



110 anos da relatividade especial (ou restrita)

Marcio Luis Ferreira Nascimento

Abstract: On June 30, 1905 a young federal public servant patent analyst published a surprising scientific article in a renowned newspaper. In 2015 it is celebrated the 110 years of this famous discovery, called Special Relativity, that modestly changed the world by assuming only two postulates: i) the laws of physics are invariant in all inertial systems; ii) the speed of light in a vacuum is the same for all observers. A simple example of time dilatation is shown, due to P. Frank.

Resumo: Em 30 de junho de 1905 um jovem servidor público federal analista de patentes publicou um surpreendente artigo científico num renomado jornal. Em 2015 celebram-se 110 anos desta famosa descoberta, denominada Relatividade Especial, que modestamente mudou o mundo ao se assumir apenas dois postulados: i) as leis físicas são invariantes em todos sistemas de referência inerciais; ii) a velocidade da luz no vácuo é a mesma para todos observadores. Um simples exemplo do fenômeno da dilatação do tempo é apresentado, devido a P. Frank.

Keywords: Relativity, Einstein, Engineering, Science, Physics, Nobel Prize

Palavras-chave: Relatividade, Einstein, Engenharia, Ciência, Física, Prêmio Nobel

Introdução

Todo mês de março a ciência comemora um importante aniversário. Mais precisamente, todo dia 14 de março, pois foi no ano de 1879 que nasceu, nesse dia, um dos maiores cientistas da humanidade: Albert Einstein. Criador de algumas das mais importantes teorias do século XX, as denominadas Teorias da Relatividade Especial e Geral,

veio ao mundo na cidadezinha de Ulm, sul da Alemanha, situada na margem esquerda do rio Danúbio, no seio de uma família judia com relativos poucos recursos. Seu pai, Hermann Einstein (1847-1902), foi empresário, empreendedor e engenheiro, e sua mãe, Pauline Einstein (1858-1920), dona de casa, além de talentosa pianista.

De acordo com sua irmã, e citado por um dos seus mais importantes biógrafos – Abraham Pais [1], até três anos de idade (Figura 1) teve bastante dificuldade para falar. Tímido, calmo e introspectivo, sua diversão preferida era montar castelos de cartas. Sua família instalou uma pequena oficina eletrotécnica em Munique apenas um ano depois de seu nascimento, chamada “Elektrotechnische Fabrik J. Einstein & Cie”, e em 1885 já fabricavam equipamentos elétricos como dínamos para estações elétricas, acionados por corrente contínua.

Há um mito entorno das capacidades intelectuais do menino – vários biógrafos, incluindo sua única irmã, Maria Einstein (1881-1951), costumavam defini-lo apenas como desinteressado e desajustado ao modo de ensino de sua época – mas ainda assim era bom aluno. Sua imensa curiosidade e a proximidade com o pai e tios empreendedores na empresa de eletrotécnica provavelmente o fez ler e pesquisar assuntos além dos ensinados na escola, mostrando assim um vivo interesse em ciências, matemática, filosofia, música e poesia.



Figura 1. A foto mais antiga de que se tem conhecimento, quando Einstein tinha três anos.

Uma vez seu pai mostrou-lhe uma bússola de bolso, e o garoto percebeu que deveria haver algo que fizesse com que a agulha se movesse, apesar do aparente “espaço vazio”. Como outro exemplo, aos 12 anos, travou o primeiro contato com o livro “Os Elementos” de geometria, do sábio Euclides de Alexandria (c. 325 – c. 265 a.C) [1]. Infelizmente a empresa familiar faliu em 1894, perdendo espaço para equipamentos em corrente alternada, uma revolução à época.

Breve histórico

Dos doze aos 16 estudou cálculo diferencial e integral sozinho. Ainda adolescente, prestes a escolher uma universidade, precisou morar com a família em Milão brevemente, depois em Pavia, pois as perspectivas dos negócios familiares pareciam ser muito melhores na Itália. Aos 16 anos se pôs a pensar em como uma pessoa veria um raio de luz se pudesse viajar ao lado dele, em velocidade aproximadamente igual. Essa divagação que anotou num ensaio, seria o ponto de partida para sua ‘Teoria Especial da Relatividade’ [1].

