tempo	$\tau = RC$	$\tau_m = R_m C_m$
Equação diferencial	$RC \cdot dV_C/dt = \varepsilon - V_C$	$R_m C_m \cdot dV_m/dt = E_{ion} - V_m$
Solução	$V_C(t) = \varepsilon(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$	$V_m(t) = E_{ion} + (V_0 - E_{ion})e^{-t/\tau_m}$

Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Nussenzveig (2013), Boron e Boulpaep (2017) e Hodgkin e Huxley (1952).

A constante de tempo τ_m não é apenas um parâmetro matemático, ela tem significado fisiológico direto e mensurável. Três consequências se destacam.

Primeiro, o aumento da resistência de membrana, associado à redução do número de canais abertos ou à diminuição da condutância iônica, implica maior constante de tempo e, portanto, resposta elétrica mais lenta da célula a perturbações do potencial.

Segundo, a redução da resistência ou equivalentemente, o aumento da condutância iônica por abertura de canais, acelera a resposta elétrica, reduzindo τ_m e tornando a célula mais sensível a variações rápidas do potencial.

Terceiro, alterações na capacitância de membrana por modificações na área superficial efetiva ou na composição lipídica, também modulam a velocidade de resposta do sistema, independentemente das propriedades resistivas (Boron; Boulpaep, 2017).

Nesse quadro, o retardo imposto pelo nó atrioventricular, pode ser interpretado em termos da constante de tempo do tecido nodal. A reduzida condutância iônica das células do nó AV, associada ao menor número de junções comunicantes entre elas, resulta em valor elevado de R_m e, conseqüentemente, em τ_m maior que o das demais estruturas do sistema de condução. O atraso fisiológico observado no ECG como intervalo PR é, portanto, a expressão macroscópica de uma propriedade RC do tecido e sua relação com τ_m é a correspondência central que justifica o uso do circuito RC como modelo do sistema de condução cardíaca (Boron; Boulpaep, 2017; Okuno; Caldas; Chow, 1986).

Tal correspondência, entre o circuito RC e a membrana celular é matematicamente precisa no regime passivo, isto é, quando o potencial de membrana varia suavemente em torno do potencial de repouso. Fora desse regime, quando o potencial atinge o limiar de disparo do potencial de ação, a membrana exibe comportamento não-linear que o modelo RC passivo não consegue descrever. Dessa forma, as condutâncias iônicas deixam de ser constantes e passam a depender do próprio potencial de membrana, exigindo o formalismo completo de Hodgkin e Huxley (1952), ver equação 3.2.4. Além disso, o modelo RC trata a membrana como um sistema concentrado, com capacitância e resistência uniformes, enquanto a membrana real é distribuída no espaço e apresenta heterogeneidade regional nas propriedades dos canais iônicos (Keener; Sneyd, 2009).

Reconhecer esses limites é parte essencial do trabalho com modelos científicos. A correspondência é um modelo, uma representação idealizada que captura o essencial do comportamento temporal do sistema dentro de um domínio de validade definido. É nesse domínio que ela se sustenta como ferramenta analítica, pedagógica e interpretativa.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo Geral

Desenvolver e avaliar uma sequência didática fundamentada no uso estruturado de analogias entre circuitos elétricos e o sistema de condução elétrica cardíaca, com vistas à promoção da aprendizagem conceitual e significativa de eletricidade no Ensino Médio técnico, em uma perspectiva interdisciplinar entre Física e Biologia.

4.2 Objetivos específicos

- Associar as estruturas do sistema de condução elétrica cardíaca aos elementos de um circuito elétrico equivalente.
- Analisar o eletrocardiograma como expressão gráfica do circuito elétrico cardíaco, identificando em seu traçado os eventos correspondentes a estrutura do sistema de condução estudada ao longo da sequência.
- Discutir os limites das analogias propostas, promovendo a compreensão de que os modelos científicos são representações aproximadas da realidade com domínios de validade delimitados, contribuindo para o desenvolvimento do pensamento científico crítico dos estudantes.
- Verificar o ganho de aprendizagem conceitual em eletricidade produzido pela sequência didática, por meio da comparação entre os resultados obtidos no pré-teste e no pós-teste.

5 METODOLOGIA

5.1 Natureza da pesquisa

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa de natureza mista, qualitativa e quantitativa, desenvolvida na modalidade de pesquisa intervenção pedagógica aplicada em ambiente escolar. A adoção da abordagem mista justifica-se pela necessidade de contemplar tanto os aspectos mensuráveis da aprendizagem, como o desempenho dos estudantes nos instrumentos de verificação e o ganho de aprendizagem entre pré-teste e pós-teste, quanto os processos interpretativos e subjetivos envolvidos na construção de significados por analogia, que exigem análise qualitativa das falas, justificativas e percepções dos estudantes. A triangulação entre os dados quantitativos e qualitativos confere maior robustez às análises e conclusões da pesquisa (Creswell, 2014; Bogdan; Biklen, 1994).

Do ponto de vista quantitativo, a pesquisa emprega pré-teste e pós-teste com questões objetivas, permitindo a verificação do ganho de aprendizagem ao longo da intervenção. Do ponto de vista qualitativo, a análise de conteúdo das respostas discursivas das atividades aplicadas ao longo do produto e do questionário de avaliação permite identificar padrões de compreensão, dificuldades conceituais e a apropriação das analogias propostas pelos estudantes.

A intervenção pedagógica foi planejada e conduzida pelo próprio pesquisador, na condição de professor da instituição onde o estudo foi realizado, o que caracteriza a pesquisa também como uma pesquisa-ação, na medida em que o investigador não ocupa posição externa ao fenômeno estudado, mas participa ativamente de sua transformação.

5.2 Contexto e Participantes

O estado do Ceará, localizado na região Nordeste do Brasil, possui área territorial de 148.894 km² e população estimada de 9,2 milhões de pessoas, distribuídas em 184 municípios (IBGE, 2022). No campo da educação pública de Ensino Médio, o estado conta com escolas funcionando em tempo integral gerenciadas pela Secretaria de Educação do Estado do Ceará (SEDUC), entre as quais se destacam as Escolas Estaduais de Educação Profissional (EEEPs) (SEDUC, 2024).

As EEEP's constituem um modelo de Ensino Médio integrado à Educação Profissional e Tecnológica, que busca preparar os estudantes tanto para a continuidade dos estudos acadêmicos quanto para o ingresso no mercado de trabalho. Seu funcionamento ocorre em regime de tempo integral, com jornada diária de nove horas, fornecimento de três

refeições, fardamento e material didático, garantindo condições estruturais para a permanência do estudante (SEDUC, 2023). Um elemento diferenciador do modelo é a realização de estágio curricular obrigatório e remunerado pelo Governo do Estado durante o terceiro ano, conforme estabelecido pela Lei Estadual nº 15.572/2014 (Ceará, 2014).

A proposta pedagógica das EEEPs fundamenta-se na Educação Interdimensional, com foco no desenvolvimento do Protagonismo Juvenil e na construção do Projeto de Vida do estudante, articulando competências cognitivas e socioemocionais e incentivando o estudante a ser o sujeito principal de sua aprendizagem e trajetória cidadã (ICE, 2015; SEDUC, 2018).

A pesquisa foi desenvolvida no município de Fortaleza, capital do Ceará, com área territorial de 313,8 km² e população de aproximadamente 2,7 milhões de pessoas (IBGE, 2022). No município, funcionam 84 escolas públicas estaduais em tempo integral, das quais 16 são da modalidade de educação profissional (Ceará, 2023). Entre essas instituições, destaca-se a EEEP Maria José Medeiros, integrante da Superintendência das Escolas Estaduais de Fortaleza 2 (SEFOR 2), escola na qual a intervenção foi realizada.

A instituição conta atualmente com 392 estudantes distribuídos em 10 turmas, com média de 40 alunos por turma, e oferece os cursos técnicos em Administração, Enfermagem e Redes de Computadores. Para a aplicação do produto educacional, foram selecionadas duas turmas do terceiro ano, uma do curso técnico em Enfermagem e outra do curso técnico em Redes de Computadores.

A turma do curso de Enfermagem é composta por 35 estudantes (4 do sexo masculino e 31 do sexo feminino), enquanto a turma de Redes de Computadores conta com 39 estudantes (23 do sexo masculino e 16 do sexo feminino). A seleção dessas turmas justifica-se pelos critérios.

Apresentarem os melhores desempenhos acadêmicos entre as turmas de terceiro ano da escola, demonstraram expressivo engajamento com a área de Ciências da Natureza; e, no caso específico da turma de Enfermagem, os estudantes haviam cursado a disciplina técnica Preparação para Exames componente de 20 horas que aborda procedimentos preparatórios para exames clínicos, incluindo o eletrocardiograma (ECG), o que lhes conferia subsunçores biológicos relevantes para a proposta interdisciplinar desenvolvida.

5.3 Instrumentos e Coleta de Dados

A coleta de dados foi realizada ao longo de toda a sequência didática, por meio de instrumentos que contemplam as dimensões quantitativa e qualitativa da pesquisa. Os instrumentos utilizados foram os seguintes.

O pré-teste foi constituído por dez questões objetivas de múltipla escolha, aplicadas no início da intervenção, com o objetivo de diagnosticar o conhecimento prévio dos estudantes sobre os conceitos de eletricidade abordados ao longo da sequência e mapear os subsunçores disponíveis para ancoragem das analogias propostas.

Já o pós-teste foi aplicado após a conclusão de todas as aulas, utilizando o mesmo instrumento do pré-teste, modificando alguns elementos nas questões numéricas. A adoção de instrumento idêntico nos dois momentos é uma escolha metodológica intencional, com o mesmo instrumento, qualquer variação no desempenho é diretamente atribuível ao processo de ensino vivenciado pelo estudante (Creswell, 2014). É importante ressaltar que o pré-teste não foi devolvido aos estudantes antes da aplicação do pós-teste, evitando que a memorização das respostas específicas do instrumento influenciasse os resultados.

Concomitantemente, as atividades formativas foram compostas por três a quatro questões por atividade, aplicadas ao final de cada etapa da intervenção, com exceção da Etapa 4. Cada atividade combina questões discursivas focadas na construção das correspondências analógicas entre os circuitos elétricos e o sistema de condução cardíaca, questões conceituais sobre os princípios físicos abordados em cada módulo e questões numéricas. Para fins de análise, as questões analógicas constituem o foco central de avaliação das atividades formativas, por estarem diretamente alinhadas ao objetivo da sequência. As questões numéricas são comentadas de forma complementar, com ênfase nas dificuldades operacionais observadas.

Cabe registrar que, em razão de contingências do calendário escolar, feriados, eventos institucionais e outras situações que reduziram o número de aulas disponíveis, apenas a Atividade 1 foi realizada individualmente. As demais foram aplicadas em grupos de até cinco integrantes, como adaptação necessária para viabilizar a conclusão da sequência dentro do período letivo disponível. Essa condição deve ser considerada na interpretação dos resultados das atividades formativas, uma vez que as respostas em grupo refletem um processo coletivo de construção da analogia e não permitem a identificação do desempenho individual de cada estudante.

O pré-teste e o pós-teste foram aplicados por meio da ferramenta Google Forms, o que facilitou a coleta e a organização dos dados.

Ao longo da sequência, foram utilizados simuladores computacionais, PhET Interactive Simulations e Falstad Circuit Simulator, como recursos didáticos de apoio à construção das analogias em cada módulo. Esses recursos não constituem instrumentos de

coleta de dados, mas integram a proposta pedagógica do produto educacional, descritos na seção 5.5.

5.4 Procedimentos de Análise

A análise dos dados coletados foi conduzida em duas dimensões complementares, quantitativa e qualitativa, conforme a natureza de cada instrumento. Em ambas as dimensões, a unidade de análise é a turma, e não o estudante individualmente. Os resultados são apresentados em termos de desempenho médio coletivo, distribuição de respostas e padrões emergentes nas turmas de Enfermagem e Redes de Computadores, permitindo a comparação entre os dois grupos e a identificação de tendências gerais produzidas pela intervenção.

Os dados do pré-teste e do pós-teste foram tabulados e analisados por meio de estatística descritiva, com o cálculo da média e do desvio padrão do desempenho de cada turma nos dois momentos. A variação percentual no desempenho médio entre os dois instrumentos foi calculada por questão e por categoria conceitual, permitindo identificar quais conceitos apresentaram maior e menor avanço ao longo da sequência e comparar o comportamento das duas turmas frente a cada conjunto de conteúdo.

As questões discursivas e analógicas das atividades formativas foram analisadas por meio de uma rubrica analítica de três níveis, elaborada com base nas etapas do modelo TWA proposto por Glynn (1991), descrita na Tabela 2. As questões numéricas não foram submetidas à rubrica analítica, sendo comentadas de forma complementar a partir das dificuldades operacionais observadas.

Tabela 2 – Rubrica analítica para avaliação das respostas discursivas nas atividades formativas.

Nível	Denominação	Descrição	Exemplo representativo
1	Superficial	Identifica a correspondência sem justificar	O nó SA é como uma bateria porque os dois geram energia.
2	Relacional	Identifica e justifica a relação funcional	O nó SA funciona como uma fonte de <i>fem</i> porque gera espontaneamente uma diferença de potencial que coloca os íons em movimento, assim como uma pilha mantém uma tensão que faz a corrente circular no

3	Adequado	Justifica e aponta limite da analogia	circuito. O nó SA se comporta como uma fonte de FEM no sentido de gerar a diferença de potencial que inicia o impulso, mas diferente de uma pilha, ele não tem energia química armazenada, a 'carga' se renova continuamente por processos iônicos da membrana.
---	----------	---------------------------------------	--

Fonte: Elaborado pelo autor baseado em Glynn (1991).

É importante destacar que, dada a natureza coletiva da maioria das atividades formativas, a análise pela rubrica foi aplicada às respostas de cada grupo como unidade de análise e não a cada estudante individualmente. Essa condição não compromete a identificação dos níveis de sofisticação analógica predominantes na turma, mas limita a possibilidade de rastrear a evolução individual de cada estudante ao longo da sequência.

5.5 O Produto Educacional e sua Aplicação

O produto educacional desenvolvido nesta pesquisa consiste em um guia didático destinado ao professor de Física do Ensino Médio, estruturado para o ensino de eletricidade por meio de analogias com o sistema de condução elétrica cardíaca. Sua aplicação foi planejada para 14 aulas de 50 minutos, organizadas em 8 etapas progressivas que percorrem desde a apresentação da proposta e o diagnóstico inicial dos estudantes até a avaliação final.

O produto está organizado em três partes complementares. A Parte 1 apresenta os conteúdos em seis módulos sequenciais, cada um estruturado com objetivos de aprendizagem, situação-problema, desenvolvimento conceitual, analogia biológica com o sistema de condução cardíaca, limitações da analogia, proposta de uso de simuladores computacionais e atividade avaliativa. A progressão dos módulos parte dos conceitos mais intuitivos, como a geração de tensão por uma fonte de força eletromotriz, e avança gradualmente até a síntese final, com a leitura do eletrocardiograma como expressão gráfica do circuito elétrico cardíaco. A Parte 2 apresenta a sequência didática estruturada em etapas, descrevendo a ordem cronológica de aplicação dos conteúdos, a quantidade de aulas sugerida e os momentos de avaliação ao longo do processo. Enquanto a Parte 3, reúne os instrumentos de avaliação e as atividades desenvolvidas para aplicação ao longo da sequência.

Antes dos módulos de Física, o produto traz um Módulo de Apoio dedicado às bases biológicas do sistema de condução elétrica cardíaca, escrito em linguagem física e sem pressupor conhecimento prévio de Biologia. Esse módulo tem função preparatória, pois permite que o professor compreenda e traduza para seus alunos as estruturas do coração que serão utilizadas como análogos ao longo de toda a sequência, garantindo que a abordagem interdisciplinar parta de uma base conceitual sólida em ambos os domínios.

5.5.1 Simuladores Computacionais Utilizados

Dois simuladores computacionais gratuitos foram selecionados como recursos didáticos de apoio à sequência, o PhET Interactive Simulations, desenvolvido pela Universidade do Colorado Boulder, e o Falstad Circuit Simulator, desenvolvido por Paul Falstad. A escolha de ambos se fundamentou em três critérios principais, (i) acesso gratuito e irrestrito, (ii) funcionamento diretamente no navegador, sem necessidade de instalação e (iii) compatibilidade com computadores, tablets e smartphones, o que os torna viáveis para uso em escolas públicas com infraestrutura variada.

O PhET foi utilizado nos módulos 1 a 4, que cobrem os conceitos de geradores e receptores, capacitores, corrente elétrica e resistência elétrica. O simulador oferece ambientes interativos com representação visual do campo elétrico, do fluxo de cargas e do comportamento dos circuitos, permitindo que o estudante manipule variáveis como tensão, resistência e capacitância e observe em tempo real as consequências sobre o circuito. Essa manipulação ativa favorece a construção das analogias propostas, ao alterar a resistência de um fio e observar a mudança na corrente, o estudante tem condições de conectar esse comportamento ao papel das fibras de Purkinje no sistema de condução cardíaca.

Enquanto isso, Falstad foi utilizado nos módulos 5 e 6, dedicados ao circuito RC e à síntese pelo eletrocardiograma. O simulador exibe em tempo real o gráfico de tensão em função do tempo no capacitor, o mesmo tipo de gráfico $V \times t$ que representa o ECG, tornando visível e manipulável a curva exponencial e a constante de tempo $\tau = RC$. Esse recurso foi essencial para o momento de síntese da sequência, ao projetar lado a lado o gráfico do Falstad e um traçado de ECG, permitindo o professor conduzir os estudantes a identificar por conta própria as correspondências entre as ondas do ECG e os eventos de carga e descarga do capacitor.

Em ambos os casos, o produto educacional inclui roteiros de uso específicos para cada módulo, com orientações de acesso, configuração inicial e perguntas de mediação prontas para o professor utilizar durante a exploração dos simuladores em sala de aula.

5.5.2 Estrutura do Produto

A estrutura completa da sequência didática, com a descrição de cada etapa, os módulos envolvidos, o número de aulas e os instrumentos de avaliação previstos, está sintetizada na Tabela 3.

Tabela 3 - Estrutura da Sequência Didática.

Etapa	Descrição	Capítulo(s)	Aulas	Atividade / Avaliação
01	Apresentação da proposta e aplicação do pré-teste diagnóstico.	—	1	Pré-teste
02	Geradores e Receptores: <i>fem</i> , pilhas e baterias. Nó SA como fonte de tensão autônoma	1	2	Atividade 01
03	Capacitores: armazenamento de energia. Membrana celular como capacitor biológico	2	2	Atividade 02
04	Corrente Elétrica: fluxo de cargas e o impulso iônico no sistema de condução	3	1	—
05	Resistência Elétrica e Lei de Ohm: resistores em série, paralelo e Efeito Joule. Feixe de His e fibras de Purkinje	4	3	Atividade 03 e 04
06	Circuito RC: carga, descarga e constante de tempo τ . Nó AV como capacitor temporizador	5	2	Atividade 05
07	O ECG como síntese: leitura do eletrocardiograma com os conceitos dos módulos anteriores	6	1	Atividade 06
08	Aplicação do pós-teste	—	2	Pós-teste

Fonte: Próprio autor

5.5.3 Descrição da Aplicação

A aplicação do produto educacional foi realizada entre 2 de fevereiro e 30 de abril de 2026, ao longo de 14 aulas de 50 minutos, nas turmas do terceiro ano dos cursos técnicos de Enfermagem e Redes de Computadores da EEEP Maria José Medeiros, em Fortaleza, Ceará. As aulas ocorreram nos horários regulares de Física de cada turma, sem alteração da grade curricular. O período de aplicação foi impactado por feriados, eventos institucionais e problemas estruturais da escola, em especial um intervalo de aproximadamente duas semanas em março sem aulas de Física, somado ao período da Semana Santa, dias de avaliação institucional e eventos escolares, o que exigiu adaptações no ritmo originalmente previsto.

A primeira etapa consistiu na apresentação da proposta aos estudantes, com explicação dos objetivos da sequência e da abordagem por analogias, seguida da aplicação do pré-teste via Google Forms, cujo o modelo das questões está em anexo no produto, acessado pelos estudantes em seus celulares. As reações das turmas foram distintas desde o início: na turma de Enfermagem, os estudantes demonstraram entusiasmo imediato, motivados especialmente pela curiosidade de como elementos cardíacos seriam abordados em aulas de Física; na turma de Redes de Computadores, a recepção inicial foi mais contida, sem reação expressiva perceptível.

Ao longo das etapas seguintes, os módulos foram desenvolvidos na ordem prevista na sequência didática. As relações matemáticas foram apresentadas no quadro, com atenção às formas de abordagem valorizadas em avaliações externas, enquanto as analogias eram introduzidas progressivamente para fortalecer a compreensão conceitual. Seguindo o modelo TWA de Glynn (1991), as analogias foram conduzidas de forma estruturada e explícita, apresentando o análogo familiar, mapeando as correspondências e discutindo os limites comparativos, com apoio dos simuladores computacionais para tornar os fenômenos visualmente acessíveis.

A construção das correspondências entre os circuitos elétricos e o sistema de condução cardíaca não ocorreu de forma espontânea em nenhuma das duas turmas. Em todos os módulos, as analogias precisaram ser mediadas de forma intencional pelo professor-pesquisador, o que está em consonância com as orientações do próprio modelo TWA, segundo o qual a eficácia das analogias depende de mediação estruturada e não de descoberta autônoma pelo estudante (Glynn, 1991). As duas turmas apresentaram perfis distintos nesse processo: na turma de Redes de Computadores, foi necessário apresentar os conceitos biológicos de forma explícita e simplificada antes de cada analogia, dado que os estudantes não dispunham de conhecimento prévio sobre o sistema de condução cardíaca; na turma de Enfermagem, essa necessidade concentrou-se em três momentos específicos, a associação entre a geometria da membrana plasmática e o capacitor de placas paralelas, o papel do nó AV como elemento de temporização e as propriedades das fibras de Purkinje, estruturas que, embora familiares aos estudantes, precisaram ser revisitadas sob a perspectiva elétrica.

Do ponto de vista conceitual, ambas as turmas demonstraram maior facilidade com a compreensão dos princípios físicos do que com a aplicação matemática dos conceitos, dificuldade observada de forma consistente nos dois grupos ao longo de toda a sequência. A necessidade de retomada do conceito de capacitores no momento de introdução do circuito RC, em razão do hiato no calendário entre os dois módulos, indicou esvanecimento parcial

dos subsunçores construídos anteriormente e aponta para a importância de estratégias de revisão rápida entre módulos conceitualmente encadeados.

As analogias de maior impacto pedagógico foram a do nó sinoatrial como fonte de força eletromotriz, por conectar simultaneamente a geração autônoma do impulso, a determinação da frequência cardíaca e o traçado do ECG e a das fibras de Purkinje e do feixe de His como rede de condutores em paralelo, que mobilizou discussões sobre a robustez do sistema diante da falha de um dos ramos de condução. Na turma de Enfermagem, essas discussões alcançaram profundidade além do previsto: os estudantes introduziram espontaneamente situações clínicas como o bloqueio de ramo e a falha do nó SA como condição que justifica o implante de marcapasso, tentando relacioná-las aos conceitos físicos discutidos. Esse movimento de transferência para contextos não previstos pela sequência representa um dos resultados qualitativos mais relevantes da aplicação. Na turma de Redes de Computadores, a participação foi mais contida, mas a aceitação das analogias após as intervenções de contextualização biológica foi igualmente perceptível.

Os simuladores PhET e Falstad foram utilizados na própria sala de aula, com projeção para toda a turma. Buscou-se seguir os roteiros previstos no produto, que foram aprimorados ao longo da própria aplicação a partir da experiência acumulada em cada aula. As situações-problema foram apresentadas de forma adaptada, de modo geral e direcionado ao tema de cada etapa, sem seguir linha por linha o texto do produto, em razão das restrições de tempo impostas pelos imprevistos do calendário.

As atividades avaliativas foram aplicadas em dois momentos da sequência. A Atividade 1 foi realizada individualmente; as demais foram realizadas em grupos de até cinco integrantes, como adaptação necessária para viabilizar a conclusão da sequência dentro do período letivo disponível.

Por fim, cabe registrar que o grau de mediação exercido pelo professor-pesquisador foi superior ao previsto pelo produto educacional. Essa interferência mostrou-se necessária para garantir a coerência das correspondências analógicas e o engajamento das turmas, especialmente nos módulos de maior densidade conceitual. Na avaliação do professor-pesquisador, essa mediação adicional não comprometeu a proposta, ao contrário, funcionou como ajuste natural entre o produto planejado e as demandas reais da sala de aula, reforçando a compreensão de que produtos educacionais aplicados em contexto escolar real estão sujeitos a adaptações que fazem parte do próprio processo de pesquisa.

As atividades avaliativas foram aplicadas em dois momentos distintos da sequência, conforme previsto na sequência didática. A Atividade 1, referente ao módulo de

Geradores e Receptores, foi realizada individualmente, permitindo a verificação do desempenho de cada estudante de forma isolada. As demais atividades referentes aos módulos de Capacitores, Corrente Elétrica, Resistência Elétrica, Circuito RC e ECG foram realizadas em grupos com cinco integrantes, em razão de limitações no calendário de aplicação causadas por feriados, eventos escolares e outros fatores institucionais que reduziram o número de aulas disponíveis ao longo do período. Essa adaptação foi adotada como estratégia para viabilizar a aplicação de todos os módulos dentro do tempo restante, preservando a integridade conceitual da sequência.

A aplicação encerrou-se com a realização do pós-teste aplicado via Google Forms. Ao concluir o teste, os estudantes receberam os resultados comparativos do pré-teste e do pós-teste, podendo verificar diretamente o avanço obtido ao longo da sequência. Esse momento teve valor motivacional expressivo, pois permitiu que os próprios estudantes reconhecessem concretamente o que aprenderam, o que está alinhado ao princípio de que a avaliação, nesta sequência, é parte integrante do processo de aprendizagem e não apenas um instrumento de mensuração final.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos ao longo da aplicação do produto educacional, organizados em quatro seções complementares, análise do pré-teste, análise do pós-teste e comparação entre os momentos, análise das atividades formativas. A unidade de análise é a turma Enfermagem (N = 35) e Redes de Computadores (N = 39), e os resultados são apresentados em termos de desempenho médio coletivo e distribuição por questão, permitindo a comparação entre os dois grupos e a identificação de tendências produzidas pela intervenção.

6.1 Análise do Pré-teste

O pré-teste foi aplicado antes do início da sequência didática, com o objetivo de diagnosticar o perfil de conhecimentos prévios dos estudantes e identificar os subsunçores disponíveis para ancoragem das analogias propostas ao longo dos módulos. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 4 – Desempenho no pré-teste por turma.

	Enfermagem	Redes
N	35	39
Média (0 – 10)	5,74	6,00
Desvio padrão	1,62	1,91
Menor nota	3	3
Maior nota	9	10

Fonte: Próprio autor

As duas turmas iniciaram a sequência com desempenho médio próximo, 5,74 em Enfermagem e 5,97 em Redes de Computadores, sem diferença expressiva entre os grupos no que diz respeito ao conhecimento prévio de eletricidade. Esse resultado era esperado, uma vez que ambas as turmas cursaram os mesmos componentes curriculares de Física ao longo do Ensino Médio e a proposta não pressupõe formação técnica prévia em eletricidade. A proximidade dos valores iniciais favorece a comparação posterior, pois indica que os grupos partiram de bases conceituais equivalentes.

A distribuição dos escores individuais revela, contudo, uma heterogeneidade interna relevante em ambas as turmas. Em Enfermagem, os escores variaram de 3 a 9, com

concentração entre 6 e 7 pontos, faixa que reúne 45,8% dos estudantes. Em Redes de Computadores, a variação foi igualmente ampla (3 a 10), com distribuição mais espalhada, o que se reflete no desvio padrão ligeiramente maior (1,91 contra 1,62).

Já a análise por questão, permite identificar o perfil específico dos conhecimentos prévios e dos subsunçores disponíveis, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Percentual de acertos por questão no pré-teste.

Questão	Conceito avaliado	ENF (%)	RED (%)
1	Força eletromotriz (conceitual)	77,1	97,0
2	Nó SA como fonte de FEM (analogia)	25,7	33,8
3	Corrente elétrica e fluxo iônico (analogia)	71,4	87,6
4	Fibras de Purkinje e $R = \rho L/A$ (geometria)	40,0	51,3
5	Cálculo de capacitância $C = Q/V$ (numérica)	71,4	74,3
6	Nó AV como capacitor (analogia)	54,3	59,0
7	ECG como gráfico $V \times t$ (analogia/síntese)	91,4	47,4
8	Cálculo de energia $E = \frac{1}{2}CV^2$ (numérica)	31,4	48,7
9	Cálculo de frequência cardíaca pelo ECG	77,1	59,4
10	Epistemologia limites do modelo (analógico)	34,3	38,5

Fonte: Próprio autor

Três padrões distintos emergem da análise por questão e merecem atenção específica. O primeiro padrão é o de subsunçores conceituais consolidados, verificado nas questões Q1 e Q3, com percentuais de acerto superiores a 70% nas duas turmas. A questão Q1, que pergunta o que representa a indicação de 1,5 V em uma pilha, foi acertada por 77,1% dos estudantes de Enfermagem e 97,0% dos de Redes, indicando que o conceito de força eletromotriz como "capacidade de mover cargas" estava disponível como subsunçor antes da intervenção. A questão Q3, que identifica o fluxo iônico como análogo da corrente elétrica, também apresentou alto percentual de acertos (71,4% e 87,6%), sugerindo que os estudantes já associavam intuitivamente o movimento de partículas carregadas ao conceito de corrente. Esses resultados indicam que a sequência didática encontrou terreno conceitual propício para a ancoragem das analogias nos módulos iniciais, condição favorável à aprendizagem significativa, conforme Ausubel (2003), para quem a existência de subsunçores relevantes é o fator que mais determina a eficácia do ensino.

O segundo padrão é o de baixo domínio das analogias biológicas, particularmente evidente na questão Q2, que relaciona o nó SA a uma fonte de força eletromotriz, com acerto de apenas 25,7% em Enfermagem e 30,8% em Redes. Esse resultado demonstra que, mesmo os estudantes de Enfermagem, que já haviam estudado o funcionamento cardíaco em disciplinas técnicas, não estabeleciam a correspondência entre a autoexcitabilidade do nó SA e o comportamento de uma fonte geradora de tensão. A questão Q6, que associa o nó AV a um capacitor, apresentou resultados intermediários (54,3% e 59,0%), indicando que alguma intuição sobre o comportamento temporizador do nó AV estava presente, ainda que sem respaldo conceitual físico. Esses achados confirmam a pertinência da proposta, os estudantes dispunham de conhecimento biológico fragmentado, sem a estrutura conceitual elétrica necessária para formalizar as correspondências, precisamente o que a sequência se propõe a construir, em consonância com o modelo TWA de Glynn (1991), que orienta a construção explícita e mediada das analogias a partir do análogo familiar.

O terceiro padrão é o de dificuldade com questões numéricas envolvendo subunidades, evidenciado nas questões Q8 (cálculo de energia com $C = 40 \mu F$ e $V = 2.500 V$) e, em menor grau, Q4. A questão Q8 apresentou os menores percentuais de acerto do instrumento, 31,4% em Enfermagem e 48,7% em Redes. Esse resultado revela uma dificuldade anterior à intervenção que não é de natureza conceitual, os estudantes têm alguma noção que capacitores armazenam energia, mas de natureza operacional, a conversão de subunidades (μF para F , kV para V) e o uso adequado da notação científica constituem obstáculos que precedem qualquer operação matemática. Esse perfil inicial é relevante para a interpretação dos resultados do pós-teste, nos quais essas mesmas questões apresentarão comportamento distinto das demais.

Um resultado que merece comentário específico é o alto percentual de acertos na questão Q7, que identifica o ECG como um gráfico de tensão em função do tempo, por parte dos alunos de Enfermagem, que ainda no pré-teste o índice de acerto foi de 91,4%. Entretanto em Redes apenas 47,4%, o que era esperado, uma vez que, os alunos não tiveram contato com esse instrumento anteriormente. Alternativamente, os estudantes de Enfermagem podem ter reconhecido o ECG como um registro gráfico a partir de sua familiaridade com o exame, sem, contudo, compreender sua natureza física como gráfico $V \times t$, distinção que o módulo 6 do produto busca construir de forma explícita.

Por fim, a questão Q10, sobre os limites epistemológicos do modelo analógico, apresentou percentuais de acerto de 34,3% (Enfermagem) e 38,5% (Redes), revelando que a compreensão da natureza dos modelos científicos e da distinção entre similaridade estrutural e

identidade literal era escassa em ambas as turmas antes da intervenção. Esse dado é esperado, uma vez que questões de natureza epistemológica raramente são abordadas no Ensino Médio regular. Ele reforça a pertinência de incluir, em cada módulo do produto, uma seção dedicada às limitações das analogias propostas, elemento que, conforme o modelo TWA, é indispensável para evitar que o estudante tome o análogo pelo análogo, confundindo a representação com o fenômeno representado (Glynn, 1991; Duit, 1991).

Em síntese, o pré-teste revela que os estudantes das duas turmas iniciaram a sequência com subsunçores conceituais disponíveis para os conteúdos de eletricidade básica, mas sem as correspondências analógicas que a proposta busca construir e com dificuldades operacionais matemáticas que precedem a intervenção. Esse perfil inicial orienta a leitura dos resultados do pós-teste, apresentados na seção seguinte.

6.2 Análise do Pós-teste e Comparação Pré/Pós

O pós-teste foi aplicado ao final da sequência didática, utilizando o mesmo instrumento do pré-teste. A Tabela 6 apresenta a comparação entre os dois momentos para cada turma.

Tabela 6 - Comparação entre pré-teste e pós-teste por turma.

	ENF (pré)	ENF (pós)	Variação	RED (pré)	RED (pós)	Variação
N	35	35	----	39	39	----
Média	5,74	7,57	+1,83	6,00	7,74	+1,74
Desvio padrão	1,62	1,94	+0,32	1,91	1,63	+0,28
Menor nota	3	4	+1	3	5	+2
Maior nota	9	10	+1	10	10	----

Fonte: Próprio autor.

Ambas as turmas apresentaram ganho expressivo de desempenho após a intervenção. A turma de Enfermagem evoluiu de uma média de 5,74 para 7,57 pontos, enquanto a turma de Redes de Computadores evoluiu de 6,00 para 7,74 pontos. A proximidade entre os ganhos das duas turmas é um dos resultados mais relevantes do estudo, apesar dos perfis distintos de conhecimento biológico prévio, a sequência didática produziu efeito equivalente nos dois grupos, indicando que a abordagem por analogias estruturadas não

é dependente de formação técnica prévia na área da saúde para produzir aprendizagem conceitual em eletricidade.

Do ponto de vista da distribuição dos escores, a mudança de perfil entre pré e pós-teste é igualmente expressiva. Em Enfermagem, nenhum estudante havia atingido nota 10 no pré-teste, escore máximo registrado foi 9 e apenas 5,7% obtiveram nota acima de 7. No pós-teste, 31,4% da turma atingiu nota 10 e 45,7% obtiveram nota 7 ou acima. Em Redes de Computadores, a distribuição deslocou-se de uma concentração no intervalo de 5 a 7 pontos para uma concentração em 8 e 9, com 38,5% dos estudantes atingindo pelo menos 9 pontos e 12,8% alcançando nota máxima. Em ambas as turmas, o escore mínimo também aumentou, de 3 para 4 em Enfermagem e de 3 para 5 em Redes, indicando que mesmo os estudantes com menor desempenho inicial apresentaram ganho após a intervenção.

