



**VINÍCIUS ALVES LEITÃO**

**O ÉTER E A REVOLUÇÃO ELETROMAGNÉTICA: A BUSCA  
PELA MANUTENÇÃO DE PARADIGMAS**

**LAVRAS – MG**

**2020**

**VINÍCIUS ALVES LEITÃO**

**O ÉTER E A REVOLUÇÃO ELETROMAGNÉTICA: A BUSCA PELA  
MANUTENÇÃO DE PARADIGMAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Colegiado do Curso de Licenciatura em  
Física como requisito para obtenção do grau de  
Licenciado em Física da Universidade Federal  
de Lavras.

Prof. Iraziet da Cunha Charret

Orientadora

**LAVRAS – MG**

**2020**

## RESUMO

O éter esteve presente nas teorias de vários cientistas e filósofos por quase 2000 anos, desde Aristóteles. Diversos experimentos foram feitos na tentativa de medir a velocidade relativa entre referenciais, como, por exemplo, a Terra em relação ao éter. Teorias comprovadas e válidas até hoje, como as equações do eletromagnetismo de Maxwell, foram obtidas levando em conta a existência do meio etéreo. Essa monografia discute os movimentos relativos, contração espacial, dilatação temporal, entretanto adota a perspectiva do eletromagnetismo com o pressuposto da existência do éter, meio que preenche todo o espaço, que foi abandonado na formulação da Relatividade Restrita de Einstein. Através de estudos realizados tendo como fontes artigos, livros e outros documentos, a história sobre a teoria do éter e a Revolução Eletromagnética será apresentada, levando-se em conta a discussão sobre a construção de uma teoria científica.

**Palavras-chave:** Éter, eletromagnetismo, Relatividade Restrita, Relatividade Especial, história do éter, contração espacial, dilatação temporal, Revolução Eletromagnética.

## ABSTRACT

Ether has been present in the theories of several scientists and philosophers for almost 2000 years, since Aristotle. Several experiments were made in an attempt to measure the relative speed between references, such as, for example, the Earth in relation to the ether. Theories proven and valid until today, like the electromagnetism equations of Maxwell, were obtained taking into account the existence of the ether. This monograph discusses relative movements, spatial contraction, temporal dilation, however it adopts the perspective of electromagnetism with the assumption of the existence of ether, which kind of fills the entire space, which was abandoned in the formulation of Einstein's Special Relativity. Through studies carried out using articles, books and other documents as sources, the history of the ether theory and of Eletromagnetic Revolution will be presented, taking into account the discussion on the construction of a scientific theory.

**Keywords:** Ether, electromagnetism, Restricted Relativity, Special Relativity, ether history, spatial contraction, temporal dilation, Eletromagnetic Revolution.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Representação das linhas de força, como propostas por Faraday, para cargas de sinal positivo. . . . .	12
Figura 4.2 – Representação das linhas de força, como propostas por Faraday, para cargas de sinal negativo. . . . .	13
Figura 5.1 – Referenciais inerciais $O$ e $O'$ e os respectivos vetores posição para a carga $q$ relativos aos dois referenciais. . . . .	15
Figura 6.1 – Esquema representativo para o experimento de interferência realizado por Michelson-Morley. . . . .	26
Figura 6.2 – Representação das situações em que o feixe de luz viaja entre o semi-espelho $S$ e o espelho $E_2$ e, posteriormente, de $E_2$ a $S$ . . . . .	27
Figura 6.3 – Representação das situações em que o feixe de luz viaja entre o semi-espelho $S$ e o espelho $E_1$ e, posteriormente, de $E_1$ a $S$ . . . . .	28
Figura 7.1 – Situação, observada pelo referencial $O$ , em que a carga $q$ está localizada à uma distância $r$ de um fio retilíneo percorrido por uma corrente $I$ . . . . .	30
Figura 7.2 – Situação, observada pelo referencial $O'$ , em que a carga $q$ está localizada à uma distância $r$ de um fio retilíneo percorrido por uma corrente $I$ . . . . .	31
Figura 7.3 – Gráfico do fator $\gamma$ , em função da razão $\frac{v}{c}$ , em que $v$ varia entre 0 e valores próximos de $c$ . O eixo horizontal representa a razão $\frac{v}{c}$ e o vertical o fator $\gamma$ . . . . .	37

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>APRESENTAÇÃO</b> . . . . .	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> . . . . .	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>UM POUCO DA HISTÓRIA DO ÉTER</b> . . . . .	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>RELATIVIDADE DE GALILEU</b> . . . . .	<b>14</b>
<b>5.1</b>	<b>Transformações de Galileu</b> . . . . .	<b>15</b>
<b>6</b>	<b>REVOLUÇÃO ELETROMAGNÉTICA</b> . . . . .	<b>19</b>
<b>6.1</b>	<b>Mudança na concepção sobre a composição do éter</b> . . . . .	<b>19</b>
<b>6.2</b>	<b>Experimento de Michelson-Morley</b> . . . . .	<b>24</b>
<b>6.2.1</b>	<b>O Experimento</b> . . . . .	<b>25</b>
<b>7</b>	<b>CONTRAÇÃO ESPACIAL</b> . . . . .	<b>30</b>
<b>8</b>	<b>DILATAÇÃO TEMPORAL E TRANSFORMAÇÕES DE LORENTZ</b> . . . . .	<b>38</b>
<b>9</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> . . . . .	<b>42</b>

## 1 APRESENTAÇÃO

Diversos estudantes da educação básica desenvolvem interesses por tópicos de Física moderna e contemporânea. Enquanto cursava o terceiro ano do ensino médio, meu professor trabalhou conceitos sobre a teoria da Relatividade Especial. O fato do tempo e do espaço se alterarem em função da velocidade me causou um certo espanto e essa foi uma das causas de escolher o curso de Física na Universidade Federal de Lavras. No meu primeiro período letivo na universidade, cursei uma disciplina, ministrada por minha orientadora, chamada "Introdução à Licenciatura em Física A". Nessa disciplina tive contato, novamente, com a relatividade especial, porém de forma mais aprofundada, com discussões mais abertas e não só através de aulas expositivas.

Posteriormente, eu e minha orientadora, desenvolvemos materiais, sobre a relatividade especial, para serem trabalhados com calouros da mesma disciplina que eu tinha cursado. Enquanto desenvolvia a atividade em aula, notei que os estudantes se interessavam muito pelo tema e que muitos nunca haviam tido contato anterior com o assunto até aquele momento. A partir dessas experiências, tive a ideia de produzir um conteúdo, durante o desenvolvimento do meu trabalho de conclusão de curso, para que estudantes do curso de graduação tivessem contato com um material didático sobre a Relatividade Especial, com foco principalmente na contração espacial e na dilatação temporal. Em reuniões de orientação, fui aconselhado a fazer uma abordagem diferente, levando em conta a existência do éter.

A partir do estudo da relatividade dos movimentos, na perspectiva do eletromagnetismo e utilizando o pressuposto da existência do éter, tive a finalidade de produzir um material didático, voltado aos estudantes dos cursos de licenciatura em Física. Todos os estudos planejados foram realizados pela leitura de artigos, livros, revistas e documentos científicos. Produzimos um material em que são apresentados os confrontos entre as abordagens presentes na história do desenvolvimento da Teoria da Relatividade Restrita e as suas conexões com o eletromagnetismo, mantendo-se a premissa da existência do éter.

## 2 INTRODUÇÃO

O fato do ensino, de forma geral, abordar precariamente, e com pouca profundidade, a construção de teorias na ciência ou, de forma mais objetiva (na monografia), a história do éter sustentada por quase 2000 anos, me motivou a produzir este material. Espero que ele possa ser utilizado em cursos de graduação como material didático, com o objetivo de abordar o tema na perspectiva de uma ciência formada através de um processo de construção. Além disso, o material também poderá ser utilizado para discussões na educação básica.

A existência do éter, supostamente considerada no trabalho, nos faz andar por outros caminhos possíveis com a oportunidade de ver o universo de uma forma paralela à visão de Einstein, além de abordar a natureza da ciência, ainda em construção, oposta à noção popular de ciência pronta e acabada. A Revolução Eletromagnética representa a transição da visão mecanicista para a eletromagnética e durante esse período os cientistas tentaram adaptar o paradigma vigente para não descartá-lo.

A relatividade dos movimentos entre diferentes referenciais, desde Galileu, está presente nas descrições de fenômenos físicos e, de certa forma, alterou o estudo dos eventos, trazendo a ideia de que as definições de velocidade e posição, por exemplo, são relativas. Maxwell, tendo como base os trabalhos de Faraday, propôs as equações para o eletromagnetismo e essas equações, conhecidas hoje como Equações de Maxwell, eram inconsistentes com a relatividade galileana–newtoneana. Para que elas satisfizessem a relatividade clássica, Lorentz apresentou um conjunto de transformações matemáticas que ficaram conhecidas como Transformações de Lorentz.

Quando Einstein propõe a Teoria da Relatividade Especial (ou Restrita), as transformações de Lorentz são interpretadas fisicamente, deixando de ser apenas um conjunto de transformações matemáticas. O desenvolvimento da Teoria da Relatividade Restrita, mencionada anteriormente, possibilitou avanços tecnológicos como o GPS, por exemplo, estando presente em várias tecnologias no nosso dia a dia.

Podemos ressaltar alguns objetivos do trabalho:

- Apresentar que a construção do conhecimento não é linear e harmônica;
- Discutir Revolução Eletromagnética e algumas adequações para manter o paradigma vigente à época (nesse caso, a existência do éter);

- Demonstrar que elementos da relatividade de Einstein são obtidos sem a necessidade de descartar a existência do éter
- Apresentar a revolução eletromagnética

Este trabalho está dividido da seguinte forma: no capítulo 3 apresentamos a metodologia utilizada para o desenvolvimento da pesquisa; no capítulo 4 falamos sobre a história do éter e sobre as mudanças que esse conceito sofreu ao longo do tempo; no capítulo 5 apresentamos o conceito inicial de relatividade, proposto por Galileu para explicar a relatividade dos movimentos; no capítulo 6 abordamos a teoria eletromagnética e os problemas que essa teoria apresentava quando submetida a relatividade galileana; nos capítulos 7 e 8 discutimos as alterações matemáticas necessárias para que a teoria eletromagnética fosse invariante em relação a diferentes referenciais inerciais e que originaram as Transformações de Lorentz e, finalmente; no capítulo 9 apresentamos as nossas considerações finais.

### 3 METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho, elencamos alguns problemas que precisávamos discutir. Os pontos a seguir foram as questões iniciais que impulsionaram o desenvolvimento de nossa pesquisa:

- Em qual contexto emerge o conceito de éter?
- De qual maneira esse conceito foi sendo empregado no decorrer da história da ciência?
- Qual a estrutura e os principais elementos teóricos da Teoria Eletromagnética?
- Como podemos compreender a constituição de uma teoria científica?

Com o intuito de responder e/ou debater as questões apresentadas acima, utilizamos fontes como artigos e livros para embasar as discussões, portanto optamos pela pesquisa bibliográfica que, de modo geral, é utilizada em estudos exploratórios e/ou descritivos. Segundo [7],

... a pesquisa bibliográfica possibilita um amplo alcance de informações, além de permitir a utilização de dados dispersos em inúmeras publicações, auxiliando também na construção, ou na melhor definição do quadro conceitual que envolve o objeto de estudo proposto[7, p.40].

