



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO MARAJÓ – BREVES
FACULDADE DE CIÊNCIAS NATURAIS

MARCOS PAULO SOARES DA SILVA

O CONCEITO DE ESPAÇO-TEMPO NA RELATIVIDADE RESTRITA

BREVES-PA
2019

MARCOS PAULO SOARES DA SILVA

O CONCEITO DE ESPAÇO-TEMPO NA RELATIVIDADE RESTRITA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Ciências Naturais da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do grau de Licenciada em Ciências Naturais.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Oliveira do Nascimento.

BREVES-PA
2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

S586c Silva, Marcos Paulo Soares
O conceito de espaço-tempo na relatividade restrita / Marcos Paulo
Soares Silva. — 2019.
30 f. : il.

Orientador(a): Prof. Dr. Leandro Oliveira Nascimento
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Faculdade de
Ciências Naturais, Campus Universitário de Breves, Universidade Federal
do Pará, Breves, 2019.

1. Relatividade. 2. Espaço-Tempo. 3. Eletromagnetismo. I. Título.

CDD 530.11

MARCOS PAULO SOARES DA SILVA

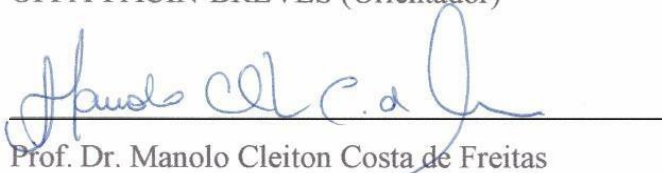
O CONCEITO DE ESPAÇO-TEMPO NA RELATIVIDADE RESTRITA

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Faculdade de Ciências Naturais da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para a obtenção do grau de Licenciada em Ciências Naturais, aprovado com o Conceito BOM.

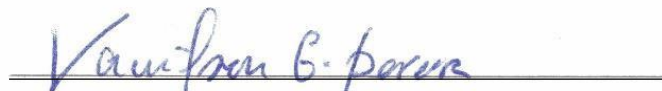
Banca examinadora:



Prof. Dr. Leandro Oliveira do Nascimento
UFPA-FACIN-BREVES (Orientador)



Prof. Dr. Manolo Cleiton Costa de Freitas
UFPA-FACIN-BREVES (MEMBRO)



Prof. Bsc. Vanilson Gomes Pereira
UFPA-FACIN-BREVES (MEMBRO)

Breves-PA, 04 de dezembro de 2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me abençoou muito em me colocar em um curso no qual me identifiquei, ciências naturais me abriu um “mar” de oportunidades nas quais me aventurei aprendendo e ensinando, acredito que isso é apenas o começo. Agradeço a minha família que apesar das dificuldades, sejam elas pessoais ou financeiras, me apoiaram e me ajudaram a permanecer no curso, sendo assim minha certificação de graduado será de todos e não um mérito individual.

Agradeço a minha turma de Ciências Naturais 2016, principalmente aos amigos que fiz durante os quase 4 anos de formação, pois a luta foi conjunta e árdua para todos, porém fatores motivacionais foi o que nos manteve até o final. Agradeço ao meu orientador que me auxiliou e orientou no meu TCC, pois relatividade foi uma fascinação do ensino médio, no qual sempre quis me aprofundar e desenvolver.

Como dizia o grande físico Isaac Newton “*Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes*”, a frase representa a todos, que de forma direta ou indireta, me ajudaram ao grande passo de minha formação acadêmica.

RESUMO

Este trabalho é uma revisão bibliográfica sobre a Relatividade Restrita, no qual será abordado o desenvolvimento histórico e conceitual desta teoria, visando a compreensão dos aspectos conceituais relacionados a interpretação física sobre o espaço-tempo. Discutiremos o contexto antes da física relativística, dando ênfase aos aspectos de discordância entre a mecânica Newtoniana e o eletromagnetismo de Maxwell. Dentre esses aspectos, podemos destacar a discussão da existência do éter (meio no qual a luz se propagaria) e a não aplicabilidade das transformações de Galileu nas equações de Maxwell. Tais problemáticas foram resolvidas por Einstein, com base na sua teoria relativista de 1905. Mostraremos como os estudos relativísticos moldaram de forma significativa os conceitos de espaço, tempo, massa e energia, ao contrário da física newtoniana que tratava tais entidades como absolutas. Depois disso, abordaremos o funcionamento do GPS, levando em conta possíveis correções relativísticas. Dessa forma, esperamos ilustrar como uma teoria de ciência básica pode ser aplicada em um recurso tecnológico que está disponível para a maioria da sociedade.

Palavras-chave: Relatividade. Ondas Eletromagnéticas. Espaço-Tempo. Massa e energia.

ABSTRACT

This work is a bibliographical review about the Restricted Relativity, in which the historical and conceptual, development of this theory will be approached, aiming at the comprehension of the conceptual aspects related to the physical interpretation about the space- time. We will discuss the context before relativistic physics, emphasizing aspects of disagreement between Newtonian mechanics and Maxwell's electromagnetism. Among these aspects, we can highlight the discourse of the existence of ether (the medium in which light would propagate) and the non-applicability of Galileo's transformations in Maxwell's equations. These problems were solved by Einstein, based on his relativistic theory in 1905. We will show how relativistic studies significantly shaped the concepts of space, time, mass and energy, as opposed to Newtonian physics that treated such entities as absolutes. After that, we will approach the GPS operation, taking into account possible relativistic corrections. In this way, we hope to illustrate how a theory of basic science may be applied to a technological resource that is available for most of our society.

Keywords: Relativity. Electromagnetic waves. Space time. Mass and energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Conjunto de referências S e S' - Índice - Representação tridimensional dos sistemas de coordenadas inerciais S (x, y e Z) e S' (x', y' e z').....	13
Figura 2 -	Relação dos sistemas de coordenadas S e S' - Índice 1 - Relação dos eixos (x, y e z) e (x', y' e z'), para dedução da transformação de Galileu.....	13
Figura 3 -	Interferômetro de Michelson-Morley Índice 2 - Ilustração funcional do Interferômetro A: Fonte de luz; B: Espelho vertical; C: Espelho horizontal; D: Espelho semi-prateado; E: Detector de interferência.....	17
Figura 4 -	Relógios de Luz - Índice 3 - Relação de relógios de luz em diferentes velocidades inerciais. No qual foi necessário para calcular a variação de tempo, dando origem as transformações de Lorentz.....	21

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	09
2	OBJETIVOS	10
2.1	OBJETIVO GERAL.....	10
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
3	PRINCÍPIOS DA TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA (TRE)	11
3.1	A FÍSICA CLÁSSICA DE GALILEU E NEWTON.....	12
3.2	AS EQUAÇÕES DE MAXWELL E O EXPERIMENTO DE MICHELSON-MORLEY.....	14
4	CINEMÁTICA RELATIVÍSTICA	18
4.1	SOBRE A ELETRODINÂMICA DOS CORPOS EM MOVIMENTO.....	19
4.2	DILATAÇÃO DO TEMPO.....	20
4.2.1	O paradoxo dos gêmeos.....	22
4.3	CONTRAÇÃO DO ESPAÇO.....	23
5	DINÂMICA RELATIVÍSTICA	25
5.1	MASSA RELATIVÍSTICA.....	26
5.2	ENERGIA RELATIVÍSTICA.....	26
5.3	MECÂNICA RELATIVÍSTICA DOS GPS.....	27
6	CONCLUSÃO	29
	REFERÊNCIAS	30

1 INTRODUÇÃO

No início do Séc. XX foi apresentado ao mundo uma nova concepção de tempo e espaço, através da teoria da relatividade especial que foi desenvolvida pelo físico Alemão Albert Einstein. Essa nova concepção é diferente da definição de tempo e espaço na física clássica newtoniana, na qual estas entidades eram tomadas como um objeto imutável, fixo e independente de referencial.