Tabela 7 - Comparação de acertos por questão entre pré-teste e pós-teste.

Questão	ENF (pré)	ENF (pós)	Δ ENF	RED (pré)	RED (pós)	Δ RED
1	77,1%	94,3%	17,20%	97,0%	100,0%	3,00%
2	25,7%	100,0%	74,30%	33,8%	92,3%	58,50%
3	71,4%	82,9%	11,50%	87,6%	100,0%	12,40%
4	40,0%	68,6%	28,60%	51,3%	76,9%	25,60%
5	71,4%	31,4%	-40,00%	74,3%	74,3%	0,00%
6	54,3%	82,9%	28,60%	59,0%	92,3%	33,30%
7	91,4%	100,0%	8,60%	47,4%	69,2%	21,80%
8	31,4%	31,4%	0,00%	48,7%	51,3%	2,60%
9	77,1%	82,9%	5,80%	59,4%	82,1%	22,70%
10	34,3%	82,9%	48,60%	38,5%	59,0%	20,50%

Fonte: Próprio autor.

O maior avanço registrado em todo o instrumento foi na questão Q2 que identifica o nó sinoatrial como análogo de uma fonte de força eletromotriz, com ganho de +74,3 pontos percentuais em Enfermagem e +58,5 em Redes. Esse resultado é notável porque o pré-teste havia revelado que apenas 25,7% e 30,8% dos estudantes, respectivamente, estabeleciam essa correspondência antes da intervenção. Após a sequência, 100% da turma de Enfermagem e 92,3% de Redes acertaram a questão. O salto é o maior de todo o instrumento e constitui evidência direta de que a sequência foi eficaz precisamente no ponto em que o déficit inicial

era maior, ou seja, na construção da correspondência entre a geração autônoma do impulso cardíaco e o comportamento de uma fonte geradora de tensão. Esse resultado está alinhado com o princípio da aprendizagem significativa de Ausubel (2003), segundo o qual o material potencialmente significativo se ancora em subsunçores existentes e os reorganiza, ampliando sua estrutura cognitiva. A analogia do nó SA, ao conectar um fenômeno biologicamente familiar, o marcapasso cardíaco, a um conceito físico que os estudantes já dominavam, a força eletromotriz, criou as condições para essa reorganização.

A questão Q6, sobre o nó AV como capacitor, também registrou ganho expressivo, +28,6% em Enfermagem (de 54,3% para 82,9%) e +33,3% em Redes (de 59,0% para 92,3%). Combinada ao ganho de Q2, esse resultado indica que as duas analogias centrais da sequência, nó SA como fonte de FEM e nó AV como capacitor RC, foram as de maior impacto pedagógico, o que é coerente com o fato de serem as analogias estruturalmente mais ricas do produto, cada uma conecta um conceito físico formal a uma função fisiológica específica e mensurável, com correspondência matemática demonstrável.

O resultado da questão Q10, epistemologia e limites do modelo analógico, merece destaque especial. Essa questão, que exigia do estudante reconhecer que a afirmação "o coração é um circuito elétrico" constitui um equívoco conceitual por confundir similaridade estrutural com identidade literal, partiu de um dos menores percentuais de acerto no pré-teste, 34,3% em Enfermagem e 38,5% em Redes. No pós-teste, atingiu 82,9% em Enfermagem e 59,0% em Redes, ganho de +48,6% e +20,5%, respectivamente. Esse avanço indica que a discussão sistemática dos limites das analogias ao longo de cada módulo produziu impacto real na capacidade dos estudantes de avaliar criticamente o alcance dos modelos científicos. Pois, trata-se de um dos resultados qualitativamente mais relevantes da pesquisa, pois o desenvolvimento do pensamento crítico sobre modelos é um dos objetivos centrais do letramento científico preconizado pela BNCC (Brasil, 2018) e pela tradição de pesquisa em ensino de ciências (Martins, 2015; Duit, 1991). A diferença entre as turmas nessa questão, 82,9% contra 59,0%, sugere que a turma de Enfermagem, ao trazer conhecimento biológico prévio mais consolidado, estava em melhor posição para avaliar onde a analogia falha, pois conhecia com mais profundidade o sistema que estava sendo modelado.

As questões Q1, Q3, Q4, Q6 e Q9 apresentaram ganhos entre +5,8% e +33,3%, configurando um padrão de consolidação conceitual progressiva. A questão Q4, que aplica a relação $R = \rho L/A$ para explicar a alta velocidade de condução das fibras de Purkinje a partir de seu maior diâmetro, registrou ganho de +28,6% em Enfermagem e +25,6% em Redes, partindo de percentuais iniciais de 40,0% e 51,3%. Esse avanço indica que a abordagem

geométrica da resistência elétrica, aplicada a uma estrutura biológica concreta, favoreceu a compreensão da relação entre forma e função, exatamente o tipo de articulação que a sequência busca promover entre os conceitos de eletricidade e a morfologia do sistema de condução cardíaca.

A questão Q9, cálculo da frequência cardíaca a partir do intervalo RR no ECG, apresentou comportamento assimétrico entre as turmas, ganho modesto em Enfermagem (+5,8%) mas expressivo em Redes (+25,7%). Esse padrão é explicado pelo perfil inicial distinto, a turma de Enfermagem já acertava 77,1% dessa questão antes da intervenção, indicando familiaridade prévia com a leitura do ECG adquirida na disciplina técnica de Preparação para Exames. Para essa turma, a intervenção consolidou um conhecimento já existente. Para a turma de Redes, que partiu de 56,4%, o módulo 6 do produto introduziu pela primeira vez a leitura quantitativa do traçado, produzindo um ganho mais significativo.

As questões Q5 e Q8 constituem os achados mais complexos do instrumento e exigem análise cuidadosa. A questão Q5, cálculo de capacitância com dados em subunidades (6 mC e 12 V), registrou queda de -40,0% em Enfermagem (de 71,4% para 31,4%) e estagnação em Redes (51,3% em ambos os momentos). A questão Q8, cálculo de energia com $C = 40 \mu\text{F}$ e $V = 2.500 \text{ V}$, permaneceu praticamente inalterada em ambas as turmas, 31,4% em Enfermagem e variação de apenas +2,6% em Redes.

A queda em Q5 na turma de Enfermagem merece atenção especial. O alto percentual de acerto no pré-teste (71,4%) não refletia necessariamente domínio conceitual sólido, pode ter sido influenciado por acerto casual ou por estratégias de eliminação de alternativas que funcionaram no pré, mas não no pós, em razão de mudanças na forma de abordar a questão. A queda observada no pós-teste é consistente com o relato do professor pesquisador sobre as dificuldades operacionais com subunidades, os estudantes que no pré-teste marcaram a alternativa correta por estratégias diversas do cálculo formal podem ter, no pós-teste, tentado realizar o cálculo e errado na conversão das unidades, o que resultaria em queda no percentual de acertos, não por regressão conceitual, mas por mudança no procedimento adotado.

A estagnação em Q8 nas duas turmas confirma que as questões de cálculo com subunidades (μF , mV, kV) representam uma barreira independente do domínio conceitual. Como discutido na descrição da aplicação, a dificuldade não estava na compreensão do que é energia armazenada em um capacitor, conceito que os estudantes demonstraram ter aprendido em outras questões, mas na operação matemática com grandezas em diferentes ordens de magnitude. A deficiência na conversão de subunidades e no uso da notação científica constitui

um obstáculo prévio à intervenção que a sequência didática, por sua natureza conceitual e analógica, não se propõe a sanar e não sanou. Esse resultado aponta para uma lacuna de articulação entre o ensino de física e o ensino de matemática que merece atenção em propostas futuras.

Um resultado que também merece comentário é o crescimento de 21,8% na questão Q7 para a turma de Redes de Computadores. Como discutido na análise do pré-teste, o baixo percentual de acerto inicial refletia a falta de contato prévio dos estudantes com o instrumento. No pós-teste, após o estudo do ECG como gráfico $V \times t$ e a compreensão de sua estrutura formal, parte dos estudantes passou a interpretar a questão com maior rigor, reconhecendo nuances nas alternativas que antes passavam despercebidas, o que resultou em maior percentual de acertos. O crescimento de 21,8% indica que o produto cumpriu com o planejado nesse aspecto, entretanto, o resultado ainda carece de aprimoramentos, uma vez que aproximadamente 30% dos estudantes não absorveram o conceito da forma esperada.

Em síntese, a comparação pré/pós-teste evidencia que a sequência didática produziu ganho de aprendizagem expressivo e consistente nas duas turmas, com maior impacto nas questões que avaliam a construção das analogias biológicas, precisamente o foco central da proposta. Os resultados confirmam que a abordagem por analogias estruturadas segundo o modelo TWA, quando mediada de forma intencional e acompanhada de discussão sistemática dos limites dos modelos, é capaz de promover aprendizagem conceitual significativa em eletricidade para estudantes do Ensino Médio técnico, independentemente do perfil de formação prévia da turma.

6.3 Análise das atividades formativas

As atividades formativas foram aplicadas ao longo da sequência didática com o objetivo de acompanhar, a construção das correspondências analógicas entre os circuitos elétricos e o sistema de condução elétrica cardíaca. Os resultados devem ser interpretados com a ressalva de que, à exceção da Atividade 1, realizada individualmente, todas as demais foram realizadas em grupos com cinco integrantes, o que favorece respostas de nível mais elevado pela colaboração entre estudantes com diferentes perfis de compreensão, sem que isso reflita necessariamente o domínio individual de cada um.

Tabela 8 – Distribuição por nível da rubrica analítica nas atividades formativas.

Atividade	Módulo	Nível	ENF	%	RED	%
1 (Individual)	Geradores e Receptores	1 (Superficial)	12	34,3%	22	56,4%
		2 (Relacional)	18	51,4%	12	30,8%
		3 (Adequado)	5	14,3%	15	12,8%
2 (Grupos)	Capacitores	1 (Superficial)	1	16,7%	3	42,9%
		2 (Relacional)	3	50,0%	4	57,1%
		3 (Adequado)	2	33,3%	0	0,0%
3 (Grupos)	Corrente Elétrica	1 (Superficial)	1	16,7%	4	57,1%
		2 (Relacional)	4	66,7%	2	28,6%
		3 (Adequado)	1	16,7%	1	14,3%
4 (Grupos)	Resistência Elétrica	1 (Superficial)	2	33,3%	3	42,9%
		2 (Relacional)	3	50,0%	4	57,1%
		3 (Adequado)	1	16,7%	0	0,0%
5 (Grupos)	Circuito RC	1 (Superficial)	4	66,7%	4	57,1%
		2 (Relacional)	2	33,3%	3	42,9%
		3 (Adequado)	0	0,0%	0	0,0%
6	ECG	1	0	0,0%	4	57,1%

(Grupos)	(Síntese)	(Superficial)			
		2			
		Relacional	2	33,3%	2
		3			
		(Adequado)	4	66,7%	1
					14,3%

Fonte: Próprio autor.

Tabela 9 – Síntese do nível analógico predominante por atividade.

Atividade	Módulo	ENFERMAGEM	REDES
1	Geradores e Receptores	Relacional	Superficial
2	Capacitores	Relacional	Relacional
3	Corrente Elétrica	Relacional	Superficial
4	Resistência Elétrica	Relacional	Relacional
5	Circuito RC	Superficial	Superficial
6	ECG (Síntese)	Adequado	Superficial

Fonte: Próprio autor.

A Atividade 1, único instrumento aplicado individualmente, constitui o ponto de referência mais confiável para a avaliação do domínio analógico individual dos estudantes, uma vez que não foi influenciada pela colaboração em grupo. Os resultados revelam um padrão assimétrico entre as duas turmas, em Enfermagem, o nível predominante foi o relacional (51,4%), com 14,3% dos estudantes atingindo o nível adequado, em Redes de Computadores, o nível predominante foi o superficial (56,4%), com apenas 30,8% no nível relacional.

Esse resultado inicial é coerente com o perfil identificado no pré-teste e com a descrição da aplicação, os estudantes de Enfermagem, por disporem de subsunções biológicas mais consolidados sobre o funcionamento cardíaco, encontravam-se em melhor posição para estabelecer as correspondências analógicas já no primeiro módulo. A turma de Redes de Computadores, sem esse conhecimento prévio, concentrou-se em identificar a correspondência sem conseguir ainda justificá-la funcionalmente, o que é esperado para um primeiro contato com a proposta, conforme as orientações do modelo TWA, que prevê progressão gradual na sofisticação das analogias ao longo da sequência (Glynn, 1991).

As três atividades seguintes, realizadas em grupo, apresentaram no conjunto padrão mais estável da sequência. Em Enfermagem, o nível relacional foi predominante nas três atividades, com percentuais entre 50,0% e 66,7%, e presença consistente do nível adequado, ainda que minoritária, nas atividades 2 e 3. Em Redes de Computadores, o padrão foi mais variável, nível relacional predominante nas atividades 2 e 4, com retorno ao nível superficial na atividade 3.

A variação observada em Redes na Atividade 3, corrente elétrica e fluxo iônico, merece atenção. Esse módulo exige que o estudante conecte o conceito físico de corrente como fluxo ordenado de cargas ao movimento coletivo de íons nos canais da membrana celular, o que pressupõe alguma familiaridade com o conceito de íon e de gradiente eletroquímico. A ausência desse subsunçor biológico em parte dos grupos de Redes, que a Atividade 1 já havia indicado, resultou em respostas mais superficiais nesse módulo específico, mesmo após a intervenção de contextualização biológica realizada pelo professor pesquisador.

A Atividade 4, sobre resistência elétrica e as fibras de Purkinje, apresentou recuperação do nível relacional em Redes (57,1%), sugerindo que a analogia geométrica, maior diâmetro implica menor resistência e maior velocidade de condução, foi mais acessível do que a analogia iônica do módulo anterior. Esse resultado é consistente com o relato da aplicação, no qual a discussão sobre as fibras de Purkinje e a associação em paralelo gerou engajamento expressivo nas duas turmas, incluindo discussões espontâneas sobre bloqueio de ramo e necessidade de marcapasso.

Posteriormente, a Atividade 5 registrou o pior desempenho analógico de toda a sequência, nível superficial predominante nas duas turmas (66,7% em Enfermagem e 57,1% em Redes) e ausência completa de respostas no nível adequado. Nenhum grupo, em nenhuma das turmas, conseguiu construir a correspondência entre a constante de tempo $\tau = RC$ e o atraso do nó AV de forma que incluísse o reconhecimento dos limites da analogia.

Esse resultado tem explicação direta no contexto da aplicação. O módulo de Circuito RC foi o mais atingido pelo hiato no calendário escolar, o intervalo extenso entre a aula de capacitores e a introdução do circuito RC resultou em esvanecimento parcial dos subsunçores construídos anteriormente, exigindo retomada dos conceitos de capacitância antes de avançar para a dinâmica temporal do carregamento. Essa retomada, somada à maior densidade matemática do módulo, a correspondência $\tau = RC \leftrightarrow$ atraso do nó AV exige que o estudante relacione uma solução exponencial a um fenômeno fisiológico, elevando a carga

cognitiva da atividade além do que a maioria dos grupos conseguiu operacionalizar nas respostas escritas.

Do ponto de vista da aprendizagem significativa, esse resultado indica que os subsunçores para essa analogia específica ainda não estavam suficientemente consolidados no momento da atividade, o que é coerente com a teoria de Ausubel (2003), segundo a qual a aprendizagem significativa exige que o material novo encontre estrutura cognitiva prévia disponível e estável para ancoragem. A instabilidade dos subsunçores de capacitância, causada pelo hiato temporal, comprometeu essa ancoragem no módulo mais exigente da sequência.

Por fim, a Atividade 6 produziu o resultado mais expressivo e assimétrico de toda a sequência. Em Enfermagem, 66,7% dos grupos atingiram o nível adequado, o maior percentual desse nível em qualquer atividade de qualquer turma ao longo de toda a sequência. Em Redes de Computadores, o nível superficial foi predominante (57,1%), com apenas 14,3% no nível adequado.

O comportamento da turma de Enfermagem na Atividade 6 é o resultado qualitativo mais relevante das atividades formativas. A síntese pelo ECG, momento em que o estudante é solicitado a identificar no traçado os eventos correspondentes a cada estrutura do sistema de condução e a reconhecer os limites dessa correspondência, foi respondida com sofisticação crescente pelos grupos que haviam acumulado os subsunçores biológicos ao longo de toda a sequência. Esses grupos não apenas estabeleceram as correspondências funcionais, mas apontaram espontaneamente situações em que a analogia falha, como a não-linearidade dos canais iônicos e a natureza distribuída da membrana, que o modelo RC passivo não descreve, demonstrando a postura crítica em relação aos modelos científicos que o produto buscava desenvolver.

Em Redes de Computadores, a dificuldade em avançar além do nível superficial na atividade de síntese é interpretada como consequência acumulada da menor disponibilidade de subsunçores biológicos ao longo de toda a sequência. Sem o conhecimento prévio sobre o ECG que a turma de Enfermagem possuía, e com os subsunçores do módulo 5 parcialmente comprometidos pelo hiato no calendário, os grupos dessa turma não dispunham dos elementos necessários para construir a síntese no nível de sofisticação exigido pelo nível adequado da rubrica. Esse achado reforça a importância do Módulo de Apoio do produto, dedicado às bases biológicas do sistema de condução, sugerindo que seu aprofundamento ou revisão ao longo da sequência poderia beneficiar turmas sem formação técnica na área da saúde.

As questões numéricas presentes nas atividades formativas confirmaram o padrão já identificado nos dados do pré-teste. A dificuldade dos estudantes não residia na compreensão dos conceitos físicos envolvido, mas nas operações matemáticas com grandezas físicas expressas em subunidades (μF , mC , kV) e na conversão destas para notação científica adequada, sendo necessárias certas intervenções realizadas pelo professor. Já prevendo essa rotina, nas atividades consta as expressões trabalhadas em cada aula, além de expor no quadro as relações das unidades e algumas resoluções apresentadas durante a aula.

Os grupos que demonstravam nível relacional nas questões discursivas, indicando compreensão conceitual da analogia, apresentavam dificuldade na aplicação quantitativa das mesmas expressões, especialmente nas questões referentes a capacitores e energia armazenada durante os testes aplicados sem a colaboração coletiva.

Essa dissociação entre compreensão conceitual e operação matemática é consistente com o perfil esperado de estudantes do Ensino Médio e aponta para uma lacuna de que extrapola o escopo da presente proposta, mas merece atenção em futuras versões do produto.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve como objetivo desenvolver uma sequência didática fundamentada no uso estruturado de analogias entre circuitos elétricos e o sistema de condução elétrica cardíaca, com vistas à promoção da aprendizagem conceitual e significativa de eletricidade no Ensino Médio técnico.

O primeiro objetivo, associar as estruturas do sistema de condução elétrica cardíaca aos elementos de um circuito elétrico equivalente, foi atendido de forma progressiva ao longo da sequência. As atividades formativas revelaram nível relacional predominante nas duas turmas nas quatro primeiras atividades, indicando que os estudantes foram capazes de identificar e justificar as correspondências funcionais entre nó SA e fonte de FEM, membrana celular e capacitor, nó AV e circuito RC, e fibras de Purkinje e rede de condutores em paralelo. Os dados do pós-teste confirmam esse resultado, com ganhos expressivos nas questões analógicas, em especial Q2 (+74,3% em Enfermagem e +58,5% em Redes) e Q6 (+28,6% e +33,3%, respectivamente).

O segundo objetivo, analisar o eletrocardiograma como expressão gráfica do circuito elétrico cardíaco foi alcançado com destaque para a turma de Enfermagem, que na Atividade 6 apresentou nível adequado predominante (66,7%), demonstrando capacidade de integrar os conceitos estudados e identificar no traçado os eventos correspondentes a cada estrutura do sistema de condução. Em Redes de Computadores, o resultado foi mais modesto, com nível superficial predominante na mesma atividade, reflexo da menor disponibilidade de subsunçores biológicos ao longo da sequência.

O terceiro objetivo, discutir os limites das analogias e desenvolver o pensamento científico crítico, foi o que apresentou maior assimetria entre as turmas. A questão Q10, que avalia a compreensão epistemológica dos modelos analógicos, registrou ganho de +48,6 pp em Enfermagem e +20,5 pp em Redes. Esse resultado indica que a discussão sistemática dos limites em cada módulo produziu impacto real, mas ainda desigual, sugerindo que turmas com maior conhecimento prévio do domínio biológico estão em melhor posição para reconhecer onde a analogia falha.

O quarto objetivo, verificar o ganho de aprendizagem conceitual, foi plenamente atendido. A turma de Enfermagem evoluiu de 57,4% para 75,7% de acertos (+31,8%) e a de Redes de Computadores de 60,0% para 77,4% (+29,1%). A equivalência dos ganhos entre turmas com perfis distintos de conhecimento prévio constitui o resultado mais expressivo da

pesquisa, a abordagem por analogias estruturadas produziu aprendizagem conceitual em eletricidade independentemente da formação técnica prévia dos estudantes.

Dois limites merecem registro. O primeiro refere-se à dificuldade persistente com questões numéricas que envolvem subunidades e notação científica, barreira de natureza matemática que a sequência, por seu caráter conceitual e analógico, não se propõe a sanar e de fato não sanou. O segundo, diz respeito às interrupções ocorridas no calendário letivo, comprometendo a sequência de aplicação das atividades didáticas, o hiato entre os módulos de Capacitores e Circuito RC comprometeu a ancoragem dos subsunçores no módulo mais exigente da proposta, resultando na queda de desempenho analógico observada na Atividade 5.

Como perspectiva de aprimoramento, sugere-se a inclusão de estratégias de revisão rápida entre os módulos, a aplicação do módulo de apoio biológico para turmas sem formação técnica na área da saúde e a incorporação de questões numéricas contextualizadas que articulem operação matemática e significado físico-biológico

REFERÊNCIAS

ATKINS, Peter; JONES, Loretta. **Princípios de Química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

AUSUBEL, David Paul. **Aquisição e retenção de conhecimentos: uma perspectiva cognitiva**. Lisboa: Plátano, 2003.

BARDIN, Laurence. **Análise de conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2016.

BOGDAN, Robert C.; BIKLEN, Sari K. **Investigação qualitativa em educação: uma introdução à teoria e aos métodos**. Porto: Porto Editora, 1994.

BORON, Walter F.; BOULPAEP, Emile L. **Medical Physiology**. 3. ed. Philadelphia: Elsevier, 2017.

BRASIL. **Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996**. Estabelece as diretrizes e bases da educação nacional. Brasília: Presidência da República, 1996. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19394.htm. Acesso em: 20 mar. 2026.

BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília: MEC, 2018. Disponível em: <http://basenacionalcomum.mec.gov.br>. Acesso em: 20 mar. 2026.

BRASIL. Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. **Matriz de Referência do Enem**. Brasília: INEP, 2009. Disponível em: https://download.inep.gov.br/download/enem/matriz_referencia.pdf. Acesso em: 20 de mar. 2026.

BUNGE, Mario. **Treatise on Basic Philosophy**. Dordrecht: Reidel, 1974.

CÁSSIA, Norma Lúcia Séis. **A interdisciplinaridade no Ensino de Ciências usando a dessalinização de água como elemento mediador**. 2022. 136 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) — Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, 2022.

CEARÁ. **Lei Estadual nº 15.572, de 7 de outubro de 2014**. Dispõe sobre a educação profissional no âmbito do Estado do Ceará. Fortaleza: Assembleia Legislativa do Estado do Ceará, 2014.

CRESWELL, John W. **Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2014.

DUIT, Reinders. On the role of analogies and metaphors in learning science. **Science Education**, Hoboken, v. 75, n. 6, p. 649–672, 1991.

FAZENDA, Ivani Catarina Arantes. **Interdisciplinaridade: história, teoria e pesquisa**. 18. ed. Campinas: Papirus, 2011.

GENTNER, Dedre. Structure-mapping: a theoretical framework for analogy. **Cognitive Science**, Hoboken, v. 7, n. 2, p. 155–170, 1983.

GIERE, Ronald N. **Explaining Science: a cognitive approach**. Chicago: University of Chicago Press, 1988.

GILBERT, John K.; BOULTER, Caroline J.; ELMER, Rosalind. Positioning models in science education. In: GILBERT, John K.; BOULTER, Caroline J. (ed.). **Developing Models in Science Education**. Dordrecht: Kluwer, 2000. p. 1–17.

GLYNN, Shawn M. Explaining science concepts: a teaching-with-analogies model. In: GLYNN, Shawn M. et al. (ed.). **The Psychology of Learning Science**. Hillsdale: Lawrence Erlbaum, 1991. p. 219–240.

GRIFFITHS, David J. **Introduction to Electrodynamics**. 4. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

GUYTON, Arthur C.; HALL, John E. **Tratado de Fisiologia Médica**. 13. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física: eletromagnetismo**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. v. 3.

HESTENES, David. Toward a modeling theory of physics instruction. **American Journal of Physics**, College Park, v. 55, n. 5, p. 440–454, 1987.

HODGKIN, Alan L.; HUXLEY, Andrew F. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. **The Journal of Physiology**, Londres, v. 117, n. 4, p. 500–544, 1952.

IBGE. **Censo Demográfico 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 20 abr. 2026.

ICE. Instituto de Corresponsabilidade pela Educação. **Tecnologia de Gestão Educacional**. Recife: ICE, 2015.

JAPIASSU, Hilton. **Interdisciplinaridade e patologia do saber**. Rio de Janeiro: Imago, 1976.

JAPIASSU, Hilton. **O sonho transdisciplinar e as razões da filosofia**. Rio de Janeiro: Imago, 2001.

KEENER, James; SNEYD, James. **Mathematical Physiology I: cellular physiology**. 2. ed. New York: Springer, 2009.

MARTINS, André Ferrer P. Natureza da ciência no ensino de ciências: para quê e por quê? **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 32, n. 3, p. 703–737, dez. 2015.

MATOS, Alexandre de. **O ensino da Física através de analogias com variantes do jogo de xadrez: potencializado com Realidade Aumentada**. 2017. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) — Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2017.

MOREIRA, Marco Antonio. **Teorias de aprendizagem**. 2. ed. São Paulo: E.P.U., 2011.

MOREIRA, Marco Antonio. **Aprendizagem significativa em mapas conceituais**. Porto Alegre: UFRGS, 2021. (Textos de Apoio ao Professor de Física, v. 22, n. 6).

MOREIRA, Marco Antonio; MASSONI, Neusa T. **Interfaces entre teorias de aprendizagem e Ensino de Ciências/Física**. Porto Alegre: UFRGS, 2011.

MORIN, Edgar. **Os sete saberes necessários à educação do futuro**. São Paulo: Cortez, 2000.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de Física Básica: eletromagnetismo**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2013. v. 3.

OKUNO, Emiko; CALDAS, Iberê L.; CHOW, Cecil. **Física para Ciências Biológicas e Biomédicas**. São Paulo: Harbra, 1986.

RAMALHO JÚNIOR, Francisco; FERRARO, Nicolau Gilberto; SOARES, Paulo Antônio de Toledo. **Os fundamentos da física: eletricidade, física moderna, análise dimensional**. 12. ed. São Paulo: Moderna, 2020. v. 3.,

HELOU, D.; GUALTER, J. B.; NEWTON, V. B. **Tópicos de Física. 1ª edição**, Vol. 3. São Paulo, Editora Saraiva, 2010

RODRIGUES, Renato. **Interdisciplinaridade no Ensino de Física: uma abordagem por TIC**. 2016. 114 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) — Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2016.

SASSERON, Luísa Helena; CARVALHO, Anna Maria Pessoa de. Alfabetização científica: uma revisão bibliográfica. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 16, n. 1, p. 59–77, 2011.

SECRETARIA DA EDUCAÇÃO DO ESTADO DO CEARÁ. **Escolas de Ensino Médio em Tempo Integral**. Fortaleza: SEDUC, 2024. Disponível em: [URL]. Acesso em: 25 de abr. 2026.

SILVERTHORN, Dee Unglaub. **Fisiologia Humana: uma abordagem integrada**. 7. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

SOUZA, Mario de. **A multidisciplinaridade sistêmica como metodologia de ensino: tensão superficial e capilaridade no contexto da Biologia**. 2016. 140 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) — Universidade Federal Rural de Pernambuco, Garanhuns, 2016.

THIOLLENT, Michel. **Metodologia da Pesquisa-Ação**. 18. ed. São Paulo: Cortez, 2011.

TIPLER, Paul A.; MOSCA, Gene. **Física para Cientistas e Engenheiros: eletricidade e magnetismo, óptica**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. v. 2.

VARELA, Leciani Eufrásio Coelho. **Interdisciplinaridade entre Física e Biologia em turmas de 8º ano do Ensino Fundamental: possibilidade para o Ensino de Ciências**. 2016. 113 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) — Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2016.

APÊNDICE A – PRODUTO EDUCACIONAL

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS DE FÍSICA
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
POLO 43**

PRODUTO EDUCACIONAL

**MODELAGEM FÍSICA DA CONDUÇÃO ELÉTRICA CARDÍACA: UMA
SEQUÊNCIA DIDÁTICA INTERDISCIPLINAR PARA O ENSINO DE
ELETRODINÂMICA**

Fortaleza

2026

Apresentação

Este produto educacional foi concebido no âmbito do Mestrado Profissional em Ensino de Física (MNPEF) como uma sequência didática estruturada para auxiliar o professor de Física no ensino de conceitos de eletricidade por meio de analogias com o sistema de condução elétrica cardíaca. Sua proposta central é tornar acessíveis e significativos conceitos como força eletromotriz, resistência elétrica, capacitância e circuito RC, ancorando-os em um fenômeno biológico real, concreto e familiar, o funcionamento elétrico do coração humano.

O material é destinado prioritariamente a estudantes do Ensino Médio, em especial àqueles da 3ª série, etapa em que os conteúdos de eletricidade e circuitos elétricos são tradicionalmente abordados. Sua aplicação pode ser estendida a contextos de pré-vestibular, considerando a ênfase em interpretação conceitual, análise de gráficos e resolução de situações-problema contextualizadas, características amplamente valorizadas em avaliações externas como o ENEM e os principais vestibulares do país.

A utilização do produto não pressupõe uma aplicação linear e rígida. Ele deve ser compreendido como um instrumento flexível, passível de adaptação conforme o ritmo da turma, o tempo disponível e as condições específicas de cada escola. O professor é livre para aprofundar determinados módulos, condensar outros ou utilizar partes do material de forma isolada, conforme seu planejamento. O produto está organizado em três partes complementares.

A Parte 1 apresenta os conteúdos em seis módulos sequenciais, cada um estruturado com objetivos de aprendizagem, situação-problema, desenvolvimento conceitual, analogia biológica com o sistema de condução cardíaca, limitações da analogia, proposta de uso de simuladores computacionais e atividade avaliativa. A progressão dos módulos parte dos conceitos mais intuitivos, como a geração de tensão por uma fonte, e avança gradualmente até a síntese final, com a leitura do eletrocardiograma como expressão gráfica do circuito elétrico cardíaco.

A Parte 2 apresenta a sequência didática estruturada em etapas, descrevendo a ordem cronológica de aplicação dos conteúdos, a quantidade de aulas sugerida e os momentos de avaliação ao longo do processo.

A Parte 3 reúne os instrumentos de avaliação e as atividades desenvolvidas para aplicação ao longo da sequência, incluindo o questionário de avaliação do produto pelos estudantes.

Antes dos capítulos de Física, o produto traz um capítulo de apoio dedicado às bases biológicas do sistema de condução cardíaca sem pressupor conhecimento prévio de Biologia. Esse módulo tem função preparatória, permitindo que o professor compreenda e traduza para seus alunos as estruturas do coração que serão utilizadas como análogos ao longo de toda a sequência.

Como usar este material

O papel do professor

Durante toda a sequência, o professor atua como mediador do processo de aprendizagem, não como especialista em Biologia. Essa distinção é fundamental, a abordagem interdisciplinar proposta aqui não exige que o professor domine a fisiologia cardíaca, mas que saiba conduzir a construção coletiva das correspondências entre os dois sistemas. Na prática, o professor deve buscar:

- Apresentar a estrutura biológica como contexto e motivação
- Conduzir a construção da analogia com perguntas abertas, sem antecipar a resposta, deixar que os alunos identifiquem a correspondência antes de confirmar.
- Aprofundar o conceito físico com rigor matemático, usando as ferramentas e equações.
- Discutir os limites da analogia, reforçando que os modelos científicos são aproximações úteis, não verdades absolutas.

Como conduzir as analogias

As analogias neste material seguem a estratégia TWA (Teaching With Analogies, Glynn, 1991), que organiza o uso de analogias em seis etapas explícitas. O professor não deve apenas mencionar a analogia, deve construí-la progressivamente com os alunos, mapear as correspondências em voz alta e, em seguida, apontar onde ela falha.

1. Introdução do conceito-alvo: Apresentar o conceito, por exemplo, capacitores, utilizando equações, simuladores etc.
2. Apresentação do conceito análogo biológico: No caso de capacitores, a estrutura da membrana celular e o nó AV, sem de fato associar um ao outro.
3. Identificação de características relevantes: O nó AV, retarda o impulso elétrico cardíaco, já na estrutura da membrana celular que separa os meios extra (positivo) e intracelular (negativo) por uma camada lipídica. A estrutura do capacitor e o tempo gasto para carregar e descarregar.
4. Mapeamento das similaridades: Tanto o nó AV quanto o capacitor apresentam uma relação temporal e no caso das membranas celulares a estrutura e função de armazenamento de energia.
5. Apontamento dos limites: A membrana não descarrega totalmente, diferente de um capacitor ideal, além de inverter sua polaridade quando o potencial de ação atua e

retorna ao potencial de repouso, ou seja, a membrana apresenta sempre uma ddp mínima.

6. Esboçar a conclusão: Reforçar a compreensão do conceito e resumir a aprendizagem.

Adaptação ao contexto

A sequência didática foi planejada para ser desenvolvida ao longo de 14 aulas de 50 minutos, organizadas progressivamente percorrendo desde a apresentação da proposta e o diagnóstico inicial dos estudantes até a avaliação final e a entrevista qualitativa. Essa estimativa pode variar de acordo com o ritmo da turma, o nível de aprofundamento desejado pelo professor e as condições específicas de cada escola.

A seguir listamos algumas orientações que ajudam o professor a adaptar este material sem comprometer a coerência pedagógica.

