

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**ANDRÉ FACCIN EVANGELISTA**

**DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO DA TEORIA DA RELATIVIDADE ESPECIAL  
SOB A ÓTICA DA CRIATIVIDADE DISTRIBUÍDA**

**Bagé  
2023**

**ANDRÉ FACCIN EVANGELISTA**

**DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO DA TEORIA DA RELATIVIDADE ESPECIAL  
SOB A ÓTICA DA CRIATIVIDADE DISTRIBUÍDA**

Trabalho de Conclusão de Curso II  
apresentado ao Curso de Física da  
Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do Título de  
Licenciado em Física.

Orientador: Vania Elisabeth Barlette

Coorientador: Mauro Sérgio Góes Negrão

**Bagé  
2023**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

E92d Evangelista, André Faccin

Desenvolvimento histórico da teoria da relatividade especial sob a ótica da criatividade distribuída / André Faccin Evangelista. – 2023. 97 p. : il.

Orientador: Vania Elisabeth Barlette

Coorientador: Mauro Sérgio Góes Negrão

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Pampa, Física, Campus Bagé, 2023.

1. Teoria da Relatividade Especial. 2. História da Ciência. 3. Criatividade Distribuída. I. Barlette, Vania Elisabeth. II. Góes Negrão, Mauro Sérgio.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal do Pampa

**ANDRÉ FACCI EVANGELISTA**

**DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO DA TEORIA DA RELATIVIDADE ESPECIAL SOB A ÓTICA DA CRIATIVIDADE DISTRIBUÍDA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Física Licenciatura da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Licenciado em Física.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 11/12/2023.

Banca examinadora:

---

Profa. Dra. Vania Elisabeth Barlette  
Orientador  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Pedro Castro Xavier de Mello e Silva  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Leandro Hayato Ymai  
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **VANIA ELISABETH BARLETTE, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/12/2023, às 12:29, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **PEDRO CASTRO MENEZES XAVIER DE MELLO E SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/12/2023, às 13:52, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LEANDRO HAYATO YMAI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/12/2023, às 13:56, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1334993** e o código CRC **5B340835**.

Referência: Processo nº 23100.025631/2023-11 SEI nº 1334993

## RESUMO

Este estudo tem como objetivo fazer uma reconstrução histórica do desenvolvimento da Teoria da Relatividade Especial na perspectiva teórica da criatividade distribuída. Os procedimentos metodológicos envolveram estudos acerca do desenvolvimento histórico da Teoria da Relatividade Especial buscando estabelecer uma rede de relações, compartilhamentos e co-criações científicas entre os pesquisadores envolvidos, dentro dos seus contextos de produção, tendo-se como referência as categorias temáticas socialidade, materialidade e temporalidade extraídas da Teoria da Criatividade Distribuída. Essa teoria aborda a criatividade como um fenômeno social e cultural, em vez de apenas um atributo individual, enfatizando a importância dos contextos sociais, materiais e temporais no processo criativo. A partir da construção de uma rede de relações, observou-se que Poincaré, Lorentz e Einstein nesta ordem, estabeleceram os maiores números de conexões com os demais da rede para o desenvolvimento desta teoria. Como principal resultado deste estudo, produziu-se um texto sobre o desenvolvimento histórico da Teoria da Relatividade Especial na perspectiva da criatividade distribuída, buscando justificção por inferências a partir das categorias teóricas e os fatos históricos. Além disso, o trabalho apresenta o desenvolvimento de um material didático a partir dessa análise sociocultural e histórica do desenvolvimento da Teoria da Relatividade Especial.

Palavras-Chave: Teoria da Relatividade Especial. História da Ciência. Criatividade Distribuída.

## **ABSTRACT**

This study aims to reconstruct the historical development of the Theory of Special Relativity from the theoretical perspective of distributed creativity. The methodological procedures involved studying the historical development of the Theory of Special Relativity, seeking to establish a network of relationships, sharing, and scientific co-creation among the researchers involved, within their production contexts. The reference for this analysis was based on the thematic categories of sociality, materiality, and temporality extracted from the Theory of Distributed Creativity. This theory views creativity as a social and cultural phenomenon rather than just an individual attribute, emphasizing the importance of social, material, and temporal contexts in the creative process. By constructing a network of relationships, it was observed that Poincaré, Lorentz, and Einstein, in that order, established the greatest number of connections with others in the network for the development of this theory. The main result of this study is the production of a text on the historical development of the Theory of Special Relativity from the perspective of distributed creativity, seeking justification through inferences from theoretical categories and historical facts. Furthermore, this work presents the development of teaching material based on this sociocultural and historical analysis of the development of the Special Theory of Relativity.

**Keywords:** Special Theory of Relativity. History of Science. Distributed Creativity.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Criatividade na Perspectiva Histórico-Cultural de Lev Vygotsky .....	21
Figura 02 – Modelo de Criatividade Distribuída de Vlad Glăveanu .....	30
Figura 03 – Ilustração dos Círculos de Pensamento que Poincaré estava exposto	38
Figura 04 – Ilustração do Experimento de Michelson-Morley.....	46
Figura 05 – Uma esfera definida no sistema de referência móvel $k$ .....	65
Figura 06 – O formato de uma esfera no referencial estacionário $K$ .....	66
Figura 07 – Linha do Tempo .....	73
Figura 08 – Rede de Conexões.....	77
Figura 09 – Interações de Poincaré com objetos .....	80
Figura 10 – Interações de Einstein com objetos.....	82

## LISTA DE QUADROS

Quadro 01 – Material de Análise .....	31
---------------------------------------	----

## LISTA DE ABREVIATURAS

*id.* – *idem* – mesmo autor

*ibid.* – *ibidem* – mesma obra

*et al.* – *et alii* – e outros

n. – número

p. – página

f. – folha

v. – volume

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1 Propósito do Estudo .....	12
1.2 Objetivos .....	13
1.3 Abordagem Metodológica .....	14
1.4 Organização do Trabalho .....	14
<b>2 REFERENCIAIS TEÓRICO-METODOLÓGICOS</b> .....	<b>16</b>
2.1 Criatividade na Perspectiva Histórico-Cultural de Lev Vygotsky .....	16
2.2 Criatividade na Perspectiva Distribuída de Vlad Glăveanu .....	22
2.2.1 Criatividade Distribuída: O que é? .....	22
2.2.2 Teorias de Mente Estendida e Cognição Distribuída .....	23
2.2.3 Criatividade e Socialidade .....	25
2.2.4 Criatividade e Materialidade .....	27
2.2.5 Criatividade e Temporalidade.....	28
<b>3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b> .....	<b>31</b>
3.1 Materiais.....	31
3.2 Métodos.....	32
3.2.1 Seleção de fontes históricas .....	33
3.2.2 Leitura e análise do material histórico .....	33
3.2.3 Leitura da formulação teórica da criatividade distribuída de Glăveanu e seleção de categorias teóricas .....	33
3.2.4 Elaboração de um texto com inferências, interpretação e justificação do pressuposto que originou a pesquisa.....	34
<b>4 ANÁLISE DAS TRAJETÓRIAS DE VIDA DOS AUTORES DA RELATIVIDADE ESPECIAL</b> .....	<b>35</b>
4.1 Henri Poincaré .....	35
4.1.1 Coletivos de Pensamento de Henri Poincaré .....	36
4.1.2 A Medida do Tempo e a Questão da Simultaneidade.....	38

4.1.3 Pensamentos de Poincaré em relação à Construção do Conhecimento e à Criatividade.....	40
4.2 Albert Einstein .....	42
5 REVISÃO HISTÓRICA.....	45
5.1 Antecedentes Históricos dos Artigos Apresentados por Poincaré e Einstein em 1905 .....	45
5.2 A Dinâmica do Elétron por Henri Poincaré (1905-1906).....	49
5.2.1 Transformações de Lorentz .....	50
5.2.2 O Princípio da Mínima Ação .....	50
5.2.3 As Transformações de Lorentz e o Princípio da Mínima Ação .....	51
5.2.4 O Grupo de Lorentz.....	52
5.2.5 Ondas de Langevin .....	52
5.2.6 Contração dos Elétrons .....	53
5.2.7 Movimento Quase Estacionário .....	55
5.2.8 Movimento Arbitrário .....	55
5.2.9 Hipóteses sobre a Gravitação .....	56
5.3 Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento por Albert Einstein (1905).....	58
5.3.1 Parte I – Cinemática .....	60
5.3.1.1 Definição de Simultaneidade.....	61
5.3.1.2 Sobre a Relatividade dos Comprimentos e Tempos .....	62
5.3.1.3 Teoria da Transformação de Coordenadas e do Tempo de um Sistema Estacionário para outro Sistema em Movimento Uniforme de Translação Relativamente ao Primeiro .....	63
5.3.1.4 Significado Físico das Equações Obtidas em Relação ao Movimento de Corpos Rígidos e Relógios Móveis.....	65
5.3.1.5 Teorema da Adição de Velocidades .....	67
5.3.2 Parte II – Eletrodinâmica.....	67
5.3.2.1 Transformações das Equações de Maxwell-Hertz para o Espaço Vazio: Sobre a Natureza das Forças Eletromotrizes que ocorrem em um Campo Magnético Durante o Movimento .....	68

5.3.2.2 Teoria do Princípio Doppler e da Aberração .....	69
5.3.2.3 Transformação da Energia dos Raios de Luz. Teoria da Pressão da Radiação Exercida sobre Refletores Perfeitos .....	69
5.3.2.4 Transformações das Equações de Maxwell-Hertz quando as correntes de Convecção são levadas em conta .....	70
5.3.2.5 Dinâmica do Elétron Lentamente Acelerado.....	70
5.3.3 Parte III – Energia: A Inércia de um Corpo Depende do seu conteúdo Energético?.....	71
5.4 A Relatividade após os Artigos de Poincaré e Einstein.....	71
6 ANÁLISE, DISCUSSÃO E IMPLICAÇÕES PARA A EDUCAÇÃO BÁSICA .....	74
6.1 Análise.....	74
6.1.1 Interlocução entre pessoas para o Desenvolvimento da Teoria da Relatividade Especial (Socialidade).....	75
6.1.2 A Interlocução entre pessoas e objetos para o Desenvolvimento da Teoria da Relatividade Especial (Materialidade) .....	78
6.1.3 A Importância da passagem do Tempo para o Desenvolvimento da Teoria da Relatividade Especial (Temporalidade).....	83
6.2 Implicações para a Educação Básica .....	83
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	85
REFERÊNCIAS.....	86
APÊNDICE A – TEORIA DA RELATIVIDADE ESPECIAL: UMA HISTÓRIA DE MUITAS MÃOS.....	88

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Propósito do Estudo

A Teoria da Relatividade é amplamente popular, frequentemente retratada em diversos filmes, documentários, e outros meios. Essa teoria desempenha um papel crucial no mundo moderno, uma vez que suas ideias são fundamentais para aplicações em dispositivos GPS e outras tecnologias presentes em nosso cotidiano.

Com frequência, o desenvolvimento histórico da Teoria da Relatividade Especial é erroneamente apresentado como um processo de criação solitária atribuído apenas a Albert Einstein. Em outra direção, o presente trabalho de conclusão de curso busca destacar o processo de criação e co-criação envolvendo diversos cientistas, com ênfase nos principais contribuintes: Poincaré, Lorentz e Einstein.

A origem da ideia de realizar um estudo sobre a Teoria da Relatividade Especial está intimamente ligada à trajetória acadêmica do autor deste trabalho, pois sempre teve como objeto de estudo a Teoria da Relatividade, sendo este um dos principais motivos que o levaram a estudar física. Tendo isso em vista, e reconhecendo que não é possível compreender determinado tema da Física sem o conhecimento histórico de como, ou em que condições contextuais, este se desenvolveu, foi arquitetada a ideia da presente proposta de Trabalho de Conclusão de Curso.

No processo de criação da Teoria da Relatividade Especial, alcançou-se uma síntese e um formato mais próximo de uma compreensão sobre este tema com o artigo de Albert Einstein em 1905, intitulado por ele mesmo como "Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento". Esse artigo posteriormente ficou reconhecido como o marco inicial da Teoria da Relatividade Especial.

A importância deste estudo reside na possibilidade de compreender o surgimento do Princípio da Relatividade e da Teoria da Relatividade Especial em uma perspectiva social e cultural que vai além da perspectiva individual da concepção de criatividade, reunindo argumentos que indiquem que a construção da teoria foi uma obra de criação compartilhada, de caráter coletivo. Partindo desse pressuposto, espera-se um entendimento ampliado desse momento histórico para além das contribuições individuais à criatividade que se vinculam à construção de princípios físicos.

O contexto de desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso é marcado pela modernidade, uma vez que há imersão no mundo digital, o que facilita o acesso a uma ampla gama de materiais essenciais para melhor entender esse episódio histórico do desenvolvimento da ciência.

Espera-se com este trabalho tanto aprofundar o conhecimento em tópicos especiais da Teoria da Relatividade Especial quanto compreender esta criação humana com um viés ampliado da concepção de criatividade, bem como contribuir com recursos educacionais sobre o desenvolvimento desta teoria.

A proposta deste Trabalho de Conclusão de Curso centra-se no pressuposto de que a construção da Teoria da Relatividade Especial pode ser compreendida como resultado de um trabalho coletivo, co-criativo, envolvendo vários pesquisadores. Tomando-se esse pressuposto como verdade, como uma proposição, se poderá a partir dela inferir outras proposições. Para tanto, se vai procurar dar uma legitimidade a este modo de compreender o desenvolvimento da Teoria da Relatividade Especial, utilizando-se de uma abordagem social e cultural do fenômeno criativo com base no trabalho desenvolvido por Vlad Glăveanu (2014). Este é o **propósito** deste trabalho.

Com este propósito em mente, são traçados os objetivos, geral e específico, como segue.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é fazer uma reconstrução histórica do desenvolvimento da Teoria da Relatividade Especial na perspectiva da Teoria da Criatividade Distribuída, buscando justificação por inferências a partir das categorias teóricas e os fatos históricos.

Como objetivos específicos, temos:

- a. Fazer um estudo acerca do desenvolvimento histórico da Teoria da Relatividade Especial e das principais categorias temáticas da Teoria da Criatividade Distribuída;
- b. Estabelecer relações, compartilhamentos e co-criações científicas entre os pesquisadores envolvidos, dentro dos seus contextos de produção, em torno do desenvolvimento da Teoria da Relatividade Especial;

- c. Produzir um texto sobre o desenvolvimento histórico da Teoria da Relatividade Especial na perspectiva da criatividade distribuída com elementos de justificação; e,
- d. Produzir um material educacional (proposta de aula) usando todo o suporte histórico e conceitual desenvolvido no decorrer deste trabalho.

### **1.3 Abordagem Metodológica**

Este estudo adota características de uma revisão narrativa da literatura histórica, focalizando o desenvolvimento da Teoria da Relatividade Restrita, combinada com uma análise teórica categorial dos eventos históricos relevantes.

A abordagem de revisão narrativa na análise literária visa compreender os elementos essenciais das obras, destacando a importância da maneira como as histórias são narradas. Bal (2009) ressalta a importância de analisar a forma como as narrativas são construídas para uma compreensão mais profunda dos significados presentes nos textos literários.

A análise categorial, como método de pesquisa qualitativa, proporciona uma abordagem sistemática para desvendar os significados intrínsecos de um texto. Durante esse processo, o texto é minuciosamente segmentado, identificando palavras-chave ou trechos representativos. Essa metodologia não se limita à mera classificação; ela vai além, interpretando o significado subjacente, oferecendo, assim, uma compreensão mais profunda do conteúdo textual (Bardin, 2016).

### **1.4 Organização do Trabalho**

No Capítulo 2, são apresentados os referenciais teórico-metodológicos, os quais se destacam pela abordagem da Teoria Histórico-Cultural de Vygotsky e da Teoria da Criatividade Distribuída de Vlad Glăveanu. Esses referenciais constituem a base fundamental para a implementação dos procedimentos metodológicos detalhados no Capítulo 3.

Após a exposição dos procedimentos metodológicos, o trabalho prossegue com uma análise detalhada da trajetória de vida dos autores do Princípio da Relatividade e da gênese e o desenvolvimento histórico da Teoria da Relatividade Especial, oferecida de maneira abrangente nos Capítulos 4 e 5. No Capítulo 6, a discussão se

concentra na análise, estabelecendo conexões através de justificações através de inferências entre a Teoria da Criatividade Distribuída e a Teoria da Relatividade Especial. Adicionalmente, são apresentadas as implicações significativas dessa análise para a educação básica.

Por fim, as considerações finais deste trabalho de conclusão de curso são apresentadas, consolidando os principais pontos abordados e oferecendo uma síntese coerente dos pontos abordados e das contribuições do estudo.

## 2 REFERENCIAIS TEÓRICO-METODOLÓGICOS

Ao longo da história da espécie humana, temos sido testemunhas da notável habilidade criativa do ser humano, seja através da elaboração de histórias fascinantes em simples pedaços de papel, da construção de grandiosos edifícios ou da invenção de uma variedade de utensílios. Essas conquistas são frequentemente reconhecidas como expressões da capacidade criativa, imaginativa e transformadora do homem.

Nas subseções que seguem, abordaremos a criatividade na perspectiva histórico-cultural de Lev Semenovitch Vygotsky (2012) e na perspectiva distribuída de Vlad Petre Glăveanu (2014).

### 2.1 Criatividade na Perspectiva Histórico-Cultural de Lev Vygotsky

A perspectiva histórico-cultural da criatividade e imaginação foi primeiramente apresentada por Lev Vygotsky em um ensaio publicado originalmente em 1930 (Vygotsky, 2012). Ele estabeleceu uma conexão entre a imaginação e o desenvolvimento histórico-cultural, enfatizando a interação com o meio. Suas contribuições foram fundamentais para uma compreensão mais profunda da natureza da criatividade e de como ela surge por meio da interação entre o indivíduo e seu ambiente.

Quando observamos a história do desenvolvimento humano, podemos ter a falsa impressão de que a imaginação é uma capacidade de poucos. No entanto, ao fazermos uma análise científica, averiguamos que todo ser humano é dotado da capacidade criativa. Ao observarmos com maior cuidado, podemos elencar o comportamento humano através de duas atividades essenciais. A primeira está vinculada à capacidade do homem em reproduzir formas e coisas já existentes com base em suas impressões anteriores (*id.*, *ibid.*).

O nosso cérebro e os nossos nervos, providos de uma enorme plasticidade, modificam com facilidade a sua estrutura delicada sob a influência destas alterações, ou outras ações, conservando os seus vestígios sob determinada condição: que as ações sejam suficientemente fortes ou se repitam com bastante frequência. No cérebro ocorre algo semelhante ao que acontece com a folha de papel quando a dobramos ao meio; no lugar da dobra fica a marca da dobra – resultado da modificação produzida; a marca da dobra ajuda a repetição futura dessa mesma modificação. Basta soprarmos a folha para que ela dobre no mesmo sítio, onde ficou a marca da dobra (Vygotsky, 2012, p. 22).

No entanto, Vygotsky (2012) ressalta que a habilidade reprodutora por si só não é suficiente para descrever toda a atividade humana. Limitar-se apenas à reprodução levaria o ser humano a uma eterna repetição, sem a capacidade de se adaptar a novos desafios e ambientes. Por isso, o cérebro humano é dotado de uma segunda habilidade: a imaginação e criação.

Quando eu, por imaginação, desenho um quadro do futuro, digamos, a vida do homem na sociedade socialista, ou um quadro de uma parte da vida passada e da luta do homem pré-histórico, em ambos os casos, não repito impressões vividas por mim outrora. Não restabeleço simplesmente os traços de excitações nervosas pretéritas que chegaram ao meu cérebro; na realidade, eu nunca vi fosse o que fosse nem desse passado, nem desse futuro, e, no entanto, posso imaginá-lo, formar uma ideia, uma imagem ou um quadro (Vygotsky, 2012, p. 23).

Então, é de fácil percepção no âmbito das relações e dos sentidos humanos que o homem é dotado dessas duas habilidades e toda atividade humana que cria ou constrói algo novo está vinculada a essa segunda parte do cérebro. Mas quando ela acontece? E, em outras palavras, como o cérebro humano é capaz de criar histórias, fantasias e demais elementos imaginativos sem uma ligação imediata com o mundo real?

Ao longo de toda a história humana, foram poucos os que abordaram essa temática profunda e complexa, como já salientado anteriormente. Porém, no âmbito da psicologia, costuma-se denominar toda atividade combinatória e criadora como imaginação ou fantasia, palavras equivalentes nesse contexto. Portanto, devemos ter o cuidado importante de não denotar a palavra fantasia como uma manifestação do irreal. De fato, sem ela, não seria possível a confecção ou a criação de qualquer ciência, tecnologia ou mesmo de qualquer cultura presente em nosso mundo (Vygotsky, 2012).

Então, como Ribot, um psicólogo citado por Vygotsky, destaca, toda invenção, grande ou pequena, antes de se realizar, foi concebida exclusivamente pela imaginação e elaborada previamente pela mente por meio de novas combinações e conexões.

[...] Não sabemos quem realizou a maior parte das invenções; preservaram-se apenas alguns dos nomes de grandes inventores. A imaginação é sempre revelada em todas as circunstâncias, qualquer que seja o modo como é apresentada: individualmente ou em grupo. Para que o arado, que no

passado não foi mais do que um simples bocado de madeira com um cabo queimado, se transformasse, a partir deste tosco instrumento manual, no que é hoje, após uma série de modificações, descrita em manuais especializados, quem sabe avaliar quanta imaginação foi necessária? De igual modo, as chamas frágeis dos ramos resinosos dos pinheiros, que serviram de archote para o homem primitivo, servem de exemplo para uma longa linha de invenções até se chegar à iluminação a gás ou à iluminação elétrica. Todos os objetos do nosso cotidiano, não excluindo os mais simples e habituais, são, por assim dizer, imaginação cristalizada (Ribot, 1901 *apud* Vygotsky, 2012, p. 24-25).

A citação do trecho exposto acima é de grande importância, pois através dele podemos notar que a atividade imaginativa não é restrita a um grupo seleto de pessoas. Claro que a seres humanos como Darwin, Lorentz, Einstein, Poincaré e tantos outros merecem todo o reconhecimento. No entanto, o ato imaginativo está presente em todo ser humano e, inclusive, na atividade de nosso dia a dia.

De fato, ao analisarmos a ação criadora de pequenas e supostamente insignificantes invenções de forma coletiva, levando-se em conta o ato criativo coletivo, elas representam a maior parte das invenções dos seres humanos (Vygotsky, 2012).

A maior parte das invenções foram realizadas por desconhecidos, como a propósito deste assunto sublinhou Ribot. A compreensão científica deste problema obriga-nos a tratar a criatividade mais como uma regra do que como uma exceção. É certo que as manifestações superiores da criatividade são até hoje apenas acessíveis a um grupo de gênios eleitos da humanidade, mas no dia a dia a criatividade constitui-se como condição necessária para a existência e tudo o que ultrapassa os limites da rotina, mesmo uma pequeníssima quantidade de novidade, é devida ao processo criativo humano (Vygotsky, 2012, p. 26).

Quando se levam esses elementos em consideração, percebe-se que a atividade imaginativa está presente no ser humano em todos os estádios de desenvolvimento, inclusive na infância, onde são notados com frequência. Isso constitui um dos campos de estudo da psicologia da educação, que se dedica à problemática da criatividade, ao seu desenvolvimento e à sua promoção, e ao seu significado geral no desenvolvimento da criança.