Na primeira tentativa de entrar para a então renomada Escola Politécnica de Zurique (hoje Instituto Federal de Tecnologia de Zurique, www.ethz.ch), foi reprovado [1]. Ele tinha ainda 16 anos - dois a menos do que a idade-padrão para ingresso no ensino superior. Aos 17, já em 1896, melhor preparado, conseguiu passar nas provas de admissão. Continuava a ser, porém, um aluno rebelde, faltando às aulas, lendo o que

não constava do currículo e irritando os professores com perguntas consideradas impertinentes. Formou-se em 1900 como professor especializado (Fachlehrer) em física e matemática para o equivalente ao ensino médio, graças a amigos como Marcel Grossmann (1878-1936) e Mileva Maric (1875-1948, a única mulher no curso, proveniente de uma abastada família sérvia), quem lhe emprestavam anotações de aulas.

Como foi rejeitado na tentativa de se tornar professor universitário, dava aulas particulares para sobreviver. Começou um romance com Mileva que rendeu mais de 50 cartas de amor e uma criança, Lieserl. A filha, mantida em segredo pelas famílias, provavelmente foi dada em adoção – e só sabemos dela pelas cartas deixadas por Einstein. Em 1901 escreveu o primeiro artigo: “Folgerungen aus den Kapillarität Erscheinungen” (“Conclusões sobre os Fenômenos da Capilaridade”), publicado na prestigiada *Annalen der Physik* (‘Anais da

Física', revista fundada em 1790 e que existe até hoje). Conseguiu com ajuda de amigos um emprego como técnico de terceira classe no Serviço Suíço de Patentes do hoje Instituto Federal Suíço de Propriedade Intelectual (www.ige.ch), em Berna. O cargo de assistente examinador era medíocre, mas tinha a vantagem de manter a família com dignidade e lhe dar bastante tempo livre para as próprias divagações e cálculos científicos (Figura 2), que continuaram sendo feitos regularmente em 1902, 1903 e 1904 sobre termodinâmica de superfícies líquidas, eletrólise e mecânica estatística.

Em particular, em janeiro 1903, casou-se com sua ex-colega de graduação Mileva, com quem passou a viver num modesto apartamento perto do emprego. Ela havia sido a primeira mulher a ingressar no prestigioso curso de matemática da ETH, após desistir de estudar medicina.

Com apenas 26 anos, pai recente (de Hans Albert Einstein, nascido em maio de 1904; o outro filho, Eduard Einstein, nasceu em julho de 1910) e servidor público, divulgaria em 1905 a 'Teoria da Relatividade Especial' (TRE) - uma das mais extraordinárias revoluções da História da Ciência, marco fundador da Física Contemporânea. Foi nesse ano especial, 1905, que Einstein terminaria seu doutorado (Doktorarbeit) com o título "Sobre uma Nova Determinação das Dimensões Moleculares" ("Eine Neue Bestimmung der Moleküldimensionen"), depois de algumas dificuldades na elaboração da tese, e continuaria ainda publicando artigos em prestigiosas revistas científicas alemãs. Em particular, o assunto tratado no doutorado era bastante importante à época, pois muitos cientistas ainda não acreditavam na teoria atômica da matéria. Propôs então um método de determinação dos raios moleculares bem como do número de Avogadro a partir de dados de dissolução de açúcar em água, uma ideia simples, inovadora e surpreendente à época. Publicou ainda um conjunto de quatro artigos naquele ano que iria revolucionar seu destino - além do conhecimento humano. Este momento especial foi denominado de "Annus Mirabilis" ('Ano Milagroso') [1]. Certamente qualquer um destes artigos lhe daria prestígio científico.

De modo bastante resumido, o trabalho da tese tratava basicamente de uma síntese dos resulta-

Figura 2. Einstein fazendo pose em 1905, quando começou a ficar famoso, embora ainda trabalhasse como funcionário no escritório de patentes em Berna, Suíça.



dos do doutorado, escrito de forma elegante e concisa, em apenas 24 páginas. O primeiro artigo investigava a causa do 'efeito fotoelétrico': o fato de certos corpos emitirem elétrons quando atingidos pela luz [2]. Ele explicou que isso se devia ao fato de que a luz, até então tratada pela Física como uma onda contínua, poderia ser interpretada como composta de diminutas partículas de energia (chamadas quanta). Foi com este trabalho que conquistou o Prêmio Nobel de Física em 1921. Já o segundo tratava do chamado 'movimento browniano': o ziguezague feito pelas partículas em suspensão num líquido. Einstein mostrou como esse movimento permitia compreender a natureza das moléculas [3].