Em seu célebre artigo intitulado “sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento”, Albert Einstein explicou o porquê as leis do eletromagnetismo de Maxwell são incompatíveis com a relatividade de Galileu, elemento fundamental da física clássica. Tal incompatibilidade surgia da necessidade de se definir um referencial absoluto, chamado de éter, no qual a luz se propagaria com velocidade “ c ”, o que viola o princípio da relatividade que estabelece que não existe referencial preferencial para descrever as leis da natureza. Segundo Einstein, o éter não existe e a luz se move com velocidade “ c ” no vácuo para qualquer referencial inercial, sendo está a velocidade máxima para qualquer objeto da natureza. Além disso, as leis da física são as mesmas para qualquer referencial inercial. Os efeitos disso são que a segunda lei de Newton deve ser modificada para descrever o movimento de partículas que se movem com velocidades comparáveis a da luz.

O Seguinte trabalho de conclusão de curso (TCC), está dividido em três capítulos, abordando o surgimento da relatividade restrita de Einstein, suas consequências tanto para a mecânica Newtoniana, quanto para o eletromagnetismo, dando ênfase em uma nova dinâmica que até então era desconhecida.

O primeiro capítulo, “princípios da teoria da relatividade restrita”, apresenta-se como medidor histórico da física clássica, desde os primeiros conceitos de movimento, apresentados pelos filósofos naturais, no qual, entender a natureza e suas interações como tempo, espaço e matéria, seriam essenciais para entendimento da origem do universo e do mundo como conhecemos, além de aplicações desses conhecimentos para a modernização da sociedade. Chegando então na física clássica de Newton, considerada suficiente para explicar todos os fenômenos naturais. O presente capítulo também procura explicar a impossibilidade de encaixar o eletromagnetismo na física newtoniana, o que foi corroborado pelos resultados experimentais do interferômetro de Michelson-Morley. Tal experimento visava encontrar um meio material, no qual a onda eletromagnética se propagaria com velocidade “ c ”.

O segundo capítulo, “Cinemática relativística”, explica como os postulados de Einstein (a constância da velocidade da luz no vácuo e a validade das leis físicas para qualquer referencial inercial) resolveram os problemas que permeavam a física clássica e o eletromagnetismo. O custo para a unificação das leis da natureza foi uma revolução total da maneira como entendemos espaço e tempo, antes absolutos pela física clássica, de modo que dilatação do tempo e contração do espaço, foram requisitos que passaram a ser considerados na física moderna para o entendimento da dinâmica da natureza de maneira ampla e exato.

O terceiro capítulo, intitulado “dinâmica relativística”, demonstra como a relatividade redefiniu os conceitos de momentum, massa e energia em comparação a mecânica Newtoniana. A partir dos conceitos relativísticos sobre momentum, massa e energia, concluímos que essas quantidades são manifestações de uma de uma mesma entidade.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL:

Realizar uma revisão bibliográfica sobre a teoria da relatividade restrita, abordando o conceito de espaço-tempo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Comparar o conceito de espaço-tempo na física Newtoniana e na teoria da relatividade de Einstein;
- Discutir as incompatibilidades entre a mecânica Newtoniana e o eletromagnetismo de Maxwell;
- Definir tempo, energia e massa no contexto da relatividade restrita;
- Utilizar o conceito de tempo relativístico para aplicação no GPS;

3 PRINCÍPIOS DA TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA (TRE)

A necessidade de investigar as leis do universo no que diz respeito a matéria, a energia, o que são seus constituintes e como ocorre suas interações, passou a ser um ramo da ciência denominada física, do grego *physiké* significa “conhecimento”, tais descobertas resultaram em uma gama de compreensão sobre nossas origens, assim como diversas as aplicações na sociedade como citador por Macedo *apud* Oliveira, (2013, p. 24).

Foi a partir dos séculos XVI e XVII, sobre a imensa base de conhecimentos práticos e empíricos que a humanidade havia até então acumulado, que surgiram os primórdios da ciência física: primeiro na astronomia, com Copérnico, Tycho Brahe e Kepler, depois, na Mecânica, com Galileu.

As primeiras concepções, sobre a natureza dos mais diversos fenômenos que permeavam o homem, tais como os movimentos de estrelas, sejam elas próximas ou distantes, as fases lua, a órbita de alguns planetas observáveis e a divisão de noite e dia, surgiram de observações filosóficas da época medieval que se baseavam influenciados, direta ou indiretamente, pelas políticas e crenças da época. Aristóteles (384-322 a.C), conceituava a terra fixa em um universo irrelevante. Porém, como ciência se faz via observação, identificação, pesquisa e explicação de determinadas categorias de fenômenos, foi fortemente debatida pelo físico italiano Galileu Galilei (1564-1642), no qual o mesmo dizia que terra e os planetas próximos quem orbitavam o sol em universo infinito no modelo heliocêntrico, inicialmente teorizada por Nicolau Copérnico.

A ciência se faz presente nas fundamentações conceituais e representações matemáticas da física, no que se refere aos constituintes da matéria e as forças naturais, tais descobertas foram se ajustando e aperfeiçoando-se ao longo dos séculos por grandes físicos. Tais ideologias descobertas teve Isaac Newton (1643-1727), como a mente que unificou as ideias das forças naturais, uma vez que suas leis de forças e movimentos se adequavam ao que se observa no cotidiano.

Baseando-se principalmente nas transformações de Galileu, Newton considerava tempo e espaço entidades absolutas em qualquer referencial, de acordo com Aguiar (2019 p. 02), “Newton define conceitos como massa, quantidade de movimento, inércia, força e aceleração, discutindo também os conceitos de espaço e tempo, considerados em última análise absolutos”. Simões (2014 p. 07), “O sistema newtoniano por muito tempo foi considerado

definitivo: um sistema de definições e axiomas que dá lugar a um conjunto de equações matemáticas que descrevem a estrutura eterna da natureza, independente de um dado espaço ou tempo”.