Levando isso em conta, percebe-se que a simples confecção de um jogo por parte de uma criança não se constitui como uma simples atividade de recordação, mas sim como uma reelaboração das atividades já vivenciadas, uma adaptação e uma

construção de uma nova realidade-resposta às necessidades e exigências afetivas (Vygotsky, 2012).

Após a elucidação de que a imaginação está presente em todas as fases da vida e da vivência humana como um todo, pode-se voltar à questão proposta acima: como se origina a atividade criativa? A análise cuidadosa dessa atividade revela-se complexa, pois ela não surge do nada, ao contrário, é lenta e gradual e desenvolve-se de formas mais simples para mais complexas. O estudo cuidadoso da atividade imaginativa revela que sua própria origem tem raízes firmadas na realidade, pois qualquer ato criativo é elaborado a partir de elementos da realidade e, portanto, é retirado de experiências anteriores já vivenciadas pelo sujeito (*id.*, *ibid.*).

A análise científica de algumas das mais fantásticas elaborações afastadas da realidade, por exemplo, os contos, mitos, lendas, sonhos etc., convence-nos de que as fantasias mais elaboradas que representam não são mais do que uma nova combinação de elementos semelhantes, de facto retirados da realidade, mas apenas submetidos à alteração ou à reelaboração pela ação da nossa imaginação (Vygotsky, 2012, p. 30).

O fato de a atividade criativa estar vinculada diretamente ao número de experiências vivenciadas pelo sujeito vincula-se diretamente à capacidade criativa de cada ser humano, ou seja, a criança possui uma imaginação mais limitada do que a do adulto porque suas experiências acumuladas são em menor número. E assim, pode-se enunciar a **primeira** forma de ligação da fantasia com a realidade: a atividade criadora da imaginação está em relação direta com a riqueza e a variedade da experiência acumulada pelo ser humano, uma vez que essa experiência é a matéria-prima a partir da qual se elaboram as construções da fantasia. Quanto mais rica for a experiência humana, mais abundante será a matéria disponível para a imaginação (Vygotsky, 2012).

Temos ao todo quatro formas de interligação entre a fantasia e a realidade, sendo a **segunda** aquela entre o produto da fantasia e determinados elementos da realidade (*id.*, *ibid.*). Quando citamos determinado marco histórico, por exemplo, a criação da Teoria da Relatividade, conseguimos imaginar o trabalho árduo efetuado por Lorentz, Poincaré, Einstein, entre outros, mesmo sem nunca ter vivido essa experiência. Essa forma de ligação torna-se possível apenas graças à experiência alheia ou socialização, ou seja, lemos sobre isso, ouvimos falar sobre isso e, a partir

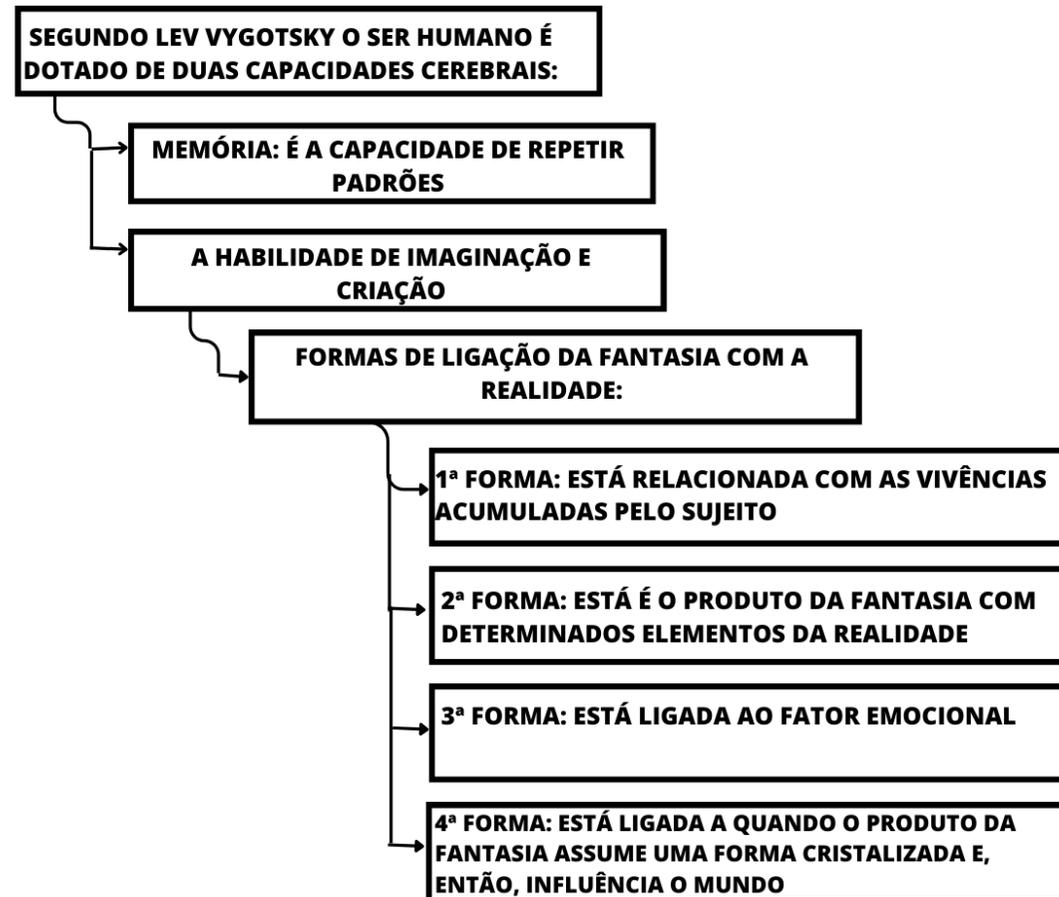
desses elementos, conseguimos uma nova combinação com base em experiências e histórias contadas por outras pessoas.

A **terceira** forma de ligação entre a fantasia e a realidade refere-se ao fator emocional. Essa lei, como o próprio nome diz, está relacionada ao fator emocional humano.

Para exemplificar de uma forma simples esta combinação de imagens, detentoras de sinal emocional semelhante, temos as situações correntes de aproximação estabelecida entre duas quaisquer impressões distintas, que nada têm em comum entre si, exceto provocarem em nós estados de humor semelhantes. Quando enunciamos que o azul é frio e o vermelho é quente, então aproximamos a impressão de azul e de frio apenas no facto de elas causarem em nós estados de humor semelhantes. É fácil perceber que a fantasia imbuída deste fator emocional, pela lógica interna dos sentimentos, representa o mais subjetivo e íntimo tipo de imaginação (Vygotsky, 2012, p. 38-39).

Por fim, a **quarta** e última forma de ligação entre a realidade e a fantasia refere-se ao fato de que o produto da fantasia pode não ter essencialmente ligação com a realidade, mas ao encarnar uma nova forma material no mundo exterior à mente, essa imaginação assume uma forma "cristalizada". Ao tornar-se objeto material, começa a existir no mundo e influenciar o mundo que nos cerca (Vygotsky, 2012). Podemos sintetizar a perspectiva histórico-cultural de Vygotsky, através da Figura 01.

Figura 01 – Criatividade na Perspectiva Histórico-Cultural de Lev Vygotsky



Fonte: Adaptado de Vygotsky (2012).

## 2.2 Criatividade na Perspectiva Distribuída de Vlad Glăveanu

Definir o que é um ato criativo, ou mesmo o que é criatividade, é um problema multifacetado. Dentre as teorias contemporâneas sobre criatividade e destaca-se o modelo da Criatividade Distribuída, proposto por Vlad Glăveanu, que trata o fenômeno da criatividade para além do indivíduo. Em outras palavras, a teoria de Glăveanu entende a criatividade como um ato distribuído entre pessoas, objetos e lugares. Assim sendo, toda a nossa análise se alicerçará na obra de Glăveanu “Distributed Creativity: Thinking Outside the Box of the Creative Individual”, publicada em 2014, onde ele explora o ato criativo a partir de um olhar muito mais amplo em comparação com a limitada e dogmática visão que olha somente para o indivíduo.

### 2.2.1 Criatividade Distribuída: O que é?

Ao olharmos para a história, somos testemunhas dos grandes feitos que impactaram a vida humana ao longo dos séculos, transparecendo a visão do gênio isolado e extremamente criativo que obteve profundas compreensões acerca da natureza, frequentemente ditas, por muitos, para além do seu tempo. Porém, aqui demonstraremos que, na perspectiva de criatividade distribuída de Glăveanu, o ato criativo não pode ser compreendido adequadamente desta forma e que a criatividade é um ato distribuído, e distribuído entre pessoas, tempos e lugares. O fenômeno da criatividade encontra-se até nos atos mais comuns da vida cotidiana, como argumenta Glăveanu (2014) e explora em sua obra:

Nesse sentido, a atividade de Maria e seus colegas decoradores têm uma importante lição a nos ensinar - ela torna visível a rede de pessoas, ações e relações que tornam a criatividade possível e que podem ser obscurecidas quando nos concentramos exclusivamente no "alto nível" desse fenômeno (Glăveanu, 2014, p. 2, tradução nossa).

No estudo da criatividade, costuma-se frequentemente realizar uma distinção entre o indivíduo criativo, ou seja, seu cérebro, que seria o lugar onde acontece o ato criativo, e o mundo externo social e cultural no qual este indivíduo está situado e que é modificado pelo ato criativo. Porém, ao analisarmos a criatividade dessa forma, podemos fazer a seguinte pergunta: como podem as mentes individuais compreender

ou influenciar o mundo do qual estão separadas dessa maneira? Ou seja, podemos colocá-lo em paradoxo.

Nesse contexto, distribuir a criatividade representa, metaforicamente, a ação de abrir a “caixa” da mente individual não para examiná-la mais a fundo (e então fechá-la e colocá-la de volta em seu lugar, dentro da cabeça), mas para eliminar completamente essa “caixa”. Se a criatividade é um fenômeno distribuído, dinâmico, sociocultural e desenvolvimental, como argumentado neste livro, então não faz sentido discuti-la em termos de fronteiras fixas e domínios estáticos (Glăveanu, 2014, p. 2, tradução nossa).

Podemos perceber que a criatividade é um ato distribuído, como Glăveanu argumenta nos seus estudos de doutoramento sobre a criatividade envolvida no artesanato. Ela não pode, de modo algum, ser reduzida somente à mente do indivíduo, mas inclui necessariamente outros fatores, como o afeto, a interação com objetos e a taticidade, assim como uma longa trajetória histórica que envolve comunidades inteiras. Glăveanu expõe sua opinião no ato que, muitas vezes, denominamos como plágio no caso dos ovos de Páscoa:

Há um grande consenso de que, mesmo ao tentar copiar o mesmo modelo, nenhum dos dois ovos são iguais. Isso torna as acusações de "roubo" de padrões de outros decoradores absurdas, já que "cada [decorador] deixa sua própria marca", a marca de um estilo único ou "mão", como é frequentemente chamado (Glăveanu, 2014, p. 4, tradução nossa).

Então, se a criatividade está em todos os lugares, como podemos defini-la adequadamente? Segundo Torrance (1988 *apud* Glăveanu, 2014), a criatividade desafia uma definição precisa, pois ela é quase infinita e envolve todos os sentidos, como visão, olfato, audição, sensação, paladar e, até mesmo, talvez, o extrassensorial. Grande parte dela é invisível, não verbal e inconsciente. Portanto, é extremamente difícil defini-la de maneira precisa, fazendo o uso somente de palavras.

Essa nova visão, mais abrangente do que consiste a criatividade e o ato tido como criativo, torna necessário entrar no mérito da discussão das teorias de mente estendida e da cognição distribuída. Assim, poderemos ao final trazer o modelo básico de criatividade de Glăveanu (2014) centrado em três pilares que se relacionam e se interligam: **(a) entre pessoas, (b) entre pessoas e objetos e (c) ao longo do tempo.**

### 2.2.2 Teorias de Mente Estendida e Cognição Distribuída

A Teoria da Criatividade Distribuída fundamenta-se nas abordagens de mente estendida e cognição distribuída. Nesse contexto, a concepção de fronteiras "naturais" da mente, delimitadas pela pele e o crânio, é rejeitada. No entanto, é importante destacar que essa perspectiva não adere integralmente ao externalismo. O que se busca e defende é uma compreensão do externalismo que enfatiza o papel ativo do ambiente nos processos cognitivos. Em outras palavras, propõe-se uma visão de mente estendida que transcende os limites anatômicos do cérebro individual (*id., ibid.*).

Clark e Chalmers, mencionados por Glăveanu (1998 *apud* Glăveanu, 2014), sustentam o princípio da paridade, que de maneira simples defende que qualquer parte do mundo que opere, como os processos que correm dentro do cérebro, seja prontamente reconhecida como cognitiva. Por exemplo, algumas anotações em um caderno desempenham eficazmente o papel de extensões de nossa memória. No entanto, é relevante ressaltar que, na perspectiva de Clark e Chalmers, embora a cognição se estenda além do cérebro do indivíduo, isso não implica automaticamente que a consciência também o faça.

No entanto, de tempos em tempos, surgem ideias mais audaciosas, como por exemplo a de Menary (2006 *apud* Glăveanu, 2014), que propõe a concepção do interacionismo cognitivo, uma perspectiva que considera veículos e processos tanto internos quanto externos como componentes de um todo integrado, ou seja, uma mente híbrida. Portanto, dessa maneira, os recursos externos não apenas replicam os processos internos do cérebro, mas os expandem de forma substancial.

Ao considerarmos o modelo de mente estendida como verdadeiro, devemos, portanto, reconhecer o papel das estruturas institucionais, conforme argumentado por Gallagher (2013 *apud* Glăveanu, 2014), que considerou abordagens clássicas muito conservadoras nesse sentido. Ele defende a ideia de 'instituições mentais' que são instituições não apenas ajudando-nos a realizar tarefas cognitivas, mas tornando-as possíveis. Assim, o próprio sistema legal é um exemplo disso.

Esta discussão nos conduz de maneira inevitável a uma análise da relação entre a "mente" e a "cultura", abordando, assim, o modelo de mente distribuída. Deve-se reconhecer o papel desempenhado pelo mundo cultural na "mente". Esse ramo é denominado psicologia cultural e argumenta que se deve considerar qualquer produto do pensamento humano como algo desenvolvido de forma distribuída entre pessoas e contextos (Glăveanu, 2014).

Geertz (1973 *apud* Glăveanu, 2014), referiu-se ao ser humano como "um animal incompleto e inacabado", necessitando de um meio cultural. Portanto, atos como lembranças, pensamentos, sentimentos, desejos e até mesmo a criação dependem de elementos externos ao corpo dos organismos individuais, pois todos esses processos estão sempre em busca de articulação e exteriorização, mesmo que isso não seja feito de imediato.

Devido ao seu caráter amplo e à sua preocupação com o exterior, o modelo da Criatividade Distribuída está em perfeita consonância com a Teoria Histórico-Cultural de Vygotsky. Ele foi um dos primeiros a reconhecer o fato de que todo criador, incluindo os aclamados 'gênios', tem suas criações como produtos do ambiente aos quais estão expostos (Glăveanu, 2014).

Além disso, o modelo da Criatividade Distribuída busca compreender como as interações entre pessoas, pessoas e objetos, e o fator da temporalidade propiciam e tornam possível o ato criativo, e, assim, iremos investigar cada um destes tópicos.

### **2.2.3 Criatividade e Socialidade**

Glăveanu exemplifica o fator ou o impacto da socialidade no ato criativo, utilizando o exemplo da decoração de ovos de Páscoa. Claramente, para executar essa tarefa, é necessária a aquisição de habilidades por meio de um período de aprendizagem, e a transmissão cultural do ofício requer contínuas interações sociais entre pessoas de diferentes idades e níveis de especialização (*id., ibid.*).

Assim, pode-se concluir que o ato criativo não se resume apenas ao próprio ato criativo e à colaboração que ocorre ao seu redor, mas relaciona-se de modo intrínseco com uma série de "públicos" que o tornam efetivamente possível. Por exemplo, na tradição de decoração de ovos de Páscoa, os "padrões tradicionais" não são radicalmente alterados, e "novidades" são introduzidas pelo criador ou pelo mercado em crescimento de acordo com as necessidades do público (*id., ibid.*).

A partir desta premissa, podemos rapidamente perceber o conflito existente entre essa visão mais abrangente da criatividade com a ideia do Criador Único, uma visão enganadora que associa a criatividade unicamente como um fenômeno interno que ocorre na "mente" do indivíduo. Benson (1993 *apud* Glăveanu, 2014), argumenta que combater a ideia do Criador Único não significa excluir completamente o criador, mas sim reconhecer o seu não isolamento, pois a ação criativa "se estende" para o

mundo de outras pessoas. Em cada caso, não é apenas uma influência "externa" que é internalizada pelo agente criativo: processos de interação e comunicação fazem parte integrante do que significa criar e contribuir efetivamente para o resultado (Glăveanu, 2014, p. 37, tradução nossa).

Pode-se encontrar a crença no Criador Único aparecendo na ciência repetidas vezes, onde frequentemente se fazem analogias com figuras populares como Newton e Einstein, o que tende a obscurecer o fato de que a produção científica é, na verdade, uma forma profundamente colaborativa de atividade. Conforme argumenta Glăveanu:

Os cientistas não apenas estão imersos no trabalho de outros através dos debates mais recentes em seu campo, mas também fazem parte de equipes de pesquisa, frequentemente possuindo membros sobrepostos em vários grupos e se relacionando com redes globais (Glăveanu, 2014, p. 37, tradução nossa).

Apesar de esse fato tornar-se evidente ao receber uma atenção mais especial, frequentemente somos levados de volta à ideia de que indivíduos fazem a ciência avançar, em vez de equipes. Ao assistir a cerimônias de premiações ou ler descrições da mídia sobre as descobertas científicas, somos levados inúmeras vezes a este erro (Glăveanu, 2014).

Um dos pontos a favor desse modelo mais abrangente de criatividade (socialmente) distribuída é o fato de que nenhum ato criativo está completo sem a sua apreciação, e essa apreciação requer necessariamente a interação com outras pessoas. Portanto, pode-se afirmar que o ato criativo somente adquire valor quando é aplicado a qualquer pessoa, objeto, processo, contexto, e assim por diante, e tudo isso requer interações entre diversas pessoas (*id.*, *ibid.*).

Em outras palavras, pode-se concluir que é impossível separar os indivíduos criativos e suas obras do contexto social e histórico em que criam suas obras. Segundo Csikszentmihalyi (1988 *apud* Glăveanu, 2014), a criatividade é produzida no diálogo entre três fatores inter-relacionados.

1. O campo, composto por especialistas e guardiões que selecionam, dentre o que o indivíduo produz, aqueles resultados que são considerados dignos de preservação.

2. O domínio, ou a área da cultura à qual os resultados criativos contribuem e a partir da qual, por meio de processos de acumulação e transmissão, eles se tornam disponíveis para futuros criadores.
3. O indivíduo que promove mudanças dentro do domínio cultural, mudanças que o campo (em última essência, se não inicialmente) validará como criativas.

Assim, ao questionar 'o que é criatividade?', a resposta de acordo com Csikszentmihalyi (1988 *apud* Glăveanu, 2014), é 'um fenômeno que resulta da interação entre três sistemas' e se tornaria impossível sem qualquer um deles.

#### **2.2.4 Criatividade e Materialidade**

Ao abordar a importância da interação com os objetos no ato criativo, Glăveanu retorna ao exemplo da decoração de ovos de Páscoa. Ou seja, no ato de decorar o ovo de Páscoa em si, existem diversas ferramentas com as quais o decorador interage. Portanto, é possível argumentar que as ideias criativas são moldadas pela ação distribuída entre pessoas e artefatos.

No exemplo do artesanato, é possível concluir facilmente que os artesãos estão imersos o tempo todo em um mundo material capaz de inspirá-los. No entanto, eles não são apenas receptores passivos desse patrimônio cultural, mas sim atores criativos que decidem o que adotar ou não adotar (Glăveanu, 2014).

Então ao iniciar-se a interação entre o indivíduo e o material, por exemplo no caso da decoração dos ovos de Páscoa a ação distribuída entre os decoradores e o artefato emergente, a relação criador-objeto não se apresenta de forma suave ou livre de problemas (*id.*, *ibid.*).

Em outras palavras, o objeto resiste à interação, e assim, essas dificuldades encontradas o moldam ativamente, revelando novos caminhos de ação e fechando outros. Portanto, o produto da criatividade não é apenas confeccionado, mas participa de sua própria criação e transforma o indivíduo no processo de criação (*id.*, *ibid.*).

Assim, nesse sentido, podemos enunciar que os objetos resistem a certos significados ou, ainda mais, resistem aos nossos próprios esforços de domar a sua estranheza e ancorá-los em algo simbólico e compartilhado. Glăveanu argumenta que:

Grandes criações, como a teoria da evolução de Darwin ou a teoria da relatividade de Einstein, são consideradas fora (e à frente) do quadro mental científico de sua época. Mas isso também é verdade para formas mais mundanas de ação criativa, nas quais os objetos desafiam os significados atribuídos a eles (Glăveanu, 2014, p. 58, tradução nossa).

Então, no âmbito da Teoria da Criatividade Distribuída, a ideia de distribuição vem desafiar o foco no indivíduo criativo e colocar em evidência e mostrar que as ferramentas materiais fazem parte integrante do sistema psicológico ‘estendido’ que incorpora elementos do ambiente imediato (Glăveanu, 2014).

Segundo Boesch (2007 *apud* Glăveanu, 2014), os objetos canalizam nossa ação ao determinar onde e como podemos nos mover, o que podemos fazer, moldam nosso potencial de ação e autoconceito, indicam nosso status social e regulam as interações sociais.

### **2.2.5 Criatividade e Temporalidade**

Ao abordar a questão da temporalidade, Glăveanu retorna ao exemplo da decoração de ovos de Páscoa, que não pode ser entendido apenas através da análise do contexto sociocultural-material abordado nas sessões anteriores. Torna-se necessário também a introdução de algo novo, que é o contexto temporal.

Além disso, os aspectos sociais e materiais dessa arte popular só podem ser estudados dentro de seu desdobramento no tempo, pois é precisamente o “movimento” do passado ao futuro que marca tanto o acúmulo histórico quanto a abertura dessa prática em relação a novos desenvolvimentos (Glăveanu, 2014, p. 65, tradução nossa).