No terceiro artigo, apresentava ao mundo sua 'Teoria da Relatividade Especial' (TRE), em que subvertia as ideias fundamentais da Física clássica, ao mostrar que o espaço não era absoluto, e o tempo não corria de maneira uniforme em todos os lugares, mas eram sim grandezas relativas, que dependiam do observador [4]. Admitiu apenas dois postulados: i) As Leis da Física são as mesmas em todos os referenciais inerciais, ou seja, não existe um referencial absoluto; ii) A velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor c (do grego celeritas, 'rápido'), igual a 300.000 quilômetros por segundo em todas as direções e em todos os referenciais inerciais.

O título era "Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento" ("Zur Elektrodynamik bewegter Körper") - curiosamente, o termo relatividade veio no ano seguinte, em 1906, a partir de sugestão do seu colega Max Planck (1858-1947). Dessa forma, Einstein denominou o primeiro postulado de "princípio da relatividade". Neste particular trabalho definiu uma nova e revolucionária concepção de espaço e tempo. Uma consequência da relatividade é que, quanto mais

veloz um corpo se move, mais vagaroso o tempo passa em relação a ele. Outra é que, à medida que se aproxima da velocidade da luz, o corpo se encolhe na direção do movimento e sua massa aumenta. Tudo isto ocorre porque a velocidade é medida pela relação entre espaço e tempo. Se a velocidade da luz é fixa, o tempo e o espaço precisam variar. Se um corpo estiver então viajando muito, muito rápido (mas abaixo do limite c), o tempo vai passar de modo alterado (um pouco mais lento) e o espaço também vai agir de forma diversa (o objeto vai se contrair).

No quarto artigo, finalmente, a partir de um desen-volvimento matemático da TRE, constata-se a equivalência entre massa e energia, expressa

na famosa equação $E = mc^2$ (que foi chamada pelo escritor David Bodanis de “A Equação Mais Famosa do Mundo”) [5]. Este último artigo tinha sido intitulado na forma de uma questão: “A Inércia de um Corpo depende de seu Conteúdo Energético? [5]” Enquanto conclusão, o artigo admitiu que “se um corpo cede uma quantidade de energia E sob a forma de radiação, sua massa diminuirá de E/v^2 ”, sendo v a velocidade. Uma consequência desta proposta, equivalendo massa (m) e energia, explica por exemplo a enorme liberação de energia nas explosões nucleares. O manuscrito deste trabalho, assim como outras centenas de obras, podem ser acessados gratuitamente no site Arquivos Einstein: <http://alberteinstein.info>.

Discussão

Uma breve demonstração de como funciona a relatividade pode ser apresentada como segue: seja um trem (à época de Einstein era o meio de transporte mais rápido) e dois observadores, um parado e outro em movimento, todos de olho numa mesma experiência (fenômeno), similar ao apresentado em uma de suas melhores biografias, pelo físico austríaco Philipp Frank (1884-1966) [6]. Faz-se uma simples pergunta: qual é o tempo entre a subida e descida do raio de luz, dado que a velocidade do trem é de $v = 0,8c$?

Considere, para facilitar comparações, que para o observador 2 (João) passaram-se 10 segundos desde que o raio partiu de A, refletiu em B (por meio de um espelho) e chegou em A novamente, percorrendo uma distância igual a $2D$ (sendo que D equivale à altura do vagão do trem).

O tempo que o observador 1 (Maria, que está dentro do vagão) verificou o experimento foi simplesmente $t_1 = 2D/c$, pois a determinação da velocidade nada mais é que o espaço percorrido num determinado intervalo de tempo – e por uma simples manipulação algébrica determina-se assim t_1 .

A princípio a pergunta parece não ter muito sentido, pois um leitor comum pode presumir que o tempo deveria ser o mesmo para os dois observadores. Não há dúvidas que o raio de luz desloca-se em linha reta. No entanto, note que a trajetória do raio de luz para o observador 2 (João, que está fora do vagão do trem) foi percebida de forma diversa da de Maria, conforme as ilustrações das Figuras 3 e 4.