Os autores ainda apresentam o seguinte procedimento para a pesquisa bibliográfica:

- a) Elaboração do projeto de pesquisa – escolha do assunto, formulação do problema de pesquisa e a elaboração do plano;
- b) Investigação das soluções – fase comprometida com a coleta da documentação, envolvendo dois momentos distintos e sucessivos: levantamento da bibliografia e levantamento das informações contidas na bibliografia. É o estudo dos dados e/ou das informações presentes no material bibliográfico. Deve-se salientar que os resultados da pesquisa dependem da quantidade e da qualidade dos dados coletados;
- c) Análise explicativa das soluções – consiste na análise da documentação, no exame do conteúdo das afirmações. Esta fase não está mais ligada à exploração do material pertinente ao estudo; é construída sob a capacidade crítica do pesquisador para explicar ou justificar os dados e/ou informações contidas no material selecionado;
- d) Síntese integradora – é o produto final do processo de investigação, resultante da análise e reflexão dos documentos. Compreende as atividades relacionadas à apreensão do problema, investigação rigorosa, visualização de soluções e síntese [7].

A coleta de dados consistiu em delimitar o universo de estudo a partir dos seguintes parâmetros: a) definição do tema; b) escolha das principais fontes a serem consultadas; c) definição do período cronológico das publicações[7] .

Para concretizar a pesquisa bibliográfica, a leitura é a principal técnica de identificação das informações e de construção dos dados. Para isso são necessárias cinco etapas de leitura, sendo: a) Leitura de reconhecimento do material bibliográfico; b) Leitura exploratória; c) Leitura seletiva; d) Leitura reflexiva ou crítica; e, e) Leitura interpretativa.

A forma com que serão produzidos os resultados das leituras está relacionada com [7], que nos diz:

Ao tratar da pesquisa bibliográfica, é importante destacar que ela é sempre realizada para fundamentar teoricamente o objeto de estudo, contribuindo com elementos que subsidiam a análise futura dos dados obtidos. Portanto, difere da revisão bibliográfica uma vez que vai além da simples observação de dados contidos nas fontes pesquisadas, pois imprime sobre eles a teoria, a compreensão crítica do significado neles existente. Utilizar-se de um desenho metodológico circular ou de aproximações sucessivas no encaminhamento da pesquisa bibliográfica, permite, através da flexibilidade na apreensão dos dados, maior alcance no trato dialético desses dados, pois o objeto de estudo pode ser constantemente revisto, garantindo o aprimoramento na definição dos procedimentos metodológicos, como também a exposição mais eficiente do percurso de pesquisa realizado[7, p.44].

Como o trabalho consiste em uma pesquisa qualitativa e em estudos individuais orientados, visando a produção de um material didático, optamos por utilizar, somente, a pesquisa bibliográfica como nossa metodologia para a produção do TCC.

#### 4 UM POUCO DA HISTÓRIA DO ÉTER

Muitas das discussões filosóficas e físicas a respeito do que compunha todo o espaço “vazio”, no passado, se baseavam na existência de um meio que preencheria toda a esfera celeste. Esse meio teria propriedades mecânicas, sendo intermediário entre as ações dos sistemas físicos, e também sendo propagador de ondas elétricas e magnéticas.

Desde a antiguidade filósofos e cientistas procuravam uma forma de elaborar uma explicação para a razão de dois corpos se atraírem à distância, como por exemplo: imãs e metais. Temos os primeiros registros do magnetismo no ano 570 a.C., quando Tales de Mileto (625 a.C.–546 a.C.) explicava o fenômeno como uma ação da alma, enquanto Empédocles (495 a.C.–430 a.C.) pregava que o universo era regido por amor e ódio, os dois opostos que representavam a atração dos corpos, além de propor a composição do universo pelos conhecidos "elementos gregos": terra, água, fogo e ar[5].

As discussões sobre como os corpos interagiam continuaram sendo realizadas por vários filósofos, principalmente Aristóteles (384–322 a.C.), que enxergava o universo como sendo dividido em duas esferas concêntricas, a interior, na qual se localizava a Terra, e a exterior identificada como “primeiro corpo”, cuja composição estava sempre em rotação, e que foi denominado como éter. O éter, visto por ele, era puro, inalterável, incorruptível e eterno[3]. A probabilidade de existir o vácuo era quase nula, visto que Aristóteles considerava isso como impossível, por consequência de que os corpos se movimentavam somente quando outros corpos dessem espaço para que isso ocorresse. Com a suposta existência do vácuo, as diferenças entre as regiões do espaço não existiriam, ou seja, os objetos não seriam atraídos, portanto eles não se movimentariam. Como não havia resistência maior ou menor de quaisquer dos lados do corpo, ele se moveria em todas as direções ao mesmo tempo com um movimento instantâneo, ou seja, estaria em mais de um lugar ao mesmo tempo[14], caracterizando uma violação da natureza física:

Aristóteles considerou óbvio que a resistência ao movimento aumentava à medida que aumentava a densidade do meio, e decrescia à medida que o meio se rarefazia. Dada que a rarefação do meio resultaria num aumento da velocidade proporcional e ilimitado, Aristóteles concluiu que se o meio desaparecesse por completo, deixando um vácuo, o movimento seria intântaneo[14, p.35].

No século XVII, mais precisamente na década de 40, o filósofo francês René du Peron Descartes (1596–1650) publicou o livro *Principia Philosophiae* (Princípios da Filosofia) que apresentava a teoria nomeada como Teoria dos Vórtices, que tinha por objetivo propor

uma explicação para a gravitação. Vale destacar que a concepção sobre a composição do éter apresentou mudanças ao longo do tempo, mas esse fato será discutido, detalhadamente, mais à frente.

Para compor essa explicação, Descartes considerou a matéria preenchida pelas “partículas gregas” em que as maiores compunham a terra, as médias, o ar e as menores e mais rápidas, o fogo. Cada vórtice nesta teoria representava um turbilhão rotacional dessas partículas, em que as porções compostas pelo elemento fogo ocupavam o centro. Essa composição central tinha por consequência a formação de uma estrela. Nesse modelo, os planetas eram capturados por esse éter cartesiano em que o centro era o Sol[1].

Ainda no século XVII, Isaac Newton (1643–1727) propôs a Teoria da Gravitação Universal, em que os planetas e o Sol não se atraíam por uma ação à distância, mas sim mediados pelo éter. A teoria de Newton explicava os fenômenos observáveis no sistema solar sem no entanto explicar a própria gravitação[10]. Em uma carta a Leibniz, ele escreveu:

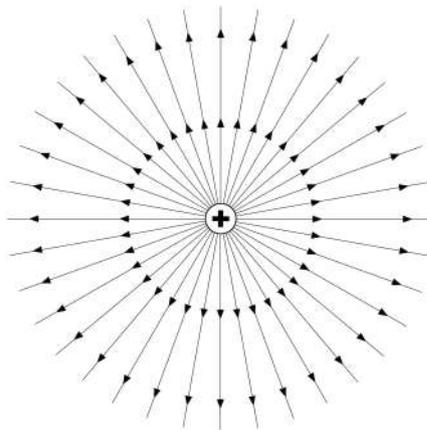
Pois como os movimentos celestes são mais regulares do que se viessem de vórtices e obedecessem a outras leis, os vórtices em nada contribuem para regular e sim para perturbar os movimentos dos planetas e cometas; e como todos os fenômenos dos céus e do mar seguem-se precisamente, tanto quanto estou ciente, apenas de que a gravidade age de acordo com as leis descritas por mim; e como a natureza é muito simples; eu próprio concluí que todas as outras causas devem ser rejeitadas, e que os céus devem ser despidos tanto quanto possível de matéria; caso contrário o movimento dos planetas e cometas seria impedido e tornado irregular. Mas se, enquanto isso, alguém explicar a gravidade e todas as suas leis pela ação de alguma matéria mais sutil, e mostrar que o movimento dos planetas e cometas não será perturbado por essa matéria, eu estarei longe de objetar[10, p.12].

Da mesma forma que os físicos trabalhavam para descrever a interação entre os corpos na mecânica, houveram avanços relacionados ao estudo da eletricidade e do magnetismo. Os principais avanços começaram a surgir quando Charles Augustin de Coulomb (1736–1806) observou que a relação entre as forças elétricas entre cargas era semelhante a relação entre as forças gravitacionais entre massas, ou seja, obedecia a uma relação proporcional ao inverso do quadrado da distância. Hans Christian Oersted (1777–1851), em 1829, estudando o eletromagnetismo, propôs que a corrente que percorria um fio condutor, alterando a posição da agulha de uma bússola, produzia turbilhões que giravam em torno do fio e movimentavam a bússola. Posteriormente, André-Marie Ampère (1775–1836) notou que o comportamento de um solenoide percorrido por uma corrente era semelhante ao de um ímã. Os fenômenos elétricos, magnéticos

e eletromagnéticos eram explicados, antes de Oersted, tendo como princípio básico somente a atração e a repulsão[10].

Em meados do século XIX, o físico experimental Michael Faraday (1791–1867), ao explicar os fenômenos eletromagnéticos observados por ele, utilizou uma nova vertente teórica, que se caracterizava por uma ação que não era à distância, mas que era transmitida através de infinitas linhas de força que possuíam realidade física. As linhas de força se comportavam como “fios de cabelo” que puxavam e empurravam[10]. Por exemplo: uma carga positiva era dotada de infinitas linhas de força que empurravam as cargas positivas e puxavam as cargas negativas, conforme esquematizado nas figuras (4.1) e (4.2).

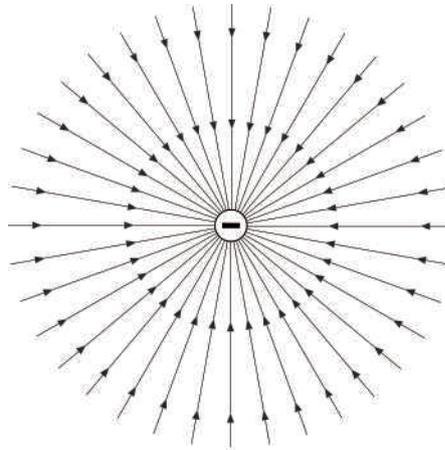
Figura 4.1 – Representação das linhas de força, como propostas por Faraday, para cargas de sinal positivo.



Fonte: Autor (2020).

Faraday, em 1824, como consta em seu diário de laboratório, realizou o experimento que é caracterizado como o marco em sua busca pela concretização do efeito de indução eletromagnética. O experimento consistia em introduzir um ímã no centro de um solenoide que estava ligado aos polos de uma bateria e, portanto, sendo percorrido por uma corrente elétrica. Na ocasião, Faraday não conseguiu observar nada no experimento. Anos de tentativas se passaram e, em 1831, ele conseguiu um avanço em sua pesquisa, induzindo uma corrente elétrica em um circuito como consequência de uma corrente elétrica presente em outro circuito. Meses depois, no mesmo ano de 1831, o físico realizou a sua experiência mais conhecida, induzindo uma corrente elétrica em um circuito por meio de uma variação do campo magnético, o que resultou no primeiro gerador de energia elétrica que é fornecida a partir de uma transformação de energia mecânica[4].

Figura 4.2 – Representação das linhas de força, como propostas por Faraday, para cargas de sinal negativo.



Fonte: Autor (2020).