3.1 A FÍSICA CLÁSSICA DE GALILEU E NEWTON

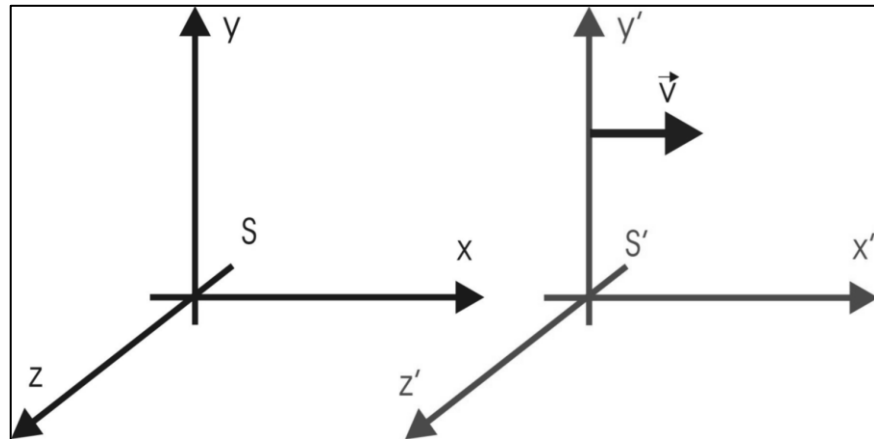
Ao longo de observações e experimentações a respeito das forças naturais que regem o universo e nosso cotidiano, como gravidade, tempo, espaço, massa e energia, Galileu Galilei fortaleceu a ideia de que o espaço é facilmente tomado como sendo Euclidiano, ou seja, satisfazendo os postulados de Euclides, em que a linha reta é a menor distância entre dois pontos e o tempo é como um rio imaginário, cujo fluxo, o "passar" do tempo, é sempre igual, independentemente de onde nos encontramos no espaço e também de nosso estado de movimento. Sendo assim a mecânica dos corpos, apenas necessitava de um conjunto de referências para que sua natureza pudesse ser representada matematicamente de forma satisfatória, logo Galileu propôs um conjunto de transformações, nas quais seria possível fazer previsões dos mais diversos movimentos independentemente de seu referencial. Sendo assim:

Podemos citar o filósofo John Locke que escreveu há duzentos anos, em seu grande tratado “Sobre o entendimento humano”, da importância do referencial: “Se encontrarmos as pedras do xadrez na mesma posição em que as deixamos, diremos que elas não foram movidas, ou permanecem imóveis, mesmo que o tabuleiro, nesse ínterim, tenha sido transportado para outro cômodo. (Wolff e Mors; 2005; p.13)

Para calcular a dinâmica de um objeto, seja ele movimento ou em repouso, Galileu utilizou-se de um conjunto de referências, posteriormente adotadas nas leis de Newton, que tem como base três coordenadas espaciais, x , y e z , representando comprimento, altura e largura respectivamente, incorporado a um tempo “ t ” absoluto. Utilizando-se de um ou mais conjuntos de referências, podemos facilmente prever a trajetória de inúmeros movimentos observáveis cotidianamente em um determinado espaço de tempo (t), como mostra as transformações de Galileu a seguir.

A física clássica demonstra que para se calcular a relação do movimento de um ponto (P), que acontece de forma simultânea em dois referenciais inerciais, um parado e outro em movimento uniforme, obtivemos dois conjuntos de referências S e S' com suas respectivas coordenadas espaciais (x, y, z, t) e (x', y', z', t') , como mostra na figura 01.

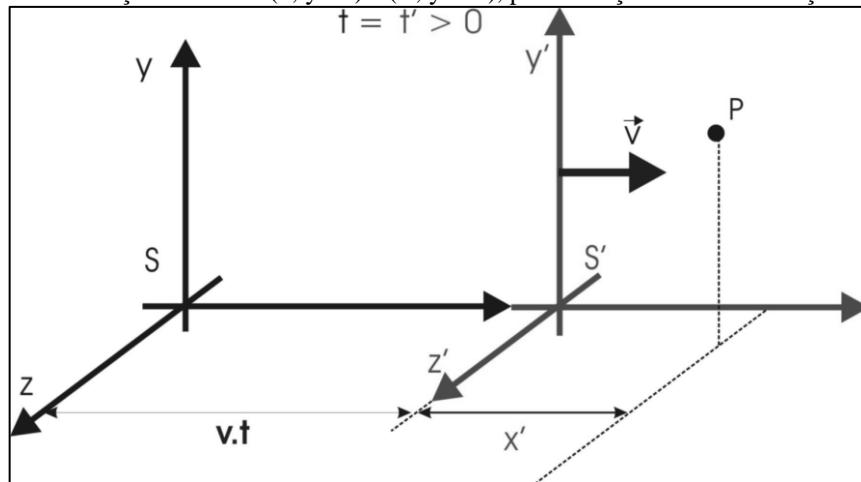
Figura 1 - Conjunto de referências S e S'
 Índice - Representação tridimensional dos sistemas de coordenadas inerciais S (x, y e Z) e S' (x', y' e z').



Fonte: WOLFF; MORS, 2005.

Observamos que as coordenadas y e z são paralelas às coordenadas y' e z', logo consideramos apenas a variação do comprimento em relação aos referenciais S e S', ou seja, a variação da velocidade pelo tempo ($V.t$), consideremos um instante posterior $t = t' > 0$, como mostra na figura 02.

Figura 2 - Relação dos sistemas de coordenadas S e S'
 Índice 1 - Relação dos eixos (x, y e z) e (x', y' e z'), para dedução da transformação de Galileu.



Fonte: WOLFF; MORS, 2005.

Logo podemos relacionar as coordenadas dos dois referenciais da seguinte forma:

$$x = x' + V \cdot t / x = x' - V \cdot t; \quad (2.1)$$

$$y = y'; \quad (2.2)$$

$$z = z'; \quad (2.3)$$

$$t = t'. \quad (2.4)$$

Essa são as transformações de Galileu que valida a equivalência de dois referenciais, sendo assim para o físico não existe um movimento absoluto e o tempo é invariante.

Uma consequência direta da invariância do tempo, segundo as transformações galileanas, é a invariância do comprimento. Explicitando melhor, pelas transformações de Galileu concluímos que o comprimento, assim como o tempo, é absoluto, independentemente do referencial em que for medido. (WOLFF; MORS; 2005; p.16)

Utilizando as transformações idealizadas na dinâmica Galileiana e de outros físicos, como a lei de Hooke, lei da física que determina a deformação sofrida por um corpo elástico através de uma força, em 1687 Newton publica sua obra de maior destaque "Princípios Matemáticos da Filosofia Natural" (*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*), trazendo as mais diversas representações matemáticas das forças da natureza incluindo a gravitação universal, que estabelece, força atrativa de dois corpos, proporcional ao produto de suas massas e inversamente proporcional a sua distância. Sendo assim, a física clássica estava completa, pois suas leis correspondiam perfeitamente as dinâmicas observadas de um espaço absoluto e imutável. Nesse sentido, para Riffel (2010, p. 06):

De acordo com Newton, o espaço absoluto sempre permanecia similar e imóvel por sua própria natureza e sem relação com qualquer corpo externo. Para Newton, o espaço era uma enorme caixa, contendo materiais e objetos, onde os fenômenos físicos aconteciam. Este espaço era tridimensional, contínuo, imóvel (não variava com tempo), infinito, uniforme e possuía as mesmas propriedades em todas as direções. Newton também defendia a ideia de um tempo absoluto, o qual era unidimensional, contínuo, infinito e possuía as mesmas propriedades em todos os locais do universo. Este tempo fluía igualmente para qualquer evento físico sem nenhuma interferência externa.