- ✓ *Com pouco tempo disponível:* Foco nos capítulos 1, 3 e 4 (*fem*, corrente elétrica e resistores), pois são a base. Utilizando apenas uma aula de encerramento para conectar qualitativamente o circuito RC e o ECG.
- ✓ *Sem acesso a computadores:* Todos os simuladores utilizados aqui podem ser utilizados nos Smartphones dos estudantes. Sendo dispensável a utilização dos computadores e projetores.
- ✓ *Sem acesso a rede de internet:* Utilize de imagens ou monte circuitos reais, com pilhas, resistores, multímetro e outros componentes que tiver a disposição.
- ✓ *Com turma de perfil técnico em saúde:* Explore os conhecimentos prévios dos alunos em fisiologia, eles funcionam como subsunçores valiosos. Pergunte o que já sabem sobre o ECG antes de apresentar a analogia. Isso enriquece a construção coletiva.
- ✓ *Turma com dificuldades em matemática:* Priorize as questões qualitativas e as interpretações gráficas antes das equações. As situações problema de cada capítulo pode ser utilizadas ou adaptadas, buscando uma maior acessibilidade, sem a necessidade de realizar cálculos.

Este material não foi criado para ser utilizado de forma rígida, sem questionamento e considerações. O professor tem total liberdade para adaptar e abordar da forma que melhor motive e extraia dos seus alunos.

Introdução

A Física, como ciência, busca compreender os fenômenos naturais mediante a descrição das forças que regem o comportamento da matéria e da energia. Dentre as quatro interações elementares (nuclear forte, eletromagnética, nuclear fraca e gravitacional, dispostas em ordem decrescente de intensidade), a gravidade costuma ser a mais intuitiva no Ensino Médio devido à sua onipresença cotidiana.

Contudo, o eletromagnetismo sobressai por sua vasta abrangência, sendo o pilar da estrutura atômica, das ligações químicas e de processos biológicos vitais. Tal área atingiu um marco histórico no século XIX com a teoria clássica de Maxwell, que unificou eletricidade, magnetismo e óptica em um único arcabouço. Ao demonstrar que a luz é uma oscilação eletromagnética, tal formulação estabeleceu as bases para o progresso da física moderna e para inovações que transformaram a sociedade, como sistemas de energia, telecomunicações e aparatos médicos, evidenciando a íntima conexão entre os domínios físico e biológico.

A convergência entre os domínios elétrico e biológico possui alicerces históricos que remetem ao final do século XVIII, período em que Luigi Galvani investigou as contrações musculares em membros de rãs excitados por estímulos externos, postulando a existência da “eletricidade animal”. Subsequentemente, Carlo Matteucci comprovou que tecidos vivos geram fluxos de carga mensuráveis, efetuando as primeiras aferições bioelétricas documentadas.

Já no início do século XX, Julius Bernstein formulou a teoria da membrana, introduzindo a noção de potencial a partir da distribuição assimétrica iônica — proposição intrinsecamente vinculada ao termo “íon”, previamente estabelecido por Michael Faraday em suas pesquisas sobre eletrólise. Tais progressos científicos culminaram na invenção do eletrocardiógrafo por Willem Einthoven, possibilitando o registro do eletrocardiograma (ECG), ferramenta indispensável ao diagnóstico clínico cuja relevância foi laureada com o Prêmio Nobel em 1924.

Apesar dessa forte conexão entre conceitos físicos e biológicos, o ensino de ciências da natureza no contexto do Ensino Médio ainda enfrenta desafios significativos. Além da fragmentação entre as áreas, no que se refere a Física, a abordagem ainda ocorre com certo excesso algorítmico, levando os estudantes a priorizarem a memorização de fórmulas e procedimentos em detrimento da compreensão conceitual dos fenômenos, caracterizando o chamado *teaching for testing*.

Adicionalmente, são notadas diversas dificuldades entre os estudantes, como a visualização de processos microscópicos, a confusão entre grandezas, a interpretação inadequada de determinados fenômenos e a dependência excessiva de fórmulas sem compreensão conceitual. Somados à falta de contextualização dos conteúdos, geram um aumento na desmotivação e no desenvolvimento de atitudes negativas em relação à disciplina.

Nesse cenário, a compreensão conceitual assume papel central, uma vez que estrutura o conhecimento científico e permite interpretar os fenômenos físicos de maneira mais profunda. Assim, torna-se necessária a busca por estratégias didáticas que favorecem a construção de significados e a articulação entre diferentes áreas do conhecimento, promovendo um melhor aprendizado e uma linguagem global das ciências, de modo a romper com a fragmentação dessas áreas.

Desta forma, o desafio do professor, está na busca de formas de ensino, nas quais estes conceitos atinjam os estudantes de forma significativa. Entretanto, deve-se admitir que não há um modelo infalível, mas há estratégias que, quando adaptadas às diversas realidades de sala de aula e aos diversos temas trabalhados, podem proporcionar o desenvolvimento de habilidades e competências.

Como prevê a Base Nacional Comum Curricular (BNCC), apoiada pela Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (LDB) e pelos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs), a interdisciplinaridade é um princípio orientador capaz de promover a integração entre áreas que compõem as Ciências da Natureza, sendo essencial para a compreensão de conceitos complexos e para a resolução de problemas do mundo real, superando a visão do conhecimento parcelado. Essa perspectiva é reforçada pelo Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM), cujas matrizes valorizam a resolução de problemas contextualizados e a articulação entre diferentes áreas.

Neste sentido, utilizar analogias e modelos surge como uma estratégia promissora para promover a aprendizagem significativa, ao possibilitar a relação entre novos conhecimentos e estruturas cognitivas previamente existentes. Em outras palavras, o professor se vale do que o aluno já conhece, mesmo que de outra área do conhecimento.

Portanto, esta sequência didática propõe uma abordagem interdisciplinar baseada na eletrofisiologia cardíaca, utilizando analogias e modelos físicos para aproximar conceitos abstratos da eletricidade a realidade biológica dos estudantes. O objetivo de favorecer a aprendizagem significativa, reduzir a distância entre teoria e prática, desenvolver a capacidade de modelagem e promover maior engajamento ao evidenciar a relevância da Física na compreensão da própria vida.

Fundamentação Didática

Interdisciplinaridade no Ensino de Ciências

A interdisciplinaridade, frequentemente compreendida apenas como uma estratégia pedagógica, possui um fundamento epistemológico mais profundo, relacionado à própria organização do conhecimento científico.

Em uma de suas definições, ela se caracteriza pela intensidade das trocas entre especialistas e pelo grau de integração efetiva entre disciplinas em torno de um mesmo objeto de estudo, exigindo uma mudança de atitude que supera a fragmentação do saber em direção a uma visão mais unificada. Essa integração pode ocorrer em diferentes níveis, desde a simples comunicação entre áreas até a articulação de conceitos, metodologias e estruturas teóricas, tendo como horizonte a construção de uma unidade do conhecimento, ainda que se apresente como um ideal problemático (Japiassu, 2001).

Tal discussão está diretamente relacionada ao processo histórico de especialização das ciências, que, embora tenha possibilitado avanços significativos, também contribuiu para a fragmentação do saber. Nesse contexto, a ciência moderna pode ser comparada a um mosaico cujas partes não se articulam plenamente, resultando em uma compreensão parcial da realidade. Essa crítica é ampliada, sob o paradigma do pensamento complexo, no qual a compreensão dos fenômenos exige a articulação entre diferentes níveis de explicação, uma vez que os sistemas naturais não se apresentam de forma isolada, mas interdependente (Morin, 2000; Japiassu, 2001).

Nesse sentido, a interdisciplinaridade não deve ser entendida como mera justaposição de conteúdos, mas como uma integração orientada por um problema ou objeto comum, na qual diferentes áreas do conhecimento contribuem com seus próprios conceitos e métodos para a construção de significados compartilhados. Tal perspectiva favorece a atribuição de sentido aos conteúdos escolares, ampliando suas possibilidades de aplicação e aproximando-os de contextos reais (Fazenda, 2011).

Do ponto de vista da aprendizagem, essa articulação entre diferentes campos do saber contribui para a construção de significados mais estáveis, uma vez que permite relacionar novos conhecimentos a estruturas cognitivas previamente existentes. Essa relação não arbitrária entre o novo e o já conhecido caracteriza a aprendizagem significativa, sendo especialmente favorecida em abordagens interdisciplinares que contextualizam os conceitos em fenômenos concretos (Ausubel, 2003).

Modelos Científicos e Modelagem no Ensino de Física

No âmbito das Ciências, a compreensão dos fenômenos naturais ocorre, em grande medida, por meio da construção e utilização de modelos. Esses modelos não constituem cópias da realidade, mas sim representações idealizadas, elaboradas com finalidades explicativas, preditivas e descritivas. Nesse sentido, o modelo científico é definido como uma construção teórica que representa um sistema real com o objetivo de descrevê-lo, explicá-lo ou prever seu comportamento, evidenciando seu caráter intencional e simplificador (Bunge, 1974).

Essa perspectiva é complementada, sob o ponto de vista que os modelos estabelecem relações de similaridade com o mundo real, e não de identidade. Assim, sua validade está associada ao grau de correspondência entre o modelo e o fenômeno investigado, o que implica reconhecer que todo modelo possui um domínio de validade e limitações específicas. Essa compreensão é fundamental no ensino de Ciências, pois evita que os estudantes interpretem modelos como representações literais da realidade (Giere, 1988).

A centralidade dos modelos na prática científica também deve se refletir no ensino. Pois, os modelos e processos de modelagem ocupam posição fundamental na construção do conhecimento científico e, portanto, devem assumir papel equivalente no contexto educacional. Nesse sentido, o ensino de Física deve priorizar não apenas a aplicação de fórmulas, mas a compreensão das estruturas conceituais que sustentam essas representações (Gilbert; Boulter; Elmer, 2000).

É importante destacar o caráter limitante dos modelos científicos como elemento essencial nesse processo, sendo fundamental que os estudantes compreendam que modelos são construções humanas, com domínios de validade delimitados, e não descrições absolutas da realidade. Essa abordagem contribui para uma visão mais sofisticada da natureza da ciência, na qual o conhecimento é entendido como provisório, dependente de contextos específicos e com possibilidade de revisão (Moreira, 2011).

Nesse contexto, a proposta de ensino baseada no ciclo de modelagem, apresentada por Hestenes, oferece uma contribuição relevante. Esse ciclo envolve etapas como a identificação de variáveis relevantes, a construção de representações e a análise da consistência e dos limites do modelo, promovendo uma abordagem mais estruturada e reflexiva do conhecimento científico. Ao adotar essa perspectiva, o ensino de Física desloca o foco da simples manipulação algorítmica para a compreensão dos fenômenos, favorecendo o desenvolvimento do pensamento crítico e científico (Hestenes, 1987).

O Uso de Analogias no Ensino de Ciências

No processo de tornar modelos científicos acessíveis aos estudantes, o uso de analogias é apresentado como uma estratégia didática reconhecida. O ensino por analogias consiste em estabelecer correspondências explícitas entre um conceito familiar (domínio-fonte) e um conceito novo (domínio-alvo), envolvendo não apenas a identificação de semelhanças, mas também o mapeamento dessas relações, a explicitação de seus limites e a formalização conceitual (Glynn, 1991).

Essa abordagem destaca que a analogia não deve ser compreendida como uma simples comparação ilustrativa, mas como uma estratégia cognitiva estruturada, que exige mediação docente cuidadosa. A eficácia, depende da explicitação tanto de suas potencialidades quanto de suas limitações, uma vez que interpretações inadequadas podem gerar concepções equivocadas por parte dos estudantes (Duit, 1991).

Uma fundamentação teórica mais robusta para o uso de analogias está na Teoria do Mapeamento Estrutural, segundo a qual uma analogia consiste na transferência de um sistema de relações de um domínio para outro. Nessa perspectiva, o foco não está nas características superficiais dos elementos envolvidos, mas nas relações estruturais que organizam o fenômeno (Gentner, 1983).

Além de favorecer a compreensão conceitual, o uso adequado de analogias possibilita ao estudante realizar inferências e formular previsões no domínio-alvo a partir do domínio-fonte, contribuindo para o desenvolvimento do pensamento científico. No entanto, a ausência de uma discussão explícita sobre os limites da analogia pode levar a interpretações ingênuas, tornando essencial a inclusão de momentos de problematização no processo de ensino (Duit, 1991; Gentner, 1983).

Alinhamento com a BNCC e o ENEM

A proposta desenvolvida neste trabalho encontra respaldo nas diretrizes curriculares nacionais, especialmente na Base Nacional Comum Curricular (BNCC) para a área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias. A articulação entre conceitos físicos e biológicos, ao relacionar circuitos elétricos com a eletrofisiologia cardíaca, dialoga diretamente com a Competência Específica 1, que propõe a análise de fenômenos naturais a partir das interações entre matéria e energia, visando à compreensão e melhoria das condições de vida (Brasil, 2018).

Nesse contexto, a construção de analogias entre resistência elétrica e resistência ao fluxo iônico, bem como entre capacitância e armazenamento de cargas na membrana celular,

possibilita ao estudante interpretar fenômenos biológicos à luz de conceitos físicos, promovendo uma abordagem integrada do conhecimento. Essa perspectiva também se alinha à habilidade EM13CNT101, que envolve a análise e representação de transformações em sistemas físicos, permitindo a realização de previsões sobre seu comportamento (Brasil, 2018).

Adicionalmente, a proposta contribui para o desenvolvimento da Competência Específica 3, que enfatiza a investigação de situações-problema e a utilização de linguagens próprias das Ciências da Natureza para comunicar resultados e conclusões. Nesse sentido, habilidades como EM13CNT301 e EM13CNT302 são mobilizadas ao estimular os estudantes a elaborar hipóteses, interpretar modelos, analisar dados e comunicar suas interpretações por meio de diferentes representações, incluindo gráficos e diagramas (Brasil, 2018).

No que se refere às avaliações externas, a proposta apresenta convergência com a matriz de referência do Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM), que privilegia a interpretação de gráficos, a análise de sistemas físicos contextualizados e a articulação interdisciplinar de conhecimentos. Em particular, são mobilizadas competências relacionadas à aplicação de tecnologias associadas às Ciências da Natureza, à compreensão de fenômenos ligados à saúde humana, ao entendimento de métodos científicos e à utilização de conceitos físicos na resolução de situações-problema (Brasil, 2009).

Dessa forma, ao promover a integração entre Física e Biologia por meio da modelagem e do uso de analogias, a proposta didática apresentada neste trabalho se mostra coerente com as orientações da BNCC e com as demandas avaliativas do ENEM, contribuindo para a formação de um estudante capaz de interpretar fenômenos, construir modelos explicativos e argumentar de maneira fundamentada em diferentes contextos.

O Coração Elétrico: Base Biológica para o Professor de Física

Esta seção não constitui um manual de ensino de eletrofisiologia cardíaca, mas um guia que visa a preparação do professor de Física para aplicação deste produto didático. Ele apresenta, de forma direta e em linguagem física, tudo o que precisa saber sobre o sistema de condução elétrica do coração para conduzir com segurança as analogias seguintes. A preocupação não passa pelo domínio da fisiologia, e sim entender os princípios elétricos que governam o coração. Exatamente isso que este capítulo oferece. Portanto, recomendamos a leitura antes de iniciar a sequência e que seja consultado como referência durante as aulas.

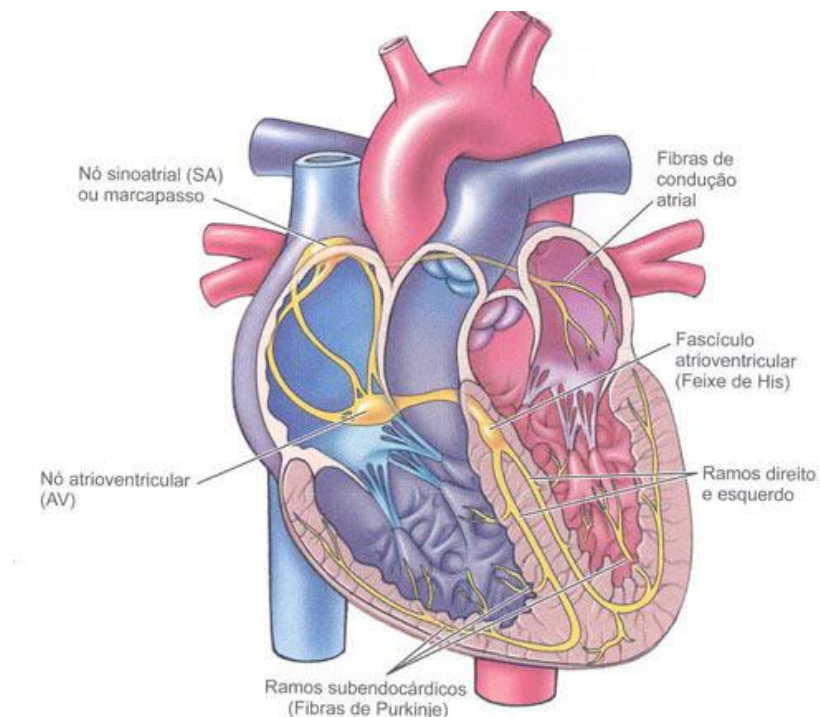
O Coração como Sistema Elétrico

O coração é um músculo que se contrai de forma rítmica para bombear sangue. Essa contração é provocada por sinais elétricos que percorrem o coração em uma sequência precisa e coordenada, ou seja, não é espontânea. Retirar a eletricidade do coração significa parar o coração.

Do ponto de vista da Física, o que ocorre é que células especializadas geram e transmitem sinais elétricos por um sistema de condutores biológicos com propriedades específicas de resistência, temporização e distribuição. O coração, em essência, é um circuito elétrico que se alimenta a si mesmo.

Tal sistema é chamado de sistema de condução elétrica cardíaca. Ele é formado por cinco estruturas principais (Nó Sinotrial, Nó Atrioventricular, Feixe de His, Ramos do Feixe de His e Fibras de Purkinje) representados na figura a seguir. Cada elemento apresenta um análogo direto nos circuitos elétricos que estudamos corriqueiramente em Física.

Figura 1 – Partes que compõem o sistema de condução cardíaco.



Fonte: Guyton, Hall, 2017

As Cinco Estruturas que importam

A seguir, as estruturas estão dispostas com sua função biológica e como o professor de Física deve pensar sobre ela.

Nó Sinoatrial (Nó SA) — "A Bateria do Coração":

- Localizado no átrio direito, o nó SA gera espontaneamente impulsos elétricos entre 60 e 100 vezes por minuto em repouso sem nenhum estímulo externo, é o marcapasso natural do coração. Como físico pense que o nó SA é uma fonte de força eletromotriz (*fem*) periódica. Ele gera diferença de potencial de forma autônoma, exatamente como uma bateria. A diferença é que a bateria fornece tensão contínua, enquanto o nó SA fornece pulsos, o que o torna ainda mais sofisticado.

Nó Atrioventricular (Nó AV) — "O Capacitor do Coração":

- Localizado entre átrios e ventrículos, o nó AV recebe o impulso do nó SA e o retarda deliberadamente por cerca de 0,12 a 0,20 segundos antes de transmiti-lo. Esse atraso garante que os átrios terminem de se contrair e enviar sangue para os ventrículos antes que estes comecem a se contrair. Como físico pense que o nó AV é um capacitor em circuito RC . Assim como o capacitor não carrega instantaneamente (levando um tempo $\tau = RC$ para responder), o nó AV introduz um atraso temporal controlado. Em exames especializados, como o Eletrocardiograma (ECG), o intervalo PR representa exatamente essa constante de tempo τ .

Feixe de His — "O Fio Condutor":

- É o único caminho elétrico que conecta átrios a ventrículos. O tecido ao redor é isolante, condicionando o impulso a passar apenas pelo feixe que conduz com alta velocidade (1 a 4 m/s). Como físico pense que o feixe de His é um fio condutor de baixíssima resistência. É a linha de transmissão do sistema, o caminho privilegiado pelo qual o sinal percorre com mínima perda. Tendo em vista a segunda Lei de Ohm, é análogo ao fio com área (A) grande e resistividade (ρ) pequeno. Numa analogia informal, o feixe de His é o fio que liga o gerador aos motores com resistência quase zero.

Ramos do Feixe de His — "Os Resistores em Paralelo"

- O feixe de His se divide em ramo direito (ventrículo direito) e ramo esquerdo (ventrículo esquerdo). Os dois ramos recebem o mesmo impulso ao mesmo tempo e conduzem correntes independentes para seus respectivos ventrículos. Como físico pense que os ramos são resistores em paralelo. Mesma tensão de entrada, correntes

independentes, resistência equivalente menor que qualquer resistência individual, logo, o sinal se distribui rápido e simultaneamente. Ou seja, o sinal se divide sem enfraquecer.

Fibras de Purkinje — "A Rede de Distribuição"

- São uma rede densa de fibras especializadas que reveste o interior dos ventrículos. Possuem diâmetro muito maior que outras células cardíacas ($\sim 75 \mu m - \sim 12 \mu m$), o que reduz drasticamente sua resistência. Distribuem o impulso por toda a musculatura ventricular em menos de 80 ms. Como físico pense que essas fibras são uma rede de condutores em paralelo com $R_{eq} \approx 0$. Como o diâmetro maior significa área maior, logo a resistência é menor, aumentando a velocidade de condução. É a "via expressa elétrica" do coração, distribuindo a corrente para cada célula dos ventrículos quase simultaneamente.

O Potencial de Repouso

Antes de disparar qualquer impulso, cada célula cardíaca já está eletricamente carregada e permanece assim enquanto não for estimulada. Esse estado de equilíbrio é chamado de potencial de repouso, e corresponde a uma diferença de potencial de aproximadamente $-70 mV$ entre o interior (carregada negativamente) e o exterior (carregada positivamente) da célula, devido a concentração iônica dos meios.

Para o professor de Física, a analogia surge ao pensar que a membrana celular em repouso é um capacitor carregado. As cargas positivas acumuladas do lado de fora e as cargas negativas do lado de dentro, formam exatamente o mesmo arranjo de um capacitor com suas duas placas paralelas separadas por um dielétrico, no caso a própria membrana lipídica, e mantendo uma diferença de potencial estável enquanto nenhuma corrente flui.

Entretanto, esse estado não é passivo. Cada célula gasta energia continuamente para manter essa separação de cargas, assim como seria necessário manter uma fonte conectada para que um capacitor permaneça carregado indefinidamente em um circuito real. É esse "capacitor carregado" que torna possível o disparo rápido e coordenado do potencial de ação. Logo, sem o potencial de repouso, não haveria energia armazenada para ser liberada.

O Potencial de Ação

Quando estimulada pelo impulso do sistema de condução, a célula cardíaca sofre um potencial de ação, ou seja, deixa seu estado de equilíbrio no potencial de repouso. Essa ação provoca uma rápida mudança na diferença de potencial, subindo de $-70 mV$ para cerca de

+30 mV, fase chamada de despolarização, depois retorna ao valor de repouso em um processo chamado de repolarização. O registro coletivo desse processo acontecendo em milhões de células ao mesmo tempo, é registrado no ECG, de modo que cada onda do traçado representa um momento específico desse ciclo de carga e descarga, em uma região específica do coração.

Para o professor de Física, a relação ocorre com o circuito RC, pois, a despolarização corresponde à descarga do capacitor, quando a tensão cai rapidamente. Já a repolarização, corresponde à recarga, quando a tensão retorna ao valor de equilíbrio.

O que Você Não Precisa Saber

Para conduzir esta sequência com segurança, não precisa conhecer e nem se estender para:

- Anatomia detalhada do coração (válvulas, artérias coronárias, câmaras além dos átrios e ventrículos)
- Bioquímica dos canais iônicos (correntes de Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e os mecanismos moleculares do potencial de ação)
- Farmacologia cardíaca (antiarrítmicos, betabloqueadores etc.)
- Interpretação clínica avançada de ECG (diagnóstico de infarto, hipertrofia etc.)
- Detalhes do modelo de Hodgkin-Huxley ou outros modelos matemáticos avançados de eletrofisiologia.

Parte 1 – Referencial Conceitual e Transposição por Analogias

1. Geradores e Receptores

1.1. Objetivos

- Compreender o conceito da força eletromotriz
- Diferenciar geradores de receptores elétricos
- Identificar as parcelas de potência útil, total e dissipada, compreendendo o conceito de rendimento como uma medida de eficiência em sistemas físicos
- Utilizar a analogia do sistema de condução cardíaco para visualizar conceitos abstratos de associação de geradores e resistência de condução.
- Relacionar o comportamento de geradores e receptores com desfibriladores

1.2. Situação Problema

Em 2 de outubro de 2005, o ciclista Lance Armstrong completou mais uma etapa da Volta da França com a precisão de sempre. O que poucos sabiam era que, desde 1999, ele carregava implantado no peito um dispositivo do tamanho de um relógio de bolso, um marcapasso, colocado após um episódio de arritmia cardíaca grave. Esse pequeno aparelho gerava pulsos elétricos periódicos que substituíam o trabalho do nó sinusal, a estrutura responsável por disparar o sinal elétrico que faz o coração bater. Sem ele, o coração de Armstrong não manteria o ritmo necessário para sustentar o esforço de uma prova de ciclismo de elite.

O marcapasso funciona como um gerador elétrico, produzindo uma diferença de potencial que "impulsiona" a corrente pelo coração, provocando a contração muscular. Mas qualquer gerador real, seja uma pilha comum, um alternador de carro ou o próprio nó sinusal, possui uma limitação que os modelos ideais não mostram. Parte da energia que ele produz é consumida internamente, antes mesmo de chegar à carga. Essa perda interna depende de uma grandeza chamada resistência interna, e ela explica por que uma pilha mais usada não consegue acender uma lâmpada com o mesmo brilho de uma pilha nova, mesmo que ambas marquem 1,5 V na embalagem.

Pense nas seguintes questões antes de começarmos:

- 1) Se o nó sinoatrial é o "gerador" do coração, o que acontece com o sinal elétrico quando esse gerador "enfraquece" por doença ou envelhecimento?
- 2) Por que a tensão medida nos terminais de uma bateria em uso é sempre menor do que o valor indicado no rótulo?
- 3) Qual a diferença entre um gerador que fornece energia e um receptor que a consome e onde cada um desses papéis aparece no circuito do coração?

1.3. Desenvolvimento

1.3.1 Conceito Físico

Em um circuito elétrico, os dispositivos podem ser classificados, do ponto de vista energético, em geradores e receptores. Os geradores elétricos são elementos capazes de fornecer energia elétrica ao circuito, convertendo outras formas de energia (química, mecânica, térmica etc.) em energia elétrica.

Um exemplo típico são as pilhas e baterias, geradores químicos, que utilizam certas reações químicas como fonte de energia química que causa movimento das cargas positivas (sentido convencional da corrente) para ir de uma região de baixo potencial elétrico (polo negativo) para uma de alto potencial elétrico (polo positivo). A grandeza associada a essa capacidade de impulsionar as cargas no interior do gerador é a força eletromotriz ($\mathcal{E}$), definida como,

$$\mathcal{E} = \frac{W}{q} \quad (1.3.1)$$

Onde W é trabalho exercido pela fonte para mover a carga q . No SI, a *fem* tem unidade o volt (V).

Entretanto, nem toda essa energia é transferida para o circuito externo. Parte é dissipada dentro do próprio gerador devido à sua resistência interna (r). Logo, a diferença de potencial nos terminais de um gerador será expressa por,

$$U = \mathcal{E} - r \cdot i \quad (1.3.2)$$

aqui i é a corrente elétrica que flui no gerador. Para um gerador ideal, a resistência interna é nula ($r = 0$), logo a diferença de potencial será a própria força eletromotriz ($U = \mathcal{E}$).

Analisando a expressão acima, se multiplicarmos ambos os lados pela corrente encontraremos,

$$i \cdot U = i \cdot \mathcal{E} - r \cdot i^2$$

$$P_u = P_t - P_d \quad (1.3.3)$$

aqui, P_t representa a potência total fornecida pelo gerador, P_d a potência dissipada pela resistência interna e P_u a potência útil, ou seja, a energia que de fato é fornecida ao circuito externo.

Logo, define-se a eficiência do gerador como,

$$\eta = \frac{P_u}{P_t} \quad (1.3.4)$$

medindo quão bem o dispositivo aproveita a energia recebida para realizar sua função.

É comum utilizarmos mais de uma pilha ou bateria para alimentar um circuito, nessa situação devemos associar os geradores, seja em série ou paralelo.

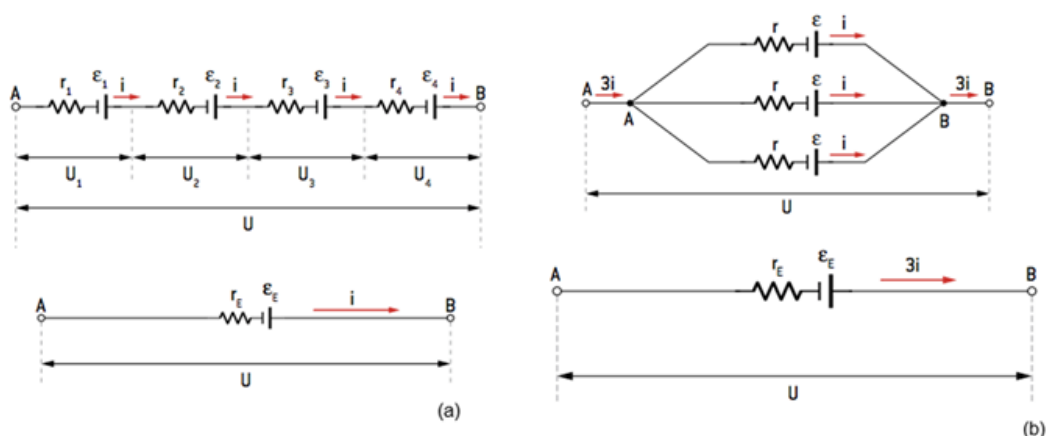
Em série, os geradores são conectados de modo que o polo positivo de um se liga ao polo negativo do próximo, ver figura, definindo a *fem* equivalente do sistema como,

$$\mathcal{E}_{eq} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 + \dots + \mathcal{E}_n \quad (1.3.5)$$

enquanto a resistência interna equivalente segue,

$$r_{eq} = r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_n \quad (1.3.6)$$

Figura 1.1 – Representação num circuito elétrico de geradores ligados em série (a) e em paralelo (b).



Fonte: Matos, 2016²

Em contrapartida, quando ligado em paralelo os terminais de mesma polaridade são ligados entre si. Para evitar correntes internas indesejadas, os geradores devem ser idênticos, ou seja, mesma *fem* e resistência interna. A equivalência será,

² <https://www.coladaweb.com/fisica/eletricidade/associacao-geradores>. Acesso dia 28 de março de 2026

$$\mathcal{E}_{eq} = \mathcal{E} \quad (1.3.7)$$

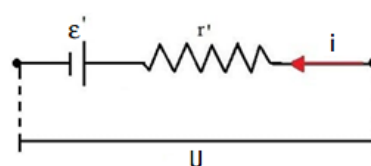
já a resistência interna,

$$r_{eq} = \frac{r}{n} \quad (1.3.8)$$

onde, n corresponde a quantidade de geradores associados em paralelos.

Já os receptores, ver figura, opera de forma inversa. Ele utiliza a energia das cargas para realizar um trabalho que não seja apenas o aquecimento do condutor.

Figura 1.2 – Representação de um gerador (bateria) num circuito



Fonte: Helerbrock, Rafael³.

Desta forma, define-se a força contra eletromotriz ($\mathcal{E}'$), que representa a energia que o dispositivo necessita para converter a energia elétrica em outra forma útil. Vale destacar que, para que a corrente possa atravessar o receptor, a ddp aplicada deve ser suficiente para vencer a *fcem* e a queda de tensão na resistência interna (r'),

$$U = \mathcal{E}' + r' \cdot i \quad (1.3.9)$$

Do ponto de vista das potências, ficamos com,

$$i \cdot U = i \cdot \mathcal{E}' + r' \cdot i^2$$

$$P_c = P_u + P'_d \quad (1.3.10)$$

P_c representa a potência fornecida ao receptor, P_u a potência útil e P_d potência dissipada internamente.

A eficiência do receptor será definida por,

$$\eta = \frac{P_u}{P'_d} \quad (1.3.11)$$

indicando o aproveitamento da energia do receptor.

1.3.2 Interpretação Física

A interpretação desses elementos reside na conservação de energia e no papel do campo não eletrostático.

³ Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/potencia-receptor.htm>. Acesso em 08 de abril de 2026.

I. A *fem* e *fcem*

A Força Eletromotriz (*fem*) não deve ser interpretada como uma "força" newtoniana, mas como um potencial de trabalho. Ela representa a energia máxima que o gerador pode fornecer a cada unidade de carga. É o "impulso" inicial que retira o sistema do equilíbrio eletrostático, levando uma carga do potencial menor (polo negativo) até o potencial maior (polo positivo).

Já a Força Contra Eletromotriz (*fcem*) representa uma oposição intrínseca ao fluxo de carga, não por atrito (que seria a resistência), mas por conversão funcional. Enquanto a resistência interna apenas "atrapalha" a passagem, a *fcem* é a medida da energia que o receptor "exige" para realizar sua tarefa principal (seja ela girar um motor ou bombear íons contra um gradiente).

II. Papel do Campo Elétrico

De acordo com a formulação a distinção reside na interação entre o campo eletrostático e o campo de origem não eletrostática:

- No gerador – O campo não eletrostático realiza trabalho para mover as cargas contra o campo eletrostático interno (do polo negativo para o positivo). O gerador atua, portanto, como uma "fonte" de campo que sustenta a diferença de potencial.
- No Receptor: O campo elétrico externo realiza trabalho sobre o dispositivo. A corrente flui a favor do campo elétrico (do potencial maior para o menor), mas deve ser forte o suficiente para vencer a barreira da *fcem*, que atua como uma "ladeira" energética a ser subida pela carga.

III. Associações de geradores

As associações são estratégias para otimizar o fornecimento. Em série busca-se um aumento da diferença de potencial fornecida pelo gerador, útil quando a resistência do circuito é muito alta e exige uma tensão maior. Já em paralelo, pode ser entendido como um compartilhamento de esforço. Ao dividir a corrente total entre vários geradores, a dissipação de cada um diminui.

Nesse tipo de associação a utilização de geradores de mesma *fem*, busca evitar um conflito elétrico, pois com $\mathcal{E}_1 > \mathcal{E}_2$, o gerador 1 quer manter uma tensão maior enquanto o 2 uma tensão menor. Esse conflito faz surgir uma corrente circulando entre os próprios geradores, fluindo da maior *fem* para a menor. Ou seja, um dos geradores passará a alimentar o outro em vez de alimentar o circuito útil. Logo, o gerador de menor *fem* atuará como um

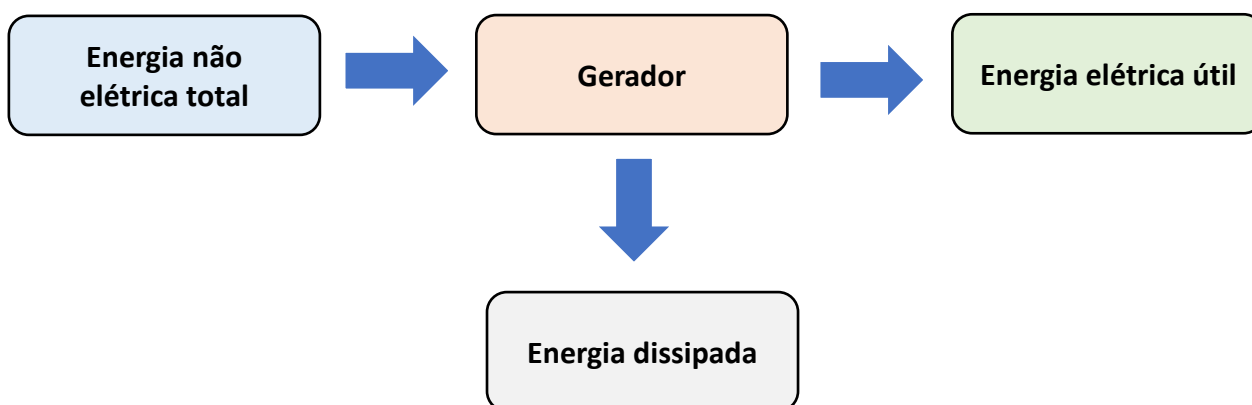
receptor, causando mais dissipação de energia, perda da eficiência e possíveis danos ao sistema.