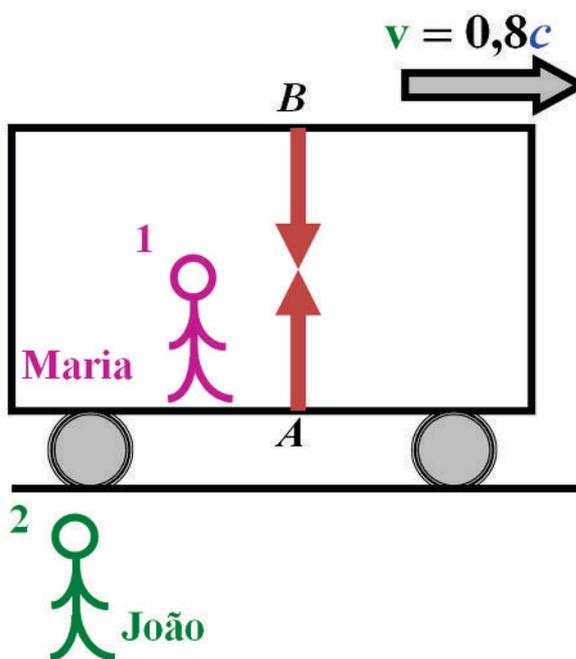


Figura 3. Um trem em movimento com velocidade $v = 0,8c$, da esquerda para direita, e dois observadores, identificados pelos números 1 (Maria) e 2 (João).

Por um breve cálculo utilizando-se do Teorema de Pitágoras conforme apresentado na Figura 4, o cateto D (altura do vagão) em unidades da velocidade c , considerando os dez segundos do observador João equivale a $D = 3c$, pois o cateto horizontal mede $4c$ e a hipotenusa vale $5c$. Portanto, a partir da expressão do tempo que Maria levou para observar a subida e descida do raio de luz dentro do vagão foi: $t_1 = 2D/c = 2 \times 3c/c = 6s$. Tal

resultado apenas foi possível por ter sido postulado que a velocidade da luz é a mesma para ambos referenciais (ou ainda, observadores): Maria e João medem a mesma velocidade da luz em seus referenciais inerciais.

Neste exemplo é possível observar uma das surpreendentes consequências dos postulados da teoria da relatividade restrita: que o tempo é relativo ao observador; i.e., parado ou em movimento, ao se observar um mesmo fenômeno o resultado pode não vir a ser o mesmo quando se consideram velocidades próximas à da luz, c . A relatividade do tempo é consequência direta da invariância da velocidade da luz no vácuo.

Dito de outra forma, se dois observadores que estão se movendo um em relação ao outro medem um intervalo de tempo entre dois eventos, em geral encontram resultados diferentes. Por quê? Porque a separação espacial dos eventos pode afetar o intervalo de tempo medido pelos observadores. Assim, João e Maria mediram o intervalo de tempo entre os mesmos dois eventos, mas o movimento relativo entre João e Maria fez com que obtivessem resultados diferentes. A conclusão é que o movimento relativo pode fazer mudar a rapidez com que o tempo passa entre dois eventos; o que se mantém constante para os dois observadores é a velocidade da luz c .

Vale ressaltar que o sucesso das propostas de Einstein não foi imediato. Certamente os artigos de 1905 bem como os demais o tornaram respeitado pelos mais eminentes cientistas. Suficientemente para que pudesse logo trocar o modesto emprego de inspetor de patentes pela carreira de professor universitário... mas somente a partir de 1908!

A façanha de Einstein foi realmente espantosa. Não é por acaso que muitos historiadores da ciência chamam 1905 de “Annus Mirabilis”. Ele só tem paralelo com o ano de 1666, quando Isaac Newton (1642-1727), aos 24 anos, isolado no campo devido a uma epidemia de peste bubônica, produziu uma explicação para a natureza da luz, criou a matemática dos cálculos diferencial e integral e ainda vislumbrou sua futura Teoria da Gravitação Universal.

Pais [1] descreve com bastante detalhe a gestação de praticamente dez anos da ideia da relatividade pelo jovem Einstein. Para tanto, teve de abdicar da ideia errônea e em voga de que a luz não poderia ser vista se não houvesse um meio (“éter”) que a transportasse, do mesmo modo que o som não

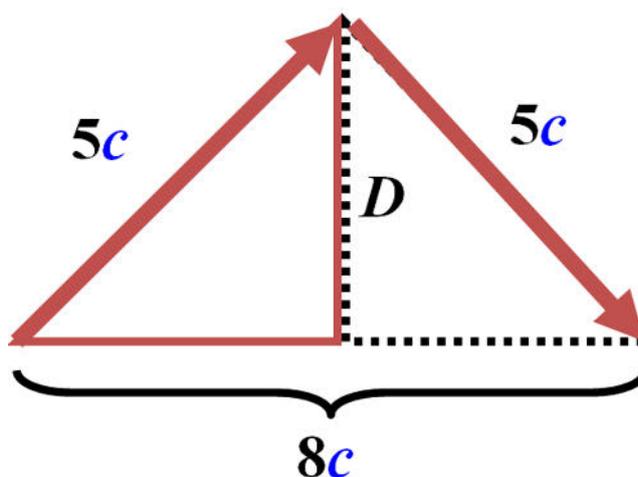


Figura 4. O raio de luz deslocou-se de $8c$ em 10 segundos na horizontal e $5c+5c$ para João. Para Maria, o tempo foi diferente, mas a velocidade da luz é a mesma para ambos pelo 2º postulado.

pode ser ouvido na ausência do ar. O postulado da invariância da velocidade da luz (no vácuo) é contrário à existência de um “éter”.