3.2 AS EQUAÇÕES DE MAXWELL E O EXPERIMENTO DE MICHELSON- MORLEY

A física clássica apresentada por Newton, demonstrava eficácia nas descobertas que se seguiram. Sendo assim, a natureza se adequava perfeitamente aos a física newtoniana. Como cita Biehl (2003, p. 91).

A mecânica do século XIX conseguia explicar movimentos complexos, como os dos piões e giroscópios; estudou os movimentos de líquidos e gases; e desenvolveu técnicas matemáticas muito sofisticadas com a chamada "mecânica analítica", que utiliza um formalismo diferente do que existia na época de Newton.

Em 1864 o físico e matemático Clerk Maxwell (1831-1879), unificou os estudos observáveis até então de campos elétricos (E^{\rightarrow}), interações de repulsão ou atração entre cargas elétricas positivas ou negativas e campos magnéticos (B^{\rightarrow}), campo gerado pelos polos dos ímãs ou cargas em movimento, assim como os campos elétricos podem ser atrativos ou repulsivos.

De acordo com Ricci (2000, p.06) “Maxwell foi capaz de obter uma equação de onda para as componentes dos campos elétrico e magnético, partindo de suas quatro equações e supondo não existirem correntes e cargas”. Utilizando a constante de permissividade elétrica do vácuo (ϵ_0), (em unidades do S.I. igual à $8,85 \times 10^{-12}$ farad/metro) e a constante de permeabilidade magnética do vácuo (μ_0), (em unidades do S.I. igual a $1,26 \times 10^{-6}$ Henry/m), Maxwell encontrou uma velocidade, a dessas ondas eletromagnéticas, velocidade essa que era associada a velocidade da luz, unificando assim a óptica e o eletromagnetismo.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2,997925 \times 10^8 m/s \quad (2.5)$$

O amplo conhecimento que Maxwell deixou sobre a natureza eletromagnética, foi determinante para o grande avanço na ciência, visto que, entender tais comportamentos levou a comunidade científica desenvolver inúmeras aplicações com as diferentes ondas conhecidas, exemplo disso as micro-ondas, as ondas de rádio, radiação infravermelha, radiação ultravioleta, raios x e raios gama, amplamente utilizadas nos dias atuais.

Ao desenvolver suas equações eletromagnéticas, o físico escocês encontrou incompatibilidade com a física Newtoniana no que se refere um referencial absoluto, uma vez que as ondas luminosas se apresentavam com velocidade “c” no vácuo, ou seja, eram desprovidas de um referencial para se calcular sua velocidade.

Acreditava-se que tal inconsistência se dava pela necessidade de definir um meio de propagação eletromagnética, uma vez que, as interações luminosas da luz visível se apresentavam como ondas, demonstrado experimentalmente por Thomas Young (1773-1829) em 1801, através interferência de franjas luminosas, que assim como as ondas na água, ao passar por duas fendas era criado um padrão de onda, no qual era perceptível bandas de maior e menor intensidade. Sendo assim, foi definido pela comunidade acadêmica um meio ainda desconhecido pelo qual as ondas eletromagnéticas se propagariam definida como Éter Luminífero. Neste sentido:

Sem a construção de modelos materiais, como era costume de Maxwell produzir em outras situações e experimentações, seu pensamento orientou-se da seguinte maneira: o campo de Faraday seria como líquido; um fluido que tomava todo espaço e, como em um rio, as correntes (linhas de força) deveriam determinar a direção e o movimento dos corpos. Esse líquido imaginário seria o éter: substância absolutamente imóvel, sem peso, invisível, de viscosidade zero, com uma resistência maior que a do aço e que não é detectado por instrumento algum. Essa substância que preenchia os interstícios entre a matéria seria o ambiente transmissor das ondas eletromagnéticas. (SIMÕES, 2014, p. 07).

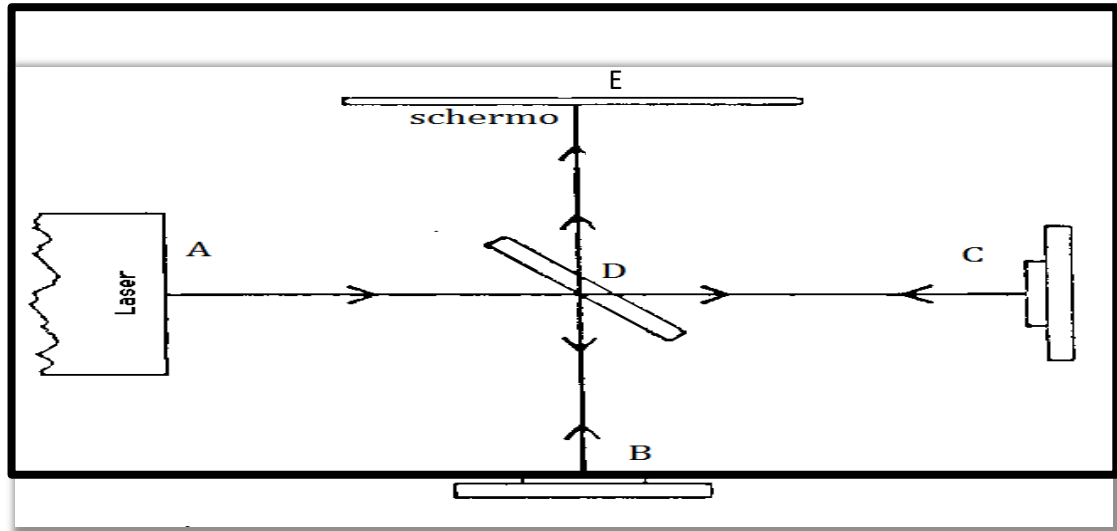
Embora a definição de éter, pudesse explicar a propagação eletromagnética no vácuo, outra questão ainda precisava ser discutida, em qual referencial inercial, da onda luminosa, o valor c era medido? Várias interpretações e teorias surgiram para explicar esse possível referencial, porém a mais lógica era que a velocidade c , a velocidade da luz, somente pudesse ser obtida em seu meio de propagação, isto é, no éter. E seguindo os princípios da mecânica clássica elucidada Ricci (2000, p. 07):

Um outro observador que se movesse com uma certa velocidade u constante com respeito ao éter mediria uma velocidade diferente para a luz. Por exemplo, se este segundo observador inercial estivesse se movendo em direção à fonte de luz ele deveria então medir uma velocidade $c+u$ para a luz.