IV. A Perspectiva da Conservação de Energia

A análise das parcelas da potência revela o destino de cada Joule de energia, no gerador:

- Potência total ($P_t = \mathcal{E} \cdot i$) – representa a taxa de conversão de energia (química, por exemplo) em elétrica.
- Potência útil ($P_u = U \cdot i$) – O que sobra para o circuito após a dissipação interna.
- Potência dissipada ($P_d = r \cdot i^2$) – A perda por calor devido a resistência interna.

Figura 1.3 – Esquema de potência em um gerador.

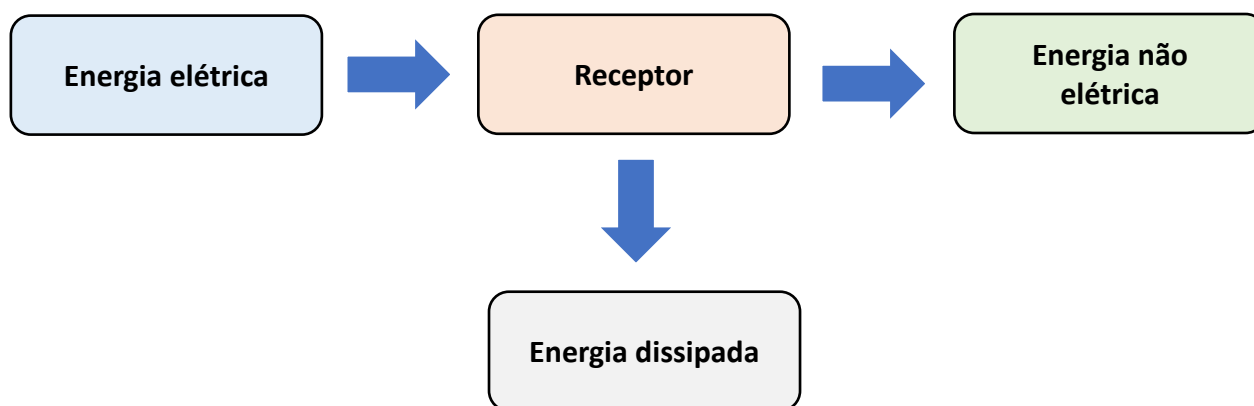


Fonte: Próprio autor.

No Receptor:

- Potência consumida ($P_c = U \cdot i$) – O total de energia elétrica da rede.
- Potência útil ($P_u = \mathcal{E}' \cdot i$) – A energia que foi efetivamente transformada na função desejada.
- Potência dissipada ($P'_d = r' \cdot i^2$) – O aquecimento do receptor durante a operação.

Figura 1.4 – Esquema de potência em um receptor.



Fonte: Próprio autor.

V. A Lógica da Eficiência

O rendimento (η) é a interpretação matemática do aproveitamento do dispositivo. Nos geradores, a eficiência cai à medida que a corrente aumenta. Existe um ponto crítico onde, se exigirmos corrente demais, o gerador dissipa tanta energia internamente que a voltagem nos terminais cai pela metade. Enquanto nos receptores, a eficiência cresce à medida que a resistência interna diminui, de modo que possa converter a energia elétrica em trabalho útil.

1.4 Analogia biológica

A. *fem*, *fcem* e na condução cardíaca

No coração, o nódulo sinoatrial (SA) atua como o gerador primário do ritmo. Ele não “cria” cargas elétricas, mas utiliza energia metabólica (ATP) para manter e restaurar os gradientes iônicos através da membrana celular, especialmente por meio da bomba de sódio e potássio. Esses gradientes são responsáveis por estabelecer uma diferença de potencial transmembrana, que funciona como a *fem* biológica do sistema.

A atividade marcapasso do nódulo SA decorre de correntes iônicas espontâneas que levam à despolarização rítmica, iniciando o potencial de ação.

Os cardiomiócitos contráteis atuam como elementos receptores. Eles recebem o estímulo elétrico e convertem essa energia em trabalho mecânico, por meio do acoplamento excitação-contração.

A analogia com a *fcem* pode ser interpretada como a resistência eletrofisiológica da membrana celular à despolarização. Para que ocorra a ativação, o estímulo elétrico precisa

atingir o limiar de excitação. Caso contrário, o estímulo é sublimiar (sinal com intensidade muito fraca para gerar um impulso) e não desencadeia potencial de ação nem contração.

B. Campo elétrico e volume condutor

Diferente de um circuito metálico, o coração está inserido em um volume condutor tridimensional, composto pelos líquidos corporais do tórax.

Durante a despolarização, forma-se um dipolo elétrico transitório, resultado da separação de cargas entre regiões despolarizadas e ainda polarizadas do tecido.

- No gerador (nódulo SA) – a atividade iônica transmembrana gera correntes locais que iniciam uma onda de despolarização, propagando-se célula a célula.
- No tecido cardíaco (receptor) – a propagação do impulso ocorre principalmente por correntes locais no meio extracelular e intracelular, que despolarizam células adjacentes ao atingir o limiar e abrir canais iônicos dependentes de voltagem.

O campo elétrico gerado por essas correntes se distribui pelo volume condutor do corpo, permitindo sua detecção à distância pelo eletrocardiograma (ECG).

D. Sistema de suplência

O coração apresenta um sistema hierárquico de automatismo,

- Nódulo SA: ~60 – 100 bpm
- Nódulo AV: ~40 – 60 bpm
- Fibras de Purkinje: ~15 – 40 bpm

Do ponto de vista físico, isso pode ser interpretado como um sistema de geradores acoplados com frequências intrínsecas distintas. O marcapasso mais rápido (nódulo SA) impõe seu ritmo sobre os demais por meio do fenômeno de supressão por sobre estímulo, mantendo as outras estruturas em estado de despolarização frequente e impedindo sua atividade espontânea.

Caso o gerador principal falhe, os demais assumem a condução, garantindo a continuidade do sistema, ainda que com menor frequência, o que equivale, na analogia, a uma menor “taxa de fornecimento de energia”.

E. Conservação de energia e potência cardíaca

O funcionamento cardíaco pode ser interpretado sob a ótica da conservação de energia:

- Potência total: energia metabólica consumida (principalmente ATP) para manter gradientes iônicos e sustentar a atividade elétrica e mecânica.

- Potência dissipada: energia perdida principalmente na forma de calor, devido à resistência ao fluxo iônico nas membranas celulares, citoplasma e junções comunicantes (gap junctions).
- Potência útil: energia convertida em trabalho mecânico, responsável pela contração das fibras e ejeção do sangue.

Essa divisão é análoga à de circuitos elétricos reais, onde nem toda energia fornecida é aproveitada.

F. Eficiência cardíaca

A eficiência do sistema cardíaco pode ser interpretada como a relação entre o trabalho mecânico realizado (ejeção de sangue) e o consumo energético (principalmente oxigênio).

Em condições como isquemia, a redução no fornecimento de oxigênio compromete a produção de ATP, prejudicando o funcionamento das bombas iônicas. Isso altera os gradientes eletroquímicos e reduz a eficiência do sistema, com menor produção de trabalho mecânico.

Já em arritmias, há desorganização na propagação do impulso elétrico. Embora haja atividade elétrica (energia sendo consumida), a falta de sincronização reduz drasticamente a eficiência mecânica do coração, comprometendo o débito cardíaco.

1.5 Limitações da analogia

1. Geradores (SA e AV)

- Fonte de Energia vs. Metabolismo – Um gerador físico (como uma pilha) possui uma reserva finita de energia química que se transforma em elétrica. No coração, o "gerador" é um sistema aberto que depende do fluxo sanguíneo constante (oxigênio e glicose) para manter os gradientes iônicos. Se o metabolismo falha, a *fem* ($\mathcal{E}$) não apenas diminui, ela desaparece porque a estrutura celular se desfaz.
- Frequência Variável (Não-Linearidade) – Em física, um gerador é geralmente modelado com uma *fem* constante. Os geradores cardíacos são autoajustáveis via sistema nervoso autônomo. Eles alteram sua "voltagem" e frequência de disparo em milissegundos, algo que em circuitos exigiria um controlador externo complexo, e não apenas um componente passivo.
- Auto excitação vs. Estabilidade: Um gerador físico é estável até que o circuito seja fechado. O gerador cardíaco possui uma "corrente de fuga" proposital (nos canais de

sódio por exemplo), que o faz disparar sozinho. Essa instabilidade intrínseca é difícil de modelar com geradores convencionais de laboratório.

2. Receptores (Miocárdio)

- O Trabalho Mecânico – O limite mais crítico é que, em um receptor físico (como um motor), a relação entre a corrente de entrada e o trabalho de saída é direta e previsível pela f_{cem} ($\mathcal{E}'$). No receptor cardíaco, pode haver eletricidade (despolarização), mas o músculo pode não contrair por falta de cálcio ou dano estrutural. É a chamada dissociação eletromecânica, um fenômeno que a analogia elétrica pura não consegue prever.
- A "Carga" do Circuito – Em circuitos, o receptor é uma carga que consome energia. No coração, cada célula receptora, ao ser ativada, torna-se momentaneamente um "reforçador" do sinal para a célula vizinha. O receptor biológico não é apenas um consumidor de energia, mas um elemento ativo na propagação do campo.

3. Meio de condução

- A Resistência Interna (r e r') – Na física, a resistência interna é uma propriedade fixa do material. No sistema cardíaco, a resistência entre o gerador e o receptor (as junções comunicantes ou *gap junctions*) pode mudar dependendo do pH do tecido ou da presença de fármacos.
- O Volume Condutor: O maior limite para ambos é a geometria. Enquanto o gerador e o receptor de um livro de física estão ligados por fios unidimensionais, no corpo eles estão imersos em um fluido condutor. Isso significa que parte da "potência útil" do gerador se dispersa por todo o corpo em vez de ir exclusivamente para o receptor (músculo), o que permite, por exemplo, que o sinal seja captado por eletrodos no pulso (ECG).

4. Observações importantes

- Eficiência Energética – Tanto no gerador físico quanto no biológico, a potência dissipada manifesta-se como calor. No coração, uma resistência interna aumentada (por fibrose, por exemplo) reduz a potência útil, exigindo maior esforço metabólico para o mesmo resultado mecânico.
- A "Fiação" Ativa – Diferente de um circuito físico onde o fio é passivo, no sistema cardíaco o "fio" (Purkinje) é excitável. Ele não apenas transporta a carga, mas reage a

ela, garantindo que a *fem* não caia ao longo do trajeto, mantendo a integridade do sinal em todo o volume cardíaco.

Tabela 1.1 – Comparação entre os elementos dos circuitos elétricos e o sistema de condução cardíaca.

Função	Elemento Físico (Circuito)	Elemento Biológico (Coração)
Geração de Potencial	Gerador: Converte energia química/mecânica em <i>fem</i> .	Nódulo Sinoatrial (SA): Marcapasso natural que gera o impulso elétrico.
Conversão de Energia	Receptor: Converte energia elétrica em trabalho ou outra forma.	Miocárdio Ventricular: Converte o sinal elétrico em contração mecânica (sístole).
Atraso e Controle	Resistor: Dificulta a passagem da corrente, gerando queda de tensão.	Nódulo Atrioventricular (AV): Promove o atraso fisiológico para o enchimento ventricular.
Condução Rápida	Fios Condutores: Caminhos de baixa resistência para o fluxo de elétrons.	Fibras de Purkinje / Feixe de His: Tecidos especializados em condução iônica veloz.
Armazenamento de Carga	Capacitor: Armazena energia no campo elétrico entre placas.	Membrana Celular (Bicamada): Separa cargas iônicas, criando o potencial de repouso.
Controle de Fluxo	Chaves / Diodos: Permitem ou bloqueiam a passagem da corrente.	Canais Iônicos: Proteínas que abrem/fecham conforme a voltagem.
Suplência	Associação em Paralelo: Mantém o sistema operando se uma fonte falhar.	Marcapassos Ectópicos: Nódulo AV e Purkinje assumem se o SA parar.
Medição de Saída	Voltímetro / Osciloscópio: Registra a diferença de potencial no tempo.	Eletrocardiograma (ECG): Registro da atividade elétrica global no volume condutor.

Fonte: Próprio autor.

1.6 Proposta de Simulador

Utilizando o PhET para demonstrar a diferença entre a *fem* (épsilon) e a tensão disponível nos terminais quando há resistência interna. Construindo assim, a analogia com o nó sinoatrial (AS) como bateria biológica, tornando o conceito mais concreto.

Link:

https://phet.colorado.edu/sims/html/circuit-construction-kit-dc/latest/circuit-construction-kit-dc_all.html?locale=pt_BR

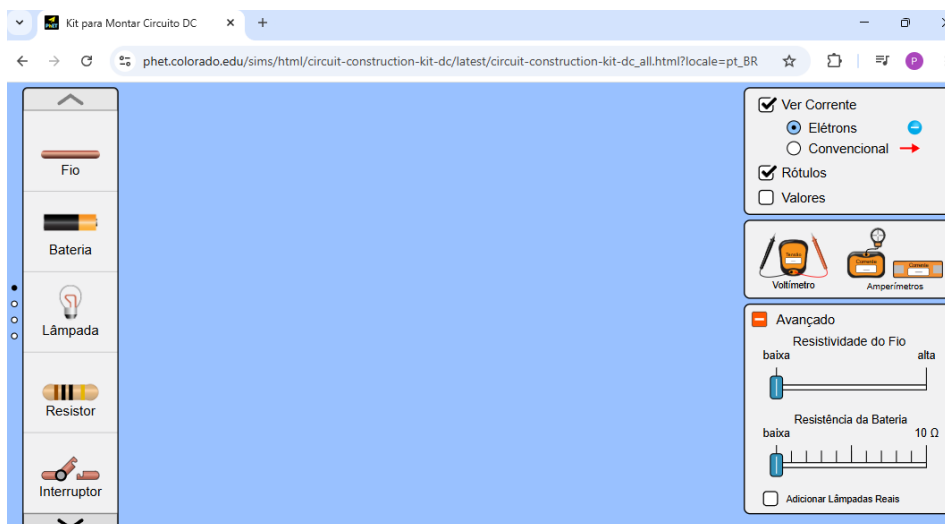
1 – Abrindo o simulador

Acessando o link, clique para iniciar a simulação e após na opção “Lab”.

2 – Conhecendo o simulador

A esquerda terá uma barra de ferramentas com alguns componentes para a montagem do esquema. A direita outra barra apresentando instrumentos de medidas e outras funcionalidades. Um pouco abaixo desta, uma opção “Avançado” que mostra mais situações a serem aplicadas no circuito.

Figura 1.5 – Simulador PhET construção de circuito DC

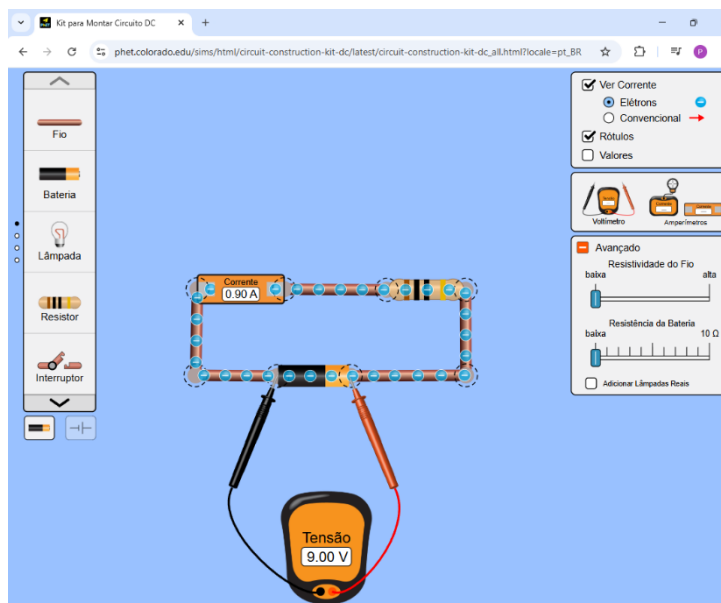


Fonte: PhET

3 – Montando o circuito

Adicione a Bateria arrastando para o fundo azul, um Resistor, o Voltímetro e o Amperímetro conectando-os utilizando os Fios, conforme mostrado na figura a seguir.

Figura 1.6 – Montagem do circuito para estudar a influência da resistência interna da bateria e a força eletromotriz.



Fonte: PhET

Com a resistência interna nula ($r = 0$), observe que a tensão registrada será idêntica a força eletromotriz. Dito isto, sugere-se a seguinte reflexão:

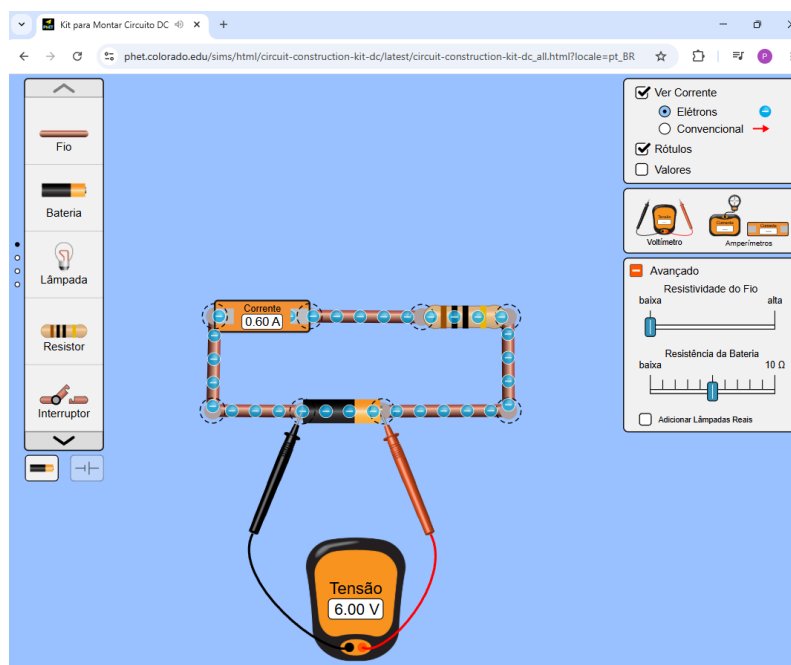
“Essa é a situação de uma fonte ideal. O que seria uma fonte ideal em termos cardíacos? A resposta seria um Nó Sinusatrial (SA) perfeito, que mantém a geração e a amplitude dos sinais elétricos rigorosamente constantes, independente das condições do tecido cardíaco (resistências). Além disso, não sofreria nenhuma perda de carga ou atenuação ao transferir o sinal para as demais partes do coração.”

Tal reflexão, busca Fazer o aluno compreender que, na biologia como em outros sistemas elétricos, possuem limitações físicas "internas" e que a "fonte ideal" é apenas um modelo teórico.

4 – Ajustando a resistência interna

Aumente gradativamente a resistência interna da bateria.

Figura 1.7 – Aumento da resistência interna da bateria e queda da tensão no voltímetro.



Fonte: PhET

A cada aumento da resistência interna o voltímetro passa a registrar uma tensão cada vez menor, levando a reflexão:

“Com o envelhecimento ou devido a patologias (doenças), o tecido muscular saudável do coração pode ser substituído por tecido fibroso (colágeno). Esta fibrose no Nó SA ou nas suas vias de saídas funcionam exatamente como o aumento da resistência interna (r) no simulador. Resultando num “impulso” (tensão efetiva que sai da fonte), mais fraco ou atrasado. Logo para que possamos ter novamente aquela tensão de quando não havia resistência interna, devemos aumentar de alguma forma a força eletromotriz. No caso cardíaco exigindo a implantação de um marcapasso artificial.

2.Capacitores

2.1. Objetivos

- Assimilar o conceito de capacitância eletrostática de um condutor.
- Verificar a dependência geométrica da capacitância de um condutor plano.
- Identificar a alteração da capacitância quando preenchido por um dielétrico.
- Interpretar o comportamento da membrana plasmática das células cardíacas como um capacitor formado por placas paralelas.
- Verificar os limites comparativos entre capacitores e membrana plasmática.

2.2. Situação Problema

Em 16 de outubro de 2023, durante uma cirurgia cardíaca de rotina no Hospital Geral de Fortaleza, os monitores do paciente registraram o que os médicos temiam: fibrilação ventricular. O coração havia perdido o ritmo e passado a vibrar de forma caótica, sem conseguir bombear sangue. Segundos contavam. A equipe médica posicionou as pás do desfibrilador sobre o tórax do paciente e acionou o disparo. Um choque de 200 joules percorreu o coração em menos de 10 milissegundos e o ritmo foi restabelecido.

O que poucos param para pensar é que aquele choque não veio de uma tomada elétrica nem de uma bateria convencional. Ele veio de um capacitor. Antes do disparo, o aparelho havia carregado silenciosamente um capacitor interno a uma tensão de cerca de 3.000 volts. No momento do acionamento, toda aquela energia acumulada foi liberada de uma só vez sobre o coração, rápida, precisa e suficientemente intensa para interromper a atividade elétrica caótica e dar ao nó sinoatrial a chance de reassumir o controle do ritmo.

O desfibrilador é talvez o exemplo mais dramático do que um capacitor é capaz de fazer: armazenar energia elétrica na forma de campo elétrico entre duas superfícies condutoras separadas por um isolante, e liberá-la no momento exato em que ela é necessária. Esse mesmo princípio, em escala muito menor, acontece em cada célula do seu coração a cada fração de segundo, a membrana celular separa cargas, acumula uma diferença de potencial e, quando estimulada, descarrega essa energia para gerar o impulso que propaga o batimento.

Pense nas seguintes questões:

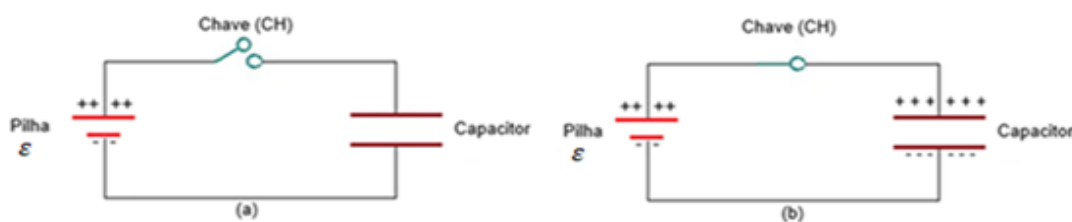
- 1) O que permite que um capacitor libere tanta energia em tão pouco tempo, enquanto uma bateria comum não conseguiria fazer o mesmo?
- 2) Como a geometria de um capacitor, área das placas e distância entre elas, influencia a quantidade de energia que ele consegue armazenar?

2.3. Desenvolvimento

2.3.1 Conceito Físico

Considere um capacitor formado por um par de placas metálicas planas e paralelas inicialmente descarregado. Ao conectá-lo num circuito elétrico que possui uma chave (*CH*) e com uma fonte externa (pilha), como indicado na figura 2.1, ao fecharmos a chave, a força eletromotriz ($\mathcal{E}$) da fonte estabelece um campo elétrico causando movimento das cargas nos fios do circuito.

Figura 2.1 – Processo de acúmulo de carga no capacitor, com a chave desligada (a) não há carga nas superfícies dos condutores, ao ligar a chave o capacitor é submetido a diferença de potencial fornecida pela pilha acumulando cargas de sinais contrários nas superfícies dos condutores (b).



Fonte: Adaptado de Mundo Educação⁴

Assim, os elétrons presentes na placa superior do capacitor, se deslocarem no sentido do terminal positivo da pilha, ocorrendo uma perda de elétrons, tornando placa carregada positivamente. A mesma quantidade de cargas é movida para a placa inferior do capacitor oriundas do terminal negativo da fonte, de modo, que o excesso de elétrons a torna negativamente carregada.

Logo, à medida que as cargas vão se armazenando nas superfícies das placas. A diferença de potencial aumenta com o tempo, até igualar com a força eletromotriz. Atingindo este equilíbrio, não haverá mais campo elétrico entre no fio que liga, (i) o terminal positivo e a placa superior, (ii) o terminal negativo e a placa inferior. Dessa forma, os elétrons não mais se deslocam e podemos afirmar que o capacitor está totalmente carregado, e tal quantidade de carga armazenada é definida por;

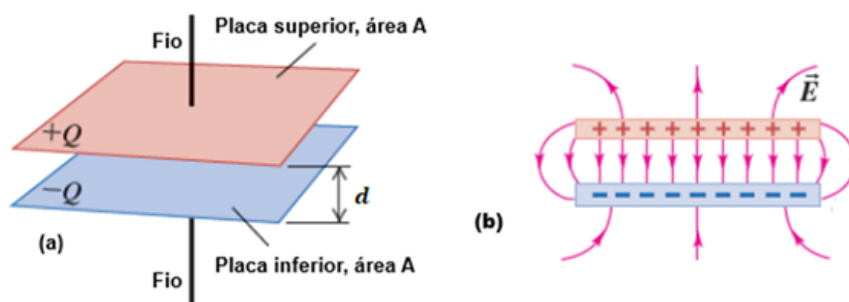
$$Q = CU \quad (2.3.1)$$

⁴ <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/capacitancia-um-capacitor.htm>. Acesso em 08 de março de 2026.

Onde C , uma constante de proporcionalidade, chamada de capacitância, que mede a capacidade deste componente armazenar carga elétrica Q para uma dada diferença de potencial U . No SI, a capacitância tem unidade de coulomb por volt, recebendo um nome especial, o farad (F).

Quando carregado, um campo elétrico é estabelecido na região entre as placas, mostrado na figura 2.2.

Figura 2.2 – Estrutura de um capacitor de placas paralelas, com duas placas de área A separadas por uma distância d . As cargas acumuladas nas superfícies das placas têm o mesmo valor absoluto e sinais contrários (a). Representação das linhas de campo elétrico entre as placas que formam o capacitor e nas bordas (b).



Fonte: Adaptado de mllsilva, 2018.⁵

Este campo elétrico é uniforme na região entre as placas (interior do capacitor), o que não ocorre na região das bordas (efeito de borda). No entanto, se a dimensão das placas for muito maior que a distância entre elas, este efeito é muito pequeno, podendo assim ser ignorado. Nessa aproximação, consideramos que o campo elétrico está totalmente contido entre as placas, assim, o módulo deste campo se resume a,

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0 A} \quad (2.3.2)$$

Já a diferença de potencial,

$$U = Ed \quad (2.3.3)$$

dessa forma,

$$Q = \frac{\epsilon_0 A}{d} U \quad (2.3.4)$$

comparando com (4.1.1), concluímos que,

⁵ https://wp.ufpel.edu.br/mllsilva/files/2018/11/Aula_7_Capacitores.pdf, Acesso em 08 de março de 2026

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{d} \quad (2.3.5)$$

onde, (A) é a área das placas, (d) a distância entre as placas e ($\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} F/m$) a permissividade elétrica do vácuo.

Ou seja, a capacitância de um capacitor depende de sua geometria, neste caso para uma formação de placas planas e paralelas, dependendo da área e da distância entre as placas.

O campo entre as placas pode ser alterado ao passo que preenchamos o espaço com um material isolante (dielétrico), garantindo que o equipamento funcione de fato como um armazenamento de carga e não gere um curto-circuito caso fosse preenchido por um condutor. Essa alteração implica também numa mudança da capacitância, através de,

$$C' = kC = \frac{k\varepsilon_0 A}{d} = \frac{\varepsilon A}{d} \quad (2.3.6)$$

aqui (k) é constante dielétrica do meio, na qual cada material apresenta um valor de constante, a tabela abaixo indica alguns.

Tabela 2.1 – Valores da constante dielétrica (k) para alguns materiais à temperatura ambiente.

MATERIAL	CONSTANTE DIELETRICA
VÁCUO	1
AR	1,00054
POLiestireno	2,6
PAPEL	3,5
PORCELANA	6,5

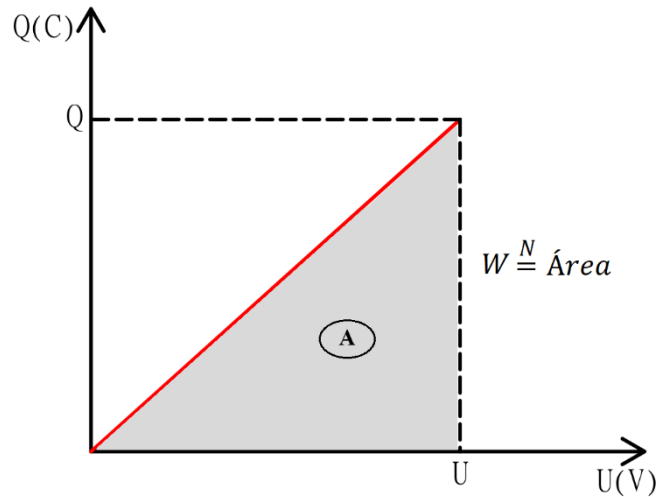
Fonte: Adaptado de Halliday; Resnick, 2016.

Essa alteração na capacitância revela que o capacitor não é apenas um recipiente passivo de partículas, mas um sistema dinâmico de interação. Ao aumentarmos a capacitância através da geometria ou do uso de dielétricos, estamos, na verdade, otimizando a capacidade do dispositivo de confinar um campo elétrico em seu interior e consequentemente a energia potencial elétrica nele armazenada.

Retornando ao processo de carregamento. A fonte externa deve realizar trabalho para mover as cargas de uma placa para a outra. No início do processo, quando o capacitor está descarregado, mover a primeira carga exige um esforço desprezível. Entretanto, à medida que as placas se tornam carregadas, as cargas subsequentes sofrem uma repulsão eletrostática cada vez maior.

De (2.3.1), verifica-se que a diferença de potencial e a carga no capacitor são grandezas diretamente proporcionais, assim, expressando tal resultado na forma gráfica, ver figura 2.3,

Figura 2.3 – Diferença de potencial em função da carga. A área delimitada no gráfico é numericamente igual ao trabalho realizado.



Fonte: Próprio autor.

chegando,

$$W = \frac{Q^2}{2C} \quad (2.3.7)$$

esse trabalho não se perde, ele fica armazenado no sistema sob a forma de energia potencial elétrica (E_{pot}), utilizando (2.3.1),

$$E_{pot} = \frac{CU^2}{2} \quad (2.3.8)$$

A energia potencial elétrica não está nas placas, mas sim no campo elétrico que preenche o espaço entre elas. Assim, considerando um volume, área vezes volume (Ad), de um capacitor de placas paralelas define-se a densidade de energia u , ou seja, energia por unidade de volume,

$$u = \frac{E_{pot}}{Ad} = \frac{CU^2}{2Ad} \quad (2.3.9)$$

usando (2.3.5) e (2.3.3),

$$u = \frac{1}{2} \epsilon_0 \left(\frac{U}{d} \right)^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \quad (2.3.10)$$

Esta expressão indica que em qualquer lugar do espaço onde exista um campo elétrico, haverá energia armazenada. Consequentemente, o capacitor é, portanto, um instrumento projetado para "engarrafar" esse campo de maneira eficiente e segura.

2.3.2 *Interpretação Física*

Nesta seção, nosso objetivo é realizar a transposição didática das equações apresentadas anteriormente, focando na compreensão fenomenológica que o docente deve mediar em sala de aula. Interpretar o capacitor exige deslocar o olhar da "matemática do acúmulo" para a "física do confinamento".

I. A Capacitância como Propriedade Estrutural

Para o aluno, a equação $C = Q/U$ pode sugerir erroneamente que a capacitância depende da carga ou da tensão. Cabe ao professor interpretar a capacitância como uma assinatura geométrica e material.

Analogamente à constante elástica de uma mola, a capacitância define o quanto o sistema "cede" a força eletromotriz (ddp) para acomodar carga. No contexto de dispositivos, interpretamos (C) como a eficiência em manter cargas separadas, onde,

- Se a capacitância é alta, o sistema é "condescendente": ele aceita muita carga sem que a tensão suba bruscamente.
- Se é baixa, o sistema é "rígido": qualquer pequena carga gera um salto enorme no potencial.

II. O Papel do Dielétrico

A interpretação física do uso de isolantes entre as armaduras deve focar na polarização. O professor deve enfatizar que o dielétrico não "aumenta a carga" por mágica, mas sim reduz o campo elétrico resultante no interior do dispositivo através da criação de um campo induzido oposto.

Essa "manobra" física reduz a diferença de potencial para uma mesma quantidade de carga, permitindo que a fonte (seja uma bateria ou uma bomba iônica) realize menos trabalho para adicionar novas cargas. Interpretar o dielétrico é entender como a natureza otimiza o armazenamento de energia manipulando a permissividade do meio.

III. A Energia localizada no Campo

Talvez o salto conceitual mais importante desta seção seja a localização da energia. Enquanto a eletrostática elementar foca nas interações entre partículas, a interpretação avançada propõe que a energia não reside nas placas metálicas, mas no espaço entre elas.

Ao tratar da densidade de energia, o professor deve instigar a percepção de que o capacitor é, essencialmente, um "confinador de espaço". Onde houver um campo elétrico estabelecido, existe energia potencial pronta para ser convertida em trabalho ou movimento de cargas assim que um caminho condutor for oferecido.

IV. Do Metal ao Eletrólito

Por fim, a interpretação do conceito deve preparar o vocabulário para a seção seguinte. No capacitor comercial, lidamos com elétrons e metais, na analogia biológica, lidaremos com íons (sódio (Na^+), potássio (K^+) e cálcio (Ca^{2+})) e soluções aquosas. Devemos guiar a interpretação de que, independentemente do portador de carga, o princípio físico permanece o mesmo, a separação de cargas opostas por uma barreira isolante cria um reservatório de energia potencial pronto para ser convertido em trabalho.

2.4 Analogia biológica

A interpretação sob a ótica da física de um capacitor se dá como um instrumento que confina um campo elétrico de modo a armazenar energia. Transpondo esse modelo para uma escala microscópica do coração, nos permite enxergar a célula cardíaca (miócito) também como um sistema de armazenamento de energia.

A. Os meios condutores: Soluções em vez de Metais

Primeiro passo é identificar onde estão as placas do capacitor, nas células do coração, elas são formadas por fluidos condutores, eletrólitos, onde:

- Placa “a” – Meio Extracelular: Apresenta excesso de carga positiva devido à alta concentração de íons sódio (Na^+), mantida pela bomba de sódio e potássio, enzima que consome energia ATP para mover três íons sódio para fora e dois potássios para dentro da célula.
- Placa “b” – Meio Intracelular: Possui excesso de carga negativa devido a presença de proteínas e fosfatos com carga negativa e saída contínua de íons potássio (K^+) através dos canais iônicos presentes na membrana.