A descoberta de Faraday até hoje está presente em nossas vidas, como por exemplo nos geradores de energia localizados em usinas hidroelétricas, fonte da maior percentagem da energia produzida no Brasil.

Os trabalhos realizados por Faraday tiveram muita influência no estudo de um outro físico-matemático chamado James Clerk Maxwell (1831–1879). Assim como Faraday, Maxwell não acreditava na ação de forças a distância e, baseando-se nos estudos a respeito das linhas de força, propôs que os fenômenos eletromagnéticos eram resultado dos deslocamentos das partículas do éter. Maxwell atribuiu novas propriedades ao éter que, na teoria proposta por ele, passou a ser um meio capaz de transmitir forças entre a matéria através de tensões, pressões e rotações. O éter de Maxwell também era elástico, tendo propriedades mecânicas. No entanto, não seria um tipo de matéria propriamente dita, pelo fato da luz se propagar no éter sem diminuição da velocidade e com um comportamento ondulatório [15].

A teoria do éter, juntamente com suas propriedades, foi modificada ao longo dos anos com o objetivo de contornar determinadas brechas que contestavam sua existência, ou seja, o éter que Aristóteles teorizou não é o mesmo que, por exemplo, Maxwell considerava em seus cálculos. Em todas as teorias, esse meio era visto como sendo um referencial inercial privilegiado. Uma questão pode aparecer: o que são referenciais inerciais? Para entender esse conceito, primeiramente, veremos o que são referenciais, partindo da ideia da relatividade de Galileu, discutidos no próximo capítulo.

## 5 RELATIVIDADE DE GALILEU

Em diversos momentos do nosso cotidiano, usamos fundamentos da mecânica que estão intrinsecamente ancorados em nosso cérebro. Podemos ver seu uso, por exemplo, na análise sobre o horário que se deve sair de casa a fim de chegar em um destino sem atraso. Pensamos: se estou atrasado, preciso andar mais rapidamente. Quando estamos viajando, notamos que a paisagem vai ficando para trás, causando a impressão que ela está em movimento. Contudo, se pararmos o carro, notaremos que a paisagem, que antes ficava para trás, agora está imóvel. Quando estamos ultrapassando algum carro, notamos que ele aparenta uma velocidade extremamente baixa, quando comparada à indicação do velocímetro. O que causa essa mudança em nossa percepção? O fato de estarmos observando determinado evento, nos coloca na posição de referenciais.

O Princípio da Relatividade de Galileu estabelece que sistemas de referência inerciais são equivalentes no que se refere à descrição mecânica dos sistemas físicos[8]. Referenciais ditos inerciais são sistemas de referência que estão sujeitos a uma força resultante de módulo nulo. Newton, alguns anos após essas discussões iniciais feitas por Galileu, enunciou a Primeira Lei, ou Lei da Inércia, em seu livro *Principia*:

LEI I - Todo o corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em linha reta, a menos que ele seja forçado a mudar aquele estado por forças imprimidas sobre ele. [12, p.53]

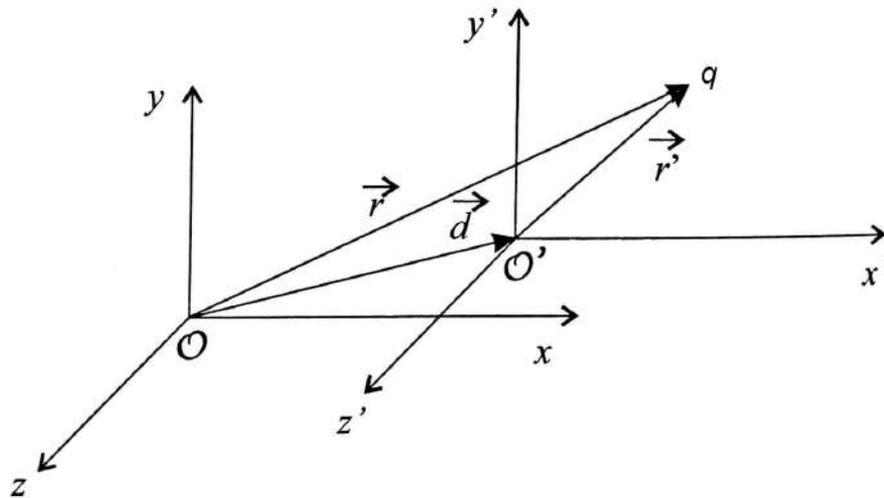
Primeiramente, vamos explorar como dois referenciais inerciais diferentes podem descrever um mesmo evento.

Um referencial inercial é privilegiado em relação aos outros pelo fato de que todas as observações feitas a partir dele podem ser descritas, por exemplo, pelas Leis de Newton. Esse referencial pode usar todas as ferramentas relacionadas à Mecânica Newtoniana para descrever o comportamento de um ente Físico em análise. A ideia apresentada anteriormente ressalta o que se denomina como Princípio da Relatividade de Galileu, que estabelece que sistemas de referência inerciais são equivalentes no que se refere à descrição mecânica dos sistemas físicos[8].

## 5.1 Transformações de Galileu

Analisaremos matematicamente a situação descrita acima, visando obter as transformadas de Galileu para a Mecânica Clássica. Para isso, consideraremos, a princípio, dois referenciais  $O$  e  $O'$ , como esquematizado na figura (5.1).

Figura 5.1 – Referenciais inerciais  $O$  e  $O'$  e os respectivos vetores posição para a carga  $q$  relativos aos dois referenciais.



Fonte: Autor (2020).

Na figura (5.1) estamos lidando com dois referenciais inerciais diferentes,  $O$  e  $O'$ . Observe que  $\vec{r}$  e  $\vec{r}'$  são os vetores que localizam a carga  $q$  em relação a  $O$  e  $O'$ , respectivamente, e  $\vec{d}$  localiza o referencial  $O'$  em relação a  $O$ . Vetorialmente, é possível estabelecer a relação entre esses três vetores, dada pela eq. (5.1).

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{d} \quad (5.1)$$

Vamos supor, agora, que  $O'$  se desloque com uma velocidade constante  $\vec{V}$  e que em  $t = 0$  os dois referenciais se encontravam em posições coincidentes. A partir dessas suposições, podemos escrever o vetor  $\vec{d}$  da seguinte forma:

$$\vec{d} = \vec{V} \cdot t \quad (5.2)$$

Substituindo a eq. (5.2) na eq. (5.1), temos a seguinte relação:

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{V} \cdot t \quad (5.3)$$

A eq. (5.3) é a chamada transformada de Galileu para as coordenadas em Mecânica Clássica e relaciona os referenciais inerciais  $O$  e  $O'$ . A posição da carga, medida por  $O$  é igual a soma da posição da carga medida por  $O'$  com a velocidade de  $O'$  em relação a  $O$  multiplicada pelo tempo.

Para exemplificar, escreveremos os vetores na forma canônica, isto é:

$$\begin{aligned}\vec{r} &= x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k} \\ \vec{r}' &= x'\mathbf{i} + y'\mathbf{j} + z'\mathbf{k} \\ \vec{V} &= V_x\mathbf{i} + V_y\mathbf{j} + V_z\mathbf{k}\end{aligned}\tag{5.4}$$

Usando o conjunto dado pela eqs. (5.4) na eq.(5.3) obtemos um conjunto de equações que representam as transformações de Galileu para as três componentes espaciais:

$$\begin{aligned}x &= (x' + V_x.t') \\ y &= (y' + V_y.t') \\ z &= (z' + V_z.t')\end{aligned}\tag{5.5}$$

Continuaremos usando a eq. (5.3) pelo fato dela representar vetores de forma genérica. Escrevendo a derivada temporal da eq. (5.3), temos:

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d\vec{r}'}{dt'} + \vec{V}\tag{5.6}$$

Em um primeiro momento, usamos  $dt$  e  $dt'$  na eq. (5.6) para representar o intervalo infinitesimal de tempo medido durante o evento a partir do referencial  $O$  e  $O'$ , respectivamente, representando a condição de que os tempos medidos a partir de referenciais diferentes não são iguais.

Mais adiante, exploraremos essa condição. Como, na época de Galileu, o tempo era tratado como absoluto, teremos que:

$$t = t' \rightarrow dt = dt'$$

Mas, qual é o significado atribuído a uma ideia de tempo absoluto? Newton, em seu livro Principia faz algumas definições. A respeito do tempo, ele definiu:

I - 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 perepítível e externa (seja ela exata ou regular) que é obtida por meio de movimento e que é normalmente usada no lugar de tempo verdadeiro, tal como uma hora, um dia, um mês, um ano[12, p.45].

Baseado na definição apresentada por Newton sobre o tempo, podemos reescrever a eq. (5.6) como:

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d\vec{r}'}{dt} + \vec{V} \iff \vec{v} = \vec{v}' + \vec{V} \quad (5.7)$$

A eq. (5.7) mostra a transformada de Galileu para a velocidade de um objeto quando observada por dois referenciais inerciais diferentes. Ela demonstra que a velocidade da carga medida pelo referencial  $O$  é igual a soma da velocidade da carga em relação a  $O'$  e do referencial  $O'$  em relação a  $O$ .

Para explorar ainda mais essa transformada, escreveremos a derivada temporal para a eq. (5.7), obtendo:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d\vec{v}'}{dt} + \frac{d\vec{V}}{dt} \quad (5.8)$$

Assumimos, anteriormente, que o referencial  $O'$  estava a uma velocidade constante  $\vec{V}$ , portanto, temos que:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = 0 \quad (5.9)$$

Usando o resultado da eq. (5.9) na eq. (5.8), podemos obter uma relação entre as acelerações observadas nos dois referenciais inerciais.

$$\vec{a} = \vec{a}' \quad (5.10)$$

Finalmente, as transformações de Galileu são escritas como:

$$x = x' + V_x t' \quad (5.11a)$$

$$y = y' + V_y t' \quad (5.11b)$$

$$z = z' + V_z t' \quad (5.11c)$$

$$t = t' \quad (5.11d)$$

As eqs. (5.11) nos mostram as transformações de coordenadas para dois sistemas inerciais que se movem relativamente com uma velocidade  $\vec{V}$  constante. Nesse caso, as acelerações da carga medidas a partir dos dois referenciais são as mesmas e, conseqüentemente, ambas são descritas pela mesma equação de movimento, dada pela Segunda Lei de Newton.

Os cálculos apresentados aqui são desenvolvidos de forma semelhante aos encontrados em [8].

Devemos salientar que durante o estudo da relatividade de Galileu fizemos a suposição de que os tempos medidos pelos dois referenciais inerciais são iguais, visto que essa era a concepção clássica, mecanicista – o tempo era absoluto. Mas, podemos indagar, e se os tempos medidos a partir de  $O$  e  $O'$  forem diferentes? Quais seriam as conseqüências?

Antes de discutirmos a respeito desse questionamento, ressaltaremos algumas inconsistências que o mecanicismo apresenta em relação ao eletromagnetismo.