Identificar o ainda desconhecido éter seria a resposta na qual resolveria o problema de referência, então os físicos Albert Michelson (1852 - 1931) e Edward Morley (1838-1923) construíram o mais preciso interferômetro da época, capaz de detectar a menor variação luminosa possível. Seria o experimento óptico capaz de detectar as diferenças de propagação de um mesmo feixe em diferentes direções, sendo assim uma mínima diferença de velocidade seria notado pelo aparelho, no qual mostraria um padrão característico por conta de sua variação, não muito diferente da apresenta por Young.

O experimento proposto por Michelson-Morley, tinha como objetivo identificar uma pequena diferença entre faixas de luz que se propagassem em direções paralelas ou perpendicular ao movimento do éter em relação a terra. Visto que, assim como luz, supostamente se movimenta através do éter, a terra com seus movimentos de translação e rotação criaria certas interferências na luz de acordo com sua direção, uma vez que já se sabia sua velocidade no vácuo, como mostra na figura 03.

Figura 3 - Interferômetro de Michelson-Morley
 Índice 2 - Ilustração funcional do Interferômetro A: Fonte de luz; B: Espelho vertical; C: Espelho horizontal;
 D: Espelho semi-prateado; E: Detector de interferência.



Fonte: <http://matepratica.it/2011/01/interferometro-di-michelson-esercizio-1.html>

O experimento seguia da seguinte maneira, um feixe de luz era lançado em direção ao espelho semi-prateado (D), que dividia o feixe em dois, um feixe até o espelho na horizontal (C) e outro feixe para o espelho na vertical (B), ambos os feixes serão recombinados novamente em direção ao detector de interferência (E). Quando dois feixes são alinhados com o mesmo comprimento de onda, ambos os picos se combinam formando um pico de maior intensidade de luz, porém quando um está descompassado com outro, por menor que seja, não há intensidade de luz o que causa um padrão de interferência.

A partir de 1887, as tentativas de observar as variações de velocidade da luz contra e a favor do “vento do éter”, realizadas pelos físicos em diferentes lugares, horários ou até mesmo épocas do ano, não demonstrou qualquer interferência por ambos os feixes de luz, visto que a luz permanecia com a mesma velocidade em qualquer direção. Logo a impossibilidade de um éter veio à tona, com isso, questões em relação as ondas eletromagnéticas ainda permaneciam inexplicáveis, visto que não se adequavam à mecânica de movimento até então válidas na época. Com isso, a comunidade científica necessitava de resposta para os questionamentos que surgiram: as equações de Maxwell estão erradas, ou a mecânica clássica Newtoniana estava errada? Ou a mecânica eletromagnética se comporta de forma diferente da mecânica clássica? Esses foram questionamentos que permearam a comunidade científica por quase duas décadas.

4 CINEMÁTICA RELATIVÍSTICA

Como explicar o comportamento das ondas eletromagnéticas sabendo que, independente do movimento do observador sua velocidade é sempre a mesma? Tal hipótese foi confirmada tanto teoricamente por Maxwell, quanto experimentalmente por Michelson-Morley. Outro exemplo bastante simples do eletromagnetismo, que infligia os princípios de movimento de Galileu, era ao analisar uma carga $Q+$ em um ponto P do espaço, em uma distância R de um fio de comprimento infinito que estava uniformemente carregado positivamente em toda sua extensão. De acordo com o eletromagnetismo de Maxwell, para um observador inercial fixo próximo ao fio, o campo elétrico criado pelo ponto P será igual a,

$$E(P) = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 R} \quad (3.1)$$

logo, a força resultante que o observador inercial fixo mediria para a carga $Q+$ seria.

$$F_R = F_E = QE(P) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda Q}{R} \quad (3.2)$$

Seguindo as transformações de Galileu, posteriormente as leis de Newton, essas interações eletromagnéticas, seria absoluta para qualquer coordenada de referências inerciais. Porém, um segundo observador em movimento constante, paralelo ao fio ao observar a carga a mesma carga $Q+$ em movimento, observaria além de uma força elétrica, prevista pelo primeiro observador, também uma força magnética atrativa, pois para ele o fio carregado positivamente, agora constitui de uma corrente elétrica contínua e a intensidade do campo magnético gerado por essa mudança de referencial,

$$F_M = \frac{\mu_0 Q v}{2\pi R}, \quad (3.3)$$

contudo, a força resultante para o segundo observador é

$$F_R = F_E - F_B = \frac{\lambda Q}{2\pi\epsilon_0 R} \left(1 - \frac{v}{c}\right). \quad (3.4)$$

Como descrever diferentes interações de um mesmo evento apenas alterando seu referencial? Tais fenômenos contraria princípios da mecânica clássica, uma vez que um

referencial deixa de ser absoluto e passa depender do observador. A necessidade de incorporar o eletromagnetismo na física clássica de Newton, foi o erro no qual cientistas como Planck e Lorentz cometeram, pois, suas tentativas de explicar tais interações eram incompletas, como as transformações de Lorentz, que era baseada possível contração da matéria na direção paralela ao vento do éter, fato esse refutado posteriormente como veremos a seguir.

4.1 SOBRE A ELETRODINÂMICA DOS CORPOS EM MOVIMENTO

Em 1905, o grande físico Albert Einstein (1879-1955), em seu artigo intitulado “Sobre eletrodinâmica dos corpos em movimento” procurou não apenas explicar a parte experimental de Michelson-Morley, como também tratar as ondas eletromagnéticas de forma definida, ou seja, sem qualquer invariância diante de um referencial inercial. Com isso o genial físico alemão demonstrou que tempo e espaço são relativos e não absolutos e imutáveis, como acreditava Galileu Galilei e Isaac Newton, ambos estão profundamente entrelaçados. Assim como a largura, comprimento e profundidade, o tempo-espaço surgiu como uma quarta dimensão que demonstraria também a curvatura do tecido do espaço-tempo e sua relação com a gravidade.

A simplicidade na qual Einstein explicou sua teoria está em seus dois postulados, o primeiro postulado diz que “*As leis da Física são as mesmas em todos os sistemas referenciais inerciais*”. Ou seja, não existe nenhum sistema de referência inercial preferencial nem mesmo uma lei específica para uma mesma situação com diferentes referências. Diferente da relatividade de Galileu, que se utilizava de um referencial absoluto para se calcular diferentes sistemas de coordenadas, sendo assim, tempo e espaço se davam como entidades imutáveis.