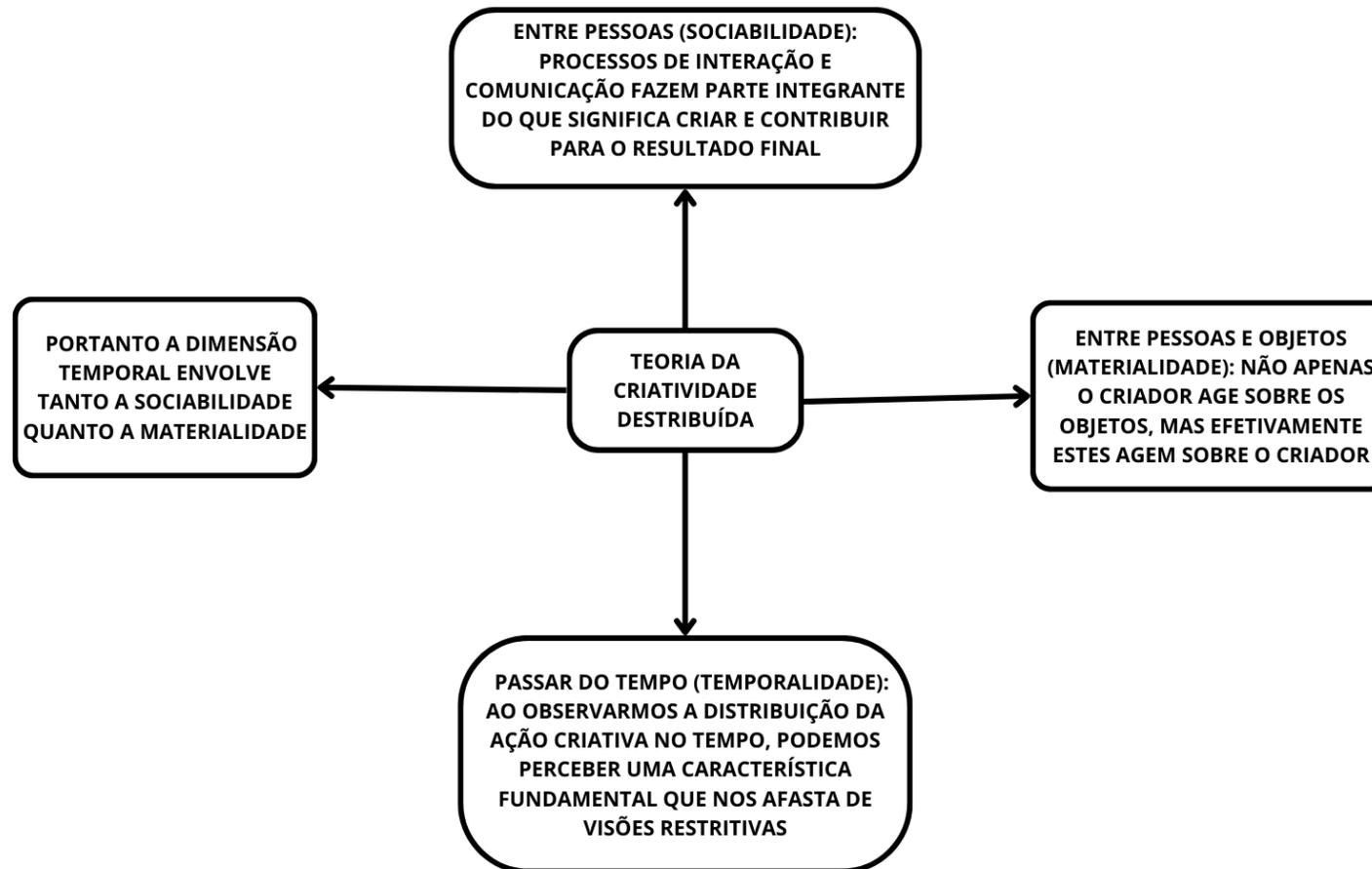
A noção de criatividade distribuída envolve, portanto, o fator temporal, pois a distribuição da ação criativa no tempo é uma característica fundamental que, quando considerada, nos afasta de visões restritivas. No contexto desse modelo, tais visões restritivas ocorrem quando atribuímos o processo criativo unicamente à mente de indivíduos (Glăveanu, 2014).

O fator temporal da criatividade tem um poder único de envolver tanto a socialidade quanto a materialidade, possibilitando que o processo criativo se desenvolva no tempo, e, portanto, aperfeiçoando invenções, ideias e teorias que são

produtos de um modelo criativo que se estende muito além do indivíduo, espalhando-se ou distribuindo-se entre pessoas e objetos (*id.*, *ibid.*).

A teoria da criatividade distribuída caracteriza-se, portanto, por tratar o processo criativo sem focar apenas no indivíduo criativo. Ela defende que a criatividade se estende muito além do indivíduo e está presente em todos os contextos, incluindo teorias revolucionárias como a Mecânica Quântica, Relatividade Especial e Geral, bem como em ações do nosso cotidiano, como, por exemplo, a decoração de ovos de Páscoa. Podemos, então, sintetizar o modelo proposto por Glăveanu no mapa mental da Figura 02.

Figura 02 – Modelo de Criatividade Distribuída de Vlad Glăveanu



Fonte: Adaptado de Glăveanu (2014).

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste estudo, utilizamos a obra e a teorização do modelo distribuído de Glăveanu (2014) para examinar o desenvolvimento histórico da Teoria da Relatividade Especial, buscando evidências no processo de construção e evolução. Esses procedimentos buscaram realizar justificações por inferências de maneira mais fundamentada.

#### 3.1 Materiais

Durante a elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso, realizou-se uma extensa revisão bibliográfica, abrangendo a leitura, consulta e análise de uma diversificada gama de obras e livros. Priorizou-se a exploração de artigos, livros e textos originais pertinentes ao tema da pesquisa. O Quadro 01, apresentado a seguir, detalha de forma abrangente toda a bibliografia analisada, que desempenhou um papel fundamental na concepção deste trabalho.

Quadro 01 – Material de Análise

(Continua)

<b>Autor(es)</b>	<b>Obra</b>	<b>Ano</b>
CAPIBARIBE, Ayni R	O princípio da Relatividade: Henri Poincaré (1854 – 1912).	2020a
CAPIBARIBE, Ayni R	O princípio da relatividade: Albert Einstein (1905).	2020b
EINSTEIN, Albert	Notas autobiográficas.	2019
EINSTEIN, Albert	Indução e dedução na Física.	2005
EISNTEIN, Albert	Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento. Textos fundamentais de física moderna, I volume: O princípio da relatividade.	1978
ISAACSON, Walter	Einstein: sua vida, seu universo.	2007
KOX, A. J.	The Scientific Correspondence of H.A. Lorentz.	2008

Quadro 01 – Material de Análise

		(Conclusão)
LORENTZ, H. A.	A Fenômenos eletromagnéticos num sistema que se move com qualquer velocidade inferior à da luz. Textos fundamentais de física moderna, I volume: O princípio da relatividade.	1978
MACH, Ernst	The Science of Mechanics: A critical and Historical Account of its Development.	1919
NEWTON, Issac	PRINCIPIA: Princípios Matemáticos de Filosofia Natural.	2018
PATY, Michel	A criação científica segundo Poincaré e Einstein.	2001
POINCARÉ, Henri	The foundations of science: science and hypothesis, the value of science, science and method. Tradução de George Bruce Halsted, Cambridge: Cambridge University Press. [Obra original publicada em 1902].	2015
SCHUTZ, Bernard F.	A first course in general relativity.	2012

Fonte: Autor (2023).

Após uma análise histórica, procedemos à reconstrução da gênese e evolução da Teoria da Relatividade Especial sob uma nova perspectiva, enfatizando a relevância do intercâmbio de ideias, especialmente no âmbito da imaginação e da criatividade, no desenvolvimento das teorias físicas. Com essa abordagem, almeja-se oferecer uma contribuição que promova uma compreensão mais abrangente e contextualizada desse significativo marco científico.

### 3.2 Métodos

O estudo utilizou uma combinação da revisão narrativa da literatura histórica (Bal, 2019) com a análise categorial dos fatos (Bardin, 2016), o que permitiu um aprofundamento do conteúdo histórico e uma reflexão acerca do fenômeno da criatividade no processo histórico de desenvolvimento da Teoria da Relatividade Restrita em seus contextos de produção social, material e temporal.

O passo a passo metodológico utilizado é apresentado a seguir.

### **3.2.1 Seleção de fontes históricas**

A seleção do material histórico foi realizada com ênfase nas fontes primárias, provenientes de cientistas, como Lorentz, Poincaré e Einstein, optando por traduções autorizadas para o português. Entretanto, devido às dificuldades encontradas na busca por obras originais desses pensadores, recorreremos a fontes secundárias, como as contribuições de Capibaribe (2020a; 2020b).

### **3.2.2 Leitura e análise do material histórico**

Posteriormente, procedemos à leitura e análise abrangente do material histórico, culminando na construção de uma revisão histórica abordando a gênese e o desenvolvimento da Teoria da Relatividade Especial.

### **3.2.3 Leitura da formulação teórica da criatividade distribuída de Glăveanu e seleção de categorias teóricas**

Então, foi realizada a análise qualitativa detalhada da obra de Glăveanu (2014) intitulada "Distributed Creativity: Thinking Outside the Box of the Creative Individual" (Em tradução livre: Criatividade Distribuída: Pensando Além dos Limites do Indivíduo Criativo).

No estudo de campo de Glăveanu com habitantes de uma vila de artesãos da Romênia no ofício de decorar ovos de Páscoa, ele entendeu que a criação artesanal dos habitantes não poderia ser compreendida sem incluir a afetividade, os materiais, além do aspecto histórico que envolvia seus habitantes num ambiente imerso em formas e símbolos tradicionais desenhados não só em ovos de Páscoa, mas também nas casas. Os artesãos faziam a decoração nos ovos de Páscoa combinando padrões existentes, adaptando-os a novos contextos ou criando um estilo pessoal, em que gerar decorações idênticas era uma impossibilidade prática ou uma tarefa muito árdua (Glăveanu, 2014, p. 4). A decoração tradicional, segundo o autor, nunca ocorre somente na mente, mas requer uma grande variedade de ferramentas (pigmentos de cor, instrumentos de desenho, fonte de calor, cera, etc.) e uma sucessão de ações, bem como o reencontro com decoradores individuais "com os olhos e as mãos de quem o ensinou a decorar" (*id., ibid.*, p. 5), que ajuda o artesão a continuar a atividade,

que aprecia e acaba por comprar os produtos deste trabalho. Para entender o ofício, Glăveanu ainda achou necessário considerar tanto o espaço quando o tempo, pois os estilos de decoração diferiam de uma região para outra, além de ser parte da trajetória histórica específica da vida de seus habitantes.

Com essa síntese, nossa intenção foi explicar a origem das três categorias utilizadas por Glăveanu em sua teoria da criatividade distribuída para compreender o fenômeno da criatividade em contexto sociocultural: a socialidade, a materialidade e a temporalidade. No presente estudo, essas categorias também foram utilizadas para a análise no desenvolvimento histórico da Teoria da Relatividade Especial.

O procedimento metodológico foi, então, tornar a compreensão mais acessível, dividindo a obra de maneira intuitiva em três categorias fundamentais que compõem a Teoria da Criatividade Distribuída. Essas categorias são:

- Entre pessoas (Socialidade);
- Entre pessoas e objetos (Materialidade);
- Passagem do tempo (Temporalidade).

#### **3.2.4 Elaboração de um texto com inferências, interpretação e justificação do pressuposto que originou a pesquisa**

Através dessas categorias, estabelecemos uma conexão entre a Teoria da Criatividade Distribuída e a evolução histórica da Teoria da Relatividade Especial, fundamentando-a por meio de justificações por inferências. Na epistemologia, esse processo refere-se à capacidade de construir ou ser embasado por meio de inferências lógicas provenientes de outras crenças ou informações. Em termos simples, representa a habilidade de articular raciocínios ou evidências para sustentar uma convicção específica, contribuindo para a construção de uma base mais robusta de conhecimento (Dutra, 2010).

## 4 ANÁLISE DAS TRAJETÓRIAS DE VIDA DOS AUTORES DA RELATIVIDADE ESPECIAL

Ao analisarmos as trajetórias pessoais dos autores da Teoria da Relatividade Especial, podemos obter uma melhor compreensão de como essas pessoas alcançaram o nível exigido de entendimento do mundo natural para a criação dos princípios que regem essa teoria física. Dessa forma, analisaremos as trajetórias de dois dos principais autores da Teoria da Relatividade Especial, Henri Poincaré e Albert Einstein.

Há certas discrepâncias nas visões epistemológicas entre Poincaré e Einstein, evidenciadas em suas abordagens metodológicas distintas. Enquanto o primeiro adotava singularmente elementos do empirismo e convencionalismo, o segundo professava um realismo e racionalismo crítico (Paty, 2001). Dessa forma, podemos afirmar que esses notáveis pensadores não apenas se destacaram como matemáticos e hábeis intérpretes dos princípios físicos, mas também se revelaram excelentes filósofos. Suas preocupações abrangiam o processo criativo científico, explorando como o ser humano, por meio de intensa dedicação e estudo, poderia alcançar princípios matemáticos e físicos que desvendam a natureza do mundo.

Neste contexto, abordaremos as percepções epistemológicas e alguns aspectos da vida pessoal de Poincaré e Einstein. É importante ressaltar que este trabalho não buscará definir uma abordagem mais eficiente ou menos eficiente, apenas apresentará as visões epistemológicas desses cientistas.

### 4.1 Henri Poincaré

Jules Henri Poincaré foi um dos maiores físico-matemáticos de todos os tempos. Suas principais contribuições para o conhecimento foram nas áreas de Teoria das Funções, Teoria dos Números, Álgebra, Funções Abelianas, Geometria Algébrica, Equações Diferenciais, Mecânica Celeste, Equações Diferenciais Parciais, Física-Matemática, Topologia Algébrica e Fundamentos da Matemática (Benjamin; Gillipsie, 2007 *apud* Capibaribe, 2020a).

Poincaré foi bastante ativo nas discussões referentes à Teoria do Elétron de Lorentz, sendo o primeiro a observar que as transformadas de Lorentz formam um grupo e podem ser extraídas através da forma quadrática  $dx^2 + dy^2 + dz^2 -$

$c^2 dt^2$ , que por sua vez é um invariante de Lorentz. Além disso, ele foi o primeiro a atribuir às transformadas de Lorentz o seu real significado (Capibaribe, 2020a).

#### 4.1.1 Coletivos de Pensamento de Henri Poincaré

Durante toda sua vida, Poincaré esteve exposto a vários coletivos de pensamento, e isso certamente o influenciou, de modo que suas contribuições para a construção da Teoria da Relatividade Especial são graças a esses coletivos de pensamento (Capibaribe, 2020a).

Vale salientar que a ideia de Coletivos de Pensamento foi introduzida pela primeira vez por Ludwik Fleck. Ele a definiu como um grupo de cientistas, pesquisadores ou indivíduos que compartilham um sistema de crenças, valores, linguagem e modos de pensamento em relação a um ou mais tópicos. Tais coletivos de pensamento não se caracterizam apenas por serem grupos de pessoas que compartilham ideias e informações, mas sim como comunidades intelectuais que moldam a forma como os cientistas veem o mundo e conduzem suas pesquisas (Fleck, 2010).

Por exemplo, aos seis anos de idade, sua família contratou Jacques Alphonse Hinzelin, um professor particular renomado, autor de livros sobre geografia, história e matemática.

Esse preceptor de Henri conversava com ele sobre todos os assuntos, transmitindo um ensinamento enciclopédico. Essa foi uma importante influência em sua educação, estimulando muito sua curiosidade e autonomia, sem sobrecarregá-lo com tarefas repetitivas. Pode-se dizer que, desde a infância, a família de Henri lhe proporcionou um ambiente intelectual adequado e que durante toda a sua formação lhe deu apoio financeiro para seus estudos. Esses foram dois aspectos que contribuíram muito para sua formação (Martins, 2015, p. 108 *apud* Capibaribe, 2020a, p. 23).

Através desse professor e de sua curiosidade insaciável, Poincaré ficou exposto a vários coletivos de pensamento. Quando começou a frequentar a escola básica aos 11 ou 12 anos, desenvolvia soluções próprias para problemas de matemática e geometria. Um certo professor de Henri afirmou à sua mãe: "Senhora, seu filho será um matemático" (Martins, 2015 *apud* Capibaribe, 2020a).

Quando Poincaré atingiu sua maturidade de forma inesperada, decidiu especializar-se em Engenharia de Minas. Segundo Galison citado por Capibaribe

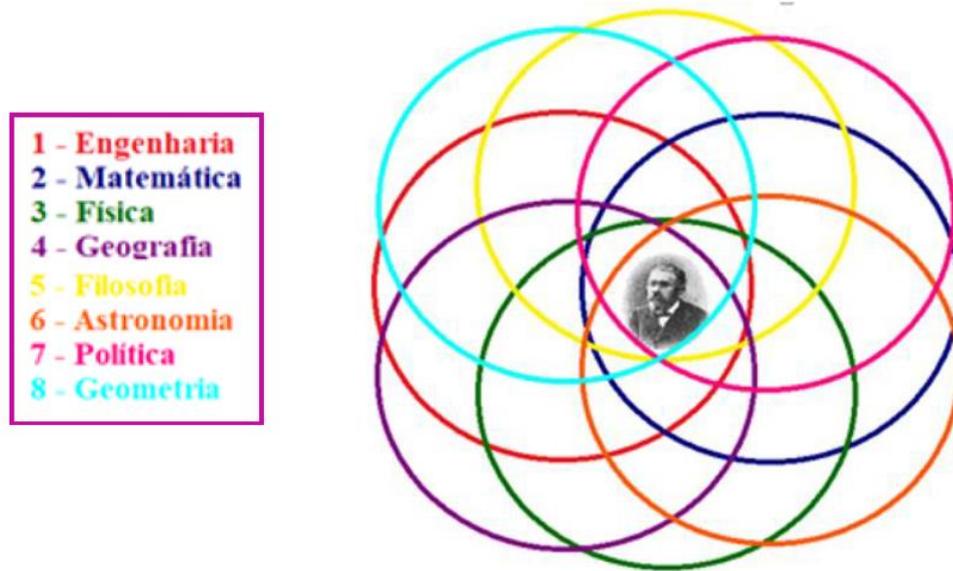
(2003 *apud* Capibaribe, 2020a), tal experiência para Henri foi negativa, pois estudava algo que não lhe agradava, dedicando-se sempre nas horas vagas à matemática. Por isso, nunca abandonou seus estudos na matemática, desenvolvendo sozinho, portanto, uma tese de doutorado em equações diferenciais que foi aprovada. Logo após seu doutoramento, iniciou sua carreira na docência na Faculdade de Ciências de Caen, ministrando aulas de Análise Matemática.

Nos anos seguintes, Poincaré assumiu a docência de cadeiras como mecânica física (1885), física-matemática (1886), cálculo de probabilidades e mecânica celeste. Vale ressaltar que sua postura não era meramente passiva nessas cadeiras, tendo produzido estudos importantes em probabilidade, física-matemática e desenvolveu análises profundas sobre a mecânica, que foram publicadas em sua obra "A Ciência e a Hipótese" de 1902 (Capibaribe, 2020a). Além disso, o círculo interlocutivo de Henri era bastante amplo, tendo comunicações com especialistas de diversas áreas, como atesta Capibaribe:

Além disso, Poincaré mantinha comunicação por cartas com os mais renomados pesquisadores das áreas de física, engenharia, matemática, geometria, geociências e química. Os documentos que não foram perdidos, deram origem a quatro livros: *La Correspondance Entre Henri Poincaré Et Gösta Mittag-Leffler* (1998), *La Correspondance Entre Henri Poincaré Et Les Physiciens, Chimistes Et Ingénieurs* (2007), *La Correspondance Entre Henri Poincaré, Les Astronomes Et Les Géodésiens* (2016) e *La Correspondance De Jeunesse D'henri Poincaré* (2017) (Capibaribe, 2020a, p. 27).

A circulação de Jules Henri Poincaré, em todas essas diversas áreas, pode ser expressa ou representada na Figura 03, a qual mostra que ele estava sob influência de várias áreas do saber humano.

Figura 03 – Ilustração dos Círculos de Pensamento que Poincaré estava exposto



Fonte: Capibaribe (2020a).

Martins (2015 *apud* Capibaribe, 2020a), atesta que a circulação e a interlocução de Poincaré com todas estas áreas fizeram com que, em 1886, aos 32 anos de idade, ele já tivesse 103 publicações em campos da física, matemática, geometria, engenharia e astronomia. Em 1887, ele foi aceito como membro permanente da Academia Francesa de Ciências, devido aos seus estudos sobre funções fuchsianas e as formas de equilíbrio de fluídos em rotação.

#### 4.1.2 A Medida do Tempo e a Questão da Simultaneidade

As discussões e o desenvolvimento da noção de espaço e tempo foram construídos ao longo dos séculos. Portanto, para compreendermos como Poincaré lidou com a questão da medição do tempo e da simultaneidade, precisamos regressar ao passado e aprender que noções de medida de tempo e de simultaneidade que existiam na época em que Poincaré viveu.

Isaac Newton foi o primeiro cientista a trazer uma definição sensata e aperfeiçoada durante o desenvolvimento da mecânica. Newton enunciou em sua maior obra científica, "Princípios Matemáticos de Filosofia Natural":

O tempo absoluto, verdadeiro e matemático, por si mesmo e por sua própria natureza, flui uniformemente sem relação com qualquer coisa externa e é também chamado de duração. O tempo comum aparente e relativo é uma

medida de duração perceptível e externa (seja ela exata ou irregular que é obtida por meio de movimento e que é normalmente usada no lugar do tempo verdadeiro, tal como uma hora, um dia, um mês ou um ano) (Newton, 2018, p. 45).

Segundo Capibaribe (2020a), essa definição sensata e perspicaz de tempo permaneceu intocada e inquestionável por séculos, até que em 1883 Ernst Mach publicou sua obra “Die Mechanik”, onde criticou as noções newtonianas de espaço e tempo absolutos. No ano seguinte, J. Thomson discutiu o problema da simultaneidade, fazendo ponderações sobre a questão em seu artigo intitulado “On the law of inertia, the principle of chronometry, and the principle of Absolute clinural rest and Absolute rotation”:

Thomson obviamente percebeu que o estabelecimento da simultaneidade distante representa um problema por causa do tempo de transmissão do sinal empregado. Ele parece mesmo ter percebido que a medição desse tempo de transmissão requer conhecimento de simultaneidade. Se ele tivesse perseguido ainda mais esse conjunto de ideias, ele teria facilmente antecipado a circularidade envolvida com a qual Poincaré lidou quatorze anos depois (Jammer, 2006, p. 98 *apud* Capibaribe, 2020a, p. 32).

Ao ingressar em 1893, o Bureau das Longitudes, Henri Poincaré iniciou o desenvolvimento de métodos e medidas geodésicas terrestres, bem como a determinação de longitudes, tendo como referência o meridiano de Paris. Enquanto o problema das geodésicas era uma questão de física e geometria esférica, o problema das longitudes era uma dificuldade de sincronização de relógios, bastante complexa (Capibaribe, 2020a).

Essas dificuldades enfrentadas por Poincaré como membro do Bureau das Longitudes fizeram com que ele iniciasse uma reflexão profunda sobre a natureza do tempo e da simultaneidade. Tais reflexões são devidas a todo o seu círculo intelectual, como já discutido anteriormente. Em 1898, ele começou a avaliar a questão da percepção dos eventos:

Executo um ato voluntário A e em seguida experimento uma sensação D, que vejo como uma consequência do ato A; por outro lado, por uma razão qualquer, infiro que essa consequência não é imediata, mas que se realizaram fora da minha consciência dois fatos B e C dos quais não fui testemunha, e de tal modo que B seja o efeito de A, que C seja o de B, e D o de C. Mas por que isso? Se creio ter razões para ver os quatro fatos A, B, C, D como ligados um ao outro por um elo de causalidade, por que os dispor na ordem causal A B C D, e ao mesmo tempo na ordem cronológica A B C D, em vez de qualquer outra ordem? Vejo bem que no ato A tenho a impressão

de ter sido ativo, ao passo que experimentando a sensação D, tenho a de ter sido passivo. É por isso que vejo A como a causa inicial e D como o efeito último; é por isso que disponho A no começo da cadeia e D no fim; mas por que colocar B antes de C, em vez de C antes de B? Se nós fazemos essa pergunta, respondemos geralmente: sabemos bem que é B a causa de C, já que vemos sempre ocorre antes de C. Esses dois fenômenos, quando somos testemunhas, passam-se numa certa ordem; quando fenômenos semelhantes ocorrem sem testemunha, não há razão para que essa ordem seja invertida. Sem dúvida, mas tomemos cuidado; jamais conhecemos diretamente os fenômenos físicos B e C; o que conhecemos são sensações B' e C' produzidas respectivamente por B e por C. Nossa consciência nos informa imediatamente que B' precede C', e admitimos que B e C se sucedem na mesma ordem. Essa regra parece de fato bem natural, e, contudo, muitas vezes somos levados a derogá-la. Só ouvimos o ruído do trovão alguns segundos após a descarga elétrica da nuvem. De dois raios — um distante e outro próximo —, não pode o primeiro ser anterior ao segundo, embora o ruído do segundo nos chegue antes do ruído do primeiro? (Poincaré, 1898, p. 9-10 *apud* Capibaribe, 2020a, p. 51-52).