Ao final do século XIX, houve uma mudança da visão física sobre a natureza, denominada Revolução Eletromagnética que, segundo [16],

No final do século XIX a visão mecanicista da natureza, segundo a qual os últimos constituintes da realidade física eram massas inerciais, discretas ou contínuas, que se movimentavam segundo as leis da mecânica, sob influência de forças de contato ou à distância, estava sendo, rapidamente, suplantada pela visão eletromagnética da natureza. Segundo esta nova visão, as únicas realidades físicas eram o éter eletromagnético e as cargas elétricas, e as leis da natureza eram redutíveis às leis do campo eletromagnético, a partir das quais tentava-se estabelecer as propriedades do éter e de sua interação com as cargas. A versão mais radical desta maneira de conceber a natureza chegava a identificar as partículas carregadas como estruturas em movimento ou singularidades do éter; apontando então este último e suas perturbações como a realidade fundamental de toda a natureza [16, p.4]

O autor ainda destaca que Lorentz e colaboradores, com o objetivo de tornar a teoria eletromagnética a teoria básica para a física, principalmente tratando-se da solução de problemas relativos à influência do movimento absoluto, buscaram se distanciar da visão mecanicista newtoniana.

No capítulo seguinte, discutiremos alguns aspectos sobre a mudança de visão do mundo físico – a transição de um pensamento mecanicista da natureza para uma visão eletromagnética.

## 6 REVOLUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Antes de discutirmos sobre a mudança da visão mecanicista para a visão eletromagnética da física, definiremos qual será o conceito de mecanicismo abordado neste trabalho. Segundo Bezerra (2006) o "mecanicismo" se trata de um termo multifacetado e polissêmico[2]. Para a nossa discussão, o sentido utilizado será dado por:

o mecanicismo “clássico”, por assim dizer, que consiste no ideal de reduzir todos os fenômenos físicos a um quadro conceitual cuja ontologia (este termo é empregado aqui com a condição de que não se pense em “ontologia” no sentido contemporâneo) inclui basicamente, como qualidades primárias, a matéria e o movimento. Este seria um sentido ontológico de mecanicismo, aquilo que se denomina tradicionalmente de uma concepção mecanicista de natureza. Costuma-se sublinhar, falando em termos negativos, que o mecanicismo clássico implica a rejeição de várias teses: (i) a rejeição de quaisquer propriedades ativas da matéria (isto é, a matéria é essencialmente passiva); (ii) a rejeição das diferentes naturezas ou essências específicas: o mundo físico teria, em vez disso, uma só natureza homogênea; (iii) a rejeição da ação a distância: toda ação se dá por contato; (iv) a rejeição das causas finais, com a redução de toda causalidade às causas eficientes; (v) a rejeição de agentes incorpóreos capazes de mover os corpos materiais (esta tese, como se sabe, gera problemas se se desejar incluir a mente ou o espírito e explicar as suas interações com um corpo). Vale lembrar que a primeira acepção de mecanicismo pode assumir uma forma plenista (rejeitando o vazio) ou uma forma atomista (admitindo o vazio)[2, p.179].

O afastamento da visão mecanicista pode ser representada por duas vertentes: a modificação ou abandono de algumas leis da mecânica newtoniana e a mudança na teoria da constituição do éter, ou seja, a substituição de um meio que era composto por partículas minúsculas interagindo à curta distância ou através do contato, por um éter contínuo que permitia a transição ininterrupta das forças eletromagnéticas, preenchendo todo o espaço[16].

Discutiremos aqui a respeito da segunda vertente mencionada – a mudança na teoria da constituição do éter. Portanto, se o leitor tiver interesse, a discussão sobre a primeira vertente, pode ser encontrada em [16].

### 6.1 Mudança na concepção sobre a composição do éter

Podemos localizar, historicamente, o início da Revolução Eletromagnética na primeira metade do século XIX, com a proposta de um éter eletromagnético que abandonava a composição corpuscular e assumia uma continuidade no meio. Essa composição contínua deveria ter extrema rigidez para que ondas transversais, como a luz, pudessem atravessá-lo a altíssimas

velocidades. Contudo, deveria apresentar, também, uma enorme fluidez para que corpos celestes se movimentassem sem ocasionar nenhum "vento" nesse meio[16]. Podemos comparar esse "vento" com rastros deixados após a passagem de um corpo em determinado meio. Meios de transporte aquáticos, por exemplo, deixam certas movimentações ou perturbações ao passarem pela água e essas modificações são análogas ao "vento" no éter. Uma forma mais intuitiva de se comparar o "vento" no éter com a perturbação em um fluido é pensarmos na passagem de grandes veículos que deslocam certa massa de ar, que pode ser sentida por nós, quando estamos a uma certa distância deles.

Se analisarmos um meio, dotados de uma percepção mecanicista da natureza, os conceitos de fluidez e de rigidez se opõem. Para que uma onda se propague com velocidades altas, em um meio mecânico, deve haver grande proximidade entre partículas da substância, todavia essa compactação exercerá mais resistência ao movimento e, conseqüentemente, o meio não terá fluidez. Vilani ainda salienta que

uma contribuição paralela fundamental, sempre no sentido de propor um meio diferente da matéria ordinária, foi a descoberta de Faraday de que o espaço privado de matéria ordinária seria ainda capaz de ação física elétrica e magnética, transmitindo ondas e induzindo corrente elétrica a partir de um ímã em movimento. Após uma primeira tentativa de explicar estas ações mediante um éter composto de partículas contíguas (próximas umas das outras) agindo a distância uma sobre a outra, ele foi obrigado a procurar uma alternativa para este modelo, pois nele o vácuo agiria como condutor e isolante. Estimulado pelas pesquisas experimentais, que o conduziram a descoberta do diamagnetismo e da rotação óptica, e confortado pelas discussões iluminantes bem como pela correspondência freqüente com W. Thomsom (Lord Kelvin), que o ajudaram a desenvolver a metodologia das "analogias físicas e a elaborar e aprofundar a ideia das linhas de força, Faraday chegou a sua nova concepção de éter. Este seria um meio contínuo, que permearia todo o espaço e todo o corpo, cheio de linhas de forças elétricas e magnéticas, as quais, com suas vibrações, transmitiriam ações eletromagnéticas e luminosas[16, p.6].

Faraday, com o intuito de explicar seus resultados experimentais, utilizou as linhas de força (representadas pela disposição das limalhas de ferro em seus experimentos eletromagnéticos), mencionadas anteriormente, que preenchem, de alguma forma, o espaço entre os corpos em interação. Nesse momento, surge um novo tipo de ação, diferente da ação à distância ou por contato, que pode ser denominada como *contínua*[2].

Mas os físicos, adeptos da representação através de linhas de força e do éter eletromagnético, tiveram problemas ao descrever a transmissão da informação, sem um meio material, em termos diferentes dos usados na mecânica, além da dificuldade de explicar a interação entre

o éter e a matéria ordinária[16]. Com esse empecilho na descrição da teoria, Maxwell desenvolveu, inspirado na teoria das linhas de força de Faraday, uma série de trabalhos, iniciados no ano de 1856 com o artigo "*On Faraday's line of force*" (Sobre as linhas de força de Faraday) e terminando com "*A treatise of eletricity and magnetism*" (Tratado sobre a eletricidade e magnetismo), em 1873. Maxwell conseguiu a façanha de unificar os domínios da eletricidade, do magnetismo e da óptica[2].

Maxwell estava em busca da unificação de um éter lumerífero e um eventual éter magnético, com o objetivo de dar fundamentação mecânica para a ação contínua de Faraday e para a descrição da luz. As equações de Maxwell não surgem como leis físicas independentes e fundamentais, mas sim como consequências das características estruturais do meio etéreo. Por exemplo, a carga e a corrente elétrica são nomes dados às certas condições do meio e não dotadas de natureza própria, assim como são apresentadas atualmente [6]. Portanto, as equações de Maxwell foram formuladas a fim de descrever perturbações e características do éter.

As Equações de Maxwell, na forma diferencial, são

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{Lei de Gauss elétrica})$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Lei da Indução de Faraday})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{Lei de Gauss magnética})$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (\text{Lei de Ampère com a corrente de deslocamento})$$

em que  $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$  e  $\vec{H} = \frac{1}{\mu} \vec{B}$  nos meios isotrópicos<sup>1</sup> e  $\epsilon$  e  $\mu$  são a permissividade elétrica do meio e a permeabilidade magnética do meio, respectivamente.

Ao contrário do que é divulgado na maioria das vezes, as equações de Maxwell não tratam ainda de campos com existências próprias, mas sim da teoria do éter eletromagnético e suas perturbações que, posteriormente, foi definido por ele sendo o mesmo que o éter luminífero. Vale ressaltar que Maxwell não utiliza a notação vetorial apresentada anteriormente, mas faz o uso de componentes para representar cada ente físico[2].

<sup>1</sup> Um meio isótropo é um meio que apresenta as mesmas propriedades em todas as direções.

Em meados do século XIX, o conceito de energia era uma das principais ferramentas da física, mas quando Maxwell discutiu a energia (mecânica, classificada por ele) do campo magnético e elétrico, sua ideia era diferente do pensamento comum da época[11].

Para exemplificar a visão de Maxwell, consideraremos um capacitor carregado em que a energia eletrostática pode ser calculada como o somatório de todas as forças entre os pares de partículas carregadas, ou seja,

$$W = \sum_{i,j} \frac{q_i q_j}{4\pi\epsilon_0 r_{ij}} \quad (6.1)$$

A forma mais comum de se pensar é que a energia eletrostática calculada a partir da eq.(6.1) está presente nas cargas elétricas, mas Maxwell pensava diferente. Ele atribuiu a energia às deformações e tensões que as cargas geram no éter; o próprio movimento das cargas produz trabalho no éter da mesma forma em que uma mola esticada ou contraída[10]. Na mola, a energia potencial fica distribuída ao longo do material e, de forma análoga, a energia eletrostática seria uma energia potencial relacionada às tensões no éter. É importante notar que

desse modo, o campo já não é mais apenas uma propriedade disposicional (isto é, se uma partícula fosse colocada em tal ponto do espaço, então ela sentiria tal força), mas sim uma entidade física com existência real. Assim, aponta-se claramente para uma transformação na ontologia básica da física[2, p.191].

De acordo com a análise de Bezerra (2006), as publicações de Maxwell entre "*Sobre as linhas de força de Faraday*" até o "*Tratado sobre a eletricidade e magnetismo*" mostra uma certa ascendência ao questionamento dos modelos mecânicos, uma tendência a investir a noção de campo de realidade física e um movimento em direção a uma teoria mais matematizada e abstrata, instanciada particularmente no uso do formalismo lagrangiano. Nesse formalismo, o conceito de energia ocupa um lugar fundamental, substituindo o conceito de força. No método de análise mecânico, deve-se trabalhar com várias forças e acelerações vetoriais. Já o formalismo lagrangiano dispensa o conhecimento detalhado dos vínculos mecânicos internos do sistema e das forças devidas a esses vínculos, entretanto as forças externas aplicadas ao sistema devem ser levadas em conta. Trabalha-se com a função escalar  $L = T - V$ , em que  $T$  é a energia potencial do sistema e  $V$  a energia cinética [2].

Assim como aconteceu com muitos cientistas, Maxwell não conseguiu se desprender totalmente da teoria vigente (nesse caso, o mecanicismo). Bezerra [2] traz interpretações sobre os trabalhos de Maxwell entre "*Sobre as linhas de força de Faraday*" e "*A dynamical theory of the electromagnetic field*" (A teoria dinâmica do campo eletromagnético) e, posteriormente,

no "*Tratado sobre a eletricidade e o magnetismo*", onde se pode observar, pelo menos nos pronunciamentos de Maxwell, uma crescente intenção de abrir mão dos modelos mecânicos, porém nesse movimento metodológico existem algumas tensões e não linearidades.