O nome teoria da relatividade está ligado ao fato de que o movimento, do ponto de vista da experiência possível, aparece sempre como o movimento relativo de um objeto em relação a outro. O movimento jamais é observado como movimento em relação ao espaço, ou, como já se expressou, como movimento absoluto. O princípio da relatividade, em seu sentido mais amplo, está contido na afirmação: a totalidade dos fenômenos físicos é de caráter tal que não fornece base para a introdução do conceito de movimento absoluto; ou, de forma mais breve, mas menos precisa: não há movimento absoluto. (PEDUZZE, 2009, p. 150)

O segundo postulado ou princípio da constância da velocidade da luz explica que, “*a velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor c para todos os sistemas referenciais inerciais*”, segundo Einstein, e já comprovado experimentalmente, a velocidade da luz se apresenta como uma constante da natureza, que além determina um valor limite ser alcançado por qualquer

corpo, independentemente do movimento da fonte e/ou do observador, a velocidade da luz no vácuo tem um valor constante. Neste sentido Peduzze (2009, p, 152) diz:

A teoria da relatividade especial ilustra a essência dessas idéias de Einstein. Publicada em 1905 na revista alemã *Annalen der Physik*, em um artigo intitulado “Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento”, tem como pressupostos básicos os Postulados da relatividade e da constância da velocidade da luz.

4.2 DILATAÇÃO DO TEMPO

O Princípio da Relatividade de Einstein exige que as leis da física sejam as mesmas em todos os referenciais inerciais, não existindo, portanto, nenhum referencial inercial privilegiado. Consequência da homogeneidade e isotropia do espaço, leva à invariância das leis da física por translações e rotações, respectivamente. Sendo assim, a dilatação do tempo foi algo fora do “senso comum” para ser analisado, pois, paradoxos e simultaneidades formam algumas das questões a serem analisadas.

Para ilustrar as consequências dos postulados, consideramos um “relógio de luz”, que consiste de um tubo cilíndrico com dois espelhos planos paralelos localizados nas extremidades, a uma distância D um do outro, capaz de lançar um pulso de luz por vez. Imaginemos então ser capaz de observamos o pulso de luz do relógio A, onde está em repouso em relação a um referencial S, onde o mesmo vai observar a luz se propagando em um vertical, marcando o tempo em que um feixe de luz leva para chegar de uma extremidade a outra ct (**figura parte (a)**). Agora consideramos um segundo relógio B, em movimento em relação a um observador S' que se move na direção de x , com velocidade v , sabendo que,

$$v = \frac{x}{t}, \quad (3.5)$$

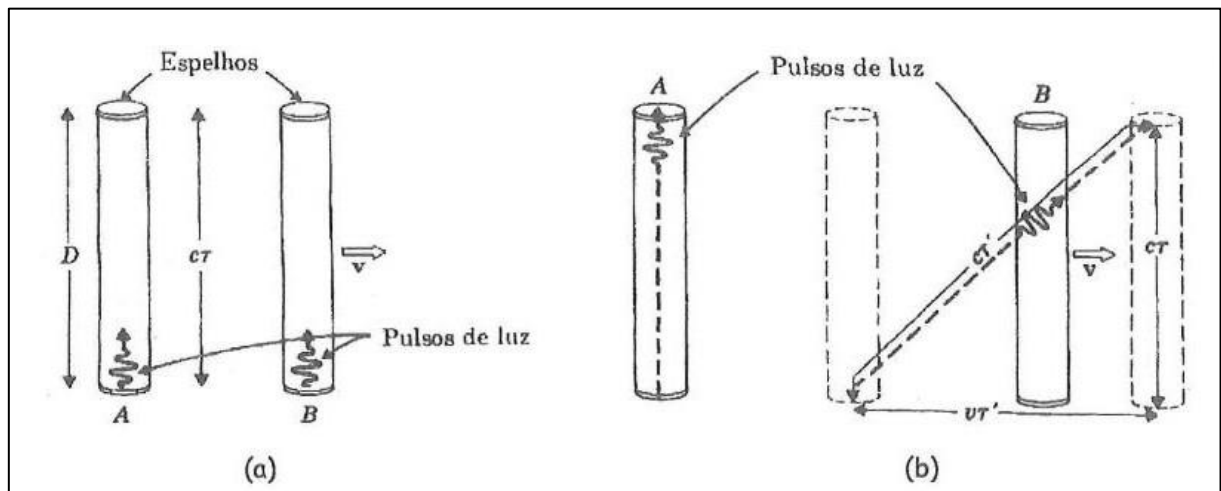
Logo,

$$x = vt. \quad (3.6)$$

Sendo assim, o observador em S' marcar ct' para o tempo que o pulso de luz levou, para chegar de uma extremidade a outra do cilindro, como mostra a **figura parte (b)**, apenas lembrando que estamos considerando o pulso de luz em c .

Figura 4 - Relógios de Luz

Índice 3 - Relação de relógios de luz em diferentes velocidades inerciais. No qual foi necessário para calcular a variação de tempo, dando origem as transformações de Lorentz.



Fonte: RICCI, 2005

O observador em S' , verá o pulso luminoso na diagonal, e a relacionar os dois referenciais (S, S') temos um teorema de Pitágoras, no qual teremos,

$$c'^2 t'^2 = c^2 t^2 + v^2 t^2. \quad (3.7)$$

agora deixamos todos os t'^2 no primeiro termo, em seguida dividimos todos os termos por c^2 ,

$$c'^2 t'^2 - v^2 t'^2 = c^2 t^2 \quad (3.8)$$

logo teremos,

$$t'^2 - \frac{v^2}{c^2} t'^2 = t^2 \quad (3.9)$$

em seguida, colocamos t'^2 em evidência, visto que ambos aparecem na mesma expressão do primeiro termo, logo

$$t'^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = t^2 \quad (3.10)$$

continuando,

$$t'^2 = \frac{t^2}{\left(1 - \frac{v'^2}{c^2}\right)} \quad (3.11)$$

agora tiramos a raiz quadrada de ambos os termos, pois, os mesmos estão em potência de 2, sendo assim,

$$\sqrt{t'^2} = \sqrt{\frac{t^2}{\left(1 - \frac{v'^2}{c^2}\right)}} \quad (3.12)$$

Igual a,

$$t' = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{v'^2}{c^2}}} \quad (3.13)$$

Temos então, a famosa transformação de Lorentz para coordenadas de tempo, que foi obtida em 1904, pelo físico holandês Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), posteriormente por Einstein, que ao definir a velocidade da luz no vácuo (c), demonstrou que objetos em altas velocidades, tem um tempo maior, se o relacionarmos com um referencial em repouso, – lembrando que o tempo é relativo, ou seja, cada um tem o seu próprio há, portanto, uma dilatação no tempo.

4.2.1 O paradoxo dos gêmeos

Uma representação dramática da dilatação do tempo, se dá ao que chamamos de paradoxo dos gêmeos, em que enfatizamos uma viagem de um dos gêmeos para o espaço, enquanto o outro permanece na terra. Se o gêmeo astronauta mantivesse em sua viagem uma velocidade de 86,6% a da luz durante 20 dias, ou seja, 10 dias de ida e 10 dias de volta, terão se passado na terra 40 dias, de acordo com a relatividade restrita, sendo assim, o irmão gêmeo que ficou na terra estaria mais velho que seu irmão que estava na espaçonave. Porém indaga Falciano (2007, p. 21):

Devido à dilatação temporal deveríamos responder que o gêmeo que viajou com velocidade comparável à da luz deveria estar mais novo já que um ano para este gêmeo equivale a mais de um ano terrestre. Porém, devido à simetria das transformações de Lorentz o gêmeo viajante poderia perfeitamente dizer que ele permaneceu parado enquanto foi a Terra que se moveu para longe de si, concluindo assim que o seu gêmeo terrestre deveria estar mais novo.