A experiência de Poincaré, trabalhando no Bureau das Longitudes, certamente foi de grande auxílio para que Henri acabasse com as noções de tempo absoluto, dando o real significado às transformações de Lorentz. São mais uma das evidências de que o processo criativo se estende para além do indivíduo, sendo influenciado por pessoas e objetos ao longo da história.

#### **4.1.3 Pensamentos de Poincaré em relação à Construção do Conhecimento e à Criatividade**

Henri Poincaré (2015) preocupou-se com a questão de como se dá à construção conhecimento no Capítulo 3 intitulado "Mathematical Creation" da obra "The Foundations of Science: Science and Hypothesis, The Value of Science, Science and Method", publicada em 1902. Ao longo desse capítulo, Poincaré aborda quatro questões centrais.

1. Como a criação matemática pode ajudar a desenvolver minha mente?
2. Quais são os métodos de trabalho dos matemáticos e como posso aplicá-los em minha própria vida?
3. Como a matemática pode ser usada para resolver problemas do mundo real?
4. Como é o processo criativo segundo Henri Poincaré?

Quanto a **questão 1**, Poincaré (2015) argumenta que a criação matemática pode auxiliar no desenvolvimento da mente, uma vez que é uma atividade em que a mente humana parece se distanciar mais do mundo externo e atua exclusivamente por si mesma e sobre si mesma. Essa prática pode contribuir para o desenvolvimento de habilidades cognitivas, como o pensamento crítico e a resolução de problemas.

Os métodos de trabalho dos matemáticos envolvem um processo prévio extenso e inconsciente, muitas vezes culminando em uma iluminação repentina. O subconsciente desempenha um papel significativo na criação matemática, no entanto, esse processo não é simplesmente mecânico e não pode ser reproduzido por uma máquina (**questão 2**). Para aplicar esses métodos na vida cotidiana, pode-se tentar trabalhar em problemas complexos por um período e, em seguida, fazer uma pausa para permitir que o subconsciente trabalhe no problema.

A matemática tem aplicações práticas na resolução de problemas do mundo real em diversas áreas, como finanças, ciência e tecnologia (**questão 3**). Por exemplo, ela é utilizada para modelar sistemas complexos, prever resultados futuros e tomar decisões informadas com base em dados quantitativos.

No que diz respeito ao processo criativo na ótica de Poincaré (**questão 4**), ele a descreve em três partes distintas:

1. **Preparação:** Durante a fase de preparação, o indivíduo estuda minuciosamente e identifica o problema em questão, adquirindo informações cruciais para a análise do problema. Nessa fase, o cérebro está em um estado consciente, constantemente analisando as informações recebidas.
2. **Incubação:** Após a etapa de preparação, ocorre o processo de incubação, em que o indivíduo deixa o problema de lado e se envolve em outras atividades. Enquanto isso, o subconsciente continua trabalhando no problema, fazendo conexões que não seriam possíveis anteriormente.
3. **Iluminação:** Por fim, surge a iluminação, em que a solução do problema se revela por meio das redes cerebrais estabelecidas durante o processo de incubação.

É importante ressaltar que Poincaré (2015) acreditava que o processo criativo não seguia uma natureza linear e previsível, pois é uma atividade complexa e

influenciada por fatores externos, como conhecimento prévio, motivação e capacidade do indivíduo.

## 4.2 Albert Einstein

Nesta seção, iremos abordar o processo criativo segundo Albert Einstein, ou seja, como fatores ligados à interação sociocultural moldaram os pensamentos de Einstein para que ele os aproveitasse usando seu próprio intelecto e, portanto, possibilitando novas compreensões acerca da natureza. Para realizarmos a difícil investigação desses fatos, iremos usar várias biografias que nos contam como foi a vida e a obra de Albert Einstein, mas iremos nos apoiar principalmente em suas notas autobiográficas, as quais foram escritas pelo próprio Einstein em 1946.

Antes de iniciarmos nossa análise sobre como as experiências vivenciadas por Einstein moldaram suas percepções de mundo, iremos nos dedicar a uma análise de como Einstein acreditava que se dava a construção do saber científico. Einstein considerava a ciência uma forma de pensamento que opera com as mesmas bases que o pensamento comum. No entanto, a ciência é um processo refinado deste pensamento (Einstein, 2019). Os conceitos da ciência também são extraídos da nossa relação com o mundo sensível (experiências sensoriais) que precisam ser organizadas em nossa mente para tornar o mundo compreensível. Assim, Einstein define o ato de pensar como a construção de conceitos que são os elementos de organização do pensamento (*id.*, *ibid.*).

Albert Einstein acreditava que a relação entre o mundo natural e o mundo sensorial era feita simplesmente através da intuição humana. A conexão dos conceitos básicos do pensamento comum com os complexos de experiências sensoriais só pode ser compreendida de modo intuitivo, não se prestando a uma determinação cientificamente lógica (*id.*, *ibid.*).

Gurgel (2011) sintetiza as percepções epistemológicas de Einstein no processo imaginativo no contexto científico, o qual pode ser subdividido em três etapas:

1. **Percepção Intuitiva da Realidade:** Nesta etapa, o pensamento estabelece uma interação multifacetada com a realidade a ser compreendida, fazendo uso de acervo de conhecimento do indivíduo.

2. **Salto Criativo:** Nesta etapa, o pensamento faz um salto criativo que liga as percepções aos conhecimentos gerais e às deduções.
3. **Verificações:** Nesta etapa, o pensamento, a partir do conhecimento construído, verifica se a variedade de experiências imediatas se encontra organizada. Para isso, confronta as proposições deduzidas com a realidade percebida.

Agora, no que tange à curiosidade insaciável de Einstein acerca da natureza das coisas, ela iniciou-se muito cedo, ficando evidenciada em uma simples passagem em que seu pai lhe apresenta uma bússola e Einstein levanta questões fundamentais sobre a própria essência da natureza.

Aos quatro ou cinco anos, experimentei esse sentimento quando meu pai me mostrou uma bússola. O fato de a agulha comportar-se de uma certa forma não se encaixava entre os tipos de ocorrências que podiam ser colocadas no mundo inconsciente dos conceitos (eficácia produzida pelo “toque” direto). Lembro-me ainda ou pelo menos creio que me lembro que essa experiência me causou uma impressão profunda e duradoura. Devia haver algo escondido nas profundezas das coisas (Einstein, 2019).

No decorrer deste pequeno relato, podemos perceber como uma experiência simples pode influenciar profundamente nossas crenças de mundo. Outra experiência que moldou a forma como Einstein via o mundo ocorreu aos seus 12 anos. Albert Einstein relata:

Aos 12 anos experimentei minha segunda sensação de espanto, de natureza completamente diversa da primeira provocada por um livrinho de geometria plana de Euclides, que veio ter às minhas mãos no início do ano escolar. Ali estavam afirmações como, por exemplo, a intersecção das três alturas dos triângulos num determinado ponto que embora não fosse evidente podia ser provada com tal certeza de que qualquer dúvida estava fora de cogitação. Esta certeza lucida impressionou-me profundamente. O fato de os axiomas serem conhecidos sem prova não me perturbou. De qualquer forma, era bastante poder basear as provas em proposições cuja validade me parecia livre de qualquer dúvida. Por exemplo, lembro-me que um tio me falou sobre o teorema de Pitágoras antes que eu tivesse lido o livrinho sagrado de geometria. Com muito esforço consegui “provar” esse teorema, tomando como base a similaridade dos triângulos; parecia-me “evidente” que as relações dos lados triângulos de ângulos retos teriam de ser completamente determinados por um dos ângulos agudos. Para mim, apenas as ideias que não eram evidentes dessa forma precisavam ser provadas (Einstein, 2019).

Essas duas experiências vividas por Einstein apontam algumas evidências de como interações com o meio cultural modificaram sua estrutura cognitiva e possibilitaram que ele questionasse sobre a natureza intrínseca das coisas. Isso ficará ainda mais evidente no contato que Einstein teve com as obras de Mach, mas antes de abordarmos a crítica de Mach à mecânica, iremos abordar outra experiência que Einstein vivenciou aos seus 16 anos ou 17 anos.

No final de sua adolescência, Einstein começou a questionar-se sobre a natureza da luz e como ela se comportava em relação ao espaço e ao tempo" (Isaacson, 2007, p. 35). E quanto mais pensava sobre o assunto, mais confuso ele ficava, de modo que começou a criar uma experiência imaginária na qual ele viajava ao lado de um feixe de luz que possui a incrível velocidade no vácuo de 299.792.458 m/s (Schutz, 2012, p. 48).

Podemos deduzir que todas essas experiências vivenciadas por Einstein, combinadas a crítica de Mach que acreditava que não se podia falar de espaço e tempo independentes dos objetos que neles existem, ou seja, não existia um espaço ou tempo absoluto, mas sim um espaço e um tempo relativos às coisas que neles se encontram (Mach, 1919).

Todas essas influências vivenciadas por Einstein e viabilizadas pelo meio cultural no qual ele estava inserido, combinadas às possíveis influências do experimento de Michelson-Morley e aos possíveis contatos com as contribuições de Lorentz e Poincaré, foram de uma importância imensurável para que Albert Einstein chegasse às percepções necessárias para elaborar o seu artigo de 1905, que deu origem ao que denominamos hoje como Teoria da Relatividade Especial.

## 5 REVISÃO HISTÓRICA

A seguir, apresentaremos uma revisão histórica da criação e do desenvolvimento da Relatividade Especial. Nesse contexto, abordaremos uma linha do tempo em quatro partes, cada uma dedicada a compreender os papéis dos diversos cientistas que desempenharam contribuições significativas para a concepção e o avanço da Teoria da Relatividade Especial.

### 5.1 Antecedentes Históricos dos Artigos Apresentados por Poincaré e Einstein em 1905

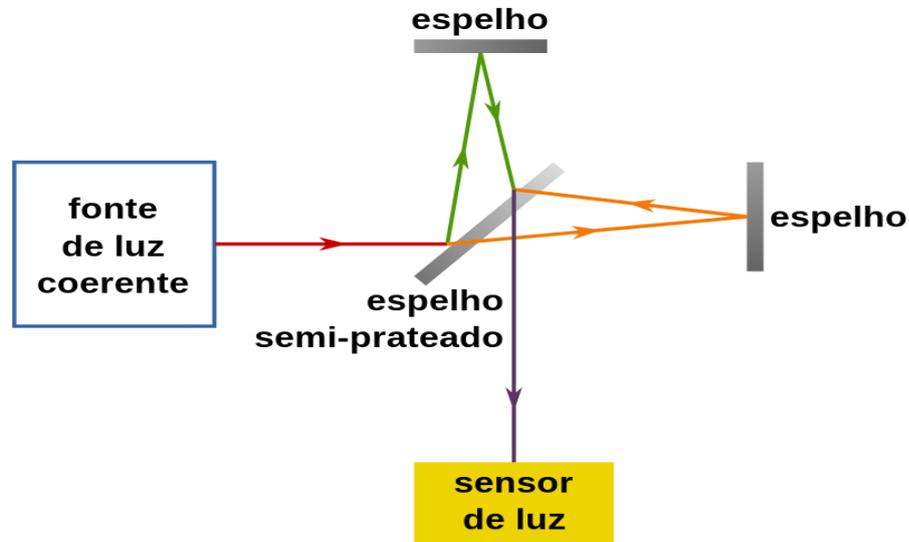
Antes de realizar a análise dos artigos de 1905 de Einstein e Poincaré, referente ao que viria a ser chamado posteriormente de Teoria da Relatividade Especial, é importante compreendermos o contexto dos antecedentes que levaram ao surgimento da teoria. A física no final do século XIX vivia um momento em que o grande quebra-cabeça da natureza parecia em via de ser finalmente decifrado.

Por exemplo, a Teoria Eletromagnética de Maxwell explicava com sucesso os fenômenos relacionados à eletricidade e magnetismo, além de conjecturar que a luz seria uma onda eletromagnética. Portanto, ela se provou de grande utilidade para a sociedade humana, não apenas no contexto do conhecimento adquirido, mas também nas inúmeras invenções de máquinas e equipamentos elétricos possíveis em grande parte graças à teoria.

A Teoria Eletromagnética de Maxwell postula que a luz é uma onda eletromagnética e, por ser uma onda, necessita de um meio material para sua propagação. Por isso, foi idealizada a tese do éter luminífero, um meio com propriedades fantásticas, sendo invisível, sem massa, elástico e preenchendo todo o universo (Capibaribe, 2020b).

Em 1887, Michelson e Morley realizaram uma série de experimentos com o objetivo de detectar os efeitos do movimento da Terra em relação ao éter. A Figura 04 apresenta um esquema do experimento de Michelson e Morley de 1887.

Figura 04 – Ilustração do Experimento de Michelson-Morley



Fonte: Wikipédia (2023).

O experimento de Michelson-Morley comparava a velocidade da luz em direções perpendiculares em uma tentativa de detectar o movimento da Terra em relação ao éter luminífero. No entanto, apesar de cada vez mais precisos, os experimentos sempre apresentavam resultados nulos (Capibaribe, 2020b).

Como se pode ver pela descrição aqui apresentada, a situação era bastante confusa, em torno de 1900. As duas mais importantes teorias do éter – a de Fresnel e a de Stokes – permitiam explicar uma parte dos resultados experimentais, mas ambas tinham problemas. A teoria de Fresnel só não explicava, sozinha, o experimento de Michelson e Morley de 1887; porém, se admitíssemos a contração dos objetos, ela se tornaria compatível com aquele experimento. Essa foi a direção em que alguns importantes pesquisadores – como Lorentz e Poincaré – desenvolveram seus trabalhos (Martins, 2015, p. 85 *apud* Capibaribe, 2020b, p. 23).

Whittaker (1953 *apud* Capibaribe, 2020b) menciona que surgiram inúmeras explicações para os resultados nulos dos experimentos. Destaca-se a explicação realizada de forma independente por Lorentz e FritzGerald. Ambos propuseram que, se os braços do interferômetro sofressem uma contração longitudinal, os resultados nulos da experiência de Michelson-Morley seriam completamente explicados.

Vemos assim que as diferenças de fase previstas pela teoria também se poderiam produzir se na rotação do aparelho, cada um dos braços fosse, alternadamente, mais comprido que o outro. Daqui resulta que estas mudanças de fase poderão ser compensadas fazendo nas dimensões dos braços modificações que se oponham a elas. Se admitirmos que o braço é

colocado segundo a direção do movimento da Terra é mais curto do que o outro, sendo  $L \cdot (v^2/2c^2)$  a diferença de comprimentos, e, ao mesmo tempo, que a translação tem a influência prevista pela teoria de Fresnel, então o resultado da experiência de Michelson fica completamente explicado (Lorentz, 1954, p. 8 *apud* Capibaribe, 2020b, p. 24).

Tais explicações foram alvo de inúmeras críticas de Jules Henri Poincaré, que as considerava uma solução artificial para o problema, pois não havia nenhum motivo físico real para imaginar que o movimento dos corpos através do éter deveria modificar as dimensões dos corpos. Por essas razões, Poincaré iniciou seus estudos do que viria a ser conhecido como o Princípio da Relatividade, tendo como sua primeira aparição no ensaio de 1895 denominado "A Propos de la Theorie de M. Larmor", onde Poincaré postula que é impossível detectar o movimento absoluto ou movimento relativo em relação ao éter somente se pode medir o movimento entre corpos ponderáveis.

Então, pode-se concluir que Poincaré enunciou o Princípio da Relatividade 10 anos antes de Einstein publicar seu artigo e o via como um princípio fundamental da natureza, através do qual pôde extrair o real significado das transformadas de Lorentz anos mais tarde (Capibaribe, 2020b).

Martins (2015 *apud* Capibaribe, 2020b) destaca que, pela primeira vez, as transformações precisas de espaço e tempo, denominadas por Poincaré como Transformações de Lorentz, foram originalmente derivadas pelo físico irlandês Joseph Larmor em 1900 e publicadas no livro "Aether and Matter". A seguir, apresentam-se as exatas transformações das coordenadas espaciais e temporais.

$$\begin{aligned}
 e^{\frac{1}{2}} x' &= (x - vt) \\
 y' &= y \\
 z' &= z \\
 t' &= e^{-\frac{1}{2}} \left( t - \frac{x'v}{c^2} \right) \\
 e &= 1 - \left( \frac{v}{c} \right)^2
 \end{aligned}
 \tag{01}$$

Então, podemos concluir:

Foi Larmor (e não Lorentz) quem obteve pela primeira vez as “transformações de Lorentz”. Mas então, por que não damos a essas equações o nome de “transformação de Larmor?” O principal motivo é que essas equações só se tornam úteis, no eletromagnetismo, quando são acompanhadas pelas transformações corretas das grandezas eletromagnéticas (campo elétrico, campo magnético, densidade de corrente etc.) e Larmor não conseguiu chegar a esse conjunto de transformações (Martins, 2015, p. 126 *apud* Capibaribe, 2020b, p. 25).

Porém, qual seria o real significado das transformações de Lorentz? Lorentz considerava que a transformação da coordenada temporal era meramente um artifício matemático, desprovido de significado físico. No entanto, ainda em 1900, ao estudar as consequências do Princípio da Relatividade, Poincaré conseguiu decifrar o mistério: a transformação do tempo (chamada de tempo local) era justamente a medida do tempo em primeira ordem de  $v/c$ , que observadores em movimento obteriam se tentassem sincronizar seus relógios usando sinais luminosos (Capibaribe, 2020b).

Em uma conferência em homenagem ao 25º aniversário de doutoramento de Lorentz ainda em 1900, Poincaré deduziu a relação entre massa e energia, ou seja, a famosa expressão  $E = mc^2$ . Poincaré a deduziu através da conjectura que a radiação deveria ter um momento associado a ela, e que durante o processo de absorção e emissão ela se comportaria como um fluido fictício que teria associada uma massa, que Langevin (1914 *apud* Capibaribe, 2020b), denominou como massa maupertusiana de Poincaré. Através desta expressão, Poincaré encontrou a ligação entre massa e energia (*op. cit.*). Em notação moderna Poincaré a demonstrou para o mundo da seguinte forma:

$$m = \frac{E}{c^2} \quad (02)$$

Importante frisar que nesse momento, tanto Lorentz como Poincaré, consideravam as transformações de Lorentz eram válidas somente até termos de segunda ordem. No entanto, em 1904, Hendrik Antoon Lorentz publicou o artigo intitulado 'Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light' (Fenômenos eletromagnéticos em um sistema em movimento com qualquer velocidade menor do que a da luz), onde demonstrava que elas eram exatas

e ainda mostrava que as transformações de campos magnéticos e elétricos permaneciam inalteradas sob diferentes referenciais inerciais sob as transformações de Lorentz (Lorentz, 1978). Tanto Einstein como Poincaré sofreram uma possível influência deste artigo e, portanto, Hendrick pode ter os inspirado a montar seus respectivos ensaios no ano seguinte (Capibaribe, 2020b).

## 5.2 A Dinâmica do Elétron por Henri Poincaré (1905-1906)

Em 1905, Poincaré fez sua contribuição mais significativa para o desenvolvimento da Teoria da Relatividade Especial. O artigo foi intitulado "Sur la Dynamique de l'électron" (A dinâmica do elétron). A versão completa do artigo foi submetida ao Comptes Rendus 25 dias antes de Einstein publicar seu próprio artigo, que será examinado posteriormente. No entanto, devido a um erro editorial, o artigo de Poincaré só foi publicado no início de 1906 (Capibaribe, 2020a).

O artigo "A dinâmica do elétron" de Henri Poincaré está dividido em nove tópicos. Portanto, cada um deles será abordado com uma breve discussão de seu formato e algumas conclusões que podem ser retiradas através de seu conteúdo e das palavras empregadas por Poincaré.

Poincaré inicia o seu artigo fazendo uma breve introdução, nela aborda a questão referente às sucessivas tentativas de medidas da velocidade da Terra em relação ao éter. Ele escreve:

Parece à primeira vista que a aberração da luz e os fenômenos ópticos associados proporcionam um meio de determinar o movimento absoluto da Terra, ou melhor, seu movimento, não em relação a outras estrelas, mas em relação ao éter. Este não é o caso: as experiências em que consideramos apenas a primeira ordem de aberração foram inicialmente mal sucedidas e uma explicação foi facilmente encontrada; mas Michelson, que imaginou um experimento através do qual os termos que dependem do quadrado da aberração poderiam ser medidos, também não teve sorte. Parece que essa incapacidade de demonstrar movimento absoluto é uma lei geral da natureza (Poincaré, 1905, p. 1504 *apud* Capibaribe, 2020a, p.149).

Na sequência, Poincaré comenta sobre o Princípio da Relatividade, porém ainda não o enuncia de forma explícita. Ele apenas fala da necessidade de adequar toda a eletrodinâmica a esse princípio, mérito alcançado por Lorentz no ano anterior com seu artigo intitulado "Fenômenos Eletromagnéticos em um Sistema que se Move com Qualquer Velocidade Inferior à da luz" (Capibaribe, 2020a)

Ao fim de sua introdução, Henri comenta de forma indireta brevemente os tópicos que irá abordar em seu artigo, sendo eles 1) Transformações de Lorentz; 2) O Princípio da Mínima Ação; 3) As Transformações de Lorentz e o Princípio da Mínima Ação; 4) O Grupo de Lorentz; 5) Ondas de Langevin; 6) Contração dos Elétrons; 7) Movimento Quase Estacionário; 8) Movimento Arbitrário; 9) Hipóteses sobre a Gravitação. Agora, cada um destes tópicos será abordado.

### 5.2.1 Transformações de Lorentz

Poincaré iniciou seu artigo fazendo algumas correções sucintas no trabalho de Lorentz de 1904, introduzindo correções nas transformações da densidade de carga e densidade de corrente e, finalmente, estabelecendo a invariância das equações de Maxwell e, portanto, sua plena concordância com o Princípio da Relatividade (Capibaribe, 2020a).

Após a conclusão das correções nas transformações de Lorentz, Poincaré introduziu ao leitor um estudo sobre as transformações relativísticas das velocidades, ou seja, o teorema de adição de velocidades relativísticas. O qual podemos escrever em notação moderna da seguinte maneira e em unidades naturais ( $c = 1$ ):

$$W' = \frac{\frac{\Delta \bar{x}}{\Delta \bar{t}} + v}{1 + v \frac{\Delta \bar{x}}{\Delta \bar{t}}} = \frac{W + v}{1 + Wv} \quad (03)$$

E, por fim, segundo Martins (2015 *apud* Capibaribe, 2020a), nesta seção, Henri batiza as transformações do espaço, tempo, dos campos elétricos e magnéticos, e das densidades de carga e de corrente como Transformações de Lorentz.