É preciso entender, em primeiro lugar, como o próprio Maxwell encarava suas próprias posições. Assim como ele desejara, em "On Faraday's lines of force" e "On physical lines of force", adotar as analogias mecânicas sem se comprometer com a realidade física dos mecanismos propostos, também o seu abandono das analogias mecânicas e sua adoção de um formalismo que dispensava o conhecimento das conexões entre as partes do sistema "não significava que a sua busca por uma explicação mecânica detalhada tivesse sido abandonada", como lembra Martin J. Klein (1972, p. 69). A adoção de modelos mecânicos, num primeiro momento, e o seu abandono, num segundo momento, constituem decisões no plano metodológico. Porém, ao mesmo tempo, Maxwell continua sustentando um compromisso mecanicista no plano axiológico, como veremos. Embora "a analogia mecânica detalhada [tenha sido] quase completamente abandonada", escreve Klein, "ele ainda estava construindo uma teoria mecânica" (1972, p. 69). Se por um lado Maxwell alerta para o fato de que os modelos analógicos devem ser considerados como meros "auxílios para a mente", e as hipóteses correspondentes não devem ser entendidas num sentido literal, explicativo – e ainda que, num segundo momento, Maxwell chegue mesmo a abandonar os modelos analógicos –, por outro lado ele repetidamente expressa a convicção de que uma explicação "completa e satisfatória" de um fenômeno físico somente seria obtida quando se conhecesse o mecanismo subjacente a ele, e quando o fenômeno fosse reduzido a mudanças na configuração e movimento de um sistema material[2, p.202].

Ao mesmo tempo em que Maxwell não conseguiu romper totalmente com o mecanicismo, ele desenvolveu uma teoria sobre o éter eletromagnético que poderia ser usada sem sua existência e pode ser chamada de teoria do campo ou teoria do campo eletromagnético. Bezerra (2006) destaca a análise de Howard Stein (1970) sobre um comentário de Hertz,

[...] de que "a teoria de Maxwell é o sistema das equações de Maxwell". Ou seja, a teoria não necessita de quaisquer hipóteses suplementares acerca do éter. Com efeito, acabou-se por perceber que Maxwell já havia formulado uma teoria que era perfeitamente independente da noção de éter, embora ele mesmo e muitos de seus contemporâneos e sucessores tenham tido dificuldade para entendê-la assim[2, p.213].

Após ter tratado o éter como um fluido, passa-se agora a considerá-lo como um sólido elástico "ideal", especialmente G. G. Stokes, em meados do século XIX. Assim, não há mais transporte de partículas, mas apenas comunicação de tensão. Podemos destacar, novamente, a transmissão de informações realizadas através de tensões no éter, transmitidas como uma ação contínua e não mais por contato e nem à distância. Por mais que a visão mecanicista da natureza fosse abandonada de forma gradativa nesse período, o éter eletromagnético (principal teoria

para o desenvolvimento de uma visão eletromagnética da natureza) continuava a apresentar inconsistências ou soluções satisfatórias acerca da caracterização da diferença entre o éter e a matéria ordinária e a interação entre o éter e a matéria, principalmente pela sua não detecção[2].

Dentre os experimentos feitos com base na detecção de fenômenos com relação ao éter, destacaremos o experimento feito por Albert Michelson e Edward Morley, popularmente conhecido como Experimento de Michelson-Morley.

## 6.2 Experimento de Michelson-Morley

Através das contribuições de vários físicos para a formulação da Teoria Eletromagnética, ao final do século XIX ela já estava bem estabelecida. A explicação dos fenômenos era baseada em interações com o éter. Os campos magnético e elétrico eram compreendidos como manifestações nesse meio, que era suposto permear todo o espaço no universo. As tensões no éter podiam acumular energia, assim como visto, anteriormente, no caso do capacitor carregado. É importante notar que, nessa época, todas as ondas mecânicas conhecidas se propagavam em algum meio material, sejam ondas na água, o som se propagando no ar, entre outros[8]. Por conseguinte, devemos ser cuidadosos com a anacronia<sup>2</sup>.

Assim como discutido anteriormente, a descrição dos fenômenos eletromagnéticos usava, como predefinição, a existência do éter. Consequentemente, não podemos menosprezar essa ideia porque ela foi a base para uma teoria que é aceita até a atualidade. As ondas eletromagnéticas, assim como as ondas mecânicas, deveriam se propagar em algum meio e, teoricamente, estabeleceram que o éter fosse esse meio[8].

Quando o experimento de Michelson-Morley é mencionado, automaticamente, existe a associação a um experimento que buscou a determinação da existência, ou não, do éter. Um exemplo significativo para essa visão, retirado de um dos artigos do Roberto Martins, é um trecho do livro "A dança do universo", de Marcelo Gleiser:

Albert Michelson, cujo brilhante experimento, executado com Edward Morley em 1887, foi fundamental para que se estabelecesse a não-existência do éter, jamais aceitou seus próprios resultados. O que supostamente deveria ter sido um mero teste para confirmar a existência do éter transformou-se num pesadelo [9, p.266].

---

<sup>2</sup> Erro de cronologia que geralmente consiste em atribuir a uma época ou a um personagem ideias e sentimentos que são de outra época.

Michelson, assim como a grande maioria dos físicos da época, não colocava em pauta a existência do éter. O seu objetivo com a realização do experimento tinha, como base, a teoria de Fresnel, que afirmava a existência do éter estacionário e, conseqüentemente, existia a possibilidade de se detectar a velocidade da Terra em relação a esse meio.

Vários experimentos foram realizados nesse sentido. Vale salientar que nem o experimento de Michelson e Morley nem qualquer outro experimento permite estabelecer a não existência do éter [9].

Mas, como o popular experimento foi executado?

Michelson e Morley consideravam a teoria do éter estacionário, portanto, assim como um barco navegando em um lago, o planeta deveria, de certa forma, deixar um rastro ou vento no éter, ocasionado pelo movimento da Terra em relação a ele. Eles teorizaram que se um feixe de luz fosse emitido com a mesma direção e sentido desse vento, ele apresentaria uma maior velocidade do que se emitido em outras direções[8]. Podemos fazer a analogia dessa ideia com um barco subindo ou descendo um rio (a favor, ou não, da correnteza). A velocidade do barco em relação à margem seria maior quando estivesse indo a favor do fluxo de água do que quando estivesse contra ele.

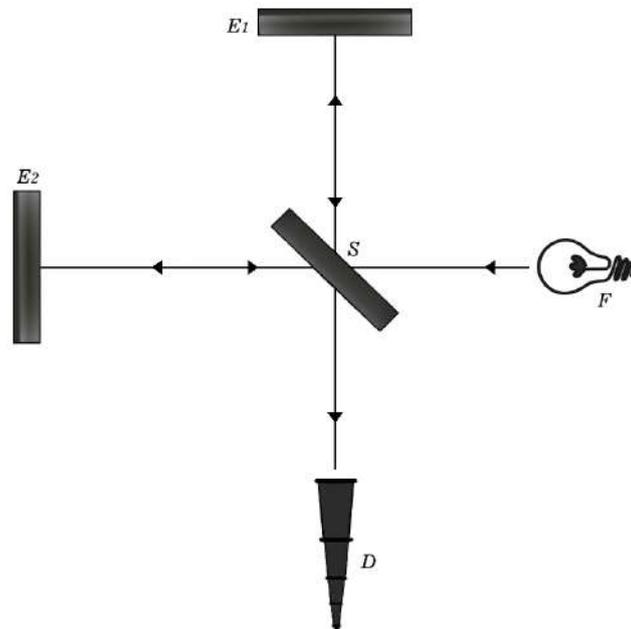
### 6.2.1 O Experimento

O experimento consiste na emissão de um feixe de luz monocromático, proveniente de uma fonte  $F$ , que incide em um semi-espelho<sup>3</sup>  $S$  que está posicionado a  $45^\circ$  de inclinação em relação a direção do feixe de luz. Parte da luz ultrapassa o semi-espelho e incide no espelho  $E_2$  que, por sua vez a reflete completamente para  $S$ , que a reflete, parcialmente para o detector  $D$ . Parte da luz que não atravessou o semi-espelho é refletida até o espelho  $E_1$ . Essa luz é refletida de volta até  $S$ , onde passa pelo semi-espelho e também chega ao detector  $D$ . A figura (6.1) mostra uma representação para esse arranjo experimental.

Primeiramente, estudaremos o trajeto horizontal da luz entre  $S$  e  $E_2$  e entre  $E_2$  e  $S$ . Nomearemos por  $C$  a velocidade da luz em relação ao éter e  $V_T$  a velocidade da Terra se movendo da direita para a esquerda em relação ao arranjo experimental mostrado na figura (6.1). A partir das transformadas de Galileu, observamos que a luz, no trajeto  $S$  a  $E_2$ , tem a velocidade  $C_{SE_2}$

<sup>3</sup> Semi-espelhos são superfícies que refletem parte da luz incidida e outra parte consegue atravessa-lo. Exemplos de semi-espelhos são vidros de carros, onde é possível ver tanto o que está dentro quanto o reflexo de fora.

Figura 6.1 – Esquema representativo para o experimento de interferência realizado por Michelson-Morley.



Fonte: Autor (2020).

em relação a Terra. Como a Terra se move da direita para a esquerda, a velocidade relativa é menor que  $C$ , de forma que

$$C(-\mathbf{i}) = V_T(-\mathbf{i}) + C_{SE_2}(-\mathbf{i})$$

escrita em módulo

$$C = V_T + C_{SE_2}$$

ou

$$C_{SE_2} = C - V_T \quad (6.2)$$

Quando o raio de luz percorre o caminho de volta, de  $E_2$  até  $S$ , a velocidade de luz em relação a Terra é maior que  $C$ . Podemos usar a relação:

$$C\mathbf{i} = C_{E_2S}\mathbf{i} + V_T(-\mathbf{i})$$

escrita em módulo

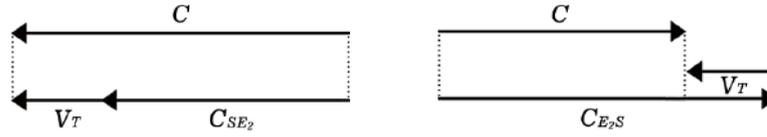
$$C = C_{E_2S} - V_T$$

ou

$$C_{E_2S} = C + V_T \quad (6.3)$$

Para ilustrar, vetorialmente, ambas as situações, veja a figura (6.2) a seguir.

Figura 6.2 – Representação das situações em que o feixe de luz viaja entre o semi-espelho  $S$  e o espelho  $E_2$  e, posteriormente, de  $E_2$  a  $S$ .



Fonte: Autor (2020).