Para resolver paradoxo, devemos associar aos irmãos que os postulados de Einstein são para referenciais iniciais, sendo assim, ela serve tanto para o irmão que está na terra, quanto para o irmão astronauta, que precisa de momentos de aceleração e desaceleração, a assimetria normalmente utilizada para justificar as idades díspares dos gêmeos está relacionada com a inercia, sendo que, apenas o gêmeo viajante sentirá esse efeito por conta de sua aceleração contra ou favor da viagem em relação a terra. Logo o mesmo não associará essa associação em seu tempo de viagem.

4.3 CONTRAÇÃO DO ESPAÇO

Objetos em velocidades relativísticas, próximas a velocidade da luz, tende maior facilidade em experimentar o espaço-tempo, tanto o espaço quanto o tempo são alterados, uma vez que, há a necessidade dessas contrações, para que a velocidade c permaneça constante. Em outras palavras, os objetos em velocidades relativísticas, sofre contrações no espaço, ou seja, aparentam está mais curto em relação a um observador em repouso.

Consideramos então, um referencial S em movimento velocidade u constante, junto à uma barra de comprimento L_0 , ou seja, o comprimento da barra em seu próprio referencial, sendo assim estamos sugestivamente denominando L_0 de “comprimento próprio”. Vamos definir que o comprimento de L_0 , como sendo a diferença entre as extremidade dos pontos x_1 e x_2 do eixo x . Agora em um referência S' , que está em repouso em relação a S , consideramos L as medidas da barra em suas extremidades como sendo x'_1 e x'_2 .

$$L_0 = x_1 - x_2 \quad (3.14)$$

$$L = x'_1 - x'_2 \quad (3.15)$$

Relacionamos então as duas medias; utilizando o fator de encurtamento, proposto por Lorentz

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \text{ teremos;}$$

$$x'_1 = \frac{x_1 - ut}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (3.16)$$

e

$$x'_2 = \frac{x_2 - ut}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (3.17)$$

de modo que o comprimento L_0 , medido no referencial S' é igual a

$$L_0 = x'_2 - x'_1 = \frac{L}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (3.18)$$

ou seja,

$$L = L_0 \sqrt{1 - v^2/c^2} \quad (3.19)$$

Desse modo, podemos considerar que para o referencial S' , $L_0 < L$, isso se dá pela utilização do fator de encurtamento proposto pelo físico G. F. FitzGerald (1851 - 1901), porém demonstrado apenas por Lorentz, utilizando suas transformações. Por esses fatores, consideramos o fator de encurtamento de Lorentz-FitzGerald.

Porém, ao definirem tal fator, ambos os físicos citados a cima, consideravam se a única explicação lógica para as inúmeras tentativas falhas, ao querer detectar o “éter”, mencionado anteriormente, no interferômetro de Michelson-Morley, pois, Lorentz e FitzGerald acreditavam que se tratava de encurtamento na linha paralelo ao “vento do éter”, onde ocasionaria contração da matéria. No entanto, o mesmo fator também foi obtido por Einstein, em que o mesmo definiu que correspondia ao encurtamento do próprio espaço, e não exatamente da matéria no espaço.

5 DINÂMICA RELATIVÍSTICA

Na física clássica, apresentado por Galileu e Newton, o momentum linear de um corpo qualquer, se dá pelo impulso, Ft (força x intervalo de tempo), sendo igual a variação do momentum mv (massa x velocidade), impulso vem da 2ª lei de Newton ($a = m/F$), ou seja, quanto maior o impulso que o corpo receber, maior seu momentum linear, logo a equação é diretamente proporcional.

$$Ft = \Delta(mv) \quad (4.1)$$

ou,

$$p = \Delta(mv). \quad (4.2)$$

Um impulso cada vez maior é igual a um momentum cada vez maior, sendo assim o momentum tende ao infinito? Sim, porém Newton interpretou como momentum infinito, massa infinita ou velocidade infinita. Utilizando a equação (4.2), demonstrava que as massas de dois corpos em uma colisão eram não covariantes, isto é, não varia em nenhum referencial, porém ao analisar de forma relativística, por Albert Einstein, mostrou-se covariante entre os referenciais. De acordo com Hewitt (2002, p. 613) “Para Newton, um momento infinito significaria ou uma massa infinita ou uma rapidez infinita. Mas não é assim na relatividade. Einstein mostrou que é necessário uma definição de momentum.”

O momentum relativístico proposto a partir da relatividade restrita, leva em consideração o fator de Lorentz (γ),

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma mv \quad (4.3)$$

Uma observação a ser considerada é que γ presente na equação (4.3), apenas será consideravelmente perceptíveis em velocidades v próximas a de c , visto que, velocidade do cotidiano são basicamente nulas se comparadas com a velocidades da luz. Para velocidades maiores, γ cresce exponencialmente, assim como o momentum relativístico, que está diretamente ligada a massa e energia de um corpo ou partícula.

5.1 MASSA RELATIVÍSTICA

As novas interpretações de momentum linear, a massa de um corpo ou partículas, dependem diretamente de sua velocidade, sendo assim, consideramos sua massa própria como sendo sua “massa de repouso” (m_0), em um determinado referencial inercial S. E massa relativística m , que se move em velocidade v em um referencial inercial S', sua relação (S,S'), se dá pelo fator de Lorentz γ , logo a massa relativística se dá pela equação:

$$m_0 = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (4.4)$$

A equação de massa relativística, nos mostra uma nova definição de massa, na qual ela depende de sua velocidade, isso significa que, corpos ou partículas com velocidades relativísticas, próximas a da luz, tem massa maior, se a considerarmos em repouso. O acréscimo de massa não está diretamente ligado a um aumento de matéria, mas sim no aumento de inércia, ou seja, na resistência que a matéria oferece à aceleração.

5.2 ENERGIA RELATIVÍSTICA

A física clássica definia a energia como algo contínuo, isto é, como algo que estava sempre presente em tudo, como a energia gravitacional, energia cinética, energia potencial, energia para acelerar ou parar um corpo ou partícula em movimento. Porém, em 1900 o físico Max Planck (1858-1947), demonstrou que a energia é quantizada, ou seja, ela está bem definida em “pacotes de energia”, posteriormente nomeadas de fótons e que as equações de movimento de uma partícula podem ser descritas de forma análoga à equação de movimento de Newton, se utilizarmos a equação de Lorentz como é o caso do momentum relativístico, como representado na equação (4.3).