B. A membrana plasmática como dielétrico

A membrana plasmática, formada por uma bicamada fosfolipídica, estrutura isolante que separa os meios intracelular e extracelular, apresenta permeabilidade seletiva, o que facilitando a saída de potássio (K^+) e dificulta a entrada de sódio (Na^+). A geometria dessa estrutura:

- Espessura (d): Distância entre os meios é de 7 a 10 nm.
- Capacitância: Como a distância é extremamente pequena, a capacitância por unidade de área é alta, cerca de $1 \mu F/cm^2$.
- Armazenamento de energia: Alta eficiência, confina campo elétrico intensos numa escala molecular.

C. A fonte de Energia

Um capacitor não se carrega sozinho. Na física, precisamos de uma bateria (*fem*). Na biologia, essa função é da Bomba de Sódio-Potássio. Ela consome energia química para "empurrar" cargas contra a atuação do campo elétrico, mantendo o sistema carregado em um *potencial de repouso* entre -70 mV e -90 mV .

D. A Descarga: O Potencial de Ação

O que se reconhece como batimento cardíaco tem origem em um evento elétrico. Quando a célula é estimulada, ocorre a abertura de canais iônicos na membrana, aumentando sua permeabilidade e permitindo o fluxo de íons entre os meios intracelular e extracelular. Esse processo promove uma rápida redistribuição de cargas elétricas, levando à variação do potencial de membrana, de modo análogo à descarga de um capacitor. A energia associada a essa reorganização elétrica está relacionada à geração do impulso elétrico, conhecido como potencial de ação, que se propaga pelo tecido cardíaco e desencadeia a contração mecânica do coração.

E. Bateria interna

Diferente de um capacitor comum que precisa religar no circuito após a descarga, a célula possui um mecanismo de recarga contínua. A bomba de sódio e potássio garante que, logo após o batimento cardíaco (descarga), o capacitor biológico retorne ao seu estado de repouso.

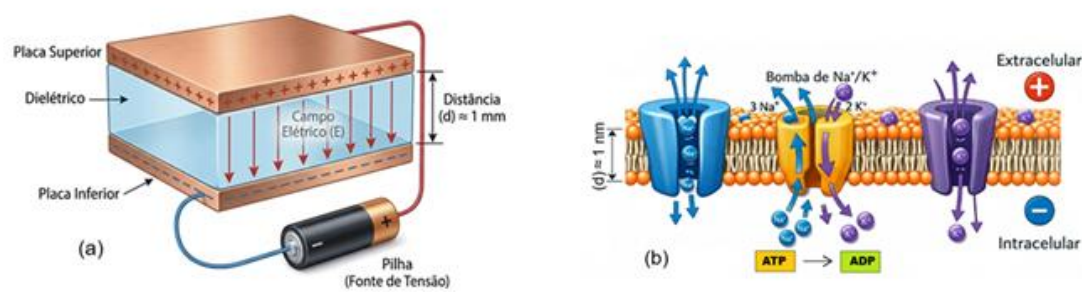
Tabela 2.2 – Comparativo didático entre o capacitor e a membrana celular.

Característica	Capacitor de Placas Paralelas	Membrana do Miócito
Placas Condutoras	Metais	Soluções eletrolíticas (meios intracelular e extracelular)
Dielétrico (Isolante)	Cerâmica, poliéster, vácuo etc.	Bicamada fosfolipídica
Portadores de Carga	Elétrons	Íons (Na^+ , K^+)
Mecanismo de Carga	Fonte de <i>fem</i> externa	Bomba de Sódio-Potássio
Espessura do Isolante (d)	Micrômetros a milímetros	7 a 10 nanômetros

Diferença de Potencial (U)	Variável	-70 mV a -90 mV
Campo Elétrico (E)	Depende da ddp aplicada	Extremamente intenso ⁶

Fonte: Próprio autor.

Figura 2.4 – (a) capacitor preenchido por um dielétrico carregando. Acumula cargas de sinais contrários nas superfícies dos condutores devido a (*fem*) da pilha. O campo elétrico gerado entre as placas armazena a energia potencial elétrica. (b) estrutura simplificada de uma célula cardíaca. A membrana plasmática, que atua como um dielétrico devido a sua bicamada fosfolipídica, separa os meios celulares evitando a fluxo livre de íons, cabendo aos canais iônicos específicos e a bomba Na^+/K^+ a manutenção da carga nos meios e a sustentação dos gradientes iônicos.



Fonte: Próprio autor.

2.5 Limitações da analogia

Embora o modelo de capacitor de placas paralelas seja uma ferramenta didática excepcional, o professor deve estar atento aos limites dessa simplificação para evitar concepções errôneas.

1. Portadores de Carga: Elétrons vs. Íons

No capacitor, o fluxo de carga é majoritariamente eletrônico. No sistema biológico, a corrente é iônica. Isso implica em massas muito maiores e velocidades de resposta diferentes. Além disso, a carga no capacitor metálico reside na superfície, na biologia, a "carga" é uma nuvem de íons próxima à membrana, influenciada por gradientes de concentração (químicos) e não apenas elétricos.

⁶ **Nota:** Ao apresentar esse tema, você pode perguntar aos alunos: "Se a membrana é tão fina, por que o campo elétrico não rompe o isolante (rigidez dielétrica)?" A resposta está na incrível estabilidade das moléculas de gordura (lipídios) que formam a membrana, suportando campos da ordem de 10 milhões de Volts por metro, comparáveis aos campos que geram raios na atmosfera.

2. O Dielétrico "Vazante"

Diferente de um capacitor comercial ideal, a membrana celular é um dielétrico imperfeito por design. Ela possui “saídas e entradas” controlados (canais iônicos) que alteram a resistência do sistema dinamicamente. Enquanto um capacitor físico busca isolamento total, a célula depende da permeabilidade seletiva para funcionar.

3. Componentes Ativos vs. Passivos

Um capacitor é um componente passivo, ele só devolve a energia que recebeu. A célula cardíaca possui mecanismos ativos (bombas de sódio e potássio) que utilizam energia química (ATP) para mover cargas *contra* o gradiente elétrico. É como se o capacitor biológico tivesse uma pequena bateria interna embutida no próprio dielétrico para se recarregar constantemente.

4. Geometria Variável

O modelo de placas planas e paralelas assume um campo elétrico uniforme. As células cardíacas possuem geometrias complexas e ramificadas. A capacitância total da célula depende da sua área superficial total, que pode mudar ligeiramente com o estiramento mecânico do tecido cardíaco, algo que não ocorre em capacitores cerâmicos ou de poliéster.

2.6 Proposta de Simulador

O PhET Capacitor Lab torna visível o campo elétrico entre as placas, a distribuição de cargas e o efeito da geometria (área e distância) na capacitância. Use-o antes de apresentar a analogia com a membrana celular.

Link:

https://phet.colorado.edu/sims/cheerpj/capacitor-lab/latest/capacitor-lab.html?simulation=capacitor-lab&locale=pt_BR

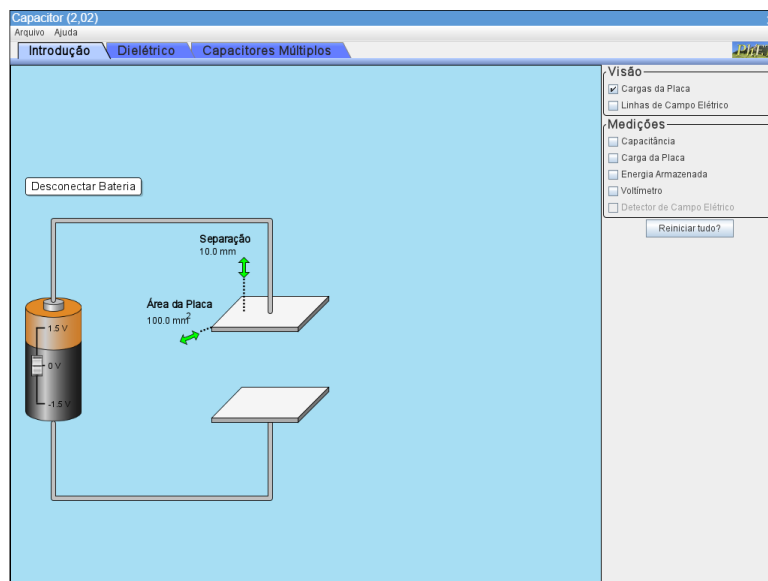
1 – Abrindo o simulador

Acessando o link, clique para iniciar a simulação. Ao abrir você já estará na aba “Introdução”.

2 – Conhecendo o simulador

A direita, uma aba com ferramentas “Visão” e “Medições” podem ser visualizadas.

Figura 2.5 – Simulador PhET, rodando capacitor – lab.

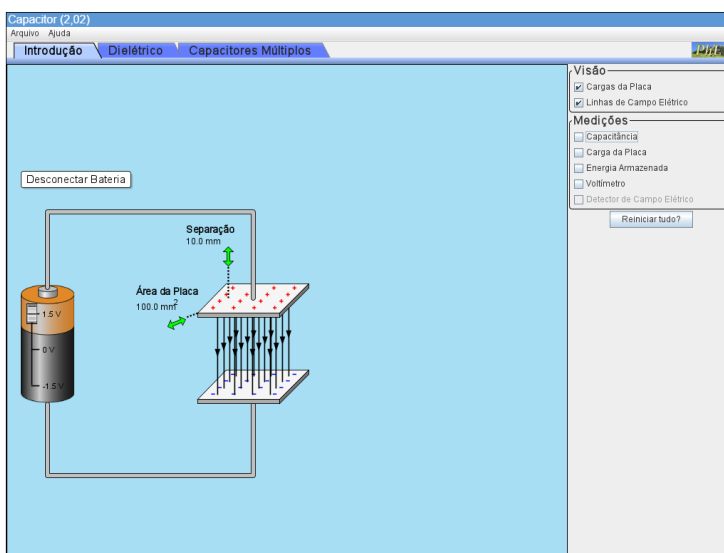


Fonte: PhET

3 – Cargas no capacitor

Ajuste na bateria a chave em 1,5 V e observe o acúmulo de cargas nas placas. Na caixa “Visão”, marque a visualização das linhas de campo, verificando o campo elétrico na região entre as placas.

Figura 2.6 – Cargas acumuladas nas placas do capacitor.



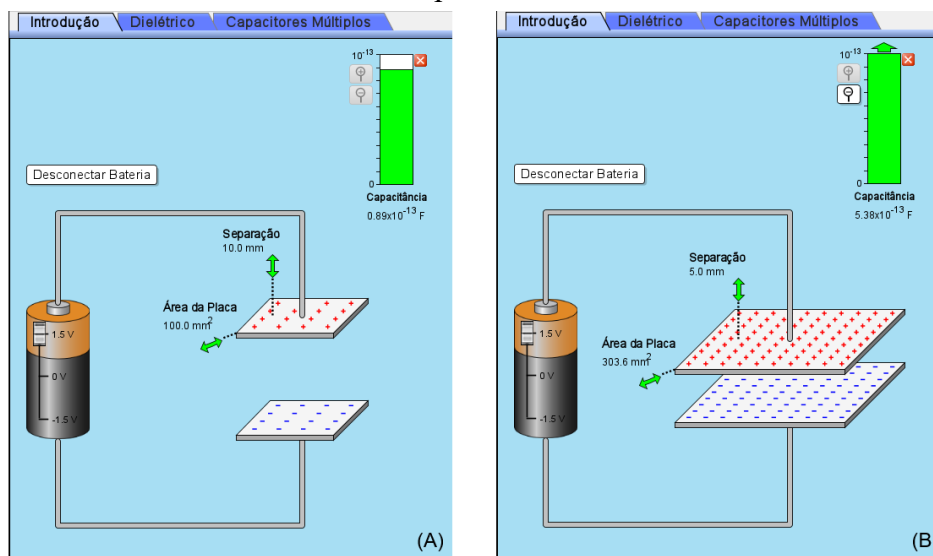
Fonte: PhET

Importante refletir que as cargas não atravessam de uma placa para outra devido ao meio isolante entre as placas, neste caso, o ar.

4 – Mudança na geometria do capacitor

Marque a caixa “Capacitância” e nas setas de cor verde que indica “Área da Placa” e “Separação”, varie e note a mudança no valor da capacitância.

Figura 2.7 – (A) Capacitância nas condições iniciais do simulador indicando valor de $8,9 \times 10^{-14} F$. (B) Capacitância de $5,38 \times 10^{-13} F$ após alterar a área e a distância entre as placas.



Fonte: PhET

A mudança nas dimensões das placas alterou a capacitância do capacitor. Levando a seguinte reflexão:

Pensando no análogo biológico, a membrana plasmática apresenta grande área e pequena separação entre as “placas”. Essa configuração permite a célula armazenar quantidade significativa de carga sem a necessidade de alta voltagem biológica, permitindo o coração manter o potencial de repouso (célula carregada pronta para disparar) e funcionando como um “filtro” de estímulos elétricos rápidos, garantindo que o impulso cardíaco se propague de forma suave e coordenada, evitando uma arritmia “choque desordenado”.

3. Corrente Elétrica

3.1. Objetivos

- Compreender o conceito de corrente elétrica
- Interpretar o significado de densidade de corrente elétrica
- Entender a velocidade de deriva do elétron na corrente elétrica
- Compreender a atuação do campo elétrico na propagação do sinal elétrico
- Estabelecer relações com o movimento dos íons nas células cardíacas

3.2. Situação Problema

Em 1887, o fisiologista britânico Augustus Waller realizou algo que jamais havia sido tentado. Colocou eletrodos na superfície do corpo de um voluntário e conectou-os a um galvanômetro, um instrumento sensível o suficiente para detectar pequenas correntes elétricas. O ponteiro oscilou. A cada batimento do coração, uma corrente elétrica percorria o corpo do voluntário e movia o ponteiro do aparelho. Era a primeira vez na história que uma corrente elétrica gerada pelo coração humano havia sido medida e registrada.

O que Waller havia detectado não era apenas uma curiosidade biológica. Era a prova de que o coração, a cada batimento, provoca o movimento ordenado de cargas elétricas, primeiro dentro das células cardíacas, depois pelo tecido ao redor, e finalmente pela superfície do corpo inteiro até os eletrodos. Esse movimento de cargas é exatamente o que chamamos de corrente elétrica, não um relâmpago único e isolado, mas um fluxo contínuo e ordenado de partículas carregadas, mantido enquanto houver uma diferença de potencial sustentando o movimento.

O nó sinoatrial gera essa diferença de potencial a cada ciclo. As cargas, neste caso, íons positivos e negativos em meio aquoso, começam a se mover. Uma corrente flui. O coração contrai. E o ciclo recomeça, 60 a 100 vezes por minuto, durante toda a vida, sem que a pessoa precise pensar nisso uma única vez.

Pense nas seguintes questões:

- 1) O que é necessário para que uma corrente elétrica exista em um circuito? O que a origina e o que a mantém?
- 2) Qual a diferença entre cargas em repouso e cargas em movimento ordenado e por que essa diferença importa para definir corrente elétrica?
- 3) Se o nó sinoatrial parar de gerar diferença de potencial, o que acontece com a corrente no sistema de condução cardíaca e o que isso significa para o coração?

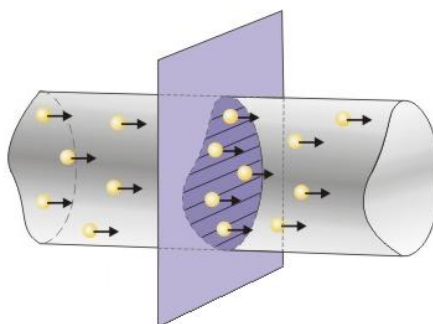
3.3. Desenvolvimento

3.3.1 Conceito Físico

Ao ligar um fio condutor as placas de um capacitor carregado ou em uma fonte de tensão, o equilíbrio eletrostático é desfeito, pois as extremidades do fio estão com potenciais diferentes. Neste instante, surgirá uma corrente elétrica, resultado do movimento de elétrons livres que se deslocam da placa negativa para a positiva passando pelo fio. Tomando uma seção transversal do fio condutor, ver figura, define-se intensidade média de corrente elétrica num intervalo de tempo t a $t + \Delta t$, como,

$$i_m = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (3.3.1)$$

Figura 3.1 – Elétrons (amarelo), atravessando uma seção do fio após ser submetido a uma diferença de potencial, caracterizando a corrente elétrica.



Fonte: Adaptado de Lemes, 2013⁷

Para uma corrente que varia como tempo, temos a corrente elétrica instantânea, definida,

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (3.3.2)$$

onde, ΔQ é a quantidade de carga que atravessa a seção do fio e Δt o tempo. No SI, a unidade de corrente é o ampère (A), equivalente a coulomb por segundo (C/s).

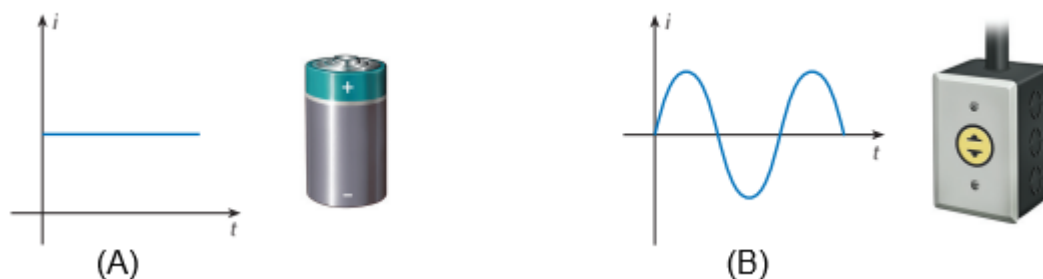
Quando a corrente apresenta sentido e intensidade constantes ao longo do tempo, seu valor não varia. Nesse caso, a corrente elétrica média é igual em qualquer intervalo de tempo e, consequentemente, coincide com o valor da corrente instantânea. De modo geral, esse tipo de corrente é denominado corrente contínua.

$$i = i_m \quad (3.3.3)$$

⁷ <https://fisicaidesa3.blogspot.com/2013/03/aula-4-corrente-eletrica.html>. Acesso 08 de março de 2026.

Além deste tipo de corrente, importante citar a corrente alternada, que altera periodicamente a intensidade e o sentido, ver Figura. As tomadas residenciais fornecem esse tipo de corrente com uma frequência de 60 Hz.

Figura 3.2 – Representação gráfica da corrente contínua fornecida por uma pilha (A) e da



corrente alternada (forma senoidal) disponibilizada nas tomadas residenciais.

Fonte: Ramalho, Nicolau, Toledo, 2009

3.3.2 Interpretação Física

Um grande obstáculo no ensino da eletrodinâmica é o "modelo mental do projétil", no qual o aluno imagina que a corrente elétrica é um elétron viajando em altíssima velocidade do interruptor até a lâmpada. O professor deve mediar a desconstrução desse modelo através de conceitos fundamentais, indo além da simples contagem de cargas no tempo.

I. O Campo como Maestro e a Corrente como Resposta

A corrente elétrica deve ser compreendida como uma manifestação coletiva do movimento de cargas. No entanto, para além do valor global medido em Amperes, é fundamental entender a Densidade de Corrente $\vec{j}$. Enquanto a corrente i é uma grandeza escalar que nos diz "quanto" flui, o vetor $\vec{j}$ nos diz "como" e "por onde" esse fluxo se distribui espacialmente. Matematicamente a densidade de corrente se relaciona com a corrente na forma,

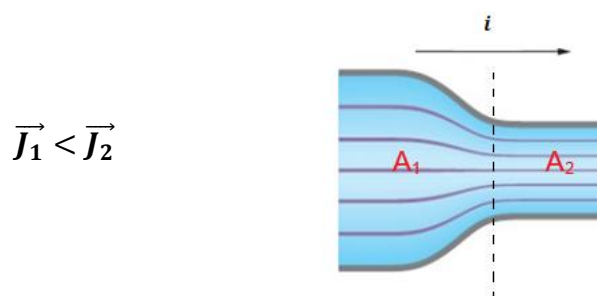
$$J = \frac{i}{A} \quad (3.3.4)$$

II. A Geometria e o Fluxo Local

Em regiões onde a área de seção transversal é menor, as cargas tendem a se concentrar mais. Interpretamos isso ao tomar a corrente elétrica com a soma das densidades de corrente em cada ponto do condutor. Mesmo que a corrente total seja uniforme ao longo do condutor

(conservação de carga), se a área diminuir a intensidade do fluxo local ($\vec{J}$) vai aumentar, ver a figura a seguir, indicando que a corrente possui um caráter local.

Figura 3.3 – Linhas de corrente elétrica para indicar a densidade de corrente $\vec{J}$ num condutor.



Fonte: Adaptado de Halliday e Resnick, 2016

III. O Campo Elétrico como "Motor"

O movimento das cargas não ocorre de forma espontânea. A corrente elétrica só se estabelece quando há um campo elétrico $\vec{E}$ no interior do condutor, atuando como o "motor" do sistema. A relação fundamental que o docente deve mediar é a Lei de Ohm em sua forma microscópica,

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.3.5)$$

no qual, σ é a condutividade do material e $\vec{E}$ o campo elétrico estabelecido no interior do condutor.

Logo, a corrente não é simplesmente um fluxo. Ela é uma resposta local dos portadores de carga ao campo elétrico estabelecido no interior do condutor pela diferença de potencial. Assim, quando o campo é nulo ($E = 0$), o módulo da densidade também é nulo ($J = 0$), implicando em ausência de corrente elétrica. Interpretar a corrente dessa forma retira o foco da "pilha" e o coloca no campo elétrico que preenche o espaço.

IV. A Velocidade de deriva e a propagação do sinal

Embora a resposta do sistema seja quase instantânea, o movimento real das cargas ocorre com velocidades baixíssimas. O funcionamento imediato de um dispositivo não depende do deslocamento individual das cargas ao longo de todo o percurso, a chamada velocidade de deriva, mas da propagação do campo elétrico. A velocidade de deriva, indica a rapidez com que os elétrons se movem no interior do condutor devido a ação do campo elétrico. Contudo, o módulo desta velocidade é da ordem de 10^{-4} m/s para uma corrente residencial convencional, ou seja, em 10 segundos percorre uma distância de 1 mm.

Logo que o circuito é fechado, o campo elétrico se estabelece no condutor a uma velocidade próxima à da luz. Todos os elétrons, que já preenchem o fio distribuídos em sua superfície, recebem a "ordem" de movimento simultaneamente devido a força elétrica sentida por cada portador. O campo "empurra" todas as cargas simultaneamente, como uma pressão que se propaga por uma mangueira já cheia de água. Assim, a corrente elétrica deve ser interpretada como um processo dinâmico, o campo sinaliza, o meio responde e a geometria distribui.

3.4 Analogia biológica

Transpondo esses conceitos para o coração, substituiremos o fluxo de elétrons em metais pela Corrente Iônica em meios eletrolíticos.

A. Os Portadores de carga

A primeira transposição didática ocorre na natureza do que se move. No condutor metálico, os portadores são elétrons livres, partículas de massa desprezível que se deslocam na rede cristalina. No sistema cardíaco, os portadores de carga são os íons, em especial o sódio (Na^+) e o potássio (K^+) que são milhares de vezes mais massivos e possuem características químicas. Enquanto o elétron responde apenas ao campo elétrico, o íon responde também ao Gradiente Eletroquímico (uma combinação de força elétrica e diferença de concentração).

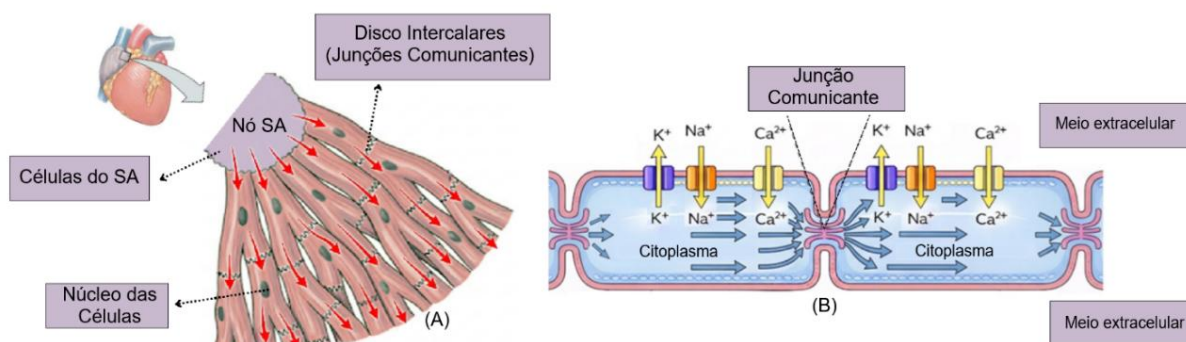
B. A Corrente nas Células Cardíacas

Nos metais, a corrente elétrica flui majoritariamente ao longo do fio. Na biologia, a corrente cardíaca é bidimensional, onde:

- Corrente Axial – Fluxo de íons positivos (em especial Na^+), que se desloca dentro da célula, conduzindo essa carga para uma célula vizinha através das Junções Comunicantes⁸(Gap Junctions) que atuam como conectores entre cabos.
- Corrente Transversal (Membrana) – Fluxo de íons que atravessa a bicamada fosfolipídica da membrana através dos canais iônicos. O que chamamos de “impulso nervoso” é, na verdade, uma sucessão de correntes transversais que descarregam e carregam localmente a membrana. Para o caso da física, seria a corrente que descarrega o capacitor ao ligá-lo num circuito fechado e carrega ao conectá-lo a uma bateria.

⁸ O professor pode explicar que a geometria dessas conexões dita a resistência do "circuito cardíaco". Se as junções fecham (devido a uma isquemia, por exemplo), a densidade de corrente cai, o fluxo local é interrompido e a arritmia surge.

Figura 3.4 – Representação da corrente axial (setas vermelhas) partindo do Nó Sinoatrial (SA) percorrendo as células cardíacas que estão ligadas pelos discos intercalares (A). Corrente elétrica axial (setas azuis) percorrendo o interior das células (citoplasma), atravessando as junções comunicantes, enquanto a corrente elétrica transversal (setas amarelas) se estabelece no fluxo de íons através dos canais iônicos (B).



Fonte: Adaptado de Silverthorn (2017).

C. Densidade de corrente, Geometria e Fluxo local

Da mesma forma que a densidade de corrente J aumenta no momento que um fio condutor apresenta um estreitamento ao manter a intensidade de corrente. Nas células cardíacas verifica-se esse comportamento nas conexões entre elas, uma vez que, essas ligações são realizadas por minúsculos poros (junções comunicantes). O sinal elétrico passa de uma célula larga para esses poros estreitos, aumentando a densidade de corrente.

D. Propagação de Sinal

No fio, o elétron se movimenta lentamente a milímetros por segundo, mas o campo elétrico se propaga ao longo do condutor com velocidade próxima à da luz. Já no tecido cardíaco, a propagação do sinal elétrico ocorre pela ação conjunta da corrente transversal, associada às correntes iônicas através da membrana e responsável pela despolarização local, e da corrente axial, que propaga essa diferença de potencial para as células vizinhas. Dessa forma, a despolarização de uma célula eleva o potencial da célula adjacente até o limiar, induzindo a abertura de canais iônicos dependentes de voltagem e garantindo a propagação contínua do sinal elétrico no tecido cardíaco.

3.5 Limitações da analogia

Apesar das semelhanças, é importante reconhecer que existem diferenças fundamentais entre os sistemas. Por isso o professor deve estar atento às seguintes distinções;

1. Portadores

No condutor metálico, o elétron é tratado como uma unidade de carga intercambiável. Na biologia, o íon possui uma identidade química que vai além da sua carga elétrica.

- Um elétron não altera a estrutura do fio. Já o fluxo de íons de Cálcio (Ca^{2+}), por exemplo, altera a conformação de proteínas contrateis.
- Ao trocar íons de Cálcio por outro de mesma carga, a corrente elétrica seria similar, porém alteraria o funcionamento do coração, já que os canais são específicos para a forma e tamanho do íon.

2. Geometria

A analogia da densidade de corrente ($\vec{J}$) em um funil sugere que o fluxo aumenta apenas por uma restrição geométrica fixa.

- As Junções Comunicantes não são apenas "buracos" no caminho. Elas são proteínas dinâmicas que podem "fechar a porta" se a célula vizinha estiver danificada (por excesso de acidez ou cálcio).
- No metal, a densidade de corrente é governada puramente pela geometria do condutor. Na biologia, a densidade de corrente é governada pela regulação metabólica. O "fio" biológico decide se quer ou não deixar a corrente passar.

3. Velocidade e campo

A analogia dos dominós descrita no fim da seção anterior, é perfeita para explicar a velocidade do sinal, mas sobre a origem da energia, temos que:

- Para os dominós caírem, você precisa de um empurrão inicial e, para repetir o processo, alguém deve reerguê-los manualmente. No coração, o sistema se "reergue" sozinho gastando ATP (energia química).
- A propagação no fio de cobre depende da energia fornecida por uma fonte de tensão externa (fem). No coração, cada trecho da membrana é sua própria "bateria" e "interruptor". É um sistema fora do equilíbrio termodinâmico que mantém sua própria prontidão para o disparo.

4. Interpretação do Estímulo

Se o coração fosse feito de fios de cobre em vez de células, o que aconteceria se você desse um susto nele?

Inicialmente considere que o “Susto” seja um “Estímulo Elétrico”, pois quando uma pessoa se assusta ela sente um tranco no corpo, um leve tremor, e depois percebe o coração

aumentar os batimentos, devido ao controle exercido pelo sistema nervoso, que atua sobre o sistema elétrico do coração. Como o coração apresenta células excitáveis, que além da condução de eletricidade, elas:

- respondem ao estímulo
- regulam o ritmo
- controlam a intensidade do sinal que se propaga ao longo do coração

Agora se o coração fosse um conjunto de fios de cobre, a resposta ao susto seria bem diferente,

- não haveria aumento nos batimentos
- nem ritmo organizado e controle do sinal

em vez disso, dois cenários poderiam ser possíveis,

Resposta instantânea e sem controle – O estímulo elétrico se propagaria imediatamente, sem modulação. Como ao ligar uma lâmpada, a corrente passa, sem a “interpretação” do sinal.

Perturbação caótica – Sem mecanismos biológicos de controle, o sistema poderia entrar em um comportamento desorganizado. Como um curto ou ruído elétrico, sem batimentos organizados.

Tabela 3.1 – Comparação entre a física dos metais e a biofísica do coração.

CONCEITO FÍSICO	METAIS	FUNÇÃO	MIÓCITOS	FUNÇÃO
PORTADORES DE CARGA	Elétrons Livres	Transporte de carga negativa com massa desprezível.	Íons ⁹	Gatilho químico para a contração muscular.
MEIO CONDUTOR (σ)	Rede cristalina sólida	Oferecer caminho de baixa resistência ao fluxo.	Soluções eletrolíticas (meio intracelular e extracelular)	Manter gradientes de concentração para a vida.
DENSIDADE DE CORRENTE (J)	Corrente por unidade de área do fio	Distribuição espacial do fluxo elétrico.	Flux iônico local na membrana e nas Junções Comunicantes	Concentrar o sinal para "saltar" entre as células.

⁹ **A massa importa:** Destaque que, enquanto o elétron é "leve" e rápido para responder ao campo, o íon é um "gigante" massivo. Isso explica por que a eletrônica funciona em Gigahertz (*GHz*), mas o coração opera em Hertz (*Hz*).

VELOCIDADE DE DERIVA (v_d)	Movimento líquido lento ($\approx 1mm/s$)	Estabelecer a taxa de fluxo de carga no tempo.	Travessia microscópica dos canais iônicas	Mudança local de voltagem que abre canais vizinhos.
CAMPO ELÉTRICO/SINAL	Propagação próxima à velocidade da luz	Transmissão instantânea de energia/informação.	Onda de despolarização e repolarização (0,01 a 4 m/s)	Coordenação rítmica e contração sincronizada.

Fonte: Próprio autor.

3.6 Proposta de Simulador

O PhET Kit CC permite observar o fluxo de elétrons, medir corrente com amperímetro virtual e conectar o conceito de corrente ao impulso iônico na condução cardíaca.

Link:

https://phet.colorado.edu/sims/html/circuit-construction-kit-dc/latest/circuit-construction-kit-dc_all.html?locale=pt_BR

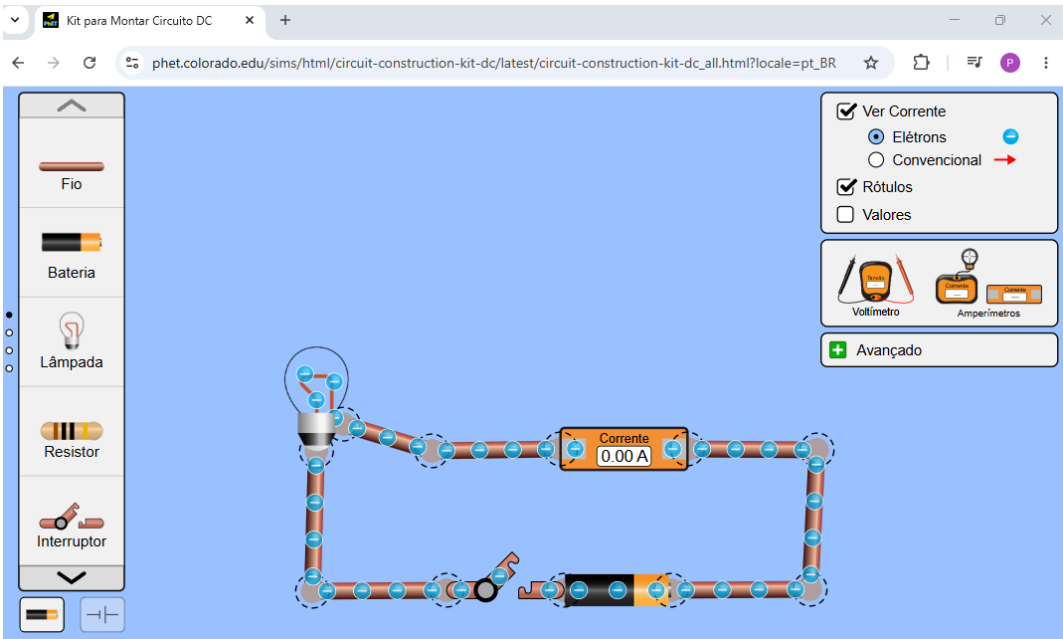
1 – Abrindo o simulador

Acessando o link, clique para iniciar a simulação e após na opção “Lab”.

2 – Montando o circuito

Adicione uma bateria, uma lâmpada, um interruptor e o amperímetro conectando-os conforme a figura a seguir.

Figura 3.5 – Circuito montado no simulador PhET.