Temos, entre  $S$  e  $E_2$ , uma distância  $d$ . A fim de calcular o intervalo de tempo gasto para o feixe ir e voltar ( $\Delta t_1$ ) por esse caminho, temos

$$\Delta t_1 = \Delta t_{ida} + \Delta t_{volta}$$

$$\Delta t_1 = \frac{d}{C_{SE_2}} + \frac{d}{C_{E_2S}}$$

que, a partir das equações (6.2) e (6.3), pode ser escrita como:

$$\Delta t_1 = \frac{d}{C - V_T} + \frac{d}{C + V_T} = \frac{d(C + V_T + C - V_T)}{(C - V_T)(C + V_T)}$$

ou

$$\Delta t_1 = \frac{2dC}{C^2 - V_T^2} \quad (6.4)$$

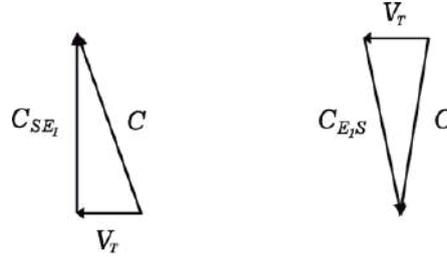
Agora, vamos considerar a trajetória do feixe de luz nos trajetos de ida e volta, entre  $S$  e  $E_1$  e  $E_1$  e  $S$ . A luz permanece, em módulo, com velocidade  $C$  em relação ao éter. Devido ao movimento horizontal da Terra, o vetor velocidade  $\vec{C}$  tem trajeto na diagonal, em relação ao éter, tanto na ida quanto na volta. Chamaremos de  $\vec{C}_{SE_1}$  e  $\vec{C}_{E_1S}$  as velocidades entre  $S$  a  $E_1$  e  $E_1$  a  $S$ , respectivamente. As relações agora ficam da seguinte forma:

$$\vec{C} = \vec{C}_{SE_1} + \vec{V}_T$$

na ida e

$$\vec{C} = \vec{C}_{E_1S} + \vec{V}_T$$

Figura 6.3 – Representação das situações em que o feixe de luz viaja entre o semi-espelho S e o espelho  $E_1$  e, posteriormente, de  $E_1$  a S



Fonte: Autor (2020).

A figura (6.3) ilustra essas relações vetoriais.

Pela Lei dos Cossenos, temos as seguintes relações entre os módulos das velocidades:

$$C^2 = C_{SE_1}^2 + V_T^2 \quad C^2 = C_{E_1S}^2 + V_T^2$$

A Terra não apresenta movimento vertical pois só se move da direita para a esquerda (horizontalmente), conseqüentemente, as velocidades  $C_{SE_1}$  e  $C_{E_1S}$  têm o mesmo módulo. Podemos escrevê-las como

$$C_{SE_1} = C_{E_1S} = \sqrt{C^2 - V_T^2} \quad (6.5)$$

O aparato experimental possuía simetria quanto aos trajetos horizontais e verticais, ou seja, a distância, nomeada anteriormente por  $d$ , entre S e  $E_2$  é a mesma que entre S e  $E_1$ .

O intervalo de tempo,  $\Delta t_2$  gasto para o feixe de luz ir e voltar na trajetória vertical é dado por:

$$\Delta t_2 = \Delta t_{ida} + \Delta t_{volta}$$

$$\Delta t_2 = \frac{d}{C_{SE_1}} + \frac{d}{C_{E_1S}}$$

Usando a eq.(6.5),  $\Delta t_2$  pode ser escrito como:

$$\Delta t_2 = \frac{d}{\sqrt{C^2 - V_T^2}} + \frac{d}{\sqrt{C^2 - V_T^2}}$$

ou

$$\Delta t_2 = \frac{2d}{\sqrt{C^2 - V_T^2}} \quad (6.6)$$

Com os cálculos feitos anteriormente, podemos obter a razão entre os intervalos de tempo gastos para a luz percorrer os trajetos horizontal e vertical do aparato. Para isso, utilizaremos as eq. (6.4) e (6.6).

$$\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = \frac{\frac{2dC}{C^2 - V_T^2}}{\frac{2d}{\sqrt{C^2 - V_T^2}}} = \frac{2dC}{C^2 - V_T^2} \cdot \frac{\sqrt{C^2 - V_T^2}}{2d}$$

ou

$$\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} = \sqrt{1 - \frac{V_T^2}{C^2}} \quad (6.7)$$

Como a velocidade da Terra é bem menor que a velocidade da luz ( $V_T \ll C$ ), a razão 6.7 se aproximaria muito de 1, ou seja, os intervalos de tempo seriam muito pequenos. Mas Michelson e Morley usavam o fenômeno da interferência para detectar esses valores. Como o comprimento de onda da luz é muito pequeno, qualquer variação da velocidade resultaria em algum tipo de interferência entre os dois feixes. Se não houvesse diferença entre a velocidade de cada feixe ( $\Delta t_1 = \Delta t_2$ ), as ondas se reforçariam. Caso ocorresse o contrário, existiriam ininterferências, construtivas e/ou destrutivas, que resultariam numa alternância de regiões claras e escuras. A experiência foi feita inúmeras vezes, por diversos pesquisadores, em muitas orientações e condições, mas as franjas de interferência não eram verificadas.

Assim como discutido nesse capítulo, o resultado da experiência não excluiu a existência do éter. A verdadeira conclusão que o experimento proporcionou foi a exclusão do éter como um referencial ao qual as grandezas eletromagnéticas deviam ser medidas, pois a velocidade da luz apresentou o mesmo valor em diferentes referenciais inerciais[8].

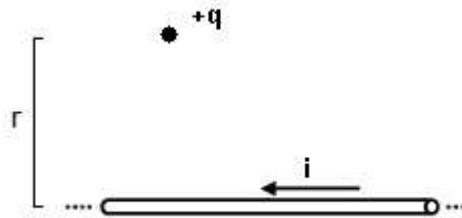
A discussão e desenvolvimento matemático apresentado nessa seção foram realizados com base no livro Eletromagnetismo: Volume 3[8].

## 7 CONTRAÇÃO ESPACIAL

O éter, a princípio, não era mais um meio com relação ao qual as grandezas eletromagnéticas deveriam ser medidas, portanto continuaremos a adotar referenciais inerciais usuais para a descrição de eventos. Já vimos que as transformadas de Galileu apresentavam falhas quando se tratava do eletromagnetismo. Discutiremos, nesse capítulo, a Força de Lorentz sob uma partícula carregada em uma determinada situação.

Consideraremos uma situação, representada pela fig 7.1 descrita por um referencial  $O$ , onde uma carga  $q$  está posicionada a uma distância  $r$  de um fio, eletricamente neutro, coincidente com o eixo  $x$ , percorrido por uma corrente  $I$  resultante de um movimento de elétrons com velocidade  $\vec{v}_i$ .

Figura 7.1 – Situação, observada pelo referencial  $O$ , em que a carga  $q$  está localizada à uma distância  $r$  de um fio retilíneo percorrido por uma corrente  $I$ .



Fonte: Autor (2020).

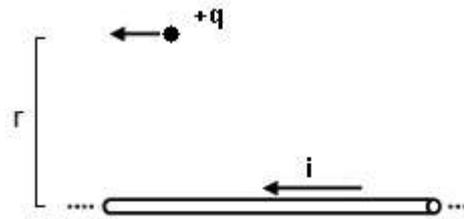
A força de Lorentz em uma carga é calculada a partir da soma da força elétrica e da força magnética que são exercidas sobre ela. Então, temos que:

$$\vec{F}_L = q\vec{E} + q\vec{V} \times \vec{B}$$

A força de Lorentz que atua sobre a carga na situação descrita acima é nula, pois ela se encontra em repouso em relação ao referencial  $O$  e não há campo elétrico atuando sobre ela.

Vamos imaginar uma nova situação: agora há um referencial  $O'$  que se move com a velocidade  $\vec{v}_i$ . Note que agora a velocidade desse referencial é a mesma velocidade dos elétrons no fio, em módulo, direção e sentido. Nessa nova situação, a carga teste apresenta uma velocidade  $-\vec{v}_i$  relativa ao referencial  $O'$ .

Figura 7.2 – Situação, observada pelo referencial  $O'$ , em que a carga  $q$  está localizada à uma distância  $r$  de um fio retilíneo percorrido por uma corrente  $I$ .



Fonte: Autor (2020).

De uma forma intuitiva, podemos pensar que na observação realizada pelo referencial  $O'$ , surgirá uma força magnética devido ao movimento relativo da carga. Mas o princípio da invariância de Galileu estabelece que

Sistemas de referência inerciais são equivalentes no que se refere à descrição mecânica dos sistemas físicos[8, p.954].

Portanto, não poderia surgir uma força ocasionada somente pela mudança de referencial inercial ( $O$  para  $O'$ )!

Vamos, nesse momento, analisar esta nova situação. Podemos nos perguntar o porquê da existência de corrente, visto que os elétrons estão em repouso de acordo com o referencial  $O'$ . Observaremos que a corrente será ocasionada, em  $O'$  pelo movimento das cargas positivas que apresentam velocidade  $-\vec{v}_i$ . Pela Lei de Ampère, podemos calcular o campo magnético gerado por esse novo movimento de cargas:

$$\oint \vec{B}' \cdot d\vec{l} = \mu_o I' \quad (7.1)$$

Os movimentos que existem no problema são apenas horizontais, portanto a carga estará sempre em uma distância fixa do fio retilíneo, denominada anteriormente por  $r$ . Pela regra da mão direita, sabemos que o campo magnético em um arco com raio  $r$ , constante, terá o mesmo valor. O produto escalar entre  $\vec{B}'$  e  $d\vec{l}$  é

$$\vec{B}' \cdot d\vec{l} = |\vec{B}'| |d\vec{l}| \cos(0) = B' dl \quad (7.2)$$

Substituindo a eq.(7.2) na eq.(7.1) temos que:

$$B' \oint dl = \mu_o I'$$

em que  $\mu_o$  é a constante de permeabilidade magnética e  $dl$  é o comprimento do arco de raio  $r$ . O campo magnético, em módulo, é dado então por:

$$B' = \frac{\mu_o I'}{2\pi r} \quad (7.3)$$

Sabendo que a corrente  $I'$  também pode ser escrita como  $\lambda'_+ v$ , em que  $\lambda'_+$  é a densidade de carga positiva no fio e  $v$  é o módulo da velocidade dessas cargas em relação a  $O'$ , podemos reescrever a eq.(7.3) da seguinte forma:

$$B' = \frac{\mu_o \lambda'_+ v}{2\pi r} \quad (7.4)$$

Sabemos que a força magnética pode ser calculada utilizando-se a seguinte equação:

$$\vec{F}_m = q(\vec{v} \times \vec{B}') \quad (7.5)$$

Como a velocidade da carga é  $v(-\mathbf{i})$  e  $\vec{B}' = B'(-\mathbf{k})$  (adotaremos o eixo z de forma que sua orientação positiva esteja saindo do plano representado no referencial  $O'$ ), a força magnética pode ser calculada como:

$$\vec{F}_m = q(\vec{v} \times \vec{B}') = qvB'[(-\mathbf{i}) \times (-\mathbf{k})] = qvB'(-\mathbf{j})$$

e, em módulo, teremos:

$$|\vec{F}_m| = qvB' \quad (7.6)$$

Substituindo a eq.(7.4) na eq.(7.6), obtemos a seguinte expressão :

$$F_m = \frac{qv^2 \mu_o \lambda'_+}{2\pi r}$$

ou, sabendo que  $\mu_o = \frac{1}{\epsilon_o c^2}$ , podemos ainda escrever:

$$F_m = \frac{qv^2 \lambda'_+}{2\pi \epsilon_o c^2 r} \quad (7.7)$$

No início desta seção, discutimos a respeito do princípio da invariância de Galileu. A partir do que analisamos anteriormente, surgiu uma força magnética, de módulo definido pela eq (7.7), devido à mudança de referencial. Ambos referenciais são inerciais, portanto, de acordo com o princípio de invariância de Galileu, um determinado evento não deve ser alterado apenas pelo fato de haver uma mudança de referencial para descrevê-lo.