### 5.2.2 O Princípio da Mínima Ação

Poincaré inicia esta seção advertindo o leitor de que ele não apresenta nenhum resultado significativamente novo, apenas expressa uma nova forma de obter as equações do elétron de Lorentz. Em seguida, inicia uma dedução explícita das equações de Maxwell pelo princípio da Mínima Ação.

Ao analisar a dedução de Poincaré, devem-se tomar alguns cuidados, pois, como bem observado por Miller (1973 *apud* Capibaribe, 2020a), a Lagrangiana é escrita como:  $L = U - T$ . Essa alteração não provoca nenhuma mudança nos resultados, pois a corrente total, definida em termos do rotacional do campo magnético induzido, compensa a mudança de sinal.

Deve-se também tomar cuidado, segundo esse autor, que Poincaré não seguia o método "germânico" empregado por Schwarzschild. O método empregado por Henri fazia uma analogia entre o eletromagnetismo e a hidrodinâmica, ou seja, através dessa analogia, utilizava-se a equação da continuidade e postulava-se que o elétron se comportava como um fluido newtoniano. Por fim, é importante ressaltar que essa técnica não era exatamente nova, pois Poincaré já a havia demonstrado em 1895, 1900 e, por fim, em 1901 no seu livro "Électricité et Optique" (Capibaribe, 2020a).

Em relação à dedução geral, não temos muito a comentar. Portanto, na próxima seção, Poincaré aponta algumas vantagens do método variacional e como podem ser encontradas simetrias importantes a partir dele, que servem de base para a relatividade.

### 5.2.3 As Transformações de Lorentz e o Princípio da Mínima Ação

Poincaré (1906 *apud* Capibaribe, 2020a) inicia esta seção com a seguinte asserção: "vamos ver se o princípio de mínima ação nos revela o motivo do sucesso das transformações de Lorenz." Em seguida, por meio de técnicas elaboradas de cálculo diferencial e integral, Henri chega à conclusão de que a ação eletromagnética é um invariante de Lorentz. Em relação a essa invariância, Poincaré observa:

No entanto, para justificar essa igualdade, os limites de integração devem ser os mesmos; Até agora, assumimos que  $t$  varia de  $t_0$  a  $t_1$ , e  $x, y, z$  de  $-\infty$  para  $+\infty$ . Nesta operação, os limites de integração serão afetados pela transformação de Lorentz, mas nada nos impede de assumir  $t_0 = -\infty$ ,  $t_1 = +\infty$ ; com essas condições, os limites são os mesmos para  $J$  e  $J'$  (Poincaré, 1906, p. 143 *apud* Capibaribe, 2020a, p. 165).

Nos próximos parágrafos e seções, Poincaré demonstrará que a invariância das equações de Maxwell sob as transformações de Lorentz é uma consequência natural do Princípio da Relatividade e do grupo de Lorentz, o que permite a construção de um espaço-tempo quadridimensional (Capibaribe, 2020a).

### 5.2.4 O Grupo de Lorentz

Poincaré tem como uma de suas maiores contribuições para a construção da Teoria da Relatividade a descoberta do grupo de Lorentz. É importante frisar que, por volta de 1905, Henri era um dos maiores especialistas do mundo em Teoria de Grupos. Assim, ele faz uso desse aparato matemático e conceitual para extrair algumas importantes propriedades que seriam redescobertas por Hermann Minkowski três anos depois (Capibaribe, 2020a).

É a partir do grupo de Lorentz que Poincaré vai construir conceitos fundamentais da relatividade restrita e da relatividade geral, como por exemplo: conceito de espaço-tempo, mostrar que a única eletrodinâmica compatível com o princípio da relatividade é a de Lorentz, enunciar que as grandezas dinâmicas da física devem ser expressas em quantidades quadrimensionais, mostrar que não existe referencial privilegiado e achar a base para seu programa de gravitação relativística (Capibaribe, 2020a, p.168).

Sobre a dedução matemática, não temos muito a analisar dado o contexto e o objetivo deste presente trabalho. Iremos demonstrar somente que nesta seção, Poincaré introduz pela primeira vez que qualquer transformação linear não alterará sua forma quadrática, e estabelece:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2 \quad (04)$$

E, portanto, neste momento em que ele introduz pela primeira vez o invariante diferencial, que denominamos hoje em dia como a métrica de Minkowski, e este invariante permite estabelecer uma variedade pseudo-euclidiana chamada espaço-tempo, neste presente trabalho denominaremos a essa invariância exposta na equação (04) pelo nome de métrica Poincaré-Minkowski por uma questão de justiça e equiparação histórica (Capibaribe, 2020a).

### 5.2.5 Ondas de Langevin

Na seção 5, Poincaré mostra que é possível deduzir, a partir das Transformações de Lorentz, as velocidades e as acelerações das ondas de um

elétron, que haviam sido descobertas por Paul Langevin alguns meses antes do artigo de Poincaré. Convém discutir um pouco o que são essas ondas de Langevin:

LANGEVIN demonstrou, utilizando os potenciais LIENARDWIECHERT, que os campos elétrico e magnético de uma carga pontual móvel (uma carga cujas dimensões são insignificantes comparadas a todas as outras distâncias que entram no problema) são compostos de duas partes: a onda de velocidade, dependente a velocidade do elétron; a onda de aceleração, dependente da aceleração do elétron. A energia devido à onda de velocidade depende da distribuição de carga: i. e. a massa eletromagnética é independente da aceleração, concentra-se na vizinhança do elétron e é transportada junto com ela. A energia devida à onda de aceleração é independente da distribuição de carga, assim como a posição do ponto de observação, e é diretamente proporcional ao quadrado da aceleração do elétron. Consequentemente, é a energia irradiada pelo elétron. Além dessas duas ondas, há uma terceira que resulta da interferência entre as ondas de velocidade e aceleração (Miller, 1973, p. 101 *apud* Capibaribe, 2020a, p.175).

A análise realizada por Poincaré conduz a afirmações de que as ondas de aceleração de Langevin são invariantes de Lorentz (Capibaribe, 2020a).

### 5.2.6 Contração dos Elétrons

A partir desta seção, o artigo de Poincaré fica consideravelmente mais denso, pois aqui e nas próximas duas seções correspondem ao núcleo do trabalho de Poincaré. Em outras palavras, nessas seções é desenvolvida a dinâmica do elétron.

Henri inicia uma análise sobre três modelos da dinâmica do elétron e prova que o único modelo em consonância com o Princípio da Relatividade é o modelo de Lorentz apresentado em 1904. Poincaré escreve:

Lorentz também foi levado a assumir que o elétron em movimento assume a forma de um esferoide oblato; esta é também a hipótese feita por Langevin, no entanto, enquanto Lorentz assumiu que dois eixos do elipsoide permanecem constantes, o que é consistente com a hipótese  $l = 1$ , Langevin assumiu que o volume permanece constante. Ambos os autores mostraram que essas duas hipóteses são consistentes com os experimentos de Kaufmann, bem como a hipótese original de Abraham (elétron esférico). A hipótese de Langevin teria a vantagem de ser auto-suficiente, porque basta considerar o elétron como deformável e incompressível, e explicar que ele toma uma forma elipsoidal quando se move. Mas eu mostro, de acordo com Lorentz, que é incapaz de concordar com a impossibilidade de um experimento que mostre o movimento absoluto. Como eu disse isso é porque  $l = 1$  é o único caso para o qual todas as transformações de Lorentz formam um grupo (Poincaré, 1905, p. 1506 *apud* Capibaribe, 2020a, p. 178).

Em seguida usando as transformações de Lorentz, Poincaré obtém as equações para o campo elétrico e magnético de um elétron ideal (em repouso) e de um elétron real (em movimento). Após, obter esses resultados são analisadas as características dinâmicas do elétron em movimento:

Determinemos agora a energia total devido ao movimento do elétron, a ação correspondente e o momento eletromagnético, para calcular a massa eletromagnética do elétron. Para um ponto distante, basta considerar o elétron como reduzido a um único ponto; somos trazidos de volta às equações (04) do § precedente, que geralmente podem ser adequadas. Mas aqui não basta, porque a energia está localizada principalmente nas partes do éter mais próximas do elétron. Sobre este assunto, podemos fazer várias hipóteses. De acordo com o de Abraham, os elétrons são esféricos e não deformáveis. Então, quando aplicamos a transformação de Lorentz quando o elétron real é esférico, o elétron se torna um elipsoide perfeito. (Poincaré, 1906, p. 152 *apud* Capibaribe, 2020a, p. 179-180)

Ao analisar a Teoria de Lorentz, Poincaré observa que a teoria exige que o elétron se contraia na direção do movimento e, portanto, essa contração é resultado direto da interação entre o éter e o elétron.

Após estabelecer as equações para a energia longitudinal e transversal, Henri estabelece o lagrangiano do campo eletromagnético por meio de relações de momento canônico. Isso possibilita o estudo das três hipóteses para a contração do elétron em movimento: o elétron esférico não deformável de Abraham, o elétron contraído com volume constante de Langevin e o elétron contraído arbitrário de Lorentz (Capibaribe, 2020a).

Poincaré deduz um potencial  $F$  que define um campo de tensões denominado hoje como tensões de Poincaré. Através desse novo potencial não elétrico, ele o soma à lagrangiana do campo eletromagnético e calcula a variação da ação definida por esses dois termos (*id.*, *ibid.*).

As tensões de Poincaré podem ser interpretadas como uma pressão negativa sobre o elétron, que o mantém estável. Portanto, o trabalho realizado por essa pressão negativa obriga a subtrair 1/3 da inércia total do sistema, chegando assim à relação massa-energia:

$$m = \frac{4 E}{3 c^2} - \frac{1 E}{3 c^2}$$

$$m = \frac{E}{c^2} \quad (05)$$

### 5.2.7 Movimento Quase Estacionário

Esta presente sessão mostra como Poincaré desenvolve uma análise do movimento quase estacionário que permite a discussão dos modelos Abraham, Langevin e Lorentz:

Resta ver se esta hipótese da contração de elétrons reflete a incapacidade de demonstrar movimento absoluto, e começarei por estudar o movimento quase estacionário de um elétron isolado, ou que está sujeito apenas à ação de outros elétrons distantes. Sabe-se que o chamado movimento quase estacionário é o movimento onde as mudanças de velocidade são lentas o suficiente para que a energia elétrica e magnética devido ao movimento do elétron difira pouco do que seria em movimento uniforme; sabemos também que Abraham derivou as massas eletromagnéticas transversais e longitudinais da noção de movimento quase estacionário (Poincaré, 1906, p. 158 *apud* Capibaribe, 2020a, p. 185).

Ao descrever a ação do campo eletromagnético sobre o elétron, através das definições de momento canônico e do módulo da velocidade do elétron, Henri obteve as expressões para a massa transversal e longitudinal do elétron (Capibaribe, 2020a).

Através de sua análise matemática cuidadosa e elaborada, Poincaré chega à conclusão de que o modelo de Lorentz deve ser o único a ser considerado, pois é o único em conformidade com o Princípio da Relatividade (*id.*, *ibid.*). 2020a).

### 5.2.8 Movimento Arbitrário

No presente tópico, Henri estende os resultados para o movimento arbitrário e demonstra que esses resultados preservam os do movimento quase estacionário. Após esse momento, é estudado o potencial de natureza não elétrica apresentado anteriormente, que define o campo das tensões de Poincaré (*id.*, *ibid.*).

Através da análise de Poincaré, conclui-se que a ação do potencial adicional é um invariante de Lorentz:

O teorema é, portanto, geral, nos dá ao mesmo tempo uma solução da questão que colocamos no final do §1: encontrar as forças complementares que não são alteradas pela transformação de Lorentz. O potencial adicional (F) satisfaz esta condição. Então podemos generalizar o resultado anunciado no final do §1 e escrever: Se a inércia de elétrons é exclusivamente de origem eletromagnética, se eles estão sujeitos apenas a forças de origem eletromagnética ou a forças geradas pelo potencial adicional (F), nenhuma experiência pode demonstrar movimento absoluto (Poincaré, 1906, p. 165 *apud* Capibaribe, 2020a, p. 191).

Ao analisar mais a fundo as propriedades do potencial “F”, Poincaré comenta brevemente sobre os resultados obtidos na sessão anterior da massa longitudinal e transversal.

Miller (1973 *apud* Capibaribe, 2020a) aponta que Henri comete um erro, pois o valor encontrado por Poincaré não coincide com os valores experimentais das massas eletromagnéticas. O mesmo autor supõe que:

Estou inclinado para a primeira conjectura, porque nos dias da relatividade pré-EINSTEINIANA não havia razão para se preocupar se a massa eletrostática (massa de repouso) ou algum múltiplo dela ocorria no momento. Supunha-se que o símbolo  $m$  no momento representava a "massa experimental". Além disso, era objetivo do POINCARE construir um formalismo LAGRANGIANO para a teoria de LORENTZ, em que o valor de ambos  $m_{||}$  e  $m_{\perp}$  no limite  $V \ll 1$  era  $e^2/6\pi r$  e não  $e^2/8\pi r$ . Além disso, era bem conhecido que  $e^2/6\pi r$  era o limite de massa a baixa velocidade para a teoria de ABRAHAM e, em geral, para todas as teorias de elétrons que usavam o momento do campo eletromagnético (Miller 1973, p. 299 *apud* Capibaribe, 2020a, p. 193-194).

### 5.2.9 Hipóteses sobre a Gravitação

Nos últimos parágrafos do artigo de Poincaré, discute-se a necessidade de conciliar o Princípio da Relatividade com a gravitação newtoniana. É importante ressaltar que no artigo de 1905, a maior preocupação de Poincaré estava em fortalecer a base do Princípio da Relatividade por meio da teoria de Lorentz, que ainda apresentava problemas, para depois verificar quais modificações seriam necessárias no modelo gravitacional vigente (Capibaribe, 2020a).

Poincaré inicia a discussão da necessidade de criar uma teoria gravitacional compatível com o Princípio da Relatividade.

Era importante examinar esta hipótese mais de perto e, em particular, examinar quais mudanças exigiria que fizéssemos sobre a lei da gravitação. É isso que eu procurei determinar; inicialmente, fui levado a supor que a propagação da gravitação não é instantânea, mas acontece com a velocidade da luz. Isso parece estar em desacordo com os resultados obtida por Laplace, que anunciou que esta propagação é, se não instantânea, pelo menos muito mais rápida que a da luz. Mas, na realidade, a questão colocada por Laplace difere consideravelmente daquilo que nos ocupa aqui. A introdução de uma velocidade finita de propagação foi à única mudança que Laplace introduziu para a lei de Newton. Aqui, pelo contrário, esta mudança é acompanhada por várias outras; é possível, e é o que acontece de fato, que ocorra uma compensação parcial entre eles (Poincaré, 1905, p. 1508 *apud* Capibaribe, 2020a, p. 199).

Vários anos antes, Laplace havia demonstrado que na formulação newtoniana, a gravidade deveria ser instantânea ou propagar-se centenas de vezes mais rápido que a luz. Porém, ao examinar esse fato, Poincaré percebeu que seria possível, portanto, por meio de sinais gravitacionais ainda hipotéticos, violar o Princípio da Relatividade garantindo a sincronização absoluta de relógios. Então, conclui-se que era necessária uma modificação da lei de Newton para que a transmissão gravitacional fosse da ordem da velocidade da luz no éter (Capibaribe, 2020a).

Na introdução da 9ª sessão, Poincaré aponta algumas diferenças entre a força eletromagnética e a força gravitacional.

Portanto, a teoria de Lorentz explicaria completamente a impossibilidade de demonstrar o movimento absoluto, se todas as forças forem de origem eletromagnética. Mas há forças que não podemos atribuir uma origem eletromagnética, como por exemplo, a gravitação. Pode acontecer, de fato, que dois sistemas de corpos produzam campos eletromagnéticos equivalentes, isto é, exercendo a mesma ação nos corpos eletrizados e nas correntes, e ainda assim esses dois sistemas não exercem a mesma ação gravitacional sobre a massa newtoniana. O campo gravitacional é, portanto, distinto do campo eletromagnético. Lorentz foi forçado a completar sua hipótese ao assumir que as forças de qualquer origem, e em particular a gravitação, são afetadas pela translação (ou, se preferir, pela transformação de Lorentz) da mesma forma que as forças eletromagnéticas. Agora é conveniente entrar em detalhes e olhar mais de perto nesta hipótese. Se quisermos que a força newtoniana seja afetada desta maneira pela transformação de Lorentz, não podemos aceitar que a força depende apenas da posição relativa do corpo atraente e do corpo atraído no instante considerado. Também dependerá das velocidades dos dois corpos. E isso não é tudo: é natural supor que a força que atua no tempo  $t$  no corpo atraído depende da posição e velocidade desse corpo ao mesmo tempo  $t$ ; mas dependerá, além disso, da posição e velocidade do corpo atraente, não no tempo  $t$ , mas um momento antes, como se a gravitação precisasse de certo tempo para se propagar (Poincaré, 1906, p. 538-539 *apud* Capibaribe, 2020a, p. 200-201).

Durante o andamento do artigo, Henri aponta cinco exigências que uma nova teoria da gravitação, em conformidade com o Princípio da Relatividade, deve satisfazer:

1. A existência de uma função invariante de Lorentz das quatro coordenadas e as velocidades que definem a lei da propagação da atração. Este requisito implica uma velocidade finita de atração, como implica o princípio da relatividade.
2. A suposição acima mencionada de que a transformação de Lorentz afeta as forças gravitacionais e eletromagnéticas da mesma maneira.
3. Para corpos em repouso, a lei da força deve coincidir com a lei de Newton.
4. A solução escolhida será aquela que menos altera a lei de Newton para velocidades pequenas.

Isso deriva da necessidade de contabilizar os dados astronômicos da mesma maneira que a lei de Newton. Isso mostra que Poincaré estava preocupado com as consequências empíricas da teoria e que não encontrou nenhuma razão empírica para modificar a lei de Newton. 5. A variável tempo nas expressões matemáticas sempre será compatível com o fato físico conhecido que leva tempo para a atração viajar de um corpo para outro. A combinação desse requisito com a condição de invariância garante que a velocidade de propagação da força gravitacional não exceda a velocidade da luz (Katzir, 2005, p. 32 *apud* Capibaribe, 2020a, p. 202).

Ao fim desta sessão, Poincaré apresenta até mesmo uma expressão nova para a força da gravidade, porém ela está incorreta e não está em conformidade com dados experimentais. No entanto, esse primeiro esforço de conciliar o Princípio da Relatividade com a gravitação não deve ser subestimado, pois foi através dele que pela primeira vez foi obtida a ideia de ondas gravitacionais.

Devemos também lembrar que erros são comuns no desenvolvimento científico. O próprio Einstein cometeu vários erros na elaboração do seu próprio artigo, como veremos posteriormente, e por várias vezes apresentou cálculos incorretos durante a elaboração da Relatividade Geral.

### **5.3 Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento por Albert Einstein (1905)**

O artigo intitulado "Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento" caracteriza-se por ter uma importância ímpar na história da ciência. Nele, Albert Einstein reúne grande parte das ideias desenvolvidas por Lorentz e Poincaré em um arcabouço teórico e conceitual mais simples. O artigo enuncia de forma explícita o Princípio da Relatividade e a constância da velocidade da luz na forma de dois postulados, além de refutar a tese do éter luminífero.

Antes de iniciarmos uma análise do artigo de 1905 de Albert Einstein, convém discutir um pouco sobre o nome do artigo. Por que Einstein intitulou seu artigo referente à Teoria da Relatividade de 1905 com o nome "Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento"? Essa questão foi levantada e discutida por Keswani (1965a *apud* Capibaribe, 2020b).

Por que ele chamou seu papel de "Sobre a eletrodinâmica de corpos em movimento"? De certo modo, esse assunto - eletrodinâmica de corpos em movimento - estava muito no ar no momento em que Einstein escreveu seu artigo. No entanto, o título do artigo de Einstein não pode ser considerado

exatamente ou mesmo amplamente representativo de sua tese. O cumprimento da teoria da eletrodinâmica de corpos em movimento na realidade tornou-se possível somente através do trabalho posterior de Minkowski (Keswani, 1965a, p. 297 apud Capibaribe, 2020b, p. 78).

Então, pode-se concluir que o título empregado por Einstein em seu artigo deve-se ao contexto cultural ao qual estava exposto. Por exemplo, um dos artigos que Albert estudou chamava-se "Tentativa de uma Teoria de Fenômenos Elétricos Ópticos dos Corpos em Movimento", de 1895, publicado por Hendrik Lorentz.

Einstein inicia a introdução de seu artigo contextualizando e abordando algumas questões de natureza assimétrica em fenômenos eletrodinâmicos descritos pela teoria de Maxwell.

Como é sabido, a Electrodinâmica de Maxwell tal como actualmente se concebe-conduz, na sua aplicação a corpos em movimento, a assimetrias que não parecem ser inerentes aos fenómenos. Consideremos, por exemplo, as acções electrodinâmicas entre um íman e um condutor. O fenómeno observável depende aqui Unicamente do movimento relativo do condutor e do íman, ao passo que, segundo a concepção habitual, são nitidamente distintos os casos em que o móvel é um, ou o outro, destes corpos. Assim, se for móvel o íman e estiver em repouso o condutor, estabelecer-se-á em volta do íman um campo eléctrico com um determinado conteúdo energético, que dará origem a uma corrente eléctrica nas regiões onde estiverem colocadas porções do condutor. Mas se é o íman que está em repouso e o condutor que está em movimento, então, embora não se estabeleça em volta do íman nenhum campo eléctrico, há no entanto uma força electromotriz que não corresponde a nenhuma energia, mas que dá lugar a correntes eléctricas de grandeza e comportamento iguais às que tinham no primeiro caso as produzidas por forças eléctricas - desde que, nos dois casos considerados, haja identidade no movimento relativo (Einstein, 1978, p. 47).

Essa passagem evidencia uma assimetria qualitativa envolvendo a Lei de Faraday, conforme apontado por Miller (1997 *apud* Capibaribe, 2020b). Maxwell, em seu livro intitulado "Tratado da Eletricidade e Magnetismo", observou também esse problema de forma mais precisa. Maxwell observou que vários fenômenos eletromagnéticos produzem efeitos mensuráveis somente em movimentos relativos (Capibaribe, 2020b).

As diferenças entre as abordagens de Einstein e de Lorentz-Poincaré aparecem já na introdução, pois, de acordo com Poincaré, a corrente elétrica produzida durante a indução era originada por diferentes forças conforme o solenoide estivesse em movimento ou repouso em relação ao éter.

Poincaré admitia a universalidade do Princípio da Relatividade, observadores mensurariam o mesmo valor para a corrente e jamais conseguiriam identificar se a força era de natureza elétrica ou magnética. Já Einstein assume que o princípio da relatividade deve ser válido para fenômenos tanto quantitativos (mensuráveis) e qualitativos (imensuráveis) (Capibaribe, 2020b, p. 81).