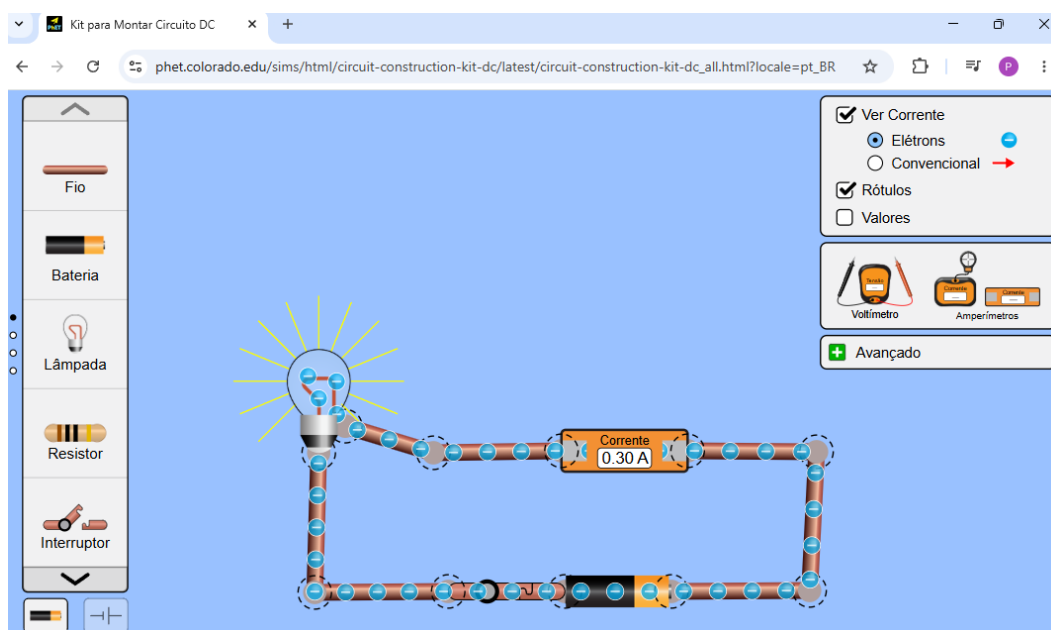
Fonte: PhET

Ao ligar o interruptor, note que os elétrons se movem devagar, ainda sim, a lâmpada acende instantaneamente, devido ao campo elétrico estabelecido no fio, empurrando todos os elétrons ao mesmo tempo.

3 – Modificando o valor da corrente

Ao clicar na Lâmpada, irá abrir na parte inferior da tela uma janela que nos possibilita alterar a resistência. Altere o valor, verificando o valor da corrente medido no amperímetro.

Figura 3.6 – Verificando a mudança na corrente ao modificar a resistência da lâmpada.

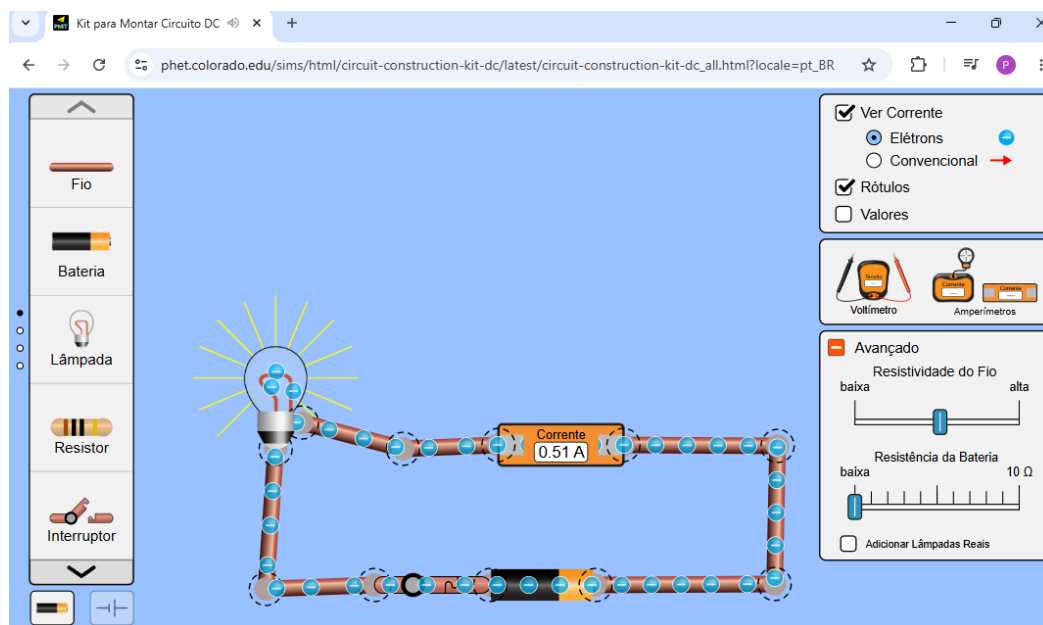


Fonte: PhET

Aqui introduzimos a relação entre tensão, corrente e resistência. O que mais a frente definiremos matematicamente como a Primeira Lei de Ohm.

Retorne com a resistência da lâmpada para $10\ \Omega$ e desta vez clique na aba “Avançado” e altere a resistência do fio verificando a mudança na intensidade da corrente.

Figura 3.7 – Verificando a mudança na corrente ao modificar a resistência dos fios.



Fonte: PhET

A corrente também diminui, dessa forma sendo interessante a apresentação desta simulação para introduzir a Segunda Lei de Ohm. Tornando interessante a seguinte reflexão:

“No circuito elétrico do coração, a natureza projetou estruturas perfeitamente otimizadas usando conexões de variadas resistências (2ª Lei de Ohm) garantindo que o pulso elétrico viaje o mais rápido possível onde é mais necessário. Desse modo permitindo que os ventrículos só encham de sangue após o esvaziamento dos átrios.

*Isto ocorre devido a diminuição da corrente elétrica, implicando numa redução na velocidade média de avanço dos elétrons (velocidade de deriva, v_d), já que a corrente é diretamente proporcional a essa velocidade ($i = n * A * q * v_d$). Ou seja, os elétrons encontram mais “obstáculos” para avançar.”*

4. Resistência Elétrica e Lei de Ohm

4.1. Objetivos

- Compreender o conceito de resistência elétrica como oposição ao fluxo de cargas
- Interpretar a dependência da resistência em função da geometria do condutor
- Analisar qualitativamente o efeito da resistência no fluxo de corrente
- Interpretar a Lei de Ohm
- Identificar análogos biológicos para resistores
- Explicar a importância funcional da resistência no coração
- Explorar os limites dos modelos físicos e biológicos

4.2. Situação Problema

Em janeiro de 2012, pesquisadores da Universidade de Michigan publicaram um estudo que chamou a atenção da comunidade científica. Eles haviam mapeado, com precisão sem precedentes, a velocidade com que o impulso elétrico percorre diferentes regiões do coração humano. Os resultados confirmaram algo que os cardiologistas já suspeitavam, mas nunca haviam medido com tanta clareza. O impulso não viaja pelo coração de forma uniforme, ele se arrasta lentamente pelo nó atrioventricular, pouco mais de 5 centímetros por segundo e dispara pelas fibras de Purkinje a quase 4 metros por segundo. A diferença é de quase 80 vezes entre os trechos mais lentos e os mais rápidos do mesmo sistema.

Essa variação não é um defeito de fabricação. É um projeto. O coração precisa que o impulso chegue devagar em alguns pontos (para dar tempo aos átrios de terminarem de se contrair antes que os ventrículos comecem) e que chegue rapidamente em outros, para que toda a musculatura ventricular seja acionada quase ao mesmo tempo, garantindo uma contração coordenada e eficiente. O sistema de condução cardíaca regula essa velocidade da mesma forma que a engenharia elétrica regula o fluxo de corrente em um circuito, controlando a resistência do caminho.

Pense no que acontece em uma rodovia, quanto mais estreita e cheia de obstáculos, mais devagar o tráfego flui. Quanto mais larga e livre, mais rápido. O mesmo princípio governa tanto o trânsito de carros em uma cidade quanto o fluxo de elétrons em um fio condutor e o fluxo de íons em uma fibra cardíaca.

Pense nas seguintes questões antes de começarmos:

- 1) O que determina a velocidade com que uma corrente elétrica percorre um condutor?
Quais propriedades do material e da geometria estão envolvidas?

- 2) Se a resistência de um trecho do sistema de condução cardíaca aumentasse por doença ou lesão, o que aconteceria com a corrente e com a coordenação do batimento?
- 3) O coração distribui o impulso elétrico para os dois ventrículos ao mesmo tempo, por caminhos independentes e em paralelo. Se um desses ramos sofresse um bloqueio aumentando drasticamente sua resistência, como o outro ramo seria afetado? O coração pararia completamente ou o outro ventrículo continuaria sendo acionado?
- 4) Em um circuito com resistores em série, a corrente que passa pelo primeiro resistor é a mesma que passa pelo segundo. No sistema de condução cardíaca, o impulso percorre o nó AV antes de chegar ao feixe de His, ou seja, passa por dois "resistores" em sequência. O que acontece com a intensidade do sinal (corrente elétrica) ao longo desse caminho?

4.3. Desenvolvimento

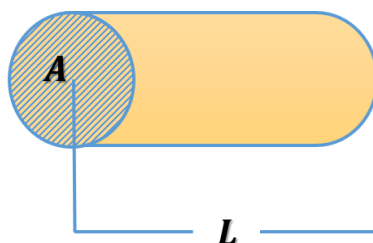
4.3.1 Conceito Físico

Quando a corrente elétrica atravessa um condutor, os elétrons que estão em movimento não encontram caminho livre. Tal dificuldade está relacionado a uma característica chamada de Resistência Elétrica, que depende da geometria e da temperatura do material que compõem o condutor, matematicamente expresso pela Segunda Lei de Ohm,

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \quad (4.3.1)$$

aqui, ρ representa a resistividade do material, L o comprimento e A a área da seção transversal. A unidade de resistência no SI é o ohm (Ω), representa volt por ampère (V/A).

Figura 4.1 – Representação de um fio condutor.



Fonte: Macuco¹⁰, 2024

¹⁰ <https://aprovatotal.com.br/leis-ohm/>. Acesso dia 05 de março de 2026

Tabela 4.1 – Resistividade de alguns materiais a 20 °C

<i>Material</i>	<i>Resistividade em Ωm</i>
<i>Prata</i>	$1,58 \times 10^{-8}$
<i>Cobre</i>	$1,72 \times 10^{-8}$
<i>Ouro</i>	$2,44 \times 10^{-8}$
<i>Tungstênio</i>	$5,60 \times 10^{-8}$
<i>Ferro</i>	$9,92 \times 10^{-8}$
<i>Silício</i>	$6,40 \times 10^2$
<i>Vidro</i>	$10^{10} \text{ a } 10^{14}$

Fonte: Adaptado de Halliday, Resnick, 2016

Contudo, existem dispositivos que desempenham a função de transformar energia elétrica em energia térmica (Efeito Joule) ou limitar a intensidade da corrente elétrica em circuitos eletrônicos. A esses equipamentos, denominado Resistores, utilizamos a versão macroscópica da Lei de Ohm, para definir a relação entre a diferença de potencial aplicada, a corrente que atravessa o sistema e a resistência utilizada,

$$U = R \cdot i \quad (4.3.2)$$

a um resistor que obedece à esta lei, é chamado de resistor ôhmico. Como o resistor não depende da ddp nem da corrente, fica estabelecido uma relação de primeiro grau entre essas grandezas quando o resistor é ôhmico, onde é válida a relação,

$$tg\theta = \frac{U}{i} = R \quad (4.3.3)$$

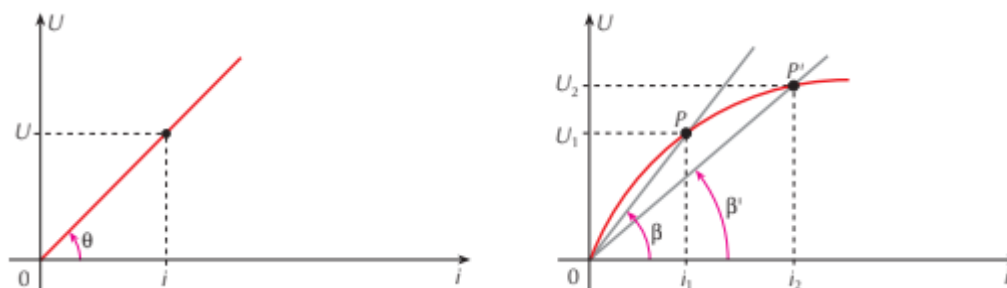
quando não obedece a esta lei, define-se a resistência aparente (R_{ap}) em cada ponto da curva característica que relaciona ddp e a corrente elétrica,

$$R_{ap} = \frac{U_1}{i_1} \quad e \quad R'_{ap} = \frac{U_2}{i_2} \quad (4.3.4)$$

Nos condutores não lineares, a curva característica é sempre determinada experimentalmente. A resistência aparente em cada ponto será numericamente igual ao coeficiente angular da secante que passa pela origem e pelo ponto considerado

$$tg\beta = R_{ap} \quad e \quad tg\beta' = R'_{ap} \quad (4.3.5)$$

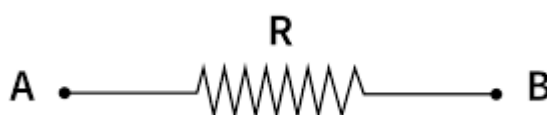
Figura 4.2 – Curva característica de um resistor ôhmico e de um resistor não ôhmico.



Fonte: Ramalho, Nicolau, Toledo, 2009

Num circuito elétrico, um resistor é representado pelo símbolo ilustrado na figura 4.3, colocando o acima ou abaixo, o valor de sua resistência elétrica.

Figura 4.3 – Representação de um resistor num circuito elétrico.



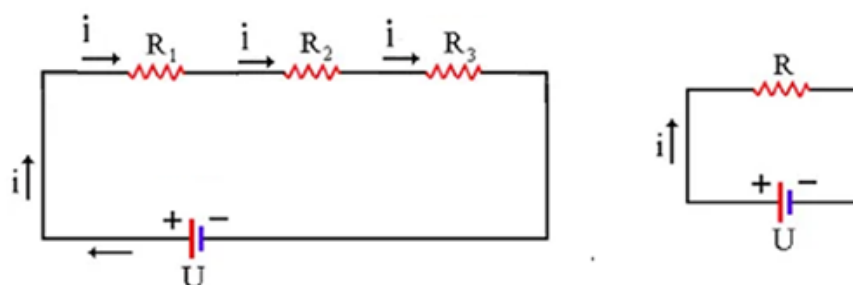
Fonte: Ramalho, Nicolau, Toledo, 2009

Na construção de um circuito elétrico, denominamos Resistência Equivalente (R_{eq}), o valor da resistência que atua igualmente as resistências que estão conectadas em associação (Série ou Paralelo), podendo assim substituí-las.

Na associação em série, o R_{eq} é definido pela soma dos resistores que estão conectados, isto se deve ao fato que a corrente que passa por todos os resistores em ser a mesma como indica a figura.

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (4.3.6)$$

Figura 4.4 – Representação de uma associação de resistores em série.

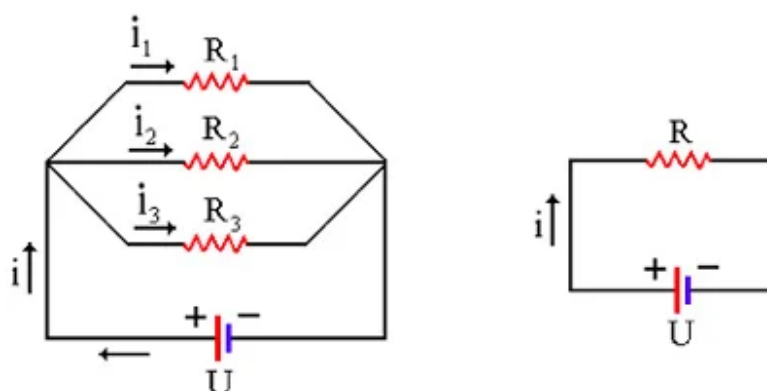


Fonte: Próprio autor.

Enquanto isso, na associação em paralelo, o inverso da resistência equivalente da associação é igual à soma dos inversos das resistências associadas. Logo, a R_{eq} para este tipo de associação é sempre menor que na associação em série.

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (4.3.7)$$

Figura 4.5 – Representação de uma associação de resistores em série.



Fonte: Próprio autor.

Note que, a corrente elétrica se divide nos resistores, no qual a corrente total é dada por,

$$i = i_1 + i_2 + i_3 \quad (4.3.8)$$

Seja qual for o tipo de associação, aos resistores está associado o Efeito Joule, transformação de parte da energia elétrica em energia térmica. A taxa com que essa energia é transformada é chamada de potência elétrica, expressa por,

$$P = i \cdot U \quad (4.3.9)$$

no SI, potência elétrica tem o watt (W) como unidade de medida.

Aplicando a lei de Ohm (4.3.4), obtemos outras formas de expressar a potência, neste caso dissipada, em função da resistência dos resistores ou dos materiais,

$$P = R \cdot i^2 \quad (4.3.10)$$

ou

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (4.3.11)$$

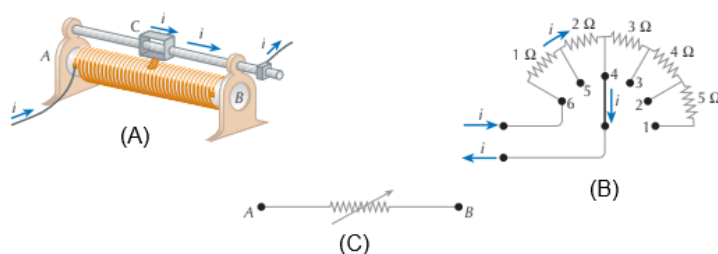
assim, para uma mesma corrente, a potência dissipada aumenta à medida que trocamos a resistência por outra maior.

Na prática laboratorial e industrial, o controle da potência dissipada em um circuito está diretamente relacionado ao controle da resistência elétrica. Em muitas aplicações, não se deseja uma resistência fixa, mas sim a possibilidade de ajustá-la conforme a necessidade do sistema. Para isso, utilizam-se resistores variáveis, como os reostatos, que permitem controlar tanto a intensidade da corrente quanto a queda de tensão no circuito.

Os reostatos são controladores de intensidade de corrente que funcionam alterando o valor de resistência. O de cursor, é um resistor constituído por um fio metálico enrolado em um suporte isolante. Ao deslizar um cursor, aumentamos ou diminuimos o trajeto da corrente, modificando a resistência, assumindo valores entre zero e o valor total de resistência do fio. Outro formado de reostatos é o de pontos, construído através de uma associação em série com pontos intermediários nos quais pode ser feita a ligação ao circuito, assumindo valores determinados de resistências entre valor mínimo e valor máximo.

Figura 4.6 – Reostato de cursor, ao modifica o cursor C modifica o comprimento do trajeto da corrente modificando a resistência (A). Reostato de pontos, ao conectar nos pontos apresenta valores definidos, como mostrado na figura, na posição 4 a $R = 1\Omega + 2\Omega = 3\Omega$ (B).

Representação de um reostato num circuito (C).



Fonte: Ramalho, Nicolau, Toledo, 2009

Em qualquer tipo de reostato, o valor da resistência é dinâmico e depende da intervenção externa (mecânica ou eletrônica).

4.3.2 Interpretação Física

Ao estudar a resistência elétrica, é comum tratá-la de forma puramente operacional, por meio de fórmulas. No entanto, para uma compreensão profunda, é fundamental interpretar o que esse conceito representa fisicamente no interior dos materiais condutores.

I. Natureza da Resistência: Colisões e Temperatura

A resistência elétrica não deve ser vista como uma "força de oposição" abstrata, mas como o resultado das colisões dos portadores de carga com a rede cristalina (em metais) ou com outras moléculas (em fluidos). Nesse processo, ocorre a conversão de energia elétrica em energia térmica, denominado Efeito Joule.

Essas colisões aumentam a agitação térmica dos átomos do condutor, elevando sua temperatura. Quanto maior a frequência dessas interações, maior será a dificuldade para o deslocamento das cargas e, conseqüentemente, maior a resistência. Essa relação é formalizada pela Segunda Lei de Ohm, que estabelece que a resistência depende da natureza do material (resistividade) e de suas dimensões geométricas.

A resistividade (ρ) varia com a temperatura. Para variações moderadas (até cerca de 100°C), podemos admitir uma variação linear. Nessas condições, a resistividade a uma temperatura (T) é dada por:

$$\rho = \rho_0 \cdot [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (4.3.13)$$

onde, ρ_0 é a resistividade a temperatura $T_0 = 20^\circ\text{C}$, valor geralmente adotado para a temperatura inicial (valores indicados na tabela 7), e α um coeficiente que depende da natureza do material. Em função da resistência, ficamos com,

$$R = R_0 \cdot [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (4.3.14)$$

II. A Primeira Lei de Ohm

A primeira lei de Ohm estabelece a relação entre tensão, corrente e resistência. Do ponto de vista físico, a diferença de potencial aplicada cria um campo elétrico no interior do material, que exerce força sobre as cargas, colocando-as em movimento. A resistência, por sua vez, regula o quanto esse movimento será dificultado.

Assim, a corrente elétrica é o resultado do equilíbrio entre a ação do campo elétrico (agente acelerador) e os mecanismos dissipativos internos (agente dificultador). É crucial enfatizar que, para materiais ôhmicos, a resistência é uma "identidade" do objeto, definida por sua fabricação e geometria, não dependendo da voltagem aplicada. Mudar a voltagem altera a corrente, mas não a resistência do componente.

III. Lógica das Associações

A forma como associamos resistores altera drasticamente a dinâmica do fluxo:

- Série – Deve ser interpretada como uma sequência de etapas obrigatórias. Como a corrente possui apenas um caminho, qualquer aumento de resistência em um componente prejudica todo o fluxo. A resistência equivalente é sempre maior que a maior resistência individual.

- Paralelo – Os resistores oferecem caminhos alternativos. Isso reduz a resistência equivalente, pois aumenta as "vias de escoamento" para as cargas. Ter mais caminhos facilita a movimentação global, resultando em uma R_{eq} sempre menor que a menor das resistências do conjunto.

IV. Potência Dissipada

A análise da potência está intrinsecamente ligada ao efeito Joule. O resistor não apenas dificulta o movimento, mas "cobra" um “pedágio” energético, convertendo energia elétrica em calor.

O fato de a potência dissipada depender do quadrado da corrente é um alerta crítico para sobrecargas: dobrar a corrente não dobra o calor gerado, mas o quadruplica. No contexto biológico, isso explica por que choques de alta intensidade causam danos térmicos irreversíveis e queimaduras profundas, já que o tecido humano atua como o resistor onde essa energia é dissipada.

Se expandirmos e substituir a segunda Lei de Ohm (4.3.1) na expressão da potência dissipada (4.3.11), encontraremos,

$$P = \frac{U^2}{\rho \cdot \frac{L}{A}} \rightarrow A = \frac{\rho \cdot L \cdot P}{U^2} \quad (4.3.14)$$

considerando a diferença de potencial elétrico (U) constante, a área da seção transversal do condutor é diretamente proporcional a potência e inversamente proporcional ao quadrado da tensão. Modelo utilizado pelas lâmpadas incandescentes¹¹, que utilizavam filamentos de tungstênio.

V. O Resistor como uma válvula de controle

A interpretação fundamental de um resistor variável é a de um regulador de fluxo. Utilizando uma analogia com sistemas hidráulicos, um resistor fixo é como um cano com diâmetro constante e o resistor variável funciona como uma torneira ou válvula.

- Controle em tempo real: Interpretar o reostato significa entender que a resistência pode ser uma variável de ajuste para manter o sistema em equilíbrio ou para disparar uma resposta específica.

¹¹ Quando a corrente elétrica atravessa o filamento de uma lâmpada incandescente, ocorre a transformação de energia elétrica em energia térmica devido às colisões dos elétrons que constituem a corrente elétrica com os átomos do filamento. À medida que a temperatura se eleva, torna-se mais intensa a emissão de energia radiante (ondas eletromagnéticas) pelo filamento. Entretanto, nem toda radiação emitida é visível. Por aquecimento, os átomos do filamento são excitados, isto é, seus elétrons passam para um nível energético mais elevado, saltando de uma órbita mais interna para outra mais externa. Quando o elétron volta a seu nível de energia anterior, ele emite, na forma de luz, a energia que recebeu, caso a frequência da radiação emitida esteja entre $4 \times 10^{14} \text{ Hz}$ e $7,5 \times 10^{14} \text{ Hz}$ (Ramalho, Nicolau, Toledo, 2009).

- Não-Linearidade e Dinâmica: Ao contrário do resistor ôhmico tradicional, o resistor variável introduz a ideia de que a relação entre U e i pode mudar instantaneamente se a geometria do material for alterada.
- O cursor como atuador: Em circuitos mais complexos, essa possibilidade de variação é fundamental, pois permite a implementação de mecanismos de controle e automação. Nesses casos, o sistema pode detectar alterações em determinadas grandezas elétricas, como corrente ou tensão, e ajustar sua própria resistência para manter o funcionamento dentro de condições desejadas.

4.4 Analogia biológica

Se o coração fosse um condutor perfeito (resistência zero), o sinal elétrico iria se propagar instantaneamente, fazendo com que átrios e ventrículos contraíssem ao mesmo tempo, impedindo o bombeamento de sangue. Portanto, no coração, a resistência elétrica é uma ferramenta fundamental para a sincronização e funcionamento.

A. Natureza da Resistência

Assim como a resistência em um metal, no coração ela surge da dificuldade que os íons (Na^+ , K^+ , Ca^{2+}) encontram ao atravessar os canais iônicos (poros proteicos) e as junções comunicantes.

- Geometria e 2ª Lei de Ohm: O citoplasma das células cardíacas e as junções comunicantes possuem uma resistividade (ρ) específica. De acordo com a segunda Lei de Ohm, células mais estreitas (menor A) ou caminhos de condução mais longos (maior L) impõem uma resistência maior no fluxo iônico.
- Sensibilidade Térmica: A condutividade dos canais iônicos é altamente sensível ao calor, o que explica o porquê estados febris podem causar taquicardia (aumento da frequência cardíaca), o aumento da temperatura corporal altera a cinética dos canais, reduzindo a resistência efetiva e acelerando o ritmo elétrico.

B. Membrana plasmática e a Resistência variável

No coração, não existem “botões” ou “cursos” mecânicos, mesmo assim a membrana celular se comporta como um conjunto de resistores variáveis automáticos. Essa resistência da membrana (R_m), varia com o estado dos canais iônicos, que no coração, são chamados de dependentes de voltagem. Pois, quem ajusta a resistência da membrana é a diferença de potencial (U). Quando a voltagem atinge um certo limiar, o "reostato biológico" gira automaticamente, reduzindo a resistência para o Sódio (Na^+), por exemplo, que permite a entrada deste íon modificando a carga do meio intracelular.

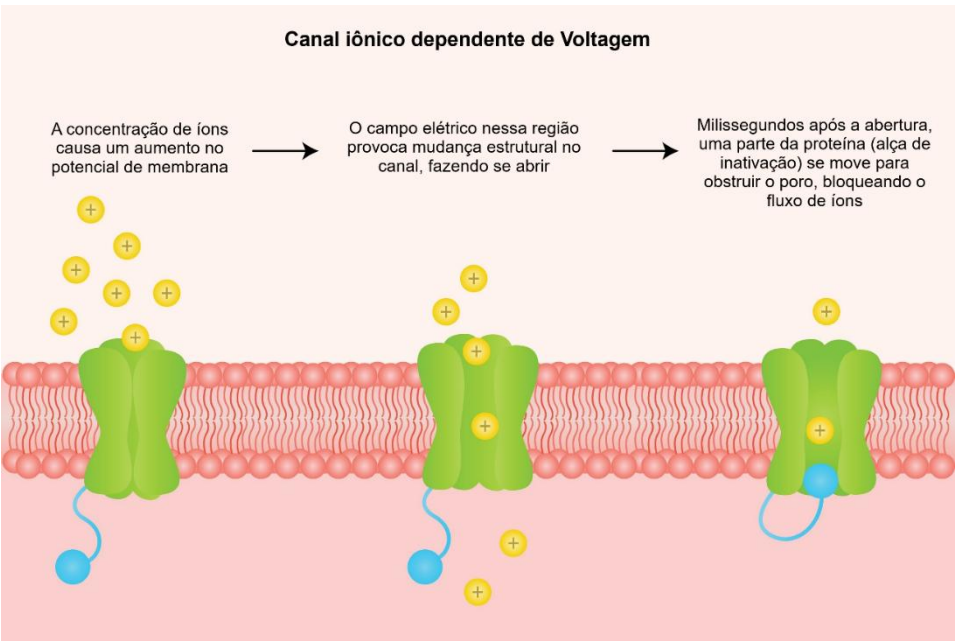
- Canais fechados: Alta resistência (como um reostato na posição máxima). A corrente iônica encontra dificuldade de fluir ou até mesmo impedida.
- Canais Abertos: Baixa resistência (como um reostato na posição mínima). O fluxo de íons dispara, causando a despolarização.

Tabela 4.2 – Comparação do controle do fluxo elétrico nos circuitos e no sistema de condução cardíaca

Característica	Resistor Variável	Membrana Celular
Mecanismo de ajuste	Deslocamento de um cursor ou posição	Mudança conformacional das proteínas (canais)
Agente controlador	Ação externa	A própria voltagem (Sensores de voltagem)
Resultado no fluxo	Aumento ou redução da corrente no fio	Disparo ou bloqueio do Potencial de Ação
Função	Ajustar volume, brilho, velocidade etc.	Decidir o momento exato da contração muscular

Fonte: Próprio autor.

Figura 4.7 – Representação da resistência variável da membrana modificando o fluxo iônico através da abertura e fechamento do canal iônico.



Fonte: Próprio autor.

C. O Nó atrioventricular (AV): O resistor de atraso

A aplicação mais didática da Primeira Lei de Ohm e da Associação em Série em meios biológicos, ocorre no Nodo Atrioventricular (AV). Este ponto funciona como um "gargalo" obrigatório para o sinal elétrico.

- O “Gargalo”: O AV é composto por células de pequeno diâmetro e poucas junções comunicantes, gerando uma alta resistência como prevê a segunda Lei de Ohm.
- O atraso necessário: Como o AV está em série com o restante do sistema, toda a corrente (i) deve passar por ele. A alta resistência causa uma queda na velocidade do sinal, gerando um atraso de aproximadamente 0,1 s.
- Função Biológica: Esse atraso é o que permite que o átrio termine de bombear sangue para o ventrículo antes que este comece a contrair. Permitindo o envio para os pulmões sangue pobre em oxigênio para ser oxigenado e após distribuindo para todo o corpo.

D. Fibras de Purkinje: Associação em Paralelo

Após passar pelo Nodo AV, o sinal atinge os ventrículos através das Fibras de Purkinje, que funcionam como uma vasta rede de resistores em paralelo.

Ao oferecer múltiplos caminhos simultâneos, o sistema ventricular reduz drasticamente a resistência total enfrentada pelo impulso. Isso permite que a corrente se espalhe quase instantaneamente por todo resto do músculo cardíaco.

Ao criar uma rede ramificada, o sinal elétrico tem múltiplos caminhos para atingir o mesmo destino (o músculo ventricular). Se um ramo for bloqueado, os outros ramos vizinhos, que estão em paralelo, continuam conduzindo a informação.

Adicionar resistores em paralelo diminui a resistência equivalente. Isso garante que, mesmo que o tecido cardíaco sofra pequenas variações de resistência ao longo da vida, a resistência total do sistema permaneça baixa o suficiente para que o sinal elétrico seja sempre rápido e eficiente.

E. Efeito Joule: Custo do Sinal e a Desfibrilação

A potência dissipada no funcionamento normal cardíaco é extremamente baixa, o que evita o aquecimento desnecessário dos tecidos. No entanto, o conceito de Efeito Joule permite entender a Desfibrilação.

Quando o coração entra em fibrilação (caos elétrico), aplica-se uma alta tensão (U) externa. Como o tecido humano possui uma resistência, essa descarga gera uma alta potência dissipada instantânea. O objetivo do choque é a despolarização de todas as células

simultaneamente, permitindo que o SA retome o controle do circuito. O professor deve destacar que o tempo do choque é da ordem de milissegundos para evitar que o Efeito Joule cause queimaduras nos miócitos.

4.5 Limitações da analogia

Como todo modelo físico aplicado à biologia, a analogia dos resistores possui fronteiras que o professor deve destacar.

1. Resistores Passivos vs. Membranas Ativas

Em circuitos elétricos convencionais, o resistor é um elemento passivo, ele não responde ao circuito, apenas oferece uma oposição constante ao fluxo de corrente, independentemente das condições ao seu redor. Sua resistência é, em primeira aproximação, fixa e independente da tensão aplicada.

Na membrana celular, essa resistência, mais corretamente interpretada como condutância variável, é altamente dinâmica e dependente do estado do sistema. Os canais iônicos não são simples aberturas, mas estruturas proteicas com sensores de voltagem, capazes de modificar sua conformação em resposta a variações no potencial elétrico. Assim, um aumento na diferença de potencial pode levar à abertura desses canais, reduzindo abruptamente a resistência da membrana.

Na sala de aula, o professor pode abordar que, enquanto um resistor se comporta como um obstáculo fixo ao fluxo de cargas, a membrana celular atua como um sistema regulador ativo, capaz de “decidir” quando permitir ou restringir a passagem de íons. Pode-se também comparar o resistor a uma roleta fixa de ônibus, enquanto a membrana cardíaca se assemelha a uma porta automática que só se abre diante de um estímulo específico, no caso, a voltagem.

2. O comportamento não ôhmico

A Primeira Lei de Ohm, descreve uma relação linear entre corrente e tensão: dobrando-se a tensão, dobra-se a corrente. Esse comportamento é observado em materiais ôhmicos, como metais em condições ideais.

Nas células cardíacas, não há essa linearidade. Seu comportamento é não-ôhmico, que apresenta curva característica $i \times U$ da membrana apresenta comportamento complexo, como retificação (preferência por um sentido de condução) e respostas abruptas a determinados limiares de voltagem.

Essa condutância da membrana depende simultaneamente da voltagem e do tempo, devido à dinâmica de abertura e fechamento dos canais iônicos. Assim, pequenas variações no potencial podem desencadear a abertura massiva de canais, produzindo aumentos

desproporcionais na corrente. Ou seja, enquanto em um resistor a corrente é proporcional à tensão, no sistema biológico a corrente pode crescer de forma abrupta e não previsível por uma relação linear simples.

3. O destino da energia

Nos circuitos elétricos, a potência dissipada em resistores é descrita pelo efeito Joule, no qual a energia elétrica é convertida em calor.

No sistema cardíaco, a dissipação de energia não tem como finalidade a produção de calor. Embora exista dissipação, ela é mínima e não representa o objetivo do processo. A energia associada ao fluxo de íons está majoritariamente relacionada à realização de trabalho biológico, como mudanças conformacionais em proteínas e ativação de mecanismos celulares.

A energia elétrica no sistema biológico é utilizada para produzir função, e não apenas para ser dissipada. Parte dessa energia está associada à manutenção de gradientes iônicos e ao funcionamento de proteínas de membrana. Como instrução para sala de aula, podemos utilizar que, em um resistor, a energia é dissipada como calor, como um pneu derrapando. No sistema biológico, a energia é utilizada para produzir efeitos organizados, como um motor que transforma energia em movimento.

4. O conceito de “Fio” ativo

Nos circuitos elétricos clássicos, há uma clara separação entre os elementos: a fonte de energia (pilha), o condutor (fio) e o elemento consumidor (carga).