As configurações do problema analisado a partir do referencial  $O'$ , até aqui, sugerem uma movimentação vertical devido à força magnética atrativa calculada anteriormente. Por outro lado, a partir do referencial  $O$ , não há nenhuma movimentação da carga de prova. Uma hipótese que consideraremos é que deva surgir uma força que vá contrabalançar a força magnética e essa força provém do surgimento de uma densidade  $\Delta\lambda'$  de carga no fio. Considerando essa hipótese, calcularemos o campo elétrico na carga de prova a partir da Lei de Gauss.

$$\epsilon_o \int \vec{E}' \cdot d\vec{a} = \Delta\lambda' \int dL \quad (7.8)$$

Como a hipótese é que haja uma força de repulsão na carga, conseqüentemente o vetor  $\vec{E}'$  pode ser escrito como  $E' \hat{j}$ . A superfície gaussiana mais conveniente para o problema é um cilindro de raio  $r$ , portanto o vetor  $d\vec{a}$  pode ser escrito como  $da \hat{j}$ . O produto escalar da eq.(7.8) fica da seguinte forma:

$$\vec{E}' \cdot d\vec{a} = E' da (\hat{j} \cdot \hat{j}) = E' da \quad (7.9)$$

Substituindo a eq.(7.9) na eq.(7.8), obtém-se:

$$\epsilon_o E' \int da = \Delta\lambda' \int dL$$

ou

$$\epsilon_o E' A_c = \Delta\lambda' L_f \quad (7.10)$$

em que  $A_c$  é a área da superfície gaussiana cilíndrica e  $L_f$  é o comprimento do fio que é compreendido pelo cilindro. A área  $A_c$  do cilindro é  $2\pi rL$ . Desse modo, o campo elétrico, segundo a eq.(7.10), sobre a carga  $q$  é

$$E' = \frac{\Delta\lambda'}{2\pi\epsilon_o r} \quad (7.11)$$

Através do cálculo do campo elétrico que atua sobre a carga  $q$ , podemos determinar a força elétrica que age na mesma. Sabendo que  $\vec{F}_e = q\vec{E}'$ , e usando a eq.(7.11), a força elétrica vale

$$F_e \mathbf{j} = \frac{q\Delta\lambda'}{2\pi\epsilon_o r} \mathbf{j}$$

ou, em módulo,

$$F_e = \frac{q\Delta\lambda'}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (7.12)$$

A hipótese de que a densidade de carga gerou um campo elétrico, a princípio, se mostrou razoável, pois temos a presença de duas forças, que devem se anular para que a carga permaneça estável em relação aos eixos  $y$  e  $y'$ . Para que esse equilíbrio aconteça e a carga permaneça com a velocidade em  $y$  ( $v_y = 0$ ), a relação a seguir deve ser respeitada:

$$\sum F_y = 0 \quad (7.13)$$

Como temos duas forças de mesmo módulo e sentidos contrários, podemos escrever, segundo a relação dada pela eq.(7.12), que:

$$F_e - F_m = 0 \quad (7.14)$$

Substituindo as eq.(7.7) e eq.(7.12) na eq.(7.14), obtemos que:

$$\frac{q\Delta\lambda'}{2\pi\epsilon_0 r} - \frac{qv^2\lambda'_+}{2\pi\epsilon_0 c^2 r} = 0$$

ou

$$\Delta\lambda' - \frac{v^2\lambda'_+}{c^2} = 0 \quad (7.15)$$

Note que  $\Delta\lambda'$  é a densidade de cargas no fio eletricamente neutro e é representada por

$$\Delta\lambda' = \lambda'_+ + \lambda'_-$$

Portanto, a eq.(7.15) pode ser reescrita como

$$\lambda'_- + \lambda'_+ \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = 0$$

ou

$$\frac{1}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} \lambda'_- = -\lambda'_+ \quad (7.16)$$

A eq.(7.16) demonstra que há uma diferença entre as densidades de carga positiva e negativa no fio retilíneo na situação descrita pelo referencial  $O'$ . Essa diferença é ocasionada por um fator que chamaremos de  $\gamma^2$ , com  $\gamma$  dado por:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (7.17)$$

Note que se a velocidade da carga  $q$  for nula, o fator  $\gamma$  tende a 1 e as densidades positiva e negativa serão semelhantes, descrevendo a observação do referencial  $O$ .

Como supomos que ocorreu uma mudança de densidade de carga ao mudarmos de referencial, podemos relacionar as densidades de carga positiva e negativa, dos referenciais  $O$  e  $O'$ , através de uma constante de proporcionalidade  $\beta$ . As relações, por simetria, são

$$\lambda'_+ = \beta \lambda_+ \quad (7.18)$$

e

$$\lambda'_- = \frac{\lambda_-}{\beta} \quad (7.19)$$

O fio, por hipótese, é eletricamente neutro em  $O$ . Consequentemente, temos que  $-\lambda_+ = \lambda_-$ . Utilizando essa relação e as eqs.(7.18 e 7.19), obtemos:

$$-\lambda'_+ = \beta^2 \lambda'_- \quad (7.20)$$

Comparando a eq.(7.20) com a eq.(7.16) notamos que a constante de proporcionalidade  $\beta$  assume o mesmo valor de  $\gamma$ , de forma que

$$\beta = \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Note que as densidades de carga, com mesmos sinais, de  $O$  e  $O'$ , são relacionadas pelo mesmo fator que promove a igualdade entre as densidades positivas e negativas no referencial  $O'$  (eq.7.16).

O princípio da conservação da carga elétrica estabelece que a carga total do sistema deve ser conservada, ou seja, a carga total  $Q_{\pm}$  em uma linha de carga  $L_{\pm}$  do fio deve ser a mesma em ambos os referenciais:

$$Q_+ = \lambda_+ L_+ = \lambda'_+ L'_+ \quad (7.21)$$

$$Q_- = \lambda_- L_- = \lambda'_- L'_- \quad (7.22)$$

Com o auxílio das eqs.(7.18 e 7.19) podemos reescrever as eqs.(7.21 e 7.22) como:

$$L'_+ = \frac{L_+}{\beta} = \frac{L_+}{\gamma}$$

e

$$L'_- = \beta L_- = \gamma L_-$$

e, finalmente,

$$L'_+ = \frac{L_+}{\gamma} \quad (7.23)$$

e

$$L'_- = \gamma L_- \quad (7.24)$$

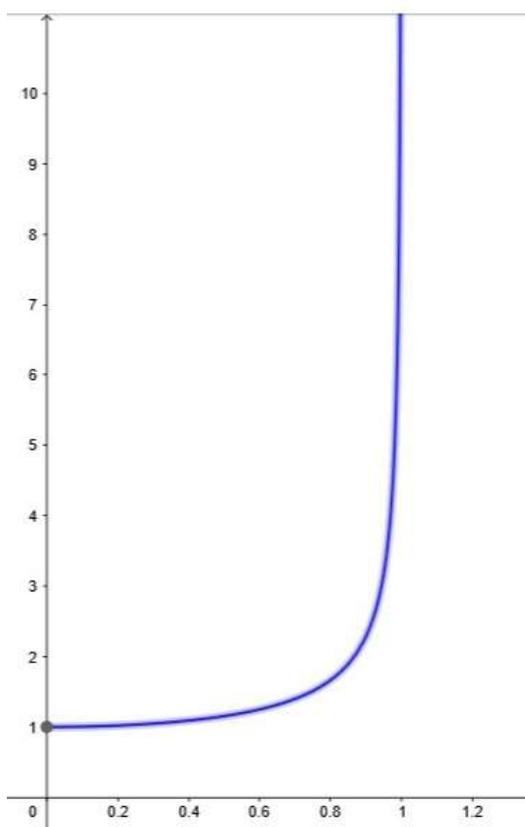
As relações finais (7.23) e (7.24) demonstram alterações no comprimento das linhas de carga positivas e negativas. O problema tratou de duas situações: a análise da inércia de uma carga em relação ao referencial  $O$  e, posteriormente, de  $O'$ . O referencial  $O'$  possuía uma velocidade  $v$  em relação à carga  $q$ , contudo o evento não poderia se alterar apenas pela mudança de um referencial inercial para outro.

Vale ressaltar que  $\gamma > 1$  pelo fato que, na eq (7.17), o fator não existe se  $v = c$ . Portanto,  $v$  apresentará valores, em módulo, entre 0 e  $c$ . Veja, na figura(7.3) a seguir, o gráfico do fator  $\gamma$  em função da razão  $\frac{v}{c}$ .

A eq (7.23) apresenta uma relação entre o comprimento da linha de carga positiva medida pelos dois referenciais. Como o fator terá sempre um valor maior que 1, podemos concluir que a linha de carga, medida pelo referencial  $O'$ , apresentou uma contração em relação ao seu comprimento observado em  $O$ . A eq (7.24), por outro lado, demonstra a dilatação do comprimento da linha de carga negativa observada em  $O'$  com relação a  $O$ .

Podemos concluir que o movimento das cargas, em relação a um referencial, altera seu comprimento. Quando a linha de carga positiva foi analisada pelo referencial em movimento, o comprimento apresentou uma contração em comparação à medida feita pelo referencial em repouso, ou seja, o espaço se contraiu na direção do movimento. Como observamos a contração do espaço na direção da velocidade, esperamos que algo mais apresente alteração, visto que a velocidade é definida pela taxa de variação da posição em relação ao tempo. Portanto, é possível que haja alguma modificação no tempo quando observado a partir dos dois referenciais.

Figura 7.3 – Gráfico do fator  $\gamma$ , em função da razão  $\frac{v}{c}$ , em que  $v$  varia entre 0 e valores próximos de  $c$ . O eixo horizontal representa a razão  $\frac{v}{c}$  e o vertical o fator  $\gamma$ .



Fonte: Autor (2020).

Os cálculos feitos nessa seção foram elaborados a partir de uma ideia inicial baseada em [13].

## 8 DILATAÇÃO TEMPORAL E TRANSFORMAÇÕES DE LORENTZ

Consideraremos novamente, dois referenciais,  $O$  e  $O'$ , que são, inicialmente, coincidentes em todos os eixos. Queremos obter transformações que relacionem os dois referenciais. Vamos utilizar uma das observações do experimento de Michelson-Morley em que a luz apresenta o mesmo valor de velocidade em qualquer direção ou referencial. No instante em que  $t = t' = 0$ , um feixe de luz é emitido nas três dimensões espaciais e, no mesmo momento, o referencial  $O'$  adquire velocidade  $v$ . Como a luz se propaga com a mesma velocidade em todas as direções, podemos descrever o pulso, visto por  $O$ , através da equação de uma casca esférica, ou seja,

$$x^2 + y^2 + z^2 = r^2 \quad (8.1)$$

Mas o raio é definido pela equação da velocidade média

$$r = S = Vt \quad (8.2)$$

Substituindo a eq (8.2) em (8.1) e sabendo que a velocidade  $v$  é a velocidade da luz  $c$ , podemos escrever

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2 \quad (8.3)$$

Como o pulso foi emitido quando  $t' = 0$ , sendo que  $r' = S' = ct'$ , o referencial  $O'$  também pode descrevê-lo pela equação da casca esférica, mas com suas próprias coordenadas:

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2 t'^2 \quad (8.4)$$

É importante notar que, através da observação feita no experimento de Michelson-Morley, a velocidade da luz é o único termo comum presente em (8.3) e (8.4).