Importante enfatizar que Einstein obteve essa concepção e outras mais que serão apresentadas devido aos desenvolvimentos anteriores de Lorentz e Poincaré, bem como ao contexto no qual ele estava inserido e à influência sofrida por outras pessoas. Por exemplo, no decorrer da introdução, Einstein declara:

Exemplos deste género, assim como o insucesso das experiências feitas para constatar o movimento da Terra em relação ao meio luminífero («Lichtmedium») levam à suposição de que, tal como na Mecânica, também na Electrodinâmica os fenómenos não apresentam nenhuma particularidade que possa fazer-se corresponder à ideia de um repouso absoluto (Einstein, 1978, p. 48).

Esta passagem evidencia o conhecimento de Einstein a respeito das tentativas frustradas de medição da velocidade da Terra em relação ao éter luminífero. Portanto, adiante, Albert comenta sobre os postulados que ele irá introduzir no decorrer de seu artigo e enuncia que:

A introdução de um «éter luminífero» revelar-se-á supérflua, visto que na teoria que vamos desenvolver não necessitaremos de introduzir um «espaço em repouso absoluto», nem de atribuir um vector velocidade a qualquer ponto do espaço vazio em que tenha lugar um processo electromagnético (Einstein, 1978, p.48).

E, assim, a introdução de Einstein é finalizada. Agora, o artigo de Einstein se dividirá em três partes principais, sendo elas: **Parte I – Cinemática**, **Parte II – Eletrodinâmica** e **Parte III – Energia**. Cada uma dessas partes abarca vários subtítulos, e, portanto, nos dedicaremos à análise de cada parte, dando a devida atenção aos componentes principais de cada uma delas no artigo de Einstein.

### 5.3.1 Parte I – Cinemática

A primeira parte do artigo de Einstein consiste em uma análise de toda a cinemática de corpos em movimento retilíneo uniforme que possuem velocidades comparáveis à velocidade da luz no vácuo.

A Parte I é dividida por Albert Einstein em cinco subseções, as quais são, respectivamente: **Definição de Simultaneidade, Sobre a Relatividade dos Comprimentos e Tempos, Teoria da Transformação de Coordenadas do Tempo de um Sistema Estacionário para outro Sistema em Movimento Uniforme de Translação Relativamente ao Primeiro, Significado Físico das Equações Obtidas em Relação ao Movimento dos Corpos Rígidos e Relógios Móveis, e Teorema de Adição de Velocidades.**

### 5.3.1.1 Definição de Simultaneidade

Ao introduzir a Parte I do seu artigo, Einstein define o conceito de simultaneidade e sincronismo que irá permitir a análise das grandezas cinemáticas, tais como comprimento e período de relógios, de acordo com seus dois postulados.

Se quisermos descrever o movimento de um ponto material! não teremos mais do que dar o valor das suas coordenadas em função do tempo. Mas devemos agora ter em atenção que uma tal descrição matemática só tem sentido físico se definirmos claramente o que aqui se entende por «tempo». Temos que ter em conta que todas as nossas apreciações em que intervém o tempo são sempre apreciações sobre acontecimentos simultâneos. Quando eu digo, por exemplo: «aquele comboio chega aqui às 7 horas», isto significa: «a indicação 7 dada pelo ponteiro pequeno do meu relógio e a chegada do comboio são acontecimentos simultâneos» (Einstein, 1978, p. 49-50).

Em seguida, Einstein emprega os mesmos argumentos utilizados por Poincaré sobre a sincronia de diferentes relógios. Peter Galisson (2003 *apud* Capibaribe, 2020b), afirma que esse emprego não é mera coincidência, pois sabemos que Albert estudou o livro "A Ciência e a Hipótese", que continha trechos do artigo de Henri intitulado "La Mesure du Temps" (A Medição do Tempo).

Poderia parecer que todas as dificuldades em que tropeça a definição de «tempo» poderiam ser eliminadas se, em vez de tempo, eu dissesse «posição do ponteiro pequeno do meu relógio»; uma tal definição satisfaz, de facto, quando se trata de definir «tempo» exclusivamente para o lugar em que se encontra colocado o relógio; mas a definição já não basta quando se pretenda estabelecer uma relação temporal entre séries de acontecimentos que se desenrolam em lugar (es diversos, ou - o que equivale ao mesmo - quando se trata de localizar no tempo acontecimentos que se produzem longe do relógio) (Einstein, 1978, p. 50).

Einstein, faz novamente uso de argumentos muito semelhantes aos de Poincaré ao sugerir o uso de sinais luminosos para a sincronização de diferentes relógios e, em seguida, estabelece duas propriedades que relógios ideais síncronos devem conter:

Admitiremos que esta definição de sincronismo se pode aplicar, sem conduzir a contradições, a um número arbitrário de pontos, sendo assim universalmente válidas as seguintes relações:

1. Se o relógio em B é síncrono com o relógio em A, também o relógio em A é síncrono com o relógio em B.
2. Se o relógio em A é síncrono com o relógio em B e também com o relógio em C, então os relógios em B e C são síncronos entre si (Einstein, 1978, p. 51).

Ao fim desta seção, A. Einstein analisa relógios em diferentes posições e fundamenta a ideia ou o conceito de "tempo do sistema em repouso".

### 5.3.1.2 Sobre a Relatividade dos Comprimentos e Tempos

Ao iniciar a segunda subseção, Einstein introduz formalmente e claramente seus dois postulados, a partir dos quais é possível retirar todos os resultados que serão apresentados ao decorrer da Parte I. Ele os enuncia da seguinte maneira:

As reflexões que se seguem apoiam-se no princípio da relatividade e na da constância da velocidade da luz, que vamos definir da seguinte maneira:

1. As leis pelas quais os estados dos sistemas físicos sofrem mudança não são afetados, quer estas mudanças de estado sejam referidas a um ou outro de dois sistemas de coordenadas em movimento de translação uniforme.
2. Qualquer raio de luz move-se no sistema de coordenadas «em repouso» com uma velocidade determinada  $V$ , que é a mesma, quer esse raio seja emitido por um corpo em repouso, quer o seja por um corpo em movimento. Aqui

$$Velocidade = \frac{\text{percurso efectuado pela luz}}{\text{intervalo de tempo}},$$

onde «intervalo de tempo» deve ser entendido no sentido fixado na definição 1 (Einstein, 1978, p. 53).

Durante a leitura do artigo, pode-se perceber que Einstein adota a mesma notação matemática de Poincaré, o que é totalmente compreensível, considerando que essa era a notação mais empregada na época. Portanto, pode-se observar que a velocidade da luz é denotada por um "V" em vez de "c", como é atualmente.

É de notória importância a discussão sobre as diferentes visões de Einstein e Poincaré acerca da validade do Princípio da Relatividade, como atestou Capibaribe (2020b). Para Poincaré, fenômenos que são quantitativamente equivalentes podem ser qualitativamente diferentes, desde que nenhuma experiência permita detectar se o sistema está em repouso ou movimento. Enquanto, para Einstein, o Princípio da Relatividade deve ser válido tanto para fenômenos quantitativos como qualitativos, ou seja, para toda a natureza (*id.*, *ibid.*).

Por fim, após introduzir seus dois postulados, Einstein demonstra qualitativamente e quantitativamente que medidas de comprimento e períodos entre diferentes relógios, bem como a sincronização de relógios, dependem do movimento relativo entre os diferentes sistemas de coordenadas.

### 5.3.1.3 Teoria da Transformação de Coordenadas e do Tempo de um Sistema Estacionário para outro Sistema em Movimento Uniforme de Translação Relativamente ao Primeiro

Após a demonstração de que as medidas de comprimento e período dependem essencialmente do movimento relativo entre diferentes referenciais inerciais, Einstein iniciou a busca pelas transformações de coordenadas espaciais e de tempo de um referencial para o outro.

A dedução einsteiniana das Transformações de Lorentz baseia-se nos postulados anteriormente abordados e na premissa da isotropia do espaço-tempo, que, em essência, é garantida pelo próprio Princípio da Relatividade. Assim, Einstein obtém as seguintes transformações:

$$\begin{aligned}\tau &= \varphi(v) \beta \left( t - \frac{v}{V^2} x \right) \\ \xi &= \varphi(v) \beta (x - vt) \\ \eta &= \varphi(v) y \\ \zeta &= \varphi(v) z\end{aligned}\tag{06}$$

Onde  $\beta$  é o fator de Lorentz, aqui usamos a notação empregada por Einstein, e onde  $\varphi(v)$  é uma função ainda desconhecida. Se nenhuma suposição for feita quanto

à posição inicial do sistema em movimento e quanto ao ponto zero de  $\tau$ , faz-se necessária a introdução de uma constante aditiva nessas equações (Einstein, 1978).

Nesse momento, Einstein inicia a busca pelo valor da função  $\varphi$ ; porém, antes de realizar essa busca, Albert Einstein demonstra que, independentemente do valor da função  $\varphi$ , essas transformações mantêm a forma esférica de uma onda luminosa invariante:

Temos agora que demonstrar que todo o raio de luz, medido no sistema em movimento, se propaga com a velocidade  $V$ , se, como vimos admitindo, assim suceder no sistema em repouso; pois ainda não fornecemos a prova de que o princípio da constância da velocidade luz é compatível com o princípio da relatividade.

Suponhamos que no instante  $t = \tau = 0$ , em que as origens das coordenadas dos dois sistemas coincidem, é emitida dessa origem uma onda esférica que se propaga no sistema  $K$  com velocidade  $V$ .

Se for  $(x, y, z)$  um dos pontos que está sendo atingido pela onda ter-se-á

$$x^2 + y^2 + z^2 = V^2 t^2$$

Transformando esta equação por meio das nossas equações de transformação, obtemos depois de um cálculo simples

$$\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2 = V^2 \tau^2$$

Assim, a onda considerada também é vista no sistema móvel como uma onda esférica de velocidade de propagação  $V$ . Deste modo se prova que os nossos dois princípios fundamentais são compatíveis (Einstein, 1978, p. 143-144).

Por meio desta prova, Einstein demonstra que a forma da onda não depende do referencial inercial ou do movimento relativo entre os referenciais. De fato, as Transformações de Lorentz podem ser obtidas por meio destas equações, procedimento adotado por Einstein em 1907 em seu primeiro artigo sobre a Relatividade Geral (Capibaribe, 2020b).

Por fim, Einstein encontra o valor da função  $\varphi$ . O procedimento adotado é a proposta de estudo das transformações para um terceiro referencial inercial. Apesar de o procedimento empregado por Einstein ser mais simples do que o procedimento adotado por Poincaré, como abordado anteriormente via Teoria de Grupos, a análise dessa dedução matemática foge do escopo deste trabalho. Portanto, nos limitamos a mostrar que:

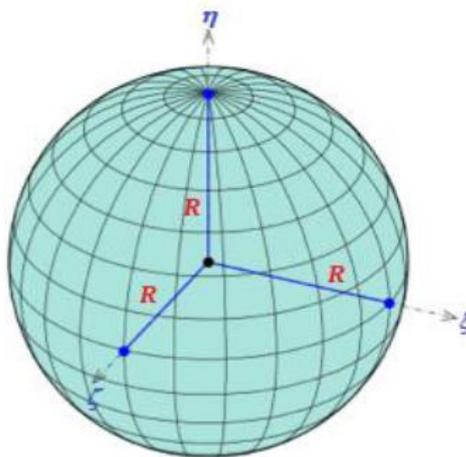
$$\varphi(v)\varphi(-v) = 1 \tag{07}$$

### 5.3.1.4 Significado Físico das Equações Obtidas em Relação ao Movimento de Corpos Rígidos e Relógios Móveis

Nesta seção, Einstein interpreta as consequências das transformações de Lorentz anteriormente obtidas. O raciocínio empregado consiste em propor uma esfera representada pela Figura 05, que se desloca com velocidade  $v$  junto com um sistema de coordenadas denotado por  $k$ . Ao partirmos de um raio  $R$ , as coordenadas dos semieixos serão  $C = (R, R, R)$  (Einstein, 1978). Então, temos:

$$\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2 = R^2 \quad (08)$$

Figura 05 – Uma esfera definida no sistema de referência móvel  $k$



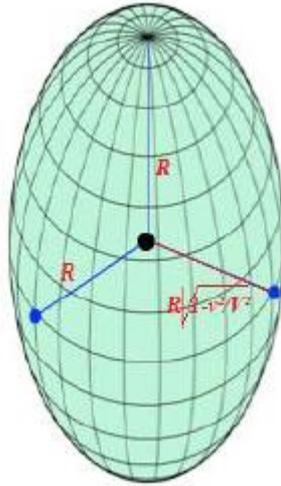
Fonte: Capibaribe (2020b).

Agora, Einstein (1978) propõe a seguinte questão: como é percebida esta esfera por um observador estacionário em  $K$  em  $t = 0$ ? Para isso, devemos aplicar as Transformações de Lorentz, e ao aplicá-las, obtemos:

$$C = \left( R \sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}, R, R \right) \quad (09)$$

O resultado desta transformação de Lorentz é bem representado pela Figura 06:

Figura 06 – O formato da esfera no referencial estacionário K



Fonte: Capibaribe (2020b).

Então, podemos concluir que, de acordo com Einstein, a esfera sofreria uma contração longitudinal, tornando-se uma elipsoide. Porém, como bem observado por Capibaribe (2020b), isso não está correto:

Por algum tempo acreditou que essa contração seria a aparência visual de objetos sobre uma transformação de Lorentz. Porém, no final da década de 1950, estudos feitos por James Terrel (1959) e Victor F. Weisskopf (1960), mostraram que visualmente, a contração de Fitzgerald-Lorentz não seria observada como uma redução do comprimento, mas como uma rotação do objeto. Roger Pensore (1959) ao estudar a contração de Fitzgerald-Lorentz em uma esfera mostrou que esta não seria visualizado como um elipsoide, mas continuaria a ser observado como uma esfera (Capibaribe, 2020b, p.156).

Posteriormente, Scott e Viner (1965 *apud* Capibaribe, 2020b), demonstraram que as componentes perpendiculares ao movimento de uma grade retangular seriam visualizadas como hipérbolas. Então, podemos concluir que:

Desta forma devemos ter em mente que existe uma diferença entre o ato de “medir” e o ato de “observar” na Teoria da Relatividade. Esse é um aspecto bastante delicado da Teoria e como mostrou uma pesquisa de Ostermann e Ricci (2002), muitos autores de livros não estão cientes deste fato e reproduzem imagens incorretas sobre a contração de Lorentz-Fitzgerald (Capibaribe, 2020b, p.157).

Tendo esses apontamentos em vista no decorrer do seu trabalho, Einstein investiga o impacto da transformação do tempo e identifica corretamente que esse

resultado é a prova de que o tempo se dilata. Além disso, ele conclui que tanto o efeito de contração longitudinal quanto a dilatação do tempo são efeitos puramente inerciais e não têm nenhuma ligação com o meio hipotético do éter luminífero (Einstein, 1978).

### 5.3.1.5 Teorema da Adição de Velocidades

O Teorema de Adição das velocidades constitui a última seção da Parte I - Cinemática. Nesta parte, Einstein demonstra que qualquer corpo que se mova com velocidade inferior à velocidade da luz sempre terá uma velocidade menor que "c" (velocidade da luz no vácuo), não importa como a composição de velocidades seja feita (Einstein, 1978).

No artigo intitulado "Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento", Einstein opera com uma partícula em um plano  $\xi - \eta$ , mas em 1907, ele generaliza para um espaço  $\xi - \eta - \zeta$  (Capibaribe, 2020b).

Albert Einstein, enuncia o teorema da adição de velocidades da seguinte maneira:

Desta equação resulta que da composição de duas velocidades menores que  $V$  resulta sempre uma velocidade menor que  $V$ . Se, em particular, pusermos  $v = V - x, w = V - \lambda$ , onde  $x$  e  $\lambda$  são positivos e mais pequenos que  $V$ , virá:

$$U = V \frac{2V - x - \lambda}{2V - x - \lambda + \frac{x\lambda}{V}} < V$$

Resulta ainda que a velocidade da luz não pode modificar-se por composição com uma «velocidade inferior à da luz». Obtém-se nesse caso:

$$U = \frac{V + w}{1 + \frac{w}{V}} = V$$

(Einstein, 1978, p. 67).

E, portanto, esta é a prova de que a composição de velocidades não pode superar a velocidade da luz, simbolizada no artigo como "V", e que a luz tem a mesma velocidade em todos os referenciais inerciais.

### 5.3.2 Parte II – Eletrodinâmica

Na segunda parte do artigo intitulado "Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento", é onde Einstein aplica os conceitos cinemáticos desenvolvidos na Parte I para resolver assimetrias que aparecem na Teoria Eletromagnética (Capibaribe,

2020b). O ponto ao qual Einstein dá maior atenção são as assimetrias envolvendo as correntes de convecção que dependem do referencial adotado.

Albert Einstein divide a segunda parte de seu artigo em cinco subtítulos novamente, sendo eles:

1. Transformações das Equações de Maxwell-Hertz para o Espaço Vazio. Sobre a Natureza das Forças Eletromotrizes que ocorrem em um Campo Magnético durante o Movimento;
2. Teoria do Princípio Doppler e da Aberração;
3. Transformação da Energia dos Raios de Luz. Teoria da Pressão da Radiação sobre Refletores Perfeitos;
4. Transformação das Equações Maxwell-Hertz quando as Correntes de convecção são levadas em conta;
5. Dinâmica do Elétron Lentamente Acelerado.

Agora, examinaremos em detalhes cada um dos tópicos que compõem a Parte II - Eletrodinâmica. É importante salientar que, como escopo matemático da Parte II é muito superior ao da Parte I, daremos maior importância aos conceitos e menor importância aos cálculos, devido ao propósito deste trabalho.

### **5.3.2.1 Transformações das Equações de Maxwell-Hertz para o Espaço Vazio: Sobre a Natureza das Forças Eletromotrizes que ocorrem em um Campo Magnético Durante o Movimento**

Esta subseção da Parte II do artigo de Einstein aborda duas problemáticas. A primeira delas utiliza os princípios cinemáticos desenvolvidos na Parte I, a partir dos quais Einstein demonstra a covariância das Equações de Maxwell para o Espaço Vazio por meio das Transformações de Lorentz. Na segunda parte, Einstein obtém a expressão da Força de Lorentz (Capibaribe, 2020b).

No entanto, a expressão deduzida por Einstein relativa à força de Lorentz está incorreta, sendo este um dos motivos que levam a crer que Einstein não tinha conhecimento do artigo de Lorentz de 1904. Além disso, é importante ressaltar que o estudo de Albert aborda apenas o caso de corpos eletrizados, não abordando as consequências do Princípio da Relatividade sobre corpos magnetizados. Os estudos

referentes a corpos magnetizados foram posteriormente abordados por Herman Minkowski (Capibaribe, 2020b).

### 5.3.2.2 Teoria do Princípio Doppler e da Aberração

Nesta subseção, Einstein obtém as expressões válidas para o efeito Doppler relativístico. Do ponto de vista histórico, Woldemar Voigt foi o primeiro cientista a estudar o efeito Doppler para a luz em 1887 (Capibaribe, 2020b).

Historiadores da ciência acreditam de maneira convicta que Einstein estava ciente dos trabalhos de Voigt, pois em uma correspondência de 1901, Einstein escreveu a Mileva Maric que ela se tornaria sua esposa.

Escreva-me em detalhes como você está gastando seu dia para que eu possa segui-lo um pouco na minha imaginação, eu não acho que isso deve ser muito difícil de imaginar. Estou morando aqui como se estivesse completamente sozinho, pois vejo ninguém particular. Quase todo dia eu dou uma voltinha para me refrescar, o resto do tempo que passo estudando física teórica de Voigt, de cujo livro aprendi muito (Capibaribe, 2020b, p. 214).

O livro citado por Albert, nesta carta, é "Kompndium der theoretischen Physik," que inclui seu artigo de 1887 com sua análise sobre o efeito Doppler da luz. Portanto, podemos concluir que Einstein foi influenciado por Voigt. Assim, Einstein usou esse artigo como uma influência positiva e o aprimorou, obtendo as expressões completas para o efeito Doppler relativístico em seu artigo (Capibaribe, 2020b).

### 5.3.2.3 Transformação da Energia dos Raios de Luz. Teoria da Pressão da Radiação Exercida sobre Refletores Perfeitos

Após obter as expressões corretas para o efeito Doppler relativístico, Einstein faz novamente uso das Transformações de Lorentz obtidas na Parte I, para caracterizar o fluxo energético de sistemas físicos fechados cheios de luz e a pressão aplicada pela luz em refletores ideais (Capibaribe, 2020b).

De acordo com Martins (2015 *apud* Capibaribe, 2020b), esta análise deriva de trabalhos anteriores discutidos por F. Hasenhorl em 1904 e 1905 e M. Abraham, em 1905, onde ficou provado que a energia deveria contribuir para a inércia do sistema.

Porém, ainda não era possível afirmar que a radiação tinha peso ou contribuía para o peso do sistema, pois ainda não havia sido formulado o Princípio da

Equivalência da massa inercial da radiação e peso, que foi obtido primeiramente por Max Planck, em 1907, e posteriormente esse princípio foi expandido pelo próprio Einstein, que o usou como ponto chave para a construção da Relatividade Geral (Capibaribe, 2020b).

#### **5.3.2.4 Transformações das Equações de Maxwell-Hertz quando as correntes de Convecção são levadas em conta**

Ao analisarmos o conteúdo do ensaio de Einstein de 1905, a presente subseção é a mais curta. Nela é apresentado que a densidade de carga e a densidade de corrente satisfazem o Princípio da Relatividade.

Porém, Albert não apresenta ou não faz menção de como ele obteve tais resultados. Einstein apenas enuncia que os cálculos são simples e podem ser facilmente deduzidos, o que não é verdade.

Estes cálculos são extremamente complexos e exigem inúmeras hipóteses adicionais. Assim, vamos apenas citar alguns métodos conhecidos hoje em dia para tais demonstrações. Caso o leitor se interesse, poderá consultar esses métodos em “O Princípio da Relatividade: Albert Einstein”, vol. 2. Campo Grande: Alrisha, 2020b, onde são citados e explorados os seguintes métodos:

1. Método de Poincaré;
2. Método da Dupla Transformação de Lorentz;
3. Método da Força.

#### **5.3.2.5 Dinâmica do Elétron Lentamente Acelerado**

Agora, Einstein dedica-se a analisar a dinâmica do elétron lentamente acelerado. A análise de Albert faz uso da expressão incorreta da Força de Lorentz e, por isso, de forma inevitável, são cometidos alguns erros. Por exemplo, a dedução da Massa Transversal do elétron está incorreta, assim como a dedução feita por Poincaré no mesmo ano (Capibaribe, 2020b).

Historicamente, tal erro foi corrigido por Max Planck em 1906. Ao analisar os artigos anteriores de Lorentz, Poincaré e Einstein, Planck propôs um tratamento

lagrangeano da dinâmica relativística e chegou ao resultado correto (Capibaribe, 2020b).

### 5.3.3 Parte III – Energia: A Inércia de um Corpo Depende do seu conteúdo Energético?

A terceira parte do ensaio de Einstein não existia em seu artigo original, mas foi introduzida ainda em 1905.

Ao analisar as equações de Maxwell-Hertz para o espaço vazio, juntamente com a expressão maxwelliana para energia eletromagnética do espaço vazio, com o primeiro postulado da Relatividade Especial, Einstein conseguiu deduzir a expressão:

$$m = \frac{L}{V^2} \quad (10)$$

Ou em notação moderna:

$$m = \frac{E}{c^2} \quad (11)$$

Assim, Einstein conclui que quando um corpo emite radiação sua massa sofre uma redução de  $L/V^2$ , mostrando que a massa de um corpo depende de seu conteúdo energético. Einstein ainda sugere, como havia observado Sordy, que esse fenômeno pode ser verificado em emissões radioativas (Capibaribe, 2020b).