No sistema cardiovascular, essa separação não é válida. A célula cardíaca desempenha simultaneamente múltiplas funções: ela gera diferenças de potencial, conduz o sinal elétrico e responde a esse sinal por meio da contração. Assim, o coração não pode ser interpretado como um circuito composto por elementos independentes, mas sim como um sistema integrado, no qual cada componente participa de múltiplos processos. Nesse sentido, a compreensão dos elementos elétricos fornece subsídios para interpretar o funcionamento do coração à luz de modelos de circuitos, respeitando, contudo, os limites dessa analogia.

É fundamental evitar que o estudante procure uma “bateria externa” no sistema biológico. O coração funciona como um circuito autossustentado, no qual as próprias células geram e mantêm os sinais elétricos necessários ao seu funcionamento.

Tabela 4.3 – Funções da resistência nos condutores e resistores em comparação com o sistema cardíaco.

<i>FENÔMENO FÍSICO</i>	<i>ELEMENTOS NOS CONDUTORES</i>	<i>FUNÇÃO</i>	<i>ELEMENTO BIOLÓGICO</i>	<i>FUNÇÃO</i>
<i>Oposição ao fluxo</i>	Resistor ou fio condutor	Limitar a corrente e causar queda de potencial.	Canais Iônicos e Junções Comunicantes.	Controlar a permeabilidade e a entrada/saída de íons.
<i>Geometria (2ª Lei de Ohm)</i>	Comprimento e área do fio	Definir a resistência intrínseca pela forma.	Nodo AV (células estreitas e longas).	Criar o atraso fisiológico (0,1 s) para enchimento dos ventrículos.
<i>Associação em Série</i>	Componentes em sequência.	Garantir que a corrente passe por etapas obrigatórias.	Via Nodo SA → Nodo AV.	Impor uma hierarquia temporal na contração das câmaras.
<i>Associação em Paralelo</i>	Divisão de ramos no circuito	Reduzir a R_{eq} e oferecer caminhos para a propagação do sinal.	Fibras de Purkinje (Rede ramificada).	Garantir sincronia rápida e segurança caso uma via falhe.

Fonte: Próprio autor

4.6 Proposta de Simulador

Use o PhET para explorar a associação de resistores em série e paralelo, para tornar visível o porquê de o coração escolher, a associação em paralelo para distribuir o impulso pelos ventrículos.

Link:

https://phet.colorado.edu/sims/html/circuit-construction-kit-dc/latest/circuit-construction-kit-dc_all.html?locale=pt_BR

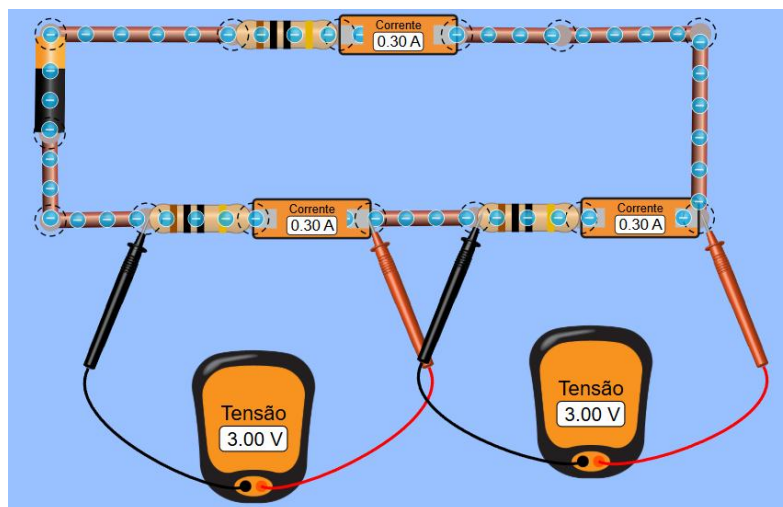
1 – Abrindo o simulador

Acessando o link, clique para iniciar a simulação e após na opção “Lab”.

2 – Montando o circuito em série

Adicione uma bateria, três resistores, três amperímetros e dois voltímetros conectando-os conforme a figura a seguir.

Figura 4.8 – Circuito com resistores em série



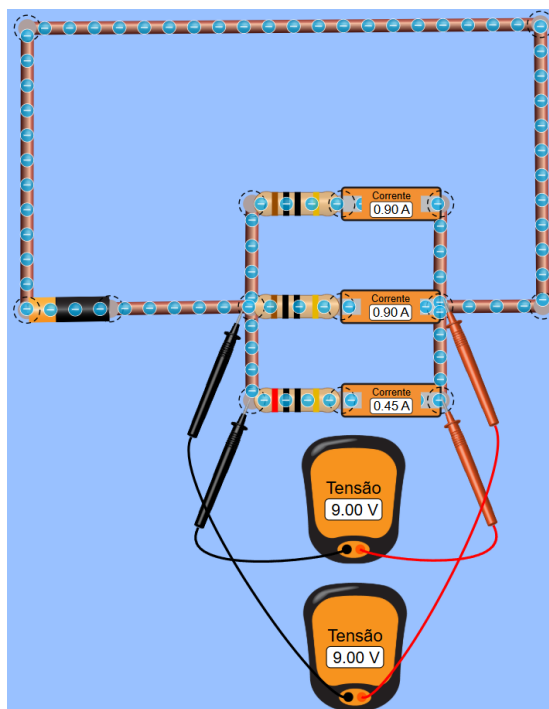
Fonte: PhET

Agora retire um dos resistores do circuito, para isto, clique em um dos resistores e exclua no ícone de lixeira que surge na caixa ao selecionar o equipamento.

3 – Montando o circuito em paralelo

Agora ligue os resistores em paralelo alterando um deles clicando no resistor e variando o valor da resistência, conforme a figura a seguir.

Figura 4.9 – Circuito com resistores em paralelo



Fonte: PhET

Novamente, retire um dos resistores do circuito, para isto, clique em um dos resistores e exclua no ícone de lixeira que surge na caixa ao selecionar o equipamento.

Aqui compare o observado ao associar os resistores em série e paralelo. Desta forma, focando na tensão e na corrente. A partir da observação, utilize a reflexão:

“O coração pulsa em sincronia graças à Segunda Lei de Ohm e à Associação em Paralelo. Nas Fibras de Purkinje, o maior diâmetro celular (maior área) reduz a resistência elétrica. Concomitantemente, os cardiomiócitos conectam-se por junções gap, organizando-se em uma gigantesca rede em paralelo (sincício funcional). Essa arquitetura reduz a resistência equivalente ao mínimo, permitindo que todos os setores sejam ativados sob a mesma tensão e o sinal viaje até 10 vezes mais rápido. Se a associação fosse em série, a resistência se somaria, tornando a condução lenta e gerando uma arritmia fatal. Enquanto no arranjo em paralelo, se uma célula falha por lesão, a corrente encontra caminhos alternativos e o sistema não para.”

5.Circuito RC

5.1. Objetivos

- Compreender o funcionamento de circuitos RC
- Definir e calcular a constante de tempo (τ) de um circuito RC.
- Interpretar gráficos de tensão e corrente em função do tempo (t).
- Relacionar o modelo físico com fenômenos bioelétricos

5.2. Situação Problema

Todo mundo já viveu essa situação, o celular marca 20% de bateria, você o conecta ao carregador e observa a porcentagem subindo, rápido no início, cada vez mais devagar conforme se aproxima dos 100%. Quando a bateria está muito baixa, os primeiros 20% chegam em minutos. Os últimos 5% podem levar quase o mesmo tempo que os anteriores 30%.

Esse comportamento não é um problema de software nem uma limitação do carregador. É Física! A velocidade com que um componente elétrico armazena energia não é constante, ela depende da diferença entre a tensão da fonte e a tensão que o componente já acumulou. No começo, essa diferença é grande e o carregamento é rápido. À medida que o componente vai se carregando, a diferença diminui e o processo vai desacelerando naturalmente, seguindo uma curva que não é uma reta, mas sim uma curva exponencial.

Esse mesmo comportamento acontece no coração, em cada batimento, fração de segundo a fração de segundo. O nó atrioventricular recebe o impulso gerado pelo nó SA e não o transmite imediatamente, ele o retarda por cerca de 0,15 segundo, exatamente como um capacitor que precisa de tempo para carregar antes de agir sobre o restante do circuito. Sem esse atraso, os átrios e os ventrículos contrairiam ao mesmo tempo, e o coração perderia grande parte da sua eficiência como bomba.

Pense nas seguintes questões:

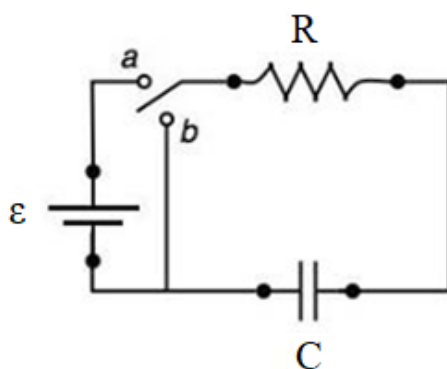
- 1) Por que a curva de carga de um capacitor não é uma linha reta? O que faz o processo ir ficando cada vez mais lento?
- 2) O que a constante de tempo $\tau = RC$ representa fisicamente e o que acontece com o circuito se τ for muito pequeno ou muito grande?

5.3. Desenvolvimento

5.3.1 Conceito Físico

A construção de muitos sistemas elétricos, vai além de um circuito apenas resistivo, que apresenta corrente elétrica invariante no tempo. Ligando um resistor em série a um capacitor, alimentado por uma fonte ideal de força eletromotriz ($\mathcal{E}$), podemos verificar uma dependência temporal tanto da corrente elétrica quanto a diferença de potencial estabelecida entre as placas do capacitor, a esse tipo de arranjo é chamado de circuito RC.

Figura 5.1 – Estrutura de um circuito RC, mostrando a associação entre o resistor (R) e o capacitor (C), além da chave que pode ser ligada nas posições “a” ou “b”.



Fonte: Marcos Pizzolatto, 2016¹²

A dependência temporal é resultado da possibilidade do capacitor acumular cargas temporariamente em suas placas. Dessa forma a corrente elétrica e a diferença de potencial não atingem instantaneamente seu regime estacionário após o fechamento do circuito. Em vez disso, ocorre um processo transitório, onde, ambos evoluem gradualmente até alcançar um estado de equilíbrio.

A verificação desses estados transitórios ocorre em dois momentos, na carga e descarga do capacitor. De modo, a encontrar uma expressão matemática que expressa a forma dessa dependência temporal e sua representação gráfica.

Considerando que o capacitor está inicialmente descarregado, ao ligar a chave em “a” inicia o processo, com a resistência dissipando parte da energia em calor e o capacitor armazenando cargas no campo elétrico estabelecido entre suas placas. De acordo com a Lei das Malhas (conservação da energia), percorrendo-o no sentido horário a partir do terminal negativo da fonte, estabelece,

¹² <https://domaker.wordpress.com/2016/02/21/circuitos-rc/>. Acesso 26/12/2025.

$$\mathcal{E} - iR - \frac{q}{C} = 0 \quad (5.3.1)$$

O termo q/C é negativo pois a placa de cima do capacitor, conectada ao polo positivo da fonte, tem potencial maior que a placa de baixo, indicando uma queda de tensão. Aqui não vamos resolver matematicamente esta equação, porém é sabido que a solução é uma função $q(t)$ de formato exponencial que satisfaz a condição $q = 0 \rightarrow t = 0$. Onde,

$$q(t) = C\mathcal{E} \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (5.3.2)$$

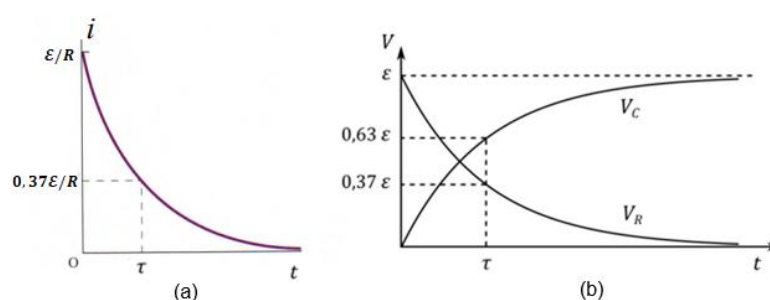
aqui, o termo $e = 2,718 \dots$ representa a base dos logaritmos naturais. A partir desta função podemos encontrar utilizando métodos matemáticos a relação da corrente elétrica e da diferença de potencial nas placas do capacitor, expressos por,

$$i(t) = \frac{\mathcal{E}}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (5.3.3)$$

$$V_c(t) = \mathcal{E} \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (5.3.4)$$

Note que, no instante inicial ($t = 0$), a corrente é $\mathcal{E}/R$ que é a corrente fornecida pela fonte, na medida que o tempo passa ela diminui tendendo a zero. Em contrapartida, a ddp é nula no capacitor quando $t = 0$ e com a evolução temporal vai se aproximando do valor da força eletromotriz, enquanto, a ddp registrada no resistor reduz até zero.

Figura 5.2 – (a) Curva da corrente elétrica no circuito RC em função do tempo. (b) Comportamento da ddp no capacitor e no resistor ao longo do tempo.



Fonte: Adaptado de IFGW¹³, 2013

O produto RC expresso nas funções tem dimensão de tempo, é chamado de constante de tempo capacitiva do circuito, que pode ser indicado por τ ,

$$\tau = RC \quad (5.3.5)$$

¹³ <https://sites.ifi.unicamp.br/f328/files/2013/09/Aula-07-F328-2S-2013.pdf>. Acesso em 08 de abril de 2026.

Durante a primeira constante de tempo a corrente reduz em 37%, a tensão no resistor cai também em 37%, já no capacitor a ddp cresce em 63% do valor da força eletromotriz. Esses valores podem ser obtidos ao fazer $t = \tau$ nas funções da corrente (5.3.3) e da tensão (5.3.4).

Após o capacitor carregar totalmente ($t \rightarrow \infty$), ao posicionar a chave em “b” inicia o processo de descarregamento do capacitor. Aplicando a Lei das Malhas, obtemos,

$$iR + \frac{q}{C} = 0 \quad (5.3.6)$$

Note que a fonte não está mais no circuito, ou seja, $\mathcal{E} = 0$. A solução desta equação será dada por,

$$q(t) = CU_c e^{-t/RC} \quad (5.3.7)$$

em que, $U_c = \mathcal{E}$ representa a ddp do capacitor carregado no momento que a chave é ligada, de modo que o produto $CU_c = q_0$. Desta função, chegamos à,

$$i(t) = i_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (5.3.8)$$

onde, $i_0 = q_0/RC$ representa a corrente inicial fornecida pelo capacitor.

Observando a constante de tempo capacitiva, a corrente elétrica cai 37% na primeira constante de tempo.

5.3.2 Interpretação Física

I. Comportamento do circuito

A interpretação de um circuito RC deve ir além da aplicação de equações matemáticas, buscando compreender o comportamento físico do sistema ao longo do tempo. Diferentemente de um resistor puro, cuja resposta à diferença de potencial é imediata, o circuito RC apresenta um comportamento gradual, evidenciando uma espécie de “resistência à mudança”. No instante inicial, o capacitor encontra-se descarregado e, portanto, não oferece oposição significativa à passagem de corrente, que assume seu valor máximo. À medida que cargas se acumulam nas placas, estabelece-se uma diferença de potencial oposta à da fonte, dificultando progressivamente a entrada de novas cargas. Assim, o capacitor atua como um elemento que retarda o estabelecimento do regime estacionário, comportamento que pode ser comparado ao enchimento de um pneu: quanto maior a pressão interna, maior o esforço necessário para inserir mais ar.

Esse comportamento está diretamente relacionado à natureza exponencial das grandezas envolvidas. A forma da curva não é apenas um resultado matemático, mas reflete o fato de que a taxa de variação do sistema depende de seu estado atual. No início do processo,

a diferença de potencial entre a fonte e o capacitor é máxima, resultando em uma variação rápida (curva íngreme). Com o passar do tempo, essa diferença diminui, reduzindo a corrente e tornando a evolução cada vez mais lenta, até que o sistema se aproxima de um valor limite. Esse aspecto evidencia um processo de autorregulação, no qual o sistema responde de forma mais intensa no início e desacelera progressivamente.

II. Constante de tempo capacitiva

Nesse contexto, a constante de tempo $\tau = RC$ desempenha papel fundamental, pois define a rapidez com que o sistema responde às variações elétricas. Valores pequenos de τ indicam sistemas que reagem rapidamente às mudanças, enquanto valores elevados caracterizam sistemas mais lentos, que suavizam variações bruscas. Essa propriedade permite interpretar o circuito RC como um sistema que pode atuar como um “filtro temporal”, respondendo de maneira diferenciada a estímulos rápidos ou lentos

5.4 Analogia biológica

A interpretação física do circuito RC permite estabelecer uma analogia direta com o funcionamento do sistema elétrico cardíaco, no qual o tempo desempenha papel fundamental na coordenação das contrações.

A. Nó Atrioventricular

Um exemplo relevante é o nó atrioventricular, responsável por introduzir um atraso na propagação do impulso elétrico entre átrios e ventrículos. Esse atraso garante que as câmaras cardíacas não se contraiam simultaneamente, permitindo o fluxo adequado de sangue. Do ponto de vista físico, esse comportamento pode ser interpretado como um sistema com constante de tempo elevada, no qual a combinação entre resistência e capacitância retarda a propagação do sinal.

B. Membrana e canais iônicos

Como visto anteriormente, a membrana celular pode ser compreendida como um capacitor de placas paralelas. Sua espessura extremamente reduzida resulta em elevada capacitância por unidade de área, o que possibilita o armazenamento de cargas suficientes para gerar variações de potencial elétrico mensuráveis. Esse aspecto é fundamental para a existência dos sinais elétricos cardíacos observados em exames como o eletrocardiograma.

Além disso, a resistência no sistema biológico não é fixa, como em resistores metálicos. Ela depende do comportamento dos canais iônicos presentes na membrana, que podem abrir ou fechar em resposta a estímulos elétricos e químicos. Essa característica confere ao sistema um comportamento dinâmico, no qual a resistência varia ao longo do

tempo. Em situações como a liberação de adrenalina, por exemplo, ocorre redução da resistência ao fluxo iônico, o que diminui a constante de tempo do sistema e permite uma resposta mais rápida, aumentando a frequência cardíaca.

5.5 Limitações da analogia

Apesar de sua utilidade, a analogia entre o circuito RC e o sistema cardíaco apresenta limitações que devem ser explicitadas. No circuito físico, o capacitor é formado por placas metálicas separadas por um dielétrico sólido, enquanto, no sistema biológico, a membrana celular funciona como uma interface entre meios eletrolíticos, envolvendo uma física mais complexa associada à dupla camada elétrica.

Outro aspecto importante refere-se ao mecanismo de disparo das células cardíacas. Diferentemente de um circuito RC, que responde continuamente à variação de tensão, a célula apresenta um comportamento do tipo “tudo ou nada”, no qual o potencial de ação só é gerado se um limiar mínimo de despolarização for atingido. Caso contrário, o estímulo não se propaga.

Por fim, destaca-se que o sistema biológico é energeticamente ativo. Enquanto, no circuito RC, a energia provém exclusivamente da fonte externa, nas células cardíacas a manutenção do potencial elétrico depende de processos metabólicos que consomem ATP. Dessa forma, a analogia deve ser compreendida como um modelo simplificado, útil para interpretar aspectos gerais do fenômeno, mas que não esgota a complexidade do sistema biológico.

5.6 Proposta de Simulador

O Falstad exibe o gráfico $V \times t$ do capacitor em tempo real. Essa curva exponencial e a ancora visual que será retomada no Capítulo seguinte ao comparar com o ECG.

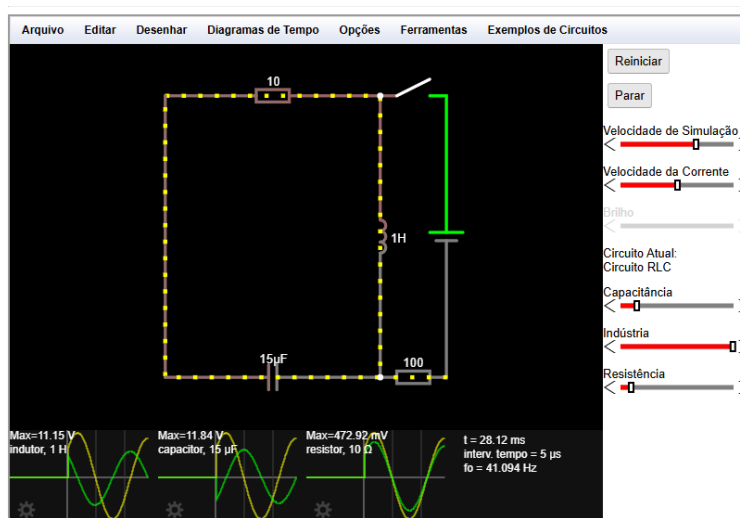
Link:

<https://falstad.com/circuit/>

1 – Abrindo e conhecendo o simulador

Ao acessar o link, verá uma barra de ferramentas na parte superior da tela, nela terá as opções “Arquivo”, “Editar” etc. Uma outra seção de opções está fixada ao lado esquerdo da tela que roda o simulador, contendo as opções “Reiniciar”, “Parar” e barras de ajustes que regulam a velocidade da simulação entre outros.

Figura 5.3 – Interface do simulador falstad.com/circuit.

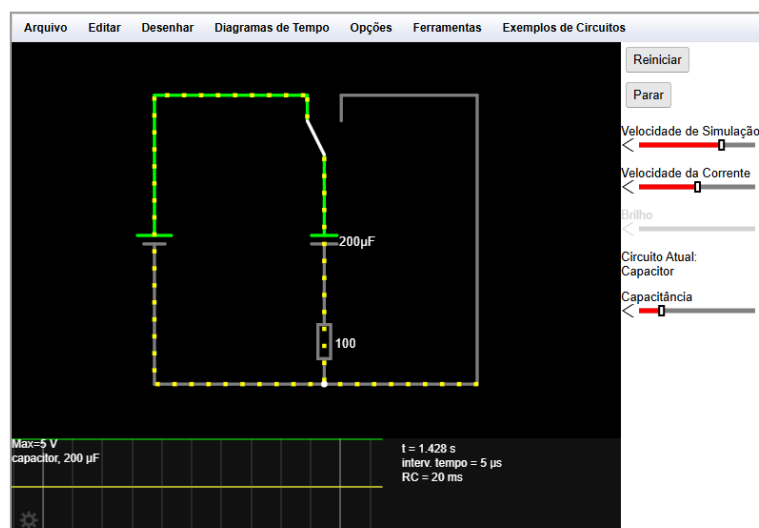


Fonte: falstad

2 – Carregando o circuito RC no simulador

Clique em “Exemplos de Circuitos”, logo o após passe o mouse a opção “Básicos” e por fim selecione “Capacitor”. Ao carregar, o simulador abre com o circuito e o osciloscópio ativados.

Figura 5.4 – Circuito RC carregado



Fonte: falstad

3 – Carregando o capacitor no circuito

A chave já estará fechada realizando o processo de carga do capacitor, aperte “Reiniciar” apontando aos alunos a curva do osciloscópio. Se preferir, na barra “Velocidade de Simulação”, diminua para melhor visualização.

Neste momento, é fundamental que o professor explore a geometria da curva de carga exibida no osciloscópio do Falstad. Gráficamente, a diferença de potencial no capacitor não cresce de forma linear, mas sim exponencial. Pergunte “Se a corrente elétrica inicial é grande, por que o capacitor não se carrega instantaneamente? O que impede esse processo imediato? (Espera-se que percebam o papel da Resistência R em limitar o fluxo).”

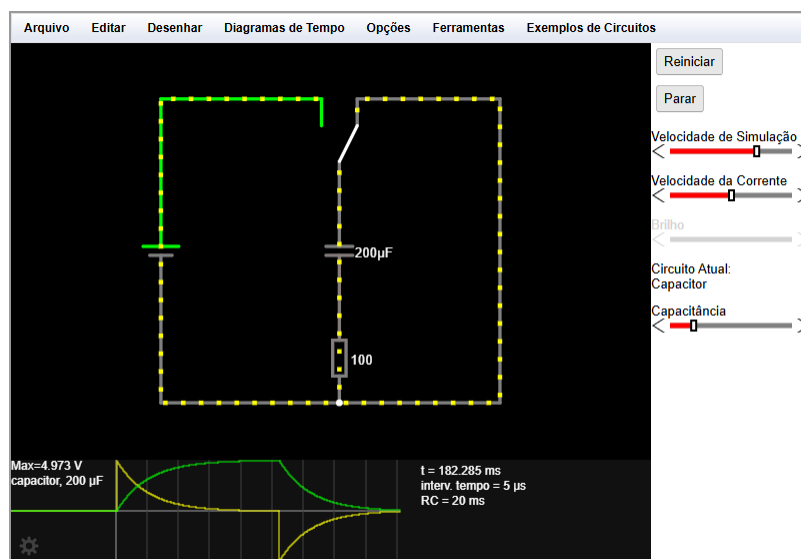
Agora com um duplo clique na resistência, dobre o valor e peça para que os alunos verifiquem a curva e o tempo característico (τ). Repita o processo, retomando o valor inicial da resistência e dobrando o valor da capacitância. Clique em “Reiniciar” e aponte para a curva.

“Reforce que, dobrar a resistência ou a capacitância dobra o tempo para atingir a carga máxima do capacitor, entretanto, há uma interpretação diferente em cada caso. Enquanto dobrar a resistência dificulta a passagem da corrente, assim diminuindo o fluxo de cargas por segundo. Duplicar a capacitância, significa que o capacitor tem “mais espaço” para armazenar cargas.”

4 – Descarga do capacitor

Abra a chave para que o processo de descarga se inicie. Chame a atenção para a curva indicada no osciloscópio.

Figura 5.5 – Circuito RC descarregando.



Fonte: falstad

Ao abrir a chave que conecta a fonte, o capacitor passa a se comportar como o elemento ativo do circuito, descarregando sua energia armazenada sobre o resistor. O osciloscópio passará a desenhar uma curva de decréscimo exponencial (decaimento). Oriente os alunos a analisarem o esvaziamento do sistema com as seguintes perguntas, para onde foi a energia que estava armazenada no campo elétrico do capacitor se a fonte do circuito foi desligada? (Discussão sobre o Princípio de Conservação da Energia e a dissipação por Efeito Joule no resistor). Se aumentarmos o valor do resistor agora, na descarga, o que acontecerá com o tempo que o circuito leva para apagar completamente? (O tempo aumenta, pois, a oposição à saída das cargas será maior).

6. O ECG como Síntese: Lendo o Coração com os Olhos da Física

6.1. Objetivos

- Identificar, em um traçado de ECG, cada onda e intervalo com o evento elétrico correspondente estudado nos módulos anteriores.
- Calcular a frequência cardíaca em bpm a partir do intervalo RR medido no ECG.
- Identificar o intervalo PR como a constante de tempo τ do nó AV e reconhecer quando ele está fora do padrão normal.
- Interpretar de forma simples duas alterações comuns no ECG — intervalo PR alargado e taquicardia — em termos dos parâmetros do circuito RC.
- Reconhecer os limites do modelo ao comparar o circuito RC com o sinal elétrico real do coração.

6.2. Situação Problema

Imagine que um estudante de Física entra em uma clínica e vê, na parede, um traçado de ECG ampliado. Ele observa com atenção, a linha sobe e desce de forma rítmica, repetindo sempre o mesmo padrão. Há um pico agudo, uma curva suave que desce, um trecho plano e o ciclo recomeça. De repente, ele percebe algo familiar. A curva que desce após o pico lembra a descarga de um capacitor. O trecho plano antes do pico agudo lembra o tempo que o capacitor leva para carregar antes de transmitir. A subida suave depois do pico lembra a recarga.

Ele não está vendo um gráfico médico. Mas sim, um gráfico de tensão em função do tempo exatamente o que estudou no em circuitos RC. Só que quem gerou esse gráfico não foi um gerador elétrico de laboratório. Foi o coração humano.

Pense nas seguintes questões:

- 1) Você consegue identificar, no traçado do ECG, qual momento corresponde ao disparo do nó SA (a "bateria" do coração)? E qual momento representa o atraso do nó AV (o "capacitor")?
- 2) Se o intervalo entre dois picos consecutivos no ECG corresponde ao período do ciclo cardíaco, como você calcularia quantas vezes por minuto esse coração está batendo?

6.3 Desenvolvimento

6.3.1 Conceito Físico

O eletrocardiograma (ECG) é o registro da variação da diferença de potencial elétrico no corpo ao longo do tempo. Do ponto de vista da Física, é um gráfico $V \times t$, o mesmo tipo de gráfico que usamos para descrever a carga e a descarga de um capacitor em circuito RC.

A semelhança não é coincidência. O coração é um sistema elétrico. Cada estrutura que estudamos nos módulos anteriores gera, conduz, atrasa ou distribui o impulso elétrico de uma forma que obedece aos mesmos princípios dos circuitos elétricos. O ECG é o registro coletivo desse processo, o traçado completo do circuito cardíaco funcionando.

Cada onda ou intervalo do ECG corresponde a um evento elétrico preciso e cada um desses eventos tem um análogo direto nos elementos de circuito estudados ao longo desta sequência, ver figura 6.1, que apresenta as ondas e os intervalos principais no processo de polarização e despolarização cardíaca.

A figura 6.2, apresenta um traçado típico de eletrocardiograma (ECG) no papel milimetrado típico. Note que os eixos (vertical e horizontal) do papel milimetrado representam respectivamente, tensão e tempo. O lado vertical de cada pequeno quadrado equivale a $0,1 \text{ mV}$ enquanto o lado horizontal a $0,04 \text{ s}$.

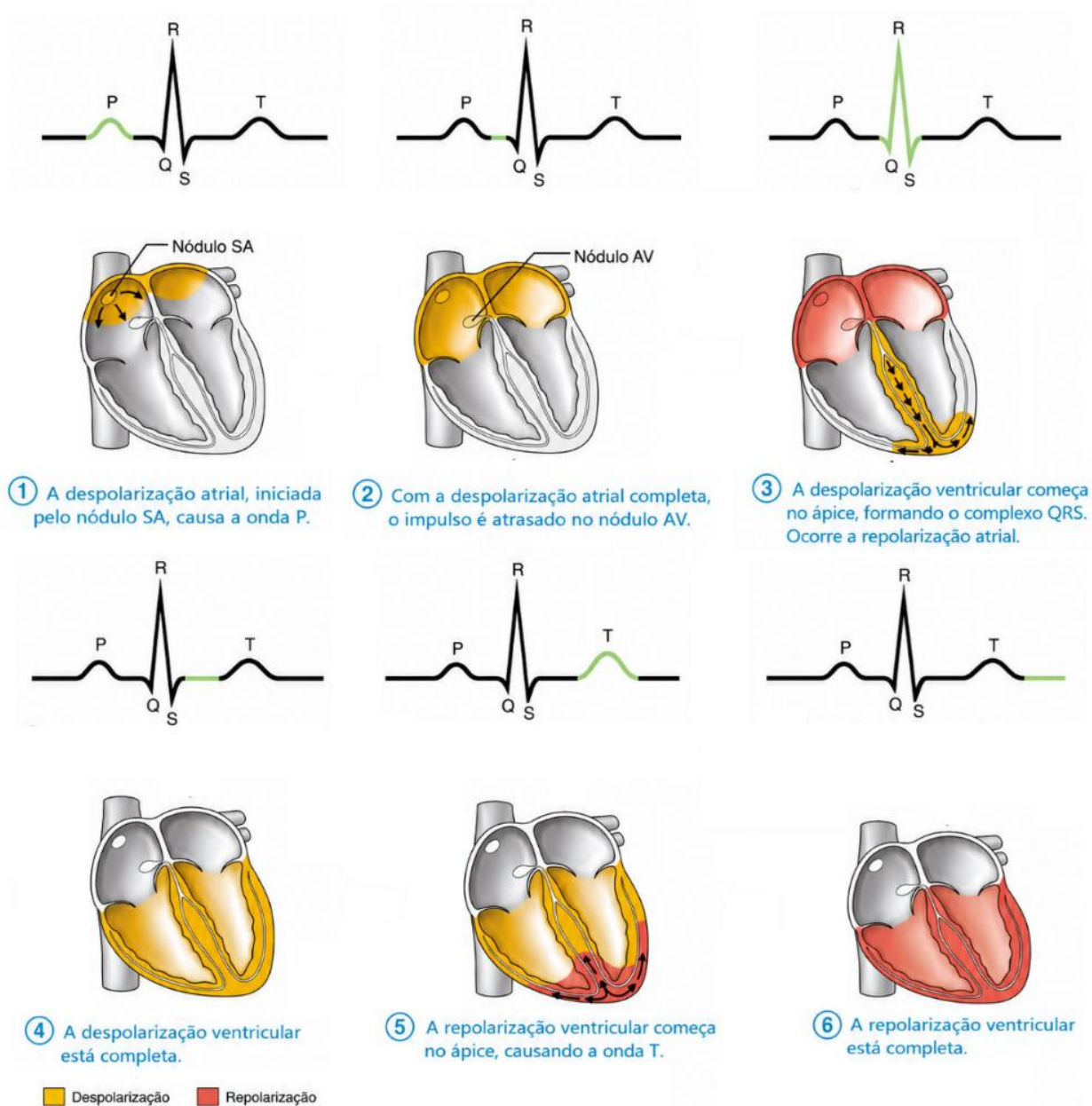
A seguir, a figura apresenta uma breve relação entre o evento elétrico cardíaco e um circuito elétrico.

Tabela 6.1 – Descrição dos elementos do ECG

<i>Onda/Intervalo</i>	<i>Evento no coração</i>	<i>Análogo do circuito elétrico</i>
<i>Onda P</i>	Despolarização atrial (nó SA dispara)	A bateria do coração gera a tensão inicial
<i>Intervalo PR</i>	Impulso percorre o nó AV	O capacitor carrega antes de transmitir
<i>Complexo QRS</i>	Despolarização ventricular (feixe de His e Purkinje agem)	Rede de baixa resistência em paralelo
<i>Onda T</i>	Repolarização ventricular (células retornam ao repouso)	Recarga suave do capacitor
<i>Intervalo RR</i>	Tempo entre dois batimentos consecutivos	Período T do oscilador (frequência cardíaca)

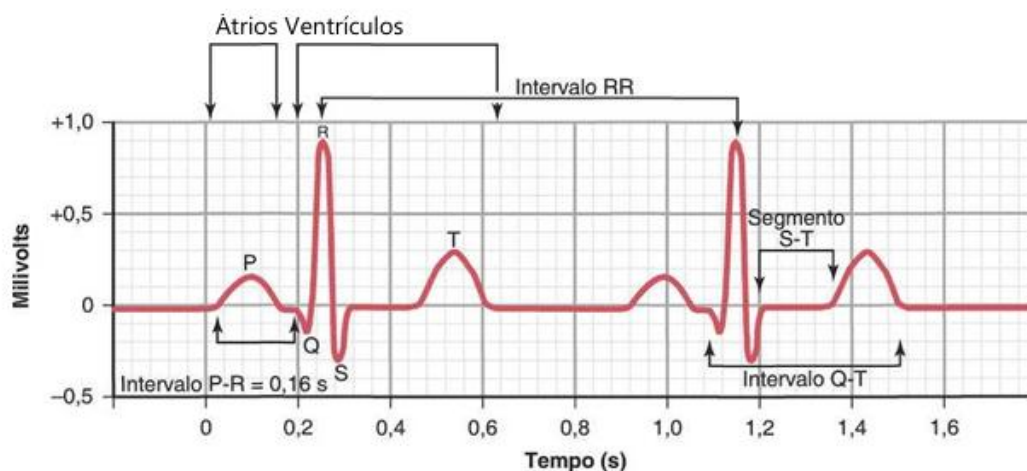
Fonte: Próprio autor.