Podemos reescrever as transformações de Galileu, contendo a correção obtida para a contração espacial, vista anteriormente em (7.24), obtendo:

$$x = \gamma(x' + Vt') \quad (8.5a)$$

$$y = y' \quad (8.5b)$$

$$z = z' \quad (8.5c)$$

No que diz respeito à coordenada temporal, faremos a suposição que, da mesma forma que o espaço, a relação entre os tempos terá o seguinte formato:

$$t = \gamma(t' + \alpha) \quad (8.6)$$

Note que existem semelhanças entre as equações (8.5) e (8.6). Se a suposição estiver correta, poderemos, partindo de (8.3), chegar em (8.4). Primeiramente, devemos encontrar o valor do termo  $\alpha$ , portanto usaremos as relações (8.5) em (8.3)

$$\gamma^2(x' + vt')^2 + y'^2 + z'^2 = c^2\gamma^2(t' + \alpha)^2$$

ou

$$\gamma^2x'^2 + 2\gamma^2vx't' + \gamma^2v^2t'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2\gamma^2t'^2 + 2c^2\gamma^2\alpha t' + c^2\gamma^2\alpha^2 \quad (8.7)$$

Observando as equações (8.3) e (8.4), podemos notar que não existe nenhum termo linear envolvendo a variável tempo ( $t$  ou  $t'$ ). Por consequência dessa observação, os termos lineares, envolvendo  $t$  e  $t'$ , da equação (8.7) devem se anular. Por conseguinte, temos que

$$2\gamma^2vx't' = 2c^2\gamma^2\alpha t'$$

ou

$$\alpha = \frac{vx'}{c^2} \quad (8.8)$$

Agora que encontramos o valor do parâmetro  $\alpha$ , nos certificaremos que o fator  $\gamma$  é o mesmo que aparece na eq.(7.17). Substituindo a eq.(8.8) na eq.(8.7), encontramos

$$\gamma^2x'^2 + \gamma^2v^2t'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2\gamma^2t'^2 + c^2\gamma^2\frac{v^2x'^2}{c^4}$$

ou

$$x'^2\gamma^2\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) + y'^2 + z'^2 = t'^2c^2\gamma^2\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \quad (8.9)$$

Para que a equação (8.9) seja verdadeira, devemos compará-la com a eq.(8.4). É perceptível que a diferença entre elas é o mesmo termo, em ambos lados da igualdade. Consequentemente, temos que

$$\gamma^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = 1$$

ou

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}} \quad (8.10)$$

Confirmamos que o fator  $\gamma$  utilizado aqui é o mesmo que fator que aparece na eq.(7.17). Dessa forma, obtemos transformações que tornaram as equações (8.3) e (8.4) equivalentes. As transformações podem ser escritas como:

$$x = \gamma(x' + vt') \quad (8.11a)$$

$$y = y' \quad (8.11b)$$

$$z = z' \quad (8.11c)$$

$$t = \gamma\left(t' + \frac{vx'}{c^2}\right) \quad (8.11d)$$

As transformações de variáveis, dadas pelo conjunto de eqs.(8.11) permitem transformar coordenadas medidas por  $O'$  em coordenadas medidas por  $O$ .

Com o intuito de fazer com que as equações de Maxwell e as equações que descrevem uma onda eletromagnética se mantivessem invariantes, Lorentz as deduziu[8].

Vale ressaltar que, para velocidades baixas ou observadas em nossa vivência diária as transformações de Lorentz se aproximam muito das transformações de Galileu, dadas pelas equações (5.11), logo podemos caracterizá-las como um caso particular das transformadas de Lorentz. Mas, por qual motivo se desejava manter a teoria e as equações de Maxwell em acordo com o Princípio da Invariância de Galileu?

Em 1887, Hertz (1857-1894) conseguiu produzir ondas eletromagnéticas, medir sua velocidade, analisar suas propriedades e confirmar a previsão de Maxwell de que uma carga elétrica, que oscila, produz ondas no éter, que transportam a energia para longe, mesmo se não houver outra carga elétrica próxima para receber essa energia. Os experimentos de Hertz possibilitaram a construção do telégrafo sem fio e a transmissão de voz por ondas de rádio.

Nos anos de 1890, a teoria eletromagnética de Maxwell era aceita pela maior parte da comunidade científica e a ação à distância, como visto na revolução eletromagnética, estava sendo abandonada. Consequentemente, o éter eletromagnético já era considerado como realidade[11].

A dificuldade em descartar a teoria que unificou o eletromagnetismo e a óptica, além de promover algumas invenções, era enorme. Portanto, torná-la invariante se apresentou como um caminho mais proveitoso, porém impactou diretamente na mecânica. A partir do momento em que se aceitou a invariância das equações de Maxwell, a mecânica foi diretamente afetada.

É necessário compreender a dificuldade de alterar a percepção da mecânica ser invariante. Isaac Newton, em seus livros, definiu o tempo e espaço absolutos e imutáveis em qualquer lugar do universo [12], portanto haveria resistência ao fato de modificar uma teoria consolidada e aceita por quase 200 anos. Podemos, de forma análoga, comparar estudantes que, durante seus anos de estudo na educação básica, conheceram somente a mecânica clássica ao ter contato com a mecânica relativística. Mudar uma concepção, principalmente quando já está consolidada, é uma tarefa árdua, principalmente porque os efeitos da deformação do tempo e espaço acontecem somente em altíssimas velocidades, portanto não era possível observar esses efeitos.

## 9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Podemos notar que, nos capítulos 7 e 8, obtemos as interpretações acerca da contração espacial e da dilatação temporal, respectivamente, sem a necessidade de descartar a existência do éter. Durante a leitura do trabalho, pode-se notar que os cientistas utilizaram de diversos artifícios para manter a teoria vigente e aceita pela comunidade científica. O fato é que Einstein, ao desenvolver a Relatividade Restrita, abandonou o éter e, conseqüentemente, excluiu a existência daquele suposto referencial inercial privilegiado. O trabalho apresentou a importância de uma teoria científica, mesmo que, nos dias atuais, seja considerada sem valor e/ou ultrapassada.

A maioria dos estudantes desconhecem a história a respeito do eletromagnetismo e as discussões a respeito das propagações de energia no universo. O fato de conhecer a construção de uma teoria científica contribui para desenvolver uma visão de ciência mais próxima da realidade. É perceptível que a existência de gênios, assim como os classificam, é questionável. Grande parte das teorias, construídas e consolidadas atualmente, possuem várias contribuições ao longo do tempo. Devo salientar que não podemos tirar os méritos de grandes cientistas, classificados como gênios, mas não seria justo descartar ou dar pouca importância para trabalhos e discussões, realizados anteriormente, que fundamentaram suas pesquisas e teorias.

Os divulgadores científicos têm um certo "prazer" em descrever a construção de teorias como "insights" iluminados. Um exemplo básico é a história da maçã que caiu na cabeça de Newton e, conseqüentemente, fez com que ele desenvolvesse a teoria da gravitação. Essas pessoas propagam, de forma equivocada, informações sobre a falta de importância a respeito de uma teoria abandonada. Ao ler esse trabalho, podemos notar que a teoria do éter, descartada, fundamentou grandes discussões sobre o eletromagnetismo e a mecânica. Maxwell, com contribuições anteriores e contemporâneas, por exemplo, conseguiu unificar a eletricidade, magnetismo e a óptica levando em consideração a existência do meio etéreo.

Durante a construção do material, mantivemos cuidadosos para não representar uma ideia errônea de ciência imutável, pronta e acabada. A ciência está em constante mudança e é nosso dever, enquanto professores, motivar pessoas a fazê-la. Fazer ciência significa: questionar, testar hipóteses, não aceitar algo simplesmente porque convém ou foi imposto, etc.

A leitura de diversos artigos, além dos que estão presentes na bibliografia, estimulou grandes discussões durante as reuniões de orientação. Devido à ótima orientação que tive, possuí a oportunidade de estudar o eletromagnetismo, juntamente com aspectos da relatividade especial, e sua história e ainda produzir um TCC que tem a potencialidade de fundamentar

discussões em aulas na graduação e educação básica. Consequentemente, a produção desse trabalho contribuiu, fortemente, para a minha formação.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] BASSALO, J. M. F. **A Teoria dos Vórtices de Descartes**. Disponível em: <<http://www.searadaciencia.ufc.br/folclore/folclore247.htm>>. Acesso em: 15/11/2018
- [2] BEZERRA, V. A. Maxwell, a Teoria do Campo e a Desmecanização da Física. *Scientiae Studia*, São Paulo, vol.4, n.2, p.177-220, 2006.
- [3] CAMPOS, A. A natureza da região celeste em Aristóteles. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. v.36 n.4, 2014.
- [4] DIAS, V. **Michael Faraday**. Disponível em: <<http://www.ghtc.usp.br/Biografias/Faraday/Faraday3.htm>>. Acesso em 20/10/2018.
- [5] JUNIOR, O. Modelo causal dos primórdios da ciência do magnetismo. *SciELO*. Disponível em: <<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci-arttext&pid=S1678-31662010000200003>>. Acesso em: 13/11/2018.
- [6] LIMA, M.C. Sobre o surgimento das equações de Maxwell. *Rev. Bras. Ens. Fis.* v.41, n.4, 2019.
- [7] LIMA, T. C. F. ; MIOTO, R. C. T. Procedimentos metodológicos na construção do conhecimento científico: a pesquisa bibliográfica. *Rev. Katál. Florianópolis* v. 10 n. esp. p. 37-45 2007.
- [8] MACHADO, K. D. **Eletromagnetismo: volume 3**. Editora: Todapalavra, 2013.
- [9] MARTINS, R. A. Como Distorcer a Física: Considerações sobre um exemplo de divulgação científica 2 - física moderna. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v.15, n.3, p.265-300, dez. 1998.
- [10] MARTINS, R. A. Dinâmica Relativística Antes de Einstein. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. v.27, n.1, p. 11-26, 2005.
- [11] MARTINS, R. A. O Éter e a óptica dos corpos em movimento: a teoria de Fresnel e as tentativas de detecção do movimento da Terra, antes dos experimentos de Michelson e Morley (1818 – 1880). *Cad. Bras. Ens. Fís.*, v. 29, n. 1: p. 52-80, 2012.
- [12] NEWTON, S. I. **Principia: Princípios Matemáticos de Filosofia Natural - Livro 1**. 2ª edição, 3ª reimpressão. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

- [13] ORTIZ, O. Contração de Lorentz, Lei de Gauss e Lei de Ampère. Rev. Bras. Ens. Fis., v.25, n.3, p.278-281, 2003.
- [14] SANTOS, M. **Interpretações e controvérsias nas teorias do éter e do vácuo.** 2015. 85f. Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2015.
- [15] SILVA, C. **James Clerk Maxwell.** Disponível em: <<http://www.ghc.usp.br/Biografias/Maxwell/Maxwellelm2.html>>. Acesso em: 26/10/2018.
- [16] VILLANI, A. A Visão Eletromagnética e a Relatividade. I. A Gênese das Teorias de Lorentz e Einstein. Biblioteca do Instituto de Física, São Paulo: IFUSP/P-528, abril, 1985.