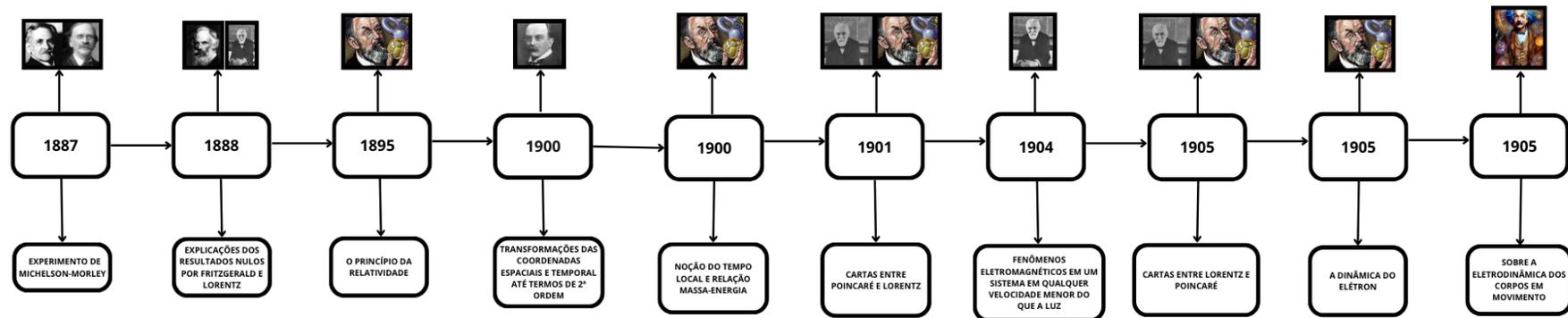
## 5.4 A Relatividade após os Artigos de Poincaré e Einstein

Após a análise do artigo intitulado "Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento", publicado por Albert Einstein em 1905, encerramos nossa revisão histórica.

Por fim, é importante ressaltar que o desenvolvimento da Relatividade continuou após o ano de 1905, com trabalhos de Albert Einstein, Max Planck, Herman Minkowski, entre outros. Infelizmente, Henri Poincaré reduziu muito sua produção acadêmica após 1905, após ser acometido por uma enfermidade que veio a tirar-lhe

a própria vida em 1912. Então, podemos sintetizar o desenvolvimento histórico da Relatividade Especial na linha do tempo apresentada na Figura 07.

Figura 07 – Linha do Tempo



Fonte: Autor (2023).

## **6 ANÁLISE, DISCUSSÃO E IMPLICAÇÕES PARA A EDUCAÇÃO BÁSICA**

Ao utilizar nosso referencial teórico sobre a Teoria da Criatividade Distribuída de Vlad Glăveanu, torna-se necessário que ele se desdobra em três categorias fundamentais: Socialidade (entre pessoas), Materialidade (entre pessoas e objetos) e Temporalidade. Assim, ao conduzir uma revisão histórica minuciosa sobre a construção e desenvolvimento da Teoria da Relatividade Especial, adotamos a metodologia de análise narrativa. Nesse contexto, estabelecemos uma ligação entre a Teoria da Criatividade Distribuída e a Teoria da Relatividade Especial, fundamentando essa conexão por meio de justificações respaldadas em inferências.

Por meio dessa análise, emergiram considerações fundamentais com implicações valiosas para a educação básica. Ao sintetizar essas descobertas, delineamos estratégias e abordagens educacionais que podem ser aplicadas, capitalizando o potencial da Criatividade Distribuída e aprofundando a compreensão das implicações da teoria da Relatividade Especial no contexto educacional.

### **6.1 Análise**

A Teoria da Criatividade Distribuída tem como objetivo deslocar o foco do indivíduo criativo e destacar todo o processo criativo que se distribui para muito além do indivíduo considerado como criativo (Glăveanu, 2014).

Segundo Glăveanu (2014), qualquer ato criativo é um ato distribuído em três eixos: entre pessoas, entre pessoas e objetos, e temporalidade. Cada um desses eixos é fundamental para o desenvolvimento de qualquer ato criativo, presente em todas as atividades humanas, desde as mais simples, como a decoração de ovos de Páscoa, até a elaboração de invenções, ideias e teorias extremamente complexas, como no caso da Teoria da Relatividade Especial.

Assim, agora serão analisados cada um dos três eixos que compõe a Teoria da Criatividade Distribuída, relacionando cada um deles ao desenvolvimento histórico da Teoria da Relatividade Especial.

### 6.1.1 Interlocução entre pessoas para o Desenvolvimento da Teoria da Relatividade Especial (Socialidade)

Sob o olhar da Teoria da Criatividade Distribuída, pode-se perceber que o fator social desempenhou um impacto profundo na criação e no desenvolvimento de toda a Teoria da Relatividade Especial. O alicerce desse pilar da Teoria da Criatividade Distribuída diz respeito exatamente à interação entre pessoas, como argumenta Glăveanu (2014), ao analisar influências externas de outros indivíduos: “Em cada caso, não é apenas uma influência "externa" que é internalizada pelo agente criativo: processos de interação e comunicação fazem parte integrante do que significa criar e contribuir efetivamente para o resultado” (p.37, tradução nossa).

Em outras palavras, não existe um criador único, e isso também não significa excluir o mérito de grandes personagens históricos, como Einstein, Poincaré ou Lorentz, mas sim colocar em evidência que o processo criativo se distribui para além do indivíduo e é impactado pela interação entre pessoas (*id.*, *ibid.*). Considerando a temática do desenvolvimento histórico da Teoria da Relatividade Especial, pode-se perceber que tanto Einstein como Poincaré e Lorentz sofreram inúmeras influências externas.

Poincaré, quando criança, foi exposto, sob a orientação de um professor particular chamado Alphonse Hinzelin, um renomado autor de livros de Geografia, História e Matemática (Capibaribe, 2020a). Provavelmente esse professor influenciou Henri a desenvolver técnicas de estudo mais eficazes e ao longo da construção da Eletrodinâmica de Lorentz, Poincaré mantinha contato com todos os grandes cientistas que estavam trabalhando no tema. Através dessa interlocução ou dessas interações entre pessoas, é possível inferir que Henri pode obter compreensões mais elevadas acerca do tema.

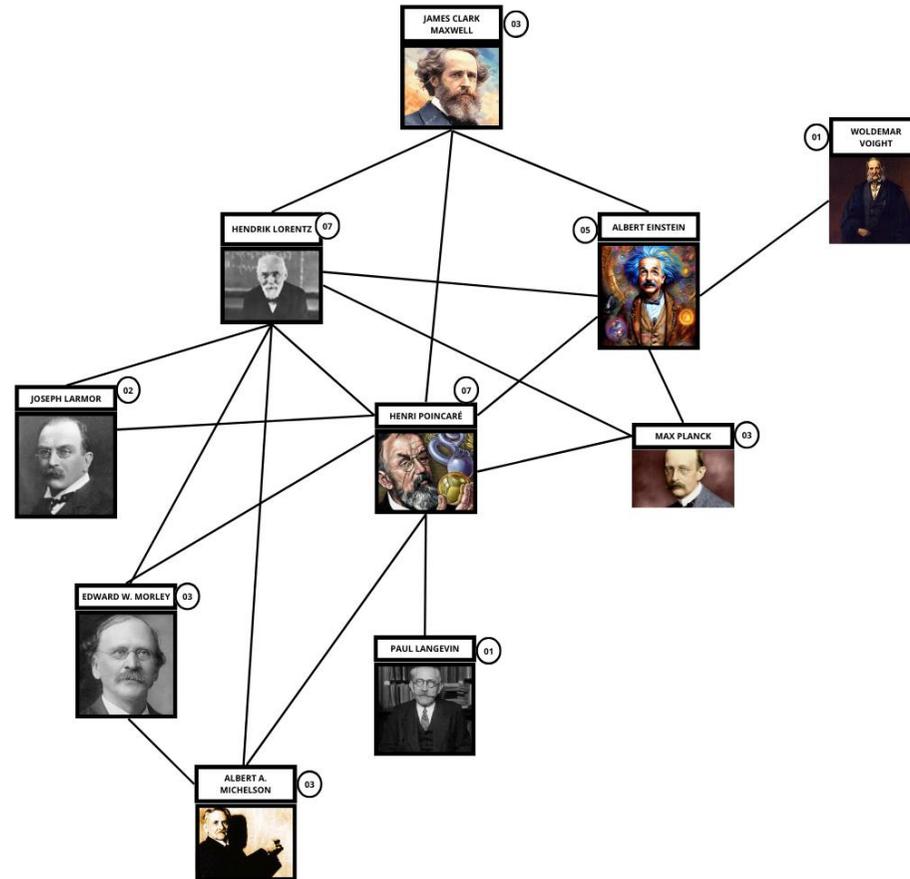
Ao analisarmos, como sugerido por Capibaribe (2020), os coletivos de pensamentos que permitem compreender o ambiente e as relações que existiram aos quais Poincaré estava exposto. Em outras palavras, Henri mantinha a interlocução com mestres em Engenharia, Matemática, Física, Geografia, Filosofia, Astronomia, Política e Geometria. Essa junção possibilitou a geração de ideias novas a partir de interações entre profissionais dessas diversas áreas como ilustrado na Figura 03 disponível na seção 4.

Analisando a biografia de Albert Einstein, podemos perceber influências de natureza semelhante, pois ele esteve exposto às ideias de Poincaré, Lorentz, Maxwell, entre outros, e não podemos esquecer que sua colega de universidade, que viria mais tarde a tornar-se sua esposa, Mileva Maric, desempenhou um papel fundamental para que Einstein obtivesse as concepções que obteve. Além disso, podemos citar as críticas de Mach à mecânica Newtoniana, que influenciaram muito o jovem Albert, detalhe que ele mesmo reconheceu e essa influência pode ser observada em suas notas autobiográficas:

[...] O primeiro da lista a ser mencionado é o argumento de Mach que, incidentalmente, já fora reorganizado por Newton de modo claro (a experiência com o balde). Sob o ponto de vista da pura descrição geométrica, todos os sistemas “rígidos” de coordenadas são logicamente equivalentes. As equações da mecânica (por exemplo, a lei da inércia) reivindicam validade apenas no que se refere a uma classe específica desses sistemas, isto é, os “sistemas de inércia”. Nesse contexto, o sistema de coordenadas não tem significado como objeto material. Portanto, para justificar a necessidade dessa escolha específica é preciso que se encontre algo que existia além dos objetos (massas, distâncias) de que se trata a teoria. Por esse motivo, o “espaço absoluto” absoluto definido por Newton como participante ativo onipotente em todos os fenômenos mecânicos; obviamente, o “absoluto” era definido como influenciado pelas massas e pelo movimento. O que transforma este estado de coisas em algo extremamente desagradável é o pressuposto da existência de vários sistemas de inércias relacionados entre si, numa transferência uniforme e irracional, e que supostamente devem ser distinguidos entre todos os outros sistemas rígidos (Einstein, 2019, p. 34-35).

É possível obter uma compreensão mais adequada do efeito que o fator da socialidade influenciou na construção e no desenvolvimento da Teoria da Relatividade Especial, por meio de uma rede de conexões que ilustra as interlocuções ou influências sofridas por renomados cientistas por outros cientistas proeminentes. O número logo acima do retângulo da Figura 08 ilustra a quantidade de conexões de cada um desses especialistas

Figura 08 – Rede de Conexões



Fonte: Autor (2023).

Ao analisar esta rede de conexões, fica evidente que Poincaré e Lorentz lideram com 7 conexões, seguidos de perto por Einstein. Isso nos faz perceber que os principais autores e desenvolvedores da Teoria da Relatividade Especial foram profundamente influenciados por seus colegas e por inúmeras fontes externas do círculo puramente científico relacionado ao desenvolvimento da Relatividade Especial, corroborando a interpretação acerca da criação coletiva ou cocriação do desenvolvimento da Teoria da Relatividade Especial, segundo a teoria da criatividade distribuída de Vlad Glăveanu.

### **6.1.2 A Interlocução entre pessoas e objetos para o Desenvolvimento da Teoria da Relatividade Especial (Materialidade)**

O segundo elemento essencial no processo criativo, conforme destacado por Glăveanu (2014), diz respeito à interação entre indivíduos e objetos. Tomemos, por exemplo, a prática de decorar ovos de Páscoa, na qual os decoradores interagem com diversas ferramentas e materiais. Nesse contexto, podemos argumentar que as ideias criativas são formadas através de uma ação compartilhada entre as pessoas e os artefatos utilizados.

Através da dinâmica interação entre pessoas e objetos, mergulha-se no reino material, um ambiente capaz de inspirar o criador. Isso lhe concede o poder de discernir quais padrões adotar e quais não. Portanto, quando se inicia a interação entre o indivíduo e o material, como no caso da decoração de ovos de Páscoa, a ação compartilhada entre os decoradores e o artefato resultante revela que a relação criador-objeto não é isenta de desafios (*id.*, *ibid.*).

A resistência à interação exerce uma profunda influência no resultado criativo, uma vez que, por meio dela, novas abordagens de ação se revelam, enquanto outras são deixadas de lado. Consequentemente, o produto da criatividade não é apenas moldado; ele se envolve ativamente em sua própria concepção e, ao fazê-lo, transforma o indivíduo no processo criativo (*id.*, *ibid.*).

Ao considerarmos esse fator, podemos perceber, durante uma análise histórica do desenvolvimento da Teoria da Relatividade Especial, que Poincaré e Einstein foram possivelmente moldados pela dinâmica da interação entre pessoas e objetos. Poincaré teve contato com as obras de Mach, que levantaram inúmeras questões em relação aos conceitos newtonianos de espaço e tempo absolutos, que haviam sido

amplamente aceitos por muito tempo. Além disso, sua própria dificuldade em medir a Geodésica Francesa durante seu trabalho no *Bureau des Longitudes* desempenhou um papel significativo, incentivando-o a reavaliar essas ideias profundamente enraizadas.

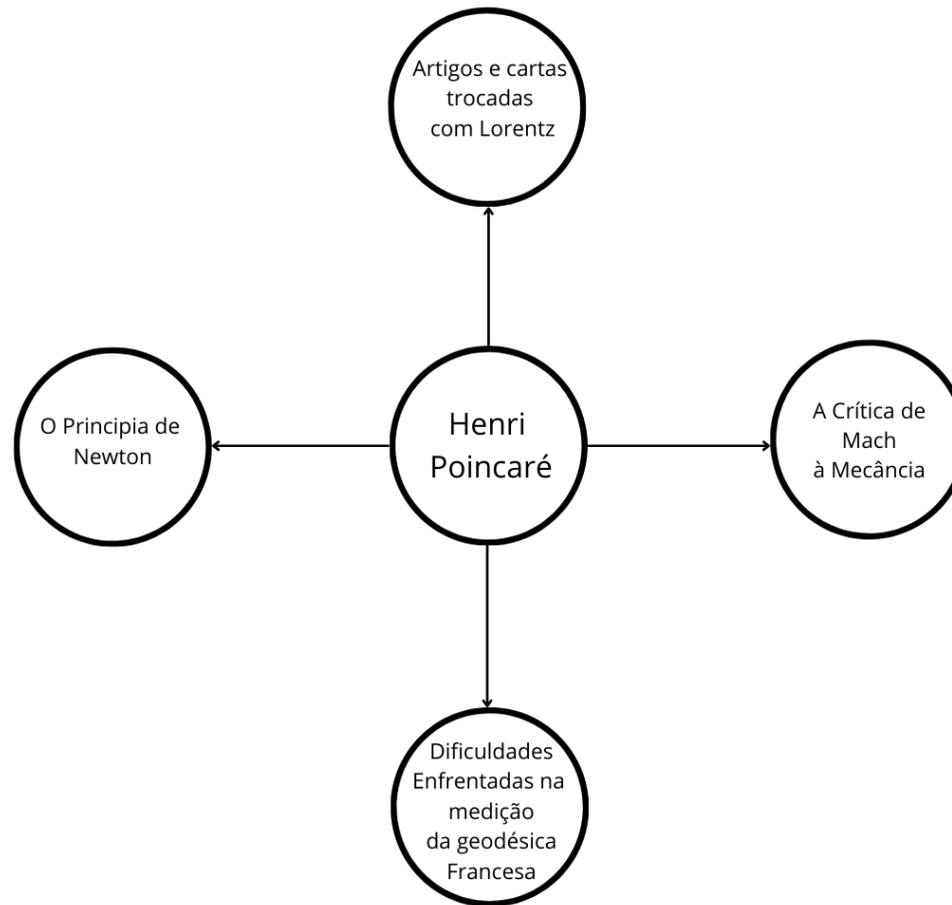
Esses questionamentos surgiram em um momento histórico oportuno, como exploramos anteriormente na revisão histórica, ou seja, em uma era em que a Teoria Eletromagnética de Maxwell estava ganhando ampla aceitação no mundo acadêmico. Nesse contexto, a necessidade de reconciliar os princípios de Maxwell com os princípios newtonianos despertou um forte interesse.

Foi precisamente nesse cenário, quando as transformações de Lorentz começaram a surgir, que as interações de Poincaré com uma variedade de fontes, como livros e artigos, proporcionaram a ele a oportunidade de compreender plenamente o significado e as implicações das transformações de Lorentz.

Podemos citar também como um dos fatores mais relevantes para as concepções e compreensões acerca da Relatividade Especial as cartas trocadas entre Henri Poincaré e Hendrik Lorentz relativas ao tema. Essas cartas possibilitaram a ambos obter compreensões e percepções mais elevadas sobre o tema, essas cartas estão disponíveis em: Kox, A.J, “The Scientific Correspondence of H.A. Lorentz”, vol. 1. 1. ed. Nova York: Springer Science+Business Media, LLC, 2008. ISBN: 978-0-387-77939-3.

Podemos resumir essas interações entre Poincaré e os objetos que possivelmente influenciaram sua perspectiva e abordagem em relação a esse assunto na Figura 09.

Figura 09 – Interações de Poincaré com objetos

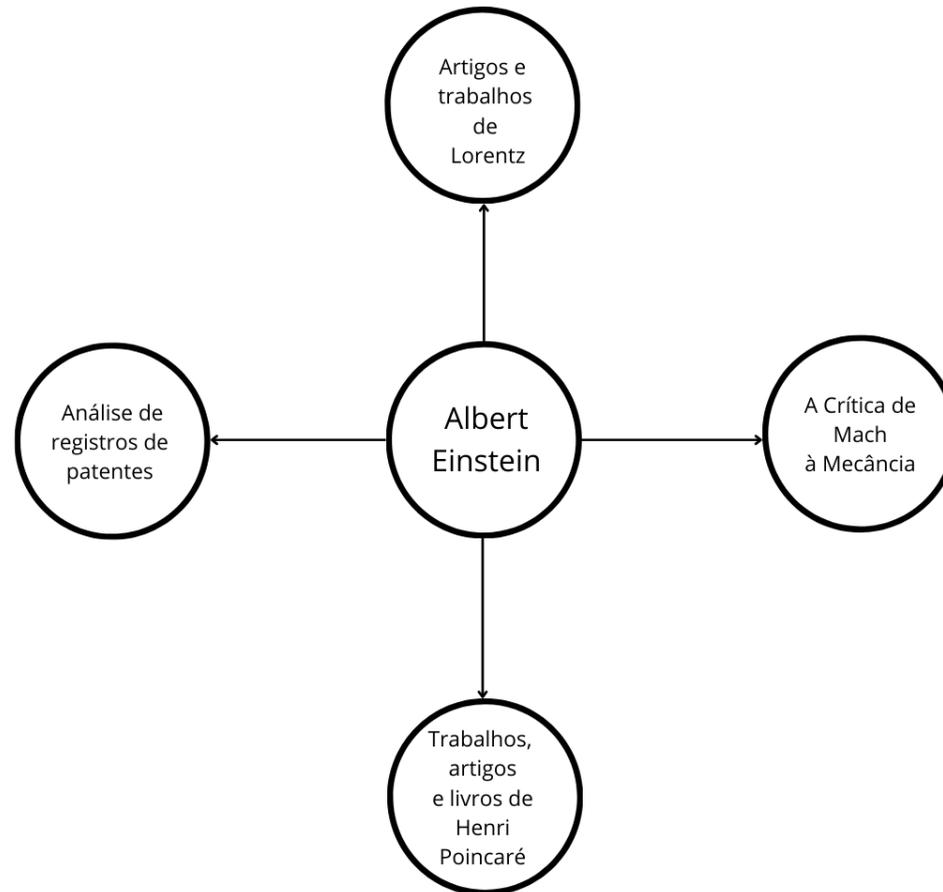


Fonte: Autor (2023).

Quanto a Albert Einstein, ao analisarmos sua jornada na juventude, notamos uma notável semelhança nesse aspecto. Einstein também teve exposição às obras de Mach, que criticavam as concepções newtonianas de espaço e tempo absolutos. Além disso, é de conhecimento atual que Albert Einstein leu obras e artigos de Hendrik Lorentz e Henri Poincaré, o que, muito provavelmente, teve uma influência significativa em sua formação intelectual.

Também é notório que durante o tempo em que Albert Einstein trabalhava como escriturário no Instituto Suíço de Patentes, ele estava envolvido na análise de projetos que visavam a sincronização de torres de relógio com sinais luminosos. Essas interações desempenharam um papel fundamental na concepção e compreensão de Einstein em relação ao Princípio da Relatividade. Podemos resumir essas interações entre a pessoa e os objetos na Figura 10.

Figura 10 – Interações de Einstein com objetos



Fonte: Autor (2023).

É fundamental destacar que as Figuras 08 e 09 não representam a totalidade das interações desses personagens históricos, Poincaré e Einstein, uma vez que é impossível retratar todas essas interações de forma abrangente, pois elas são virtualmente inumeráveis e acontecem continuamente. Além disso, é relevante ressaltar que outros coautores e contribuintes para o desenvolvimento da Teoria da Relatividade Especial também estiveram expostos a tais interações.

Conforme observado por Boesch (2007 *apud* Glăveanu, 2014), os objetos desempenham um papel crucial ao canalizar nossa ação, determinando onde e como podemos nos movimentar, o que somos capazes de realizar, moldando nosso potencial de ação, nossa autoimagem, indicando nosso status social e regulando as interações sociais.

### **6.1.3 A Importância da passagem do Tempo para o Desenvolvimento da Teoria da Relatividade Especial (Temporalidade)**

A importância da passagem do tempo se torna evidente ao longo deste trabalho, principalmente por meio da análise realizada na revisão histórica. Podemos observar que as ideias se desenvolveram gradualmente ao longo de um extenso período que abrange muitos anos.

Segundo Glăveanu (2014), esse fenômeno ocorre devido ao fator temporal que distribui a ação criativa ao longo do tempo, integrando a dimensão social e material e possibilitando, assim, o progresso e o desenvolvimento dessas manifestações criativas ao longo do tempo. Essa abordagem nos afasta de perspectivas restritivas que surgem quando atribuímos exclusivamente à mente dos indivíduos o processo criativo. Toda essa dinâmica está vividamente representada na Figura 07 da sessão 5 deste trabalho, que ilustra uma linha do tempo dos principais eventos que culminaram na configuração atual da Teoria da Relatividade Especial.