Figura 6.1 – Elementos do traçado ECG e sua leitura cardíaca.



Fonte: Santos, 2025

Figura 6.2 – Representação de um ECG normal com seus intervalos



Fonte: Guyton, Haal, 2017

6.3.2 Interpretação física

I. Cálculo da frequência cardíaca a partir do ECG

Assim como em qualquer oscilador, o período do ciclo cardíaco é o tempo entre dois eventos idênticos consecutivos. No ECG, esse intervalo é medido entre dois picos R (o pico mais alto do complexo QRS) e é chamado de intervalo RR, onde,

$$bpm = \frac{60}{T_{RR}} \quad (6.3.1)$$

Onde os valores de referência da frequência cardíaca são dados por:

- Normal = 60 a 100 bpm
- Abaixo de 60 bpm = bradicardia (coração bate lento)
- Acima de 100 bpm = taquicardia (coração bate rápido)

II. O intervalo PR como constante de tempo τ

O intervalo PR, tempo entre o início da onda P e o início do complexo QRS, representa o tempo que o impulso leva para atravessar o nó AV. dessa forma podemos associar a constante de tempo $\tau = RC$ do "capacitor AV", onde o valor normal está entre 0,12 e 0,20 segundos.

Quando esse intervalo está fora do padrão, o ECG está indicando que o "capacitor AV" do coração não está funcionando corretamente e a física do circuito RC nos ajuda a entender o que isso significa.

6.4 Analogia biológica

O ECG é a síntese visual de todo o sistema de condução elétrica cardíaca que estudamos ao longo desta sequência. Ao olhar para um traçado de ECG, através da analogia, podemos reconhecer cada estrutura e assim entender cada função no contexto dos circuitos elétricos, em especial o RC, onde:

- A onda P surge porque o nó AS, a bateria do coração, disparou. Sem bateria, sem onda P.
- O intervalo PR existe porque o nó AV, o capacitor, está carregando antes de transmitir. O τ do circuito cardíaco está entre 0,12 e 0,20 s.
- O complexo QRS é estreito e alto porque as fibras de Purkinje têm resistência muito baixa, a descarga é rápida, o τ é mínimo, a corrente chega a toda a musculatura quase simultaneamente.
- A onda T é suave e lenta porque a repolarização ventricular é um processo mais gradual, como a recarga lenta de um capacitor após a descarga.
- O intervalo RR é o período do oscilador cardíaco. Sua regularidade é a prova de que o nó SA está gerando pulsos de forma constante e que o sistema de condução está funcionando corretamente.

6.5 Limites da analogia

O modelo do circuito RC captura o essencial do comportamento elétrico cardíaco, mas tem limites importantes:

- O ECG não mede a tensão em um ponto específico do coração. Ele mede a diferença de potencial na superfície do corpo, resultado da soma vetorial de todas as atividades elétricas simultâneas de milhões de células. O circuito RC é um modelo simplificado de um único elemento.
- As ondas do ECG têm formatos mais complexos que as curvas exponenciais simples do circuito RC. Isso ocorre porque o coração tem geometria tridimensional, espessura muscular variável e direções de condução que o modelo RC não consegue reproduzir.
- O intervalo PR não é constante como τ em um circuito passivo, ele varia com a frequência cardíaca, com o estado emocional e com medicamentos. O circuito RC ideal tem τ fixo.
- A amplitude das ondas do ECG depende da massa muscular, da posição dos eletrodos e de doenças como infarto, fatores que não têm correspondente direto no modelo RC.

6.6 Proposta de Simulador

Aqui, o objetivo é simples, mostrar que o gráfico $V \times t$ do capacitor em circuito RC e o traçado do ECG têm o mesmo comportamento fundamental, utilizando uma comparação visual.

Link:

<https://falstad.com/circuit/>

1 – Executando o circuito RC no simulador

Clique em “Exemplos de Circuitos”, logo o após passe o mouse a opção “Básicos” e por fim selecione “Capacitor”. Ao carregar, o simulador abre com o circuito e o osciloscópio ativados.

2 – Gráfico de $V \times t$ do circuito RC

Modifique a resistência e a capacitância algumas vezes e indique as curvas de carga e descarga mostradas no osciloscópio por alguns minutos. Dessa forma gerando traçados com vários valores de τ .

Projete ao lado uma imagem de um ECG normal ou entregue impresso a cada estudante para que ele possa analisar as várias curvas com o traçado.

3 – Comparando as curvas

Conduza a comparação de modo a se obter as seguintes respostas:

1. Onda P, lembra o início da curva de carga de um capacitor.
2. Onda T, é o análogo perfeito da curva de descarga de um capacitor.
3. Trecho plano entre a Onda P e o QRS, lembra o estado estacionário temporário (o platô onde a corrente cessa porque o capacitor já se carregou temporariamente)
4. Complexo QRS, quando liga rapidamente a chave para carregar ou descarregar o capacitor.

“Importante relembrar que a mudança do tempo característico altera o tempo que o capacitor leva para carregar ou descarregar, ou seja, o sistema se torna lento para transmitir o sinal.”

Parte 2 – Sequência Didática

A estrutura desta sequência foi pensada para que cada etapa prepare o terreno para a seguinte, de forma que o estudante chegue ao final da sequência com condições de reconhecer, em um fenômeno vital e concreto como os batimentos do coração, os mesmos conceitos elétricos que tantas vezes são apresentados de forma abstrata nas aulas de Física.

Construída em nove etapas distribuídas ao longo de 14 aulas, a seguir mostramos uma tabela com a visão geral da aplicação, com a descrição de cada etapa, os capítulos envolvidos, o número de aulas sugerido e os instrumentos de avaliação previstos.

Tabela 7 – Estrutura da Sequência Didática

Etapa	Descrição	Capítulo(s)	Aulas	Atividade / Avaliação
01	Apresentação da proposta e aplicação do pré-teste diagnóstico.	—	1	Pré-teste
02	Geradores e Receptores: <i>fem</i> , pilhas e baterias. Nó SA como fonte de tensão autônoma	1	2	Atividade 01
03	Capacitores: armazenamento de energia. Membrana celular como capacitor biológico	2	2	Atividade 02
04	Corrente Elétrica: fluxo de cargas e o impulso iônico no sistema de condução	3	1	—
05	Resistência Elétrica e Lei de Ohm: resistores em série, paralelo e Efeito Joule. Feixe de His e fibras de Purkinje	4	3	Atividade 03 e 04
06	Circuito RC: carga, descarga e constante de tempo τ . Nó AV como capacitor temporizador	5	2	Atividade 05
07	O ECG como síntese: leitura do eletrocardiograma com os conceitos dos módulos anteriores	6	1	Atividade 06
08	Aplicação do pós-teste	—	1	Pós-teste
09	Questionário de avaliação do produto pelos estudantes	—	1	Questionário

Fonte: Próprio autor

A sequência pode ser compreendida em três fases pedagógicas, cada uma correspondendo a um momento distinto do processo de construção do conhecimento dialogando diretamente com a estratégia TWA.

A Fase 1, compreende as etapas 1 a 4 e ocupa as primeiras 6 aulas da sequência. É o momento em que o professor apresenta os conceitos de eletricidade mais próximos da experiência cotidiana dos estudantes, especialmente as pilhas e a corrente elétrica, introduzindo as primeiras analogias com o sistema de condução cardíaca.

Nessa fase, o análogo biológico funciona como motivador, pois o coração é o ponto de partida que desperta a curiosidade e ativa o conhecimento prévio dos estudantes antes de qualquer formalização matemática.

A Fase 2 abrange as etapas 5 a 7 e ocupa as 7 aulas seguintes. É a fase de maior densidade conceitual. Os estudantes trabalham com resistência elétrica, circuito RC e a constante de tempo τ , construindo progressivamente o modelo matemático que conecta o comportamento do capacitor ao atraso imposto pelo nó atrioventricular.

No módulo 6, essa fase se encerra com a síntese visual de toda a sequência, a leitura do ECG, como expressão gráfica do circuito elétrico cardíaco. De modo que, as analogias deixam de ser introdutórias e se tornam ferramentas de interpretação.

A Fase 3 corresponde às etapas 8 e 9 e ocupa as aulas finais. Além de verificar a aprendizagem por meio do pós-teste, essa fase tem um valor pedagógico ao comparar seus resultados no pré e no pós-teste. Com o resultado, o estudante toma consciência concreta do que aprendeu ou em qual conceito há a necessidade do reforço.

O questionário de avaliação do produto complementa essa etapa, capturando percepções que os estudantes adquiriram ao longo do processo, indicando possíveis aprimoramentos na condução e na elaboração das aulas.

Parte 3 – Avaliação

A avaliação nesta sequência didática está distribuída ao longo de toda a aplicação, cumprindo funções distintas em cada momento. Avaliar, aqui, significa acompanhar o processo de construção do conhecimento, identificando o que o estudante já sabe antes de começar, verificar o que está sendo aprendido durante a sequência e registrar o que foi consolidado ao final. Essa perspectiva está alinhada ao princípio da avaliação formativa, segundo o qual a avaliação e o ensino são partes do mesmo processo, não etapas separadas.

Ao longo da sequência, o professor é livre para utilizar quaisquer formas de avaliar, entretanto, recomendamos três tipos de instrumentos avaliativos, cada um com sua finalidade específica.

A avaliação diagnóstica ocorre na primeira etapa da sequência, por meio da aplicação do pré-teste. Seu objetivo não é atribuir nota, mas mapear o conhecimento prévio dos estudantes sobre os conceitos de eletricidade que serão trabalhados, identificando quais subsunçores estão disponíveis para ancorar as novas aprendizagens, conforme os princípios da aprendizagem significativa descritos por Ausubel. Dessa forma, orientam o professor a determinar o ritmo e o nível de aprofundamento das etapas seguintes.

A avaliação formativa é realizada por meio das atividades aplicadas ao longo da sequência. Cada atividade aborda os conceitos do módulo correspondente, articulando sempre o conceito físico com a analogia biológica trabalhada. Seu propósito principal é verificar se os estudantes estão construindo as correspondências esperadas entre os dois domínios e identificar dificuldades conceituais antes que se consolidem.

A avaliação somativa ocorre na etapa 8, com a aplicação do pós-teste, o mesmo instrumento do pré-teste, aplicado ao final da sequência. A comparação entre os dois resultados permite verificar o quanto cada estudante avançou ao longo do processo. Complementando essa etapa, o questionário de avaliação do produto pelos próprios estudantes, aplicado na etapa 9, fornece dados qualitativos sobre a percepção da sequência.

Tabela 8 – Instrumentos avaliativos utilizados e as respectivas finalidades

Instrumento	Etapas	Finalidade
Pré-teste	01	Diagnóstico do conhecimento prévio, orienta o professor na condução das etapas seguintes
Atividade 01	02	Verificação formativa: Capítulo 1
Atividade 02	03	Verificação formativa: Capítulo 2

Instrumento	Etapa	Finalidade
Atividade 03	05	Verificação formativa: Capítulo 3 e 4
Atividade 04	05	Verificação formativa: Capítulo 4
Atividade 05	06	Verificação formativa: Capítulo 5
Atividade 06	07	Verificação formativa: Capítulo 6
Pós-teste	08	Avaliação somativa, comparação com o pré-teste para verificação de aprendizagem
Questionário de avaliação	09	Avaliação qualitativa do produto e da sequência pelos estudantes

Fonte: Próprio autor.

Uma consideração prática que merece atenção é que a sequência não prevê tempo específico para a devolutiva individual das atividades formativas ao longo das aulas. Esse é um limite real de qualquer proposta aplicada em contexto escolar com calendário restrito, e ignorá-lo seria desonesto.

A alternativa mais viável, e pedagogicamente consistente, é a devolutiva coletiva. Após a correção das atividades pelo professor, a aula seguinte pode ser iniciada com 10 a 15 minutos dedicados à discussão das questões que geraram mais dúvidas ou erros recorrentes.

Por fim, recomendamos que o professor devolva as atividades e o pré-teste ao mesmo tempo que o pós-teste, ao final da sequência. Para que o estudante possa comparar lado a lado o que respondeu no início e no final da aplicação. Esse momento tem grande importância, pois ele percebe concretamente o quanto aprendeu.

ANEXO A – ATIVIDADE 1

Atividade — Capítulo 1: Geradores

Nome: _____ Curso: _____ Data: _____

Expressões trabalhadas nas aulas:

$$\varepsilon = \frac{W}{q}$$

$$U = \varepsilon - r * i$$

Questão 01 – Compreensão conceitual

Em suas próprias palavras, explique o que é força eletromotriz (*fem*) e porque o nó SA pode ser chamado de "*a bateria do coração*". Aponte pelo menos duas características que justificam essa analogia.

Questão 02 – Distinção de Grandezas

Qual é a diferença entre *fem* (ε) e diferença de potencial (ddp) nos terminais de uma fonte real? Por que a tensão medida nos terminais de uma pilha velha é menor do que o valor indicado no rótulo?

Questão 03 – Utilização do simulador

Com o auxílio do simulador (Circuito DC – PhET) responda. Monte um circuito utilizando uma bateria com $\varepsilon = 12\text{ V}$ e resistência interna $r = 1\ \Omega$ que alimenta um circuito externo com resistência $R = 5\ \Omega$. Identifique e anote:

a) A corrente no circuito: _____

b) Com a resposta do item anterior calcule a ddp nos terminais da bateria:

c) Utilizando o voltímetro no simulador, registre a ddp nos terminais da bateria: _____

Questão 04 – Desafio

Se você pudesse medir a "tensão" gerada pelo nó SA com um instrumento, o que estaria medindo, em termos físicos? Como você chamaria esse instrumento em termos de circuito? (Dica: pense no que o ECG registra.)

ANEXO B – ATIVIDADE 2

Atividade — Capítulo 2: Capacitores

Nome: _____ Curso: _____ Data: _____

Expressões trabalhadas nas aulas:

$$C = \frac{Q}{U} \quad E = \frac{CU^2}{2}$$

Questão 01 — Compreensão conceitual

Um capacitor é formado por duas placas condutoras separadas por um material isolante. Quando conectado a uma fonte de tensão, cargas elétricas se acumulam nas placas e uma diferença de potencial é estabelecida entre elas.

Com base nisso, responda:

a) O que acontece com a quantidade de carga armazenada no capacitor se a tensão aplicada for dobrada, mantendo a capacitância constante?

b) A membrana de cada célula cardíaca funciona como um capacitor biológico, mantendo uma diferença de potencial de aproximadamente -70 mV em repouso. O que essa diferença de potencial representa fisicamente — e o que acontece com ela quando a célula é estimulada pelo impulso elétrico do sistema de condução?

Questão 02 — Cálculo

Um capacitor armazena uma carga de $q = 0,012 \text{ C}$ quando submetido a uma diferença de potencial de $U = 6 \text{ V}$.

a) Calcule a capacitância desse capacitor.

b) Se a tensão for aumentada para $U = 9 \text{ V}$, mantendo a capacitância, qual será a nova carga armazenada?

c) Um desfibrilador utiliza um capacitor de $C = 50 \mu F$ ($1\mu = 10^{-6}$) carregado a uma tensão de $U = 2.000 V$. Calcule a energia armazenada nesse capacitor antes do disparo.

Questão 03 — Analógica

O nó atrioventricular (nó AV) retarda o impulso elétrico por cerca de 0,15 segundo antes de transmiti-lo aos ventrículos. Esse comportamento é análogo ao de um capacitor que não libera sua energia instantaneamente, ele precisa primeiro acumular carga suficiente entre suas placas para que a diferença de potencial atinja um valor capaz de influenciar o restante do circuito.

Com base nessa analogia, responda:

a) Por que é fundamental que o nó AV retarde o impulso antes de transmiti-lo aos ventrículos? O que aconteceria com a eficiência do bombeamento cardíaco se esse atraso não existisse?

b) Um capacitor armazena mais energia quando a tensão entre suas placas é maior, conforme a relação $E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$. No coração, o nó AV só transmite o impulso depois de acumular energia elétrica suficiente. O que essa correspondência sugere sobre o papel do nó AV como "armazenador temporário" do sinal elétrico cardíaco?

Questão 04 — Desafio

A membrana celular cardíaca tem espessura de aproximadamente $7 nm$ ($1 n = 10^{-9}$) e área superficial de cerca de $5.000 \mu m^2$ ($1 \mu = 10^{-6}$). Sabendo que a capacitância de um capacitor de placas paralelas é dada por $C = \varepsilon \cdot A / d$, onde ε é a permissividade do meio (para a membrana, $\varepsilon \approx 4,4 \times 10^{-11} F/m$), calcule a capacitância aproximada dessa membrana e reflita. O que esse valor indica sobre a capacidade da célula cardíaca de armazenar cargas e gerar o potencial de ação?

ANEXO C – ATIVIDADE 3

Atividade — Capítulo 3 e 4: Corrente elétrica e Resistores

Nome: _____ Curso: _____ Data: _____

Expressões trabalhadas nas aulas

$$i = \Delta q / \Delta t$$

$$U = R * i$$

$$R = \rho * L / A$$

Questão 01 – Conceito de Corrente

O que é corrente elétrica? Defina com a fórmula e com palavras. Como ela se relaciona com o movimento do impulso elétrico pelo feixe de His?

(Dica: Lembre-se dos portadores de carga no coração e que o feixe de His apresenta pequena resistência aumentando a velocidade da propagação da corrente elétrica)

Questão 02 – 2ª Lei de Ohm

Um condutor tem comprimento $L = 2 \text{ m}$, área de seção transversal $A = 0,5 \text{ mm}^2$ e resistividade $\rho = 1,7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$. Calcule sua resistência.

Questão 03 – Geometria e Resistência

As fibras de Purkinje têm diâmetro de $\sim 75 \mu\text{m}$; células cardíacas comuns têm $\sim 12 \mu\text{m}$. Considerando a fórmula $R = \rho L / A$ e que L e ρ são iguais, calcule a razão entre as resistências ($R_{\text{comum}} / R_{\text{Purkinje}}$). O que esse resultado significa para a velocidade de condução?

Questão 04 – Desafio

Complete a tabela abaixo relacionando a estrutura cardíaca à sua velocidade de condução e ao análogo físico correspondente:

Resistência:

- Alta resistência
- Baixa resistência
- Mínima resistência

Função biológica:

- Criar um atraso fisiológico para permitir o enchimento completo dos ventrículos.
- Conduzir o impulso rapidamente através do septo interventricular.
- Distribuir o impulso quase instantaneamente para todo o miocárdio ventricular.

Estrutura	Velocidade	Resistência	Função Biológica
Nó AV	0,05 m/s		
Feixe de His	1 – 4 m/s		
Fibras de Purkinje	4 m/s		

ANEXO D – ATIVIDADE 4

Atividade — Capítulo 4: Resistores

Nome: _____ Curso: _____ Data: _____

Expressões trabalhadas nas aulas

$$R = \rho * L/A \quad R_{eq} = \sum R_i \quad R_{eq} = \sum 1/R_i$$

Questão 01 – Associação em Paralelo

Três resistores de $(10 \, \Omega, 20 \, \Omega \text{ e } 30 \, \Omega)$ são ligados em paralelo. Calcule a resistência equivalente.

Questão 02 – Associação em Série

Os mesmos três resistores $(10 \, \Omega, 20 \, \Omega \text{ e } 30 \, \Omega)$ são agora ligados em série. Calcule a resistência equivalente e compare com o resultado anterior e discuta qual das formas de associar é mais recomendada, caso um dos resistores venha a falhar? E caso precisemos reduzir a tensão, qual a melhor a escolha?

Questão 03 – Analogia

Por que o coração usa associação em paralelo (e não em série) nas fibras de Purkinje? Relacione com pelo menos duas propriedades físicas das associações estudadas (tensão, corrente, R_{eq} , o que acontece quando uma componente falha).

Questão 04 – Desafio

Um infarto destrói 30% das fibras de Purkinje de um ventrículo. Sabendo que originalmente havia 1000 fibras em paralelo, cada uma com $R = 500 \, \Omega$, calcule a resistência equivalente antes e depois do infarto.

Antes (1000 fibras):

Depois (700 fibras):

O que isso implica para a velocidade e uniformidade de condução?

ANEXO E – ATIVIDADE 5

Atividade — Capítulo 5: Circuito RC

Nome: _____ Curso: _____ Data: _____

Expressões trabalhadas nas aulas

$$C = q / V \quad E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 \quad \tau = R \cdot C \quad V(t) = \varepsilon \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad V(t) = V_0 \cdot e^{-t/\tau} \quad T = 1/f \quad bmp = 60/T$$

Questão 01 – Constante de Tempo

Em um circuito RC com $R = 10 \, k\Omega$ e $C = 100 \, \mu F$, um capacitor está carregando:

a) Calcule o tempo característico $\tau = R \cdot C$

b) Em quanto tempo o capacitor atinge 63% da tensão máxima?

c) Em quanto tempo atinge 95% da tensão máxima. Considere que, $\sim 95\%$ ($\approx 3\tau$)?

Questão 02 – O Marcapasso

Um marcapasso deve operar com frequência de 72 bpm (lembre-se que $\tau = T = 1/f$). Qual deve ser o valor de $\tau = RC$ do circuito oscilador? Se o resistor usado é $R = 100 \, k\Omega$, qual deve ser o valor do capacitor C?

Questão 03 – Arritmias e Defeitos de Circuito

Associe cada arritmia ao defeito de circuito correspondente:

1. Bloqueio AV completo – Há uma ruptura total na passagem da corrente entre os átrios e os ventrículos. É como se um fio principal fosse cortado: a informação elétrica não atravessa o "nó", isolando as duas partes do circuito.
2. Wolff-Parkinson-White – Existe uma "ponte" extra de baixa resistência que ignora o atraso natural do Nó AV. O sinal pega um atalho, chegando aos ventrículos antes do tempo, como um fio que pula um resistor no circuito.

3. Fibrilação ventricular – O sinal elétrico torna-se caótico e desorganizado. Em vez de um pulso único e forte, temos múltiplos focos de corrente "vazando", impedindo que o capacitor (célula) descarregue de forma sincronizada.

- () Ruído Elétrico / Oscilação Descontrolada (bagunça total)
() Circuito Aberto (Interrupção) (Interruptor desligado ou fio partido)
() Curto-Circuito (Caminho Paralelo) (fio sem resistência)

Questão 04 – Desafio

Por que o período refratário das células cardíacas (intervalo em que a célula não responde a novo estímulo) pode ser comparado ao comportamento de um capacitor em fase de carga? Elabore a analogia.

Dica: O capacitor não carrega instantaneamente

ANEXO F – ATIVIDADE 6

Atividade — Capítulo 6: Síntese entre o ECG e o circuito RC

Nome: _____ Curso: _____ Data: _____

Expressões trabalhadas nas aulas

$$T = 1/f$$

$$bmp = 60/T$$

$$\tau = RC$$

$$V(t) =$$

$$\varepsilon * \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)$$

Questão 01 – Tabela Síntese ECG ↔ Circuito

Complete a tabela de correspondências entre o ECG e o circuito RC:

Análogo no Circuito RC:

- Início da carga do capacitor (armazenamento de energia).
- Tempo de retardo determinado pela Resistência (R) elevada.
- Carga/Descarga rápida de um capacitor maior (mais energia).
- Recarga do capacitor para o estado inicial de repouso.

Onda / Intervalo ECG	Evento Biológico	Análogo no Circuito RC
Onda P	Despolarização dos átrios (contração da parte de cima).	
Intervalo PR	Atraso no Nó AV (tempo para o sangue passar).	
Complexo QRS	Despolarização dos ventrículos (o "batidão" do coração).	
Onda T	Repolarização ventricular (o "reset" das células).	

Questão 02 — Identificação dos limites

Ao longo desta sequência, você estudou o coração como um circuito elétrico, o nó SA como fonte de tensão, o nó AV como capacitor, as fibras de Purkinje como rede de baixa resistência e o ECG como o gráfico $V \times t$ desse sistema.

Com base nisso escreva qual onda/intervalo do ECG representa os casos a seguir e o limite dessa analogia:

1. O carregamento do capacitor:

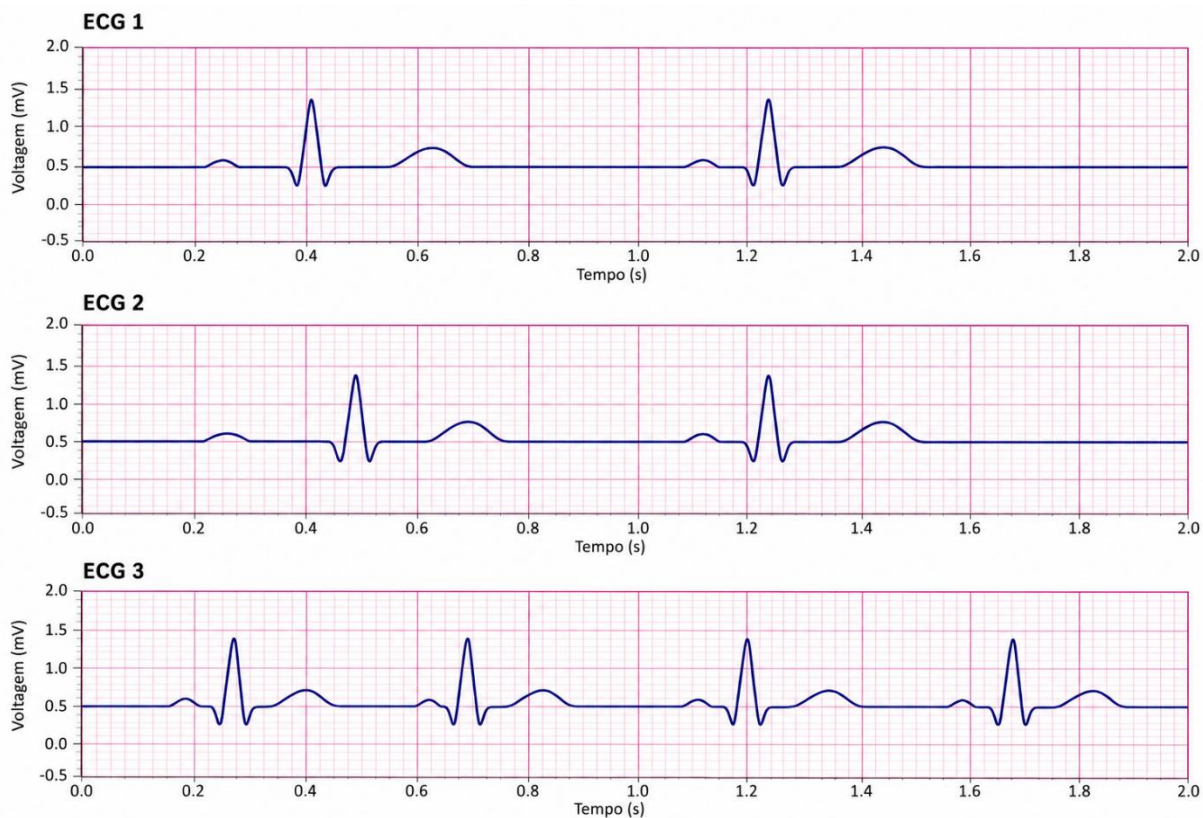
2. A descarga do capacitor:

3. O período completo do ciclo cardíaco:

Questão 03 – Análise ECG com circuito RC

Para cada ECG abaixo, identifique a frequência cardíaca (bpm), avalie o intervalo PR e indique que "parâmetro do circuito" parece alterado:

Nota: Um Intervalo PR é considerado normal no ensino médio se estiver entre 0,12 s e 0,20 s. Usar: $bpm = 60/RR$



bpm: _____ PR normal? _____

Diagnóstico circuito:

(Operando normalmente ou com anormalidades)

bpm: _____ PR normal? _____

Diagnóstico circuito:

(Maior resistência no fio ou mais facilidade de passar cargas)

bpm: _____ PR normal? _____

Diagnóstico circuito:

(Normalidade na resistência (R) e no capacitor (C) com alta frequência no gerador de tensão ou anormalidade na resistência (R) e no capacitor (C) com baixa frequência no gerador de tensão)

ANEXO G – PRÉ/PÓS-TESTE

Nome: _____ Curso: _____ Data: _____

Instrução: Responda com atenção a todas as questões. Nas questões de múltipla escolha, marque apenas uma alternativa.

Questão 01

Uma pilha comum possui uma indicação de 1,5 V em sua embalagem. Essa grandeza representa:

- a) A quantidade de carga elétrica armazenada na pilha.
- b) A força eletromotriz, a capacidade da pilha de mover cargas elétricas pelo circuito.
- c) A resistência interna da pilha.
- d) A corrente elétrica que a pilha fornece ao circuito.

Questão 02

O nó sinoatrial (nó SA) é a estrutura do coração responsável por gerar o impulso elétrico que provoca os batimentos cardíacos, de forma autônoma e periódica. Com base nisso, qual elemento de um circuito elétrico melhor representa o nó SA?

- a) Resistor, porque oferece oposição ao fluxo do impulso elétrico.
- b) Capacitor, porque armazena o impulso antes de transmiti-lo.
- c) Fonte de força eletromotriz (*fem*), porque gera diferença de potencial de forma espontânea.
- d) Fio condutor, porque conduz o impulso sem perda de energia.

Questão 03

Em um circuito elétrico simples, a corrente elétrica representa o fluxo ordenado de cargas elétricas. No sistema de condução cardíaca, o equivalente a essa corrente é:

- a) A pressão do sangue dentro dos vasos sanguíneos.
- b) O movimento ordenado de íons através das fibras do sistema de condução, gerando o impulso elétrico.
- c) A contração mecânica do músculo cardíaco.
- d) A quantidade de oxigênio transportada pelo sangue.

Questão 04

As fibras de Purkinje são estruturas do coração com diâmetro muito maior do que outras células cardíacas. Usando a relação $R = \rho L/A$, o que essa característica implica para a resistência elétrica dessas fibras e para a velocidade de condução do impulso?

- a) Maior diâmetro $\rightarrow$ maior área $A \rightarrow$ maior resistência $\rightarrow$ impulso mais lento.

- b) Maior diâmetro $\rightarrow$ maior área $A \rightarrow$ menor resistência $\rightarrow$ impulso mais rápido.
- c) O diâmetro não influencia a resistência elétrica das fibras.
- d) Maior diâmetro $\rightarrow$ menor comprimento $L \rightarrow$ resistência indeterminada.

Questão 05

Um capacitor é carregado por uma fonte de tensão de 12 V e armazena uma carga de 6 mC.

Qual é a capacitância desse capacitor?

- a) 0,072 F
- b) 2,0 F
- c) $0,5 \times 10^{-3} F$
- d) 72 F

Questão 06

O nó atrioventricular (nó AV) retarda o impulso elétrico por cerca de 0,15 segundo antes de transmiti-lo aos ventrículos. Esse comportamento é análogo ao de qual elemento de circuito elétrico?

- a) Resistor, porque dissipa energia na forma de calor.
- b) Fonte de tensão, porque gera diferença de potencial.
- c) Fio condutor, porque transmite o sinal sem perda.
- d) Capacitor, porque acumula energia antes de agir sobre o restante do circuito.

Questão 07

O eletrocardiograma (ECG) registra a atividade elétrica do coração ao longo do tempo. Em termos físicos, esse registro é equivalente a:

- a) Um gráfico de corrente em função da resistência do circuito cardíaco.
- b) Um gráfico de tensão em função do tempo, o mesmo tipo de gráfico gerado por um osciloscópio em um circuito elétrico.
- c) Um gráfico de potência dissipada ao longo do ciclo cardíaco.
- d) Um gráfico de carga armazenada nos capacitores biológicos do coração.

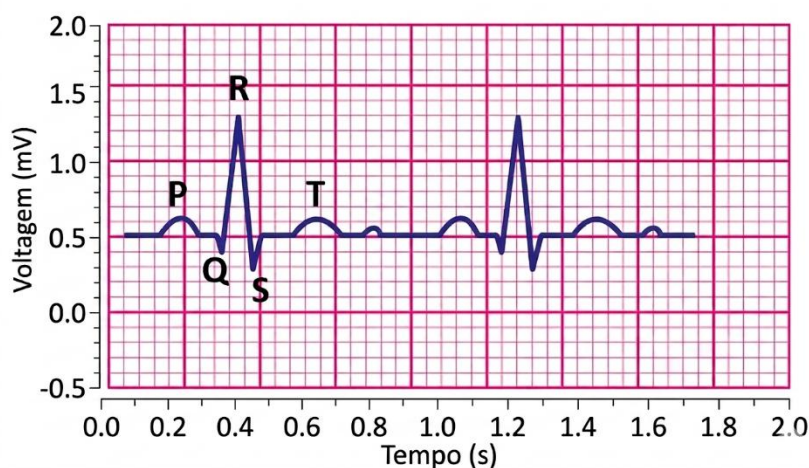
Questão 08

Um desfibrilador utiliza um capacitor de $C = 40 \mu F$ carregado a uma tensão de $V = 2.500 V$. Qual é a energia armazenada nesse capacitor antes do disparo?

- a) $E = 100 J$
- b) $E = 125 J$
- c) $E = 200 J$
- d) $E = 250 J$

Questão 09

A imagem a seguir apresenta um ECG de um paciente fictício. Com base na imagem marque a alternativa que apresenta o valor da frequência cardíaca desse paciente em batimentos por minuto e como ela se classifica?



- a) 60 bpm — bradicárdico (abaixo do normal)
- b) 75 bpm — frequência normal (entre 60 e 100 bpm)
- c) 80 bpm — frequência normal (entre 60 e 100 bpm)
- d) 100 bpm — taquicárdico (acima do normal)

Questão 10

Em uma aula interdisciplinar de Física que utilizava circuitos elétricos para explicar o funcionamento do sistema de condução cardíaca, um estudante fez a seguinte afirmação:

"O coração é um circuito elétrico — ele tem bateria, resistores e até capacitor."

Com base na natureza dos modelos científicos e nas regras para o uso de analogias no ensino de Ciências, a análise metodológica correta sobre a fala do estudante,

- a) Está correta, pois a biofísica comprova que o tecido miocárdico e os nodos cardíacos são constituídos fisicamente pelos mesmos materiais sólidos e semicondutores encontrados nos resistores e capacitores comerciais.
- b) Apresenta um equívoco conceitual, pois confunde a relação de similaridade estrutural e funcional de um modelo analógico com uma identidade literal e material entre o órgão biológico e o circuito elétrico.
- c) Está incorreta, porque os circuitos elétricos servem apenas como uma metáfora ilustrativa e ornamental, não possuindo nenhuma validade matemática ou capacidade preditiva para explicar fenômenos biológicos como o eletrocardiograma.

d) Está parcialmente correta, uma vez que o coração se comporta como um circuito elétrico passivo, o que significa que ele necessita de uma fonte de tensão externa e artificial para promover o fluxo ordenado de elétrons livres.