Fazendo uso das definições de energia de Planck e implementado as definições clássicas de energia, considerando as equações relativísticas de massa e momentum, Albert Einstein definiu energia total relativística de uma partícula livre, como sendo,

$$\epsilon = \gamma mc^2. \quad (4.5)$$

Nas palavras do próprio Einstein,

um corpo em repouso tem massa, mas nenhuma energia cinética, isto é, energia de movimento. Um corpo em movimento tem tanto massa como energia cinética. Resiste mais fortemente à alteração da velocidade do que um corpo em repouso. Parece que a energia cinética aumenta a sua resistência ao movimento. Se dois corpos têm a mesma massa de repouso, aquele com maior energia cinética resiste mais fortemente à ação de uma força externa (CARUSO; OGURI, 2016, p. 203)

Considerando agora uma massa de repouso, com energia cinética igual a 0, desconsideramos então fator de Lorentz da equação, uma vez que, depende diretamente de velocidade, logo teremos,

$$\epsilon_o = m_0c^2, \quad (4.6)$$

Ou seja, ambas as equações (4.4) e (4.5), demonstra que massa e energia são na verdade manifestações de uma mesma coisa, e o termo c^2 é o fator de conversão entre as unidades de energia e massa. Sendo assim devido ao grande valor de c , uma pequena massa, tanto em movimento quanto em repouso, correspondem a uma grande quantidade de energia.

A conversão de massa em energia, pode ser facilmente explicada em reações nucleares que acontecem no interior do sol, onde a diminuição da massa, em uma parte e mil na fusão de hidrogênio em hélio, se dá pela liberação de energia radiante e dá suporte a vida. Tais conceitos utilizados na produção de energias termonucleares, que acontecem tanto na fissão quanto na fusão nucleares, e liberam grandes quantidades de energia.

5.3 MECÂNICA RELATIVÍSTICA DOS GPS

A física relativística nos apresenta maior precisão no que se refere tempo e espaço, quando analisamos velocidades consideravelmente altas das vivenciadas cotidianamente. Um exemplo disso é a dinâmica do funcionamento do GPS, Sistema de Posicionamento Global (na sigla inglesa, *Global Positioning System*) é a tecnologia voltado a apresentar não apenas a posição em tempo real, em qualquer lugar do mundo, como também medir o movimento em falhas geológicas durante tremores de terra e para uso militar. O funcionamento de tal tecnologia é baseado em conceitos matemáticos de referências, das quais passam por

correções relativísticas constantemente.

Além das correções de tempo em relação a terra, uma vez que relógios em movimentos tem seu tempo menor em relação aos que estão em repouso, os satélites tendem a considerar também seu campo gravitacional. O Princípio da Equivalência permite generalizar as equações da Relatividade Restrita para referenciais não inerciais (referenciais acelerados ou em repouso imersos num campo gravitacional). Tais princípios demonstrando que a gravidade é inversamente proporcional ao tempo, sendo assim satélites que estão a mais de 20.200 km de altitude, desfrutam de uma gravidade diferente da terra, conseqüentemente de um tempo diferente. A deformação geométrica do espaço-tempo está diretamente ligada ao tempo relativístico.

Mais tarde, ao tentar incorporar a gravitação na sua teoria, Einstein desenvolveu a chamada Teoria da Relatividade Geral, publicada em 1915, na qual concluiu que o ritmo de um relógio depende não só da sua velocidade, mas também do local em que este se encontra: relógios colocados em pontos mais baixos de um campo gravitacional atrasam-se em relação a relógios colocados em pontos mais altos. (NATÁRIO, 2015, p. 05)

A velocidade de 14 000 km/h (3,88 km/s) que cada satélite apresenta e o campo gravitacional na qual está submetido, demonstra as correções relativísticas são de extrema importância para a precisão na demarcação de posição. Sendo assim cada satélite demarca seu tempo de forma precisa, utilizando relógios atômicos e os compara com os relógios atômicos das centrais de monitoramento da terra, a diferença de 38 microssegundos por dia em relação a um relógio colocado na terra, está diretamente relacionado ao movimento relativístico.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho é uma revisão bibliográfica, na qual demonstrou a importância da relatividade restrita para compreensão das interações que o universo relativístico tende a nos oferecer. Tais concepções e definições apresentadas de forma simples e concisa no desenvolvimento do texto, foram elaboradas com objetivo de maior compreensão do público no geral, desde os “amantes” da física, até aos curiosos sobre o tema.

A física relativística, desde sua concepção no início do século XX, se apresentou como uma grande precursora das descobertas e tecnologias que surgiram posteriormente. Sendo assim, conhecer os contextos histórico de sua descoberta e sua dinâmica é de extrema importância para compreensão atual da sociedade, sendo também fatores norteadores para novas pesquisas e aplicabilidades.

Desta forma, destacamos a importância das descobertas relativísticas, nas quais foram discutidas e apresentadas no presente trabalho, podendo ser auxílio para futuras pesquisas realizadas por acadêmicos em geral.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, Marcus A. M. **Tópicos de Mecânica Clássica**. 1ª.ed. Campinas: Editora Livraria da Física. 2011.

BIEHL, Luciano Volcanoglo. **A ciência ontem, hoje e sempre**. Canoas: Ed. ULBRA, 2003.

CARUSO, Francisco; OGURI, Vitor. **Física Moderna: origens clássicas e fundamentos quânticos**. 2ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

FALCIANO, F.T. Cinemática Relativística: paradoxo dos gêmeos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Rio de Janeiro, RJ, v. 29, n. 1, p. 19-24, março, 2007.

HEWITT, Paul. G. **Física Conceitual**. Tradução de Trieste Freire Ricci. 9ª Ed. Porto Alegre: BOOKMAN, 2002.

LIMA, Melina Silva de. **Einstein e a Teoria da Relatividade Especial: uma abordagem histórica e introdutória**. Porto Alegre: UFRGS, Instituto de Física, 2013.

NATÁRIO, J. **O GPS e a Teoria da Relatividade**. Universidade do Minho: Centro de Matemática. Lisboa, 2015.

PEDUZZI, L. O. Q. **A relatividade einsteiniana: uma abordagem conceitual e epistemológica**. Publicação interna. Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

RICCI, T. F. **Teoria da Relatividade Especial**. Porto Alegre: Gráfica do Instituto de Física UFRGS, n. 11, 2000. (Textos de Apoio ao Professor)

RIFFEL, Rogemar André. **Uma introdução a teoria da relatividade**. Monografia. Santa Maria – RS. Universidade Federal de Santa Maria. 2010.

SIMÕES, Eduardo. Eletromagnetismo: Para além das Leis de Newton. **Pesquisa & Extensão**, Montes Claros, v. 4. n.1, p. 7-14, maio. 2014.

WOLFF, Jeferson Fernando de Souza; MORS, Paulo Machado. Relatividade : a passagem do enfoque galileano para a visão de Einstein. 68 p. In: MOREIRA, Marco Antonio; VEIT, Eliane Angela (Edit.) **Textos de apoio ao professor de física**. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, v. 16, n. 5, 2005.