## **6.2 Implicações para a Educação Básica**

Apresentamos, neste momento, um modelo de material didático elaborado para instruir os alunos e os professores do ensino básico, com foco nos anos finais, sobre a Teoria da Relatividade Especial. Este modelo é o resultado de uma base histórica e

conceitual robusta, cuidadosamente desenvolvida até o presente, e encontra-se disponível no **Apêndice A** para consulta e aplicação prática.

Os principais objetivos deste material incluem capacitar os estudantes do ensino básico a compreenderem o desenvolvimento histórico da Teoria da Relatividade Especial e explorar suas implicações no âmbito da física. Recomendamos que seja abordado em sala de aula ao longo de duas horas-aula, proporcionando uma experiência educativa enriquecedora. Ressaltamos que esse tempo, foi escolhida devido as atuais circunstâncias e períodos de aulas disponíveis para a física no contexto atual da educação básica.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No desdobramento deste Trabalho de Conclusão de Curso, alcançamos uma compreensão abrangente da gênese e evolução da Teoria da Relatividade Especial. Notavelmente, evidenciamos que esta área de conhecimento não foi moldada por um único criador, mas sim por uma colaboração extensa entre inúmeros pesquisadores.

Ao conduzir uma revisão histórica, revelamos este aspecto crucial do desenvolvimento da Teoria da Relatividade Especial. Adotamos a Teoria da Criatividade Distribuída de Vlad Glăveanu, demonstrando que a compreensão deste tópico essencial da Física é mais aprimorada quando vista pela perspectiva distribuída de Glăveanu (2014). Em outras palavras, distribuimos o ato de criação e co-criação da Relatividade Restrita em três categorias: entre pessoas (socialidade), entre pessoas e objetos (materialidade) e ao longo do tempo (temporalidade).

Por fim, aproveitamos todo o entendimento histórico da criação e desenvolvimento da Teoria da Relatividade Especial, sob a ótica distribuída de Glăveanu (2014) para desenvolver um material educacional, apresentado no Apêndice A. Esse material oferece uma abordagem única da Relatividade Especial destinada à educação básica, especialmente voltada para o público dos anos finais. Este trabalho não apenas contribui para a compreensão da história da física, mas também fornece recursos pedagógicos inovadores para enriquecer o ensino da Relatividade Especial nas escolas.

## REFERÊNCIAS

BAL, Mieke. **Narratologia**: uma introdução. Tradução Maria Luiza X. de A. Borges. 2. ed. rev. e ampl. São Paulo: Editora Contexto, 2009.

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

CAPIBARIBE, Ayni R. **O princípio da relatividade**: Henri Poincaré (1854-1912). v. 1. Campo Grande, MS: Alrisha, 2020a.

CAPIBARIBE, Ayni R. **O princípio da relatividade**: Albert Einstein (1905). v. 2. Campo Grande, MS: Alrisha, 2020b.

DUTRA, Luiz Henrique de Araújo. **Introdução à epistemologia**. São Paulo: Unesp, 2010.

EINSTEIN, A. Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento. In: LORENTZ, H. A.; EINSTEIN, A.; MINKOWSKI, H. **Textos fundamentais de física moderna, I volume**: o princípio da relatividade. 2. ed. Porto, PT: Fundação Calouste Gulbenhian, 1978. p. 46-90.

EINSTEIN, Albert. **Notas autobiográficas**. Tradução Aulyde Soares Rodrigues. 6. ed. Rio de Janeiro, RJ: Nova Fronteira, 2019.

EINSTEIN, Albert. Indução e dedução na física. Tradução [da versão inglesa] Walter Alnis Bezerra. **Scientiae Studia**, v. 3, n. 4, p. 663-664, dez. 2005 [Obra original de 1919]. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/ss/article/view/11056/12824>. Acesso em: 19 mai. 2023.

FLECK, Ludwik. **Gênese e desenvolvimento de um fato científico: introdução à doutrina do estilo de pensamento e do coletivo de pensamento**. Belo Horizonte: Fabrefactum, 2010.

GLĂVEANU, Vlad P. **Distributed creativity**: thinking outside the box of the creative individual. Cham: Springer, 2014.

GURGEL, Ivã; PIETROCOLA, Maurício. Uma discussão epistemológica sobre a imaginação científica: a construção do conhecimento através da visão de Albert Einstein. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 1, p. 1602-1, 2011.

Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rbef/a/z8gHPnzcWCVftczLddPW6cJ/?format=pdf&lang=pt>.

Acesso em: 04 nov. 2023.

ISAACSON, Walter. **Einstein**: sua vida, seu universo. São Paulo, SP: Companhia das Letras, 2007.

KOX, A.J. **The scientific correspondence of H.A. Lorentz**, vol. 1. 1. ed. Nova York: Springer Science+Business Media, LLC, 2008.

LORENTZ, H. A Fenômenos eletromagnéticos num sistema que se move com qualquer velocidade inferior à da luz. In: LORENTZ, H. A.; EINSTEIN, A.; MINKOWSKI, H. **Textos fundamentais de física moderna**, I Volume: o princípio da relatividade. 2. ed. Porto, PT: Fundação Calouste Gulbenhian, 1978. p.13-43.

MACH, Ernst. **The science of mechanics**: a critical and historical account of its development. 3. ed. Mineola: Dover Publications, 2003.

NEWTON, Issac. **Principia**: Princípios matemáticos de filosofia natural. Vol.1. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2018. [Obra original publicada em 1687].

PATY, Michel. **A criação científica segundo Poincaré e Einstein**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo (EDUSP), 2001.

POINCARÉ, Henri. **The foundations of science**: science and hypothesis, the value of science, science and method. Tradução George Bruce Halsted. [S.l.]: Independently Published, 2019. [Obra original publicada em 1902].

SCHUTZ, Bernard F. **A first course in general relativity**. 2nd. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

VYGOTSKY, Lev Semenovitch. **Imaginação e criação na infância**. Tradução [do russo, introdução e notas de] João Pedro Fróis. Lisboa: Dinalivro, 2012. [Obra original publicada em 1930].

WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. **Experiência de Michelson-Morley**. Flórida: Wikimedia Foundation, 2022. Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Experi%C3%Aancia\\_de\\_Michelson-Morley&oldid=64984737](https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Experi%C3%Aancia_de_Michelson-Morley&oldid=64984737) . Acesso em: 28 nov. 2023.

## APÊNDICE A – TEORIA DA RELATIVIDADE ESPECIAL: UMA HISTÓRIA DE MUITAS MÃOS



### ORIENTAÇÕES PARA O PROFESSOR

- Este material tem como propósito explorar a Teoria da Relatividade Especial nos anos finais da educação básica, abordando-a a partir de uma perspectiva histórica do seu desenvolvimento. A estrutura desta aula é fundamentada neste trabalho de conclusão de curso.
- O tempo recomendado para a abordagem deste material com a devida discussão com a turma é de 2 horas-aulas.

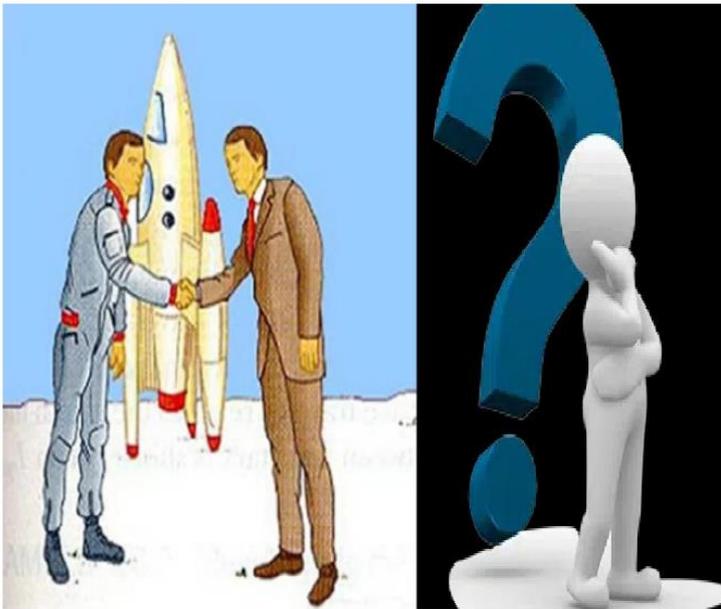
## OBJETIVOS



Compreender o desenvolvimento histórico da Teoria da Relatividade Especial;



Explorar e conhecer as implicações Físicas.



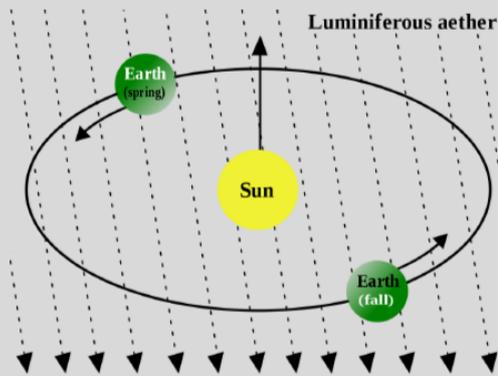
Fonte: SoCientífica (2023).

## PROBLEMA PROPOSTO

Considere dois irmãos gêmeos, Pedro e João. Pedro decide embarcar em uma emocionante viagem espacial a uma velocidade próxima à velocidade da luz, enquanto João permanece na Terra. Durante a viagem, Pedro passa por vários anos luz de distância a uma velocidade próxima à da luz e retorna à Terra.

**A pergunta é a seguinte:** o tempo teria passado da mesma maneira para Pedro e para João, quando Pedro retornar à Terra?

## ORIGEM DO PROBLEMA



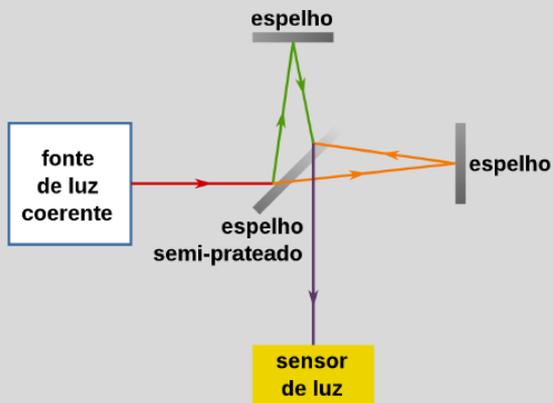
Fonte: Wikipédia (2023)

- A Teoria Eletromagnética de Maxwell postula que a luz é a onda eletromagnética e, por ser uma onda, supõe-se que necessite de um meio para se propagar. No final do século XIX, os cientistas propuseram a existência de um meio invisível e elástico denominado Éter Luminífero.
- A Figura ao lado ilustra o movimento do Éter (setas pontilhadas) em relação a Terra.

## EXPERIMENTO DE MICHELSON-MORLEY

- O experimento de Michelson-Morley, conduzido em 1887 por Albert A. Michelson e Edward W. Morley, tinha como principal objetivo detectar a existência do éter luminífero, um suposto meio hipotético através do qual a luz se propagaria. A teoria predominante na época sugeria que a luz, sendo uma onda eletromagnética, precisaria de um meio (éter) para se propagar, assim como as ondas sonoras se propagam através do ar.

## EXPERIMENTO DE MICHELSON-MORLEY



Fonte: Wikipédia (2023).

- O experimento consistia em comparar a velocidade da luz em duas direções perpendiculares entre si e em relação ao movimento da Terra em sua órbita. Se a Terra estivesse se movendo através do éter, os pesquisadores esperavam observar uma diferença na velocidade da luz ao longo dessas direções. Surpreendentemente, o experimento não detectou nenhuma diferença significativa na velocidade da luz, independentemente da direção em que foi medida.
- A figura ao lado ilustra o experimento de Michelson-Morley, sendo que o feixe vermelho incidente divide-se igualmente em dois feixes (verde e laranja) e por fim, recompõem-se e atingem o sensor de luz.

## EXPERIMENTO DE MICHELSON-MORLEY

- Esses resultados, aparentemente contraditórios, foram fundamentais para o desenvolvimento da teoria da relatividade especial, idealizada por vários pesquisadores, entre eles Lorentz, Poincaré e Einstein, que propõem que a luz se propaga com uma velocidade constante no vácuo, independente do movimento da fonte luminosa ou do observador. Essa teoria revolucionou a compreensão da natureza do espaço e do tempo. Portanto, o experimento de Michelson-Morley desempenhou um papel crucial na transição do paradigma científico do final do século XIX para o século XX.

## POSTULADOS DE EINSTEIN-POINCARÉ

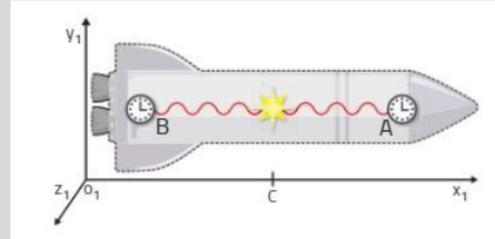
- **1° Postulado (Poincaré-Einstein):** Todas as leis da natureza são as mesmas em todos os referenciais que se movem com velocidade uniforme.
- **2° Postulado (Einstein):** A velocidade de propagação da luz no espaço livre tem o mesmo valor para todos os observadores, não importando o movimento da fonte de luz ou do observador, isto é, a velocidade de propagação da luz é constante.

## CONSEQUÊNCIAS DOS POSTULADOS

- Quebra da Simultaneidade;
- Contração dos Comprimentos.

## EXEMPLO

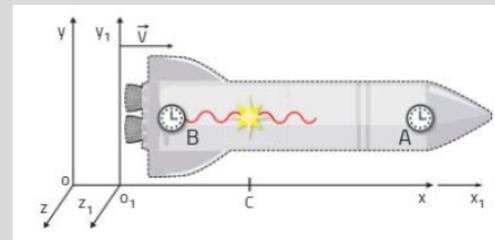
- Uma nave espacial está em movimento com uma determinada velocidade. No centro da nave, há uma fonte de luz. Para um observador dentro da nave, a luz viaja uma distância igual à metade do comprimento da nave, tanto na direção da frente (A) quanto na direção da traseira (B), e atinge os extremos da nave simultaneamente.



Fonte: Godoy (2020).

## EXEMPLO

- No entanto, para um observador que não está na nave, o feixe luminoso que se move na direção oposta ao movimento da nave percorre uma distância menor do que o feixe que se move no mesmo sentido que a nave.

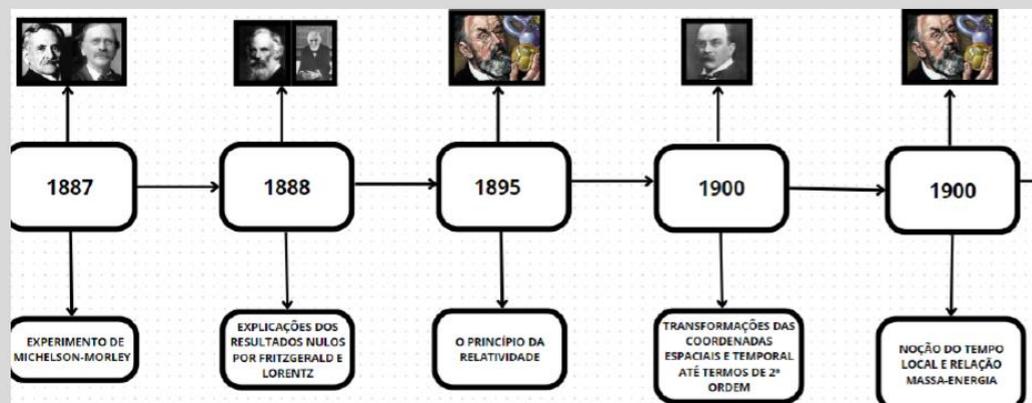


Fonte: Godoy (2020).

## EXEMPLO

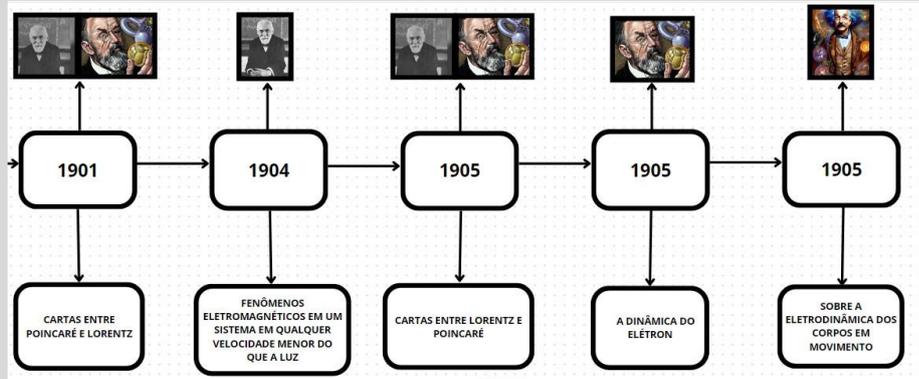
- Observe que o feixe de luz direcionado para a parte traseira da nave chegará primeiro, ou seja, em um intervalo de tempo menor do que o feixe que se move na mesma direção que a nave. Isso resulta no fato de que os extremos da nave são atingidos em momentos distintos. Consequentemente, uma das implicações de considerar a constância da velocidade da luz para qualquer observador é que a simultaneidade dependerá da condição de movimento ou repouso do observador em relação ao fenômeno observado.
- Daí concluímos que tempo e espaço são modificados em função do referencial do observador. É por isso que, na teoria da relatividade, esses dois conceitos não são mais pensados de forma independente, mas sim como parte de um único conceito chamado espaço-tempo.

## LINHA DO TEMPO

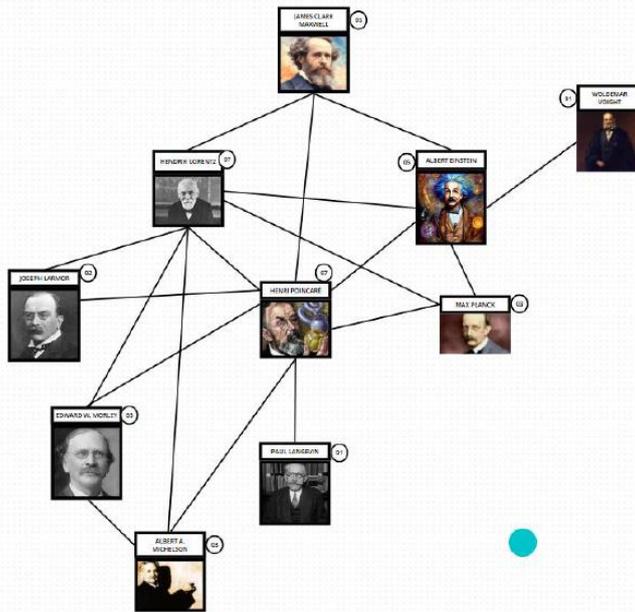


Fonte: Autor (2023).

# LINHA DO TEMPO



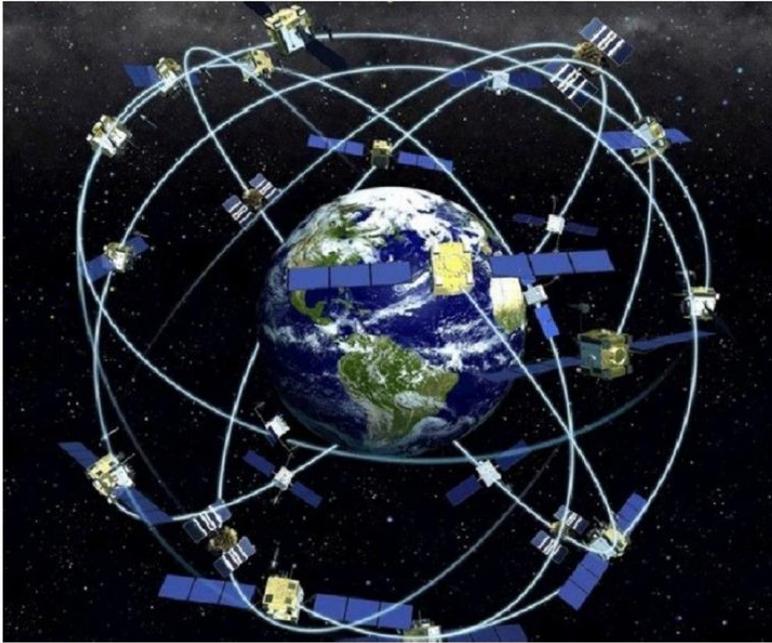
Fonte: Autor (2023).



Fonte: Autor (2023)

## REDE DE CONEXÕES

Essa rede de conexões evidencia as inúmeras interações e ligações entre os cientistas que desempenharam papéis fundamentais na concepção e desenvolvimento da Teoria da Relatividade Especial. É notável que Poincaré, Lorentz e Einstein destacam-se pelo significativo número de interações em que estiveram envolvidos.



Fonte: Wikipédia (2023).

## APLICAÇÃO

A importância da Teoria da Relatividade Especial para satélites GPS reside na correção necessária devido aos efeitos relativísticos do tempo. Segundo a teoria, o tempo transcorre de maneira diferente para objetos em movimento em relação a observadores em repouso. Em altitudes orbitais, onde os satélites GPS estão localizados, a velocidade é considerável e, portanto, o tempo passa de forma ligeiramente diferente em comparação com um observador na Terra.

## RETORNANDO AO PROBLEMA PROPOSTO

- Considere dois irmãos gêmeos, Pedro e João. Pedro decide embarcar em uma emocionante viagem espacial a uma velocidade próxima à velocidade da luz, enquanto João permanece na Terra. Durante a viagem, Pedro passa por vários anos luz de distância a uma velocidade próxima à da luz e retorna à Terra.
- **A pergunta é a seguinte:** o tempo teria passado da mesma maneira para Pedro e para João, quando Pedro retornar à Terra?

## RETORNANDO AO PROBLEMA PROPOSTO



A imagem ao lado apresenta a problemática em questão, onde o lado esquerdo retrata os gêmeos Pedro e João momentos antes da partida de Pedro. No lado direito, a situação problemática é ilustrada quando Pedro retorna ainda jovem de sua jornada interestelar, contrastando com o envelhecimento avançado de seu irmão João.

## REFERÊNCIAS

GODOY, Leandro Pereira de; DELLAGNOLO, Rosana Maria; MELO, Wolney Candido de. **Multiversos: Ciências da Natureza: Ciência, Tecnologia e Cidadania: Ensino Médio**. 1. ed. São Paulo: FTD, 2020.

SoCientífica. **Como a Relatividade Especial de Einstein Resolve o Paradoxo dos Gêmeos**. Disponível em: <https://socientifica.com.br/como-a-relatividade-especial-de-einstein-resolve-o-paradoxo-de-gemeos>. Acesso em: 28 nov. 2023.

Wikipédia, a enciclopédia livre. **Experiência de Michelson-Morley**. Flórida: Wikimedia Foundation, 2022. Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Experi%C3%Aancia\\_de\\_Michelson-Morley&oldid=64984737](https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Experi%C3%Aancia_de_Michelson-Morley&oldid=64984737). Acesso em: 28 nov. 2023.

Wikipédia, a enciclopédia livre. **Luminiferous aether**. Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Luminiferous\\_aether](https://en.wikipedia.org/wiki/Luminiferous_aether). Acesso em: 28 nov. 2023.

Wikipédia, a enciclopédia livre. **Constelação de satélites**. Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Constela%C3%A7%C3%A3o\\_de\\_sat%C3%A9lites](https://pt.wikipedia.org/wiki/Constela%C3%A7%C3%A3o_de_sat%C3%A9lites). Acesso em: 28 nov. 2023.