Vinculado a este estudo da relatividade, seu último (e breve) trabalho de 1905 mostrou que “a massa de um corpo é uma medida do respectivo conteúdo energético”, ou ainda que a lei de conservação da massa é um caso especial da lei de conservação da energia [1]. A publicação destes trabalhos de 1905, em particular o da relatividade, marcou o início do fim do isolamento do servidor público federal na repartição de patentes, promovendo-o a Herr Professor.

Testes e confirmações da teoria da relatividade especial ocorreram à exaustão com o passar dos anos. No entanto, propostas da impossibilidade da teoria surgiram aqui e ali, todas sem comprovação. Vale a pena citar um parêntese - uma proposição bastante recente do físico português João Magueijo (n. 1967) de uma situação muito particular onde a teoria da relatividade não funcionaria: precisamente no início, na formação do universo, durante sua expansão primeva, ou Big Bang [7]. Nesta aurora do tempo e espaço a velocidade da luz deveria ser muito, muito maior enquanto o universo era bastante jovem e quente. Com esta hipótese (para alguns, uma heresia, um disparate, para outros apenas especulação - o que é algo muito comum em ciência), seria possível explicar uma série de questões mal-resolvidas sobre a evolução do universo desde seus estágios iniciais. E isto não implica que a teoria da relatividade esteja errada, já que esta funciona para o universo após o Big Bang (i.e., após a criação do espaço-tempo).

Conclusão

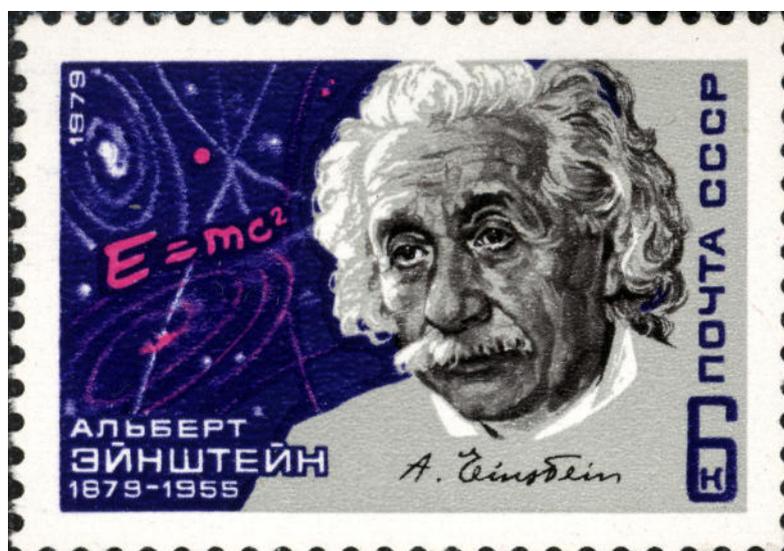
O princípio da relatividade é considerado por muitos como uma das mais significativas realizações da Ciência. No entanto, para que o segundo postuladado tenha validade, ou seja, que c seja considerada constante, outras coisas seriam abandonadas – e estas eram as ideias de espaço e tempo universais e imutáveis – algo que se aprende logo cedo no ensino médio e é reforçado nas escolas, principalmente de engenharias, contrariando a princípio as definições newtonianas.

Os últimos 20 anos de vida de Einstein, passados nos Estados Unidos, na Universidade de Princeton, mais precisamente no Instituto de Estudos Avançados (www.ias.edu), foram relativamente pacatos. Sua conhecida foto com a língua de fora provavelmente ocorreu no dia da comemoração do seu 72º aniversário, pois estava irritado com a perseguição da mídia. Publicou mais de 300 trabalhos científicos em sua carreira, juntamente com mais de 150 obras não científicas.

Einstein faleceu no dia 18 de abril de 1955 devido à ruptura de um aneurisma na aorta. Conforme seu último desejo, seu corpo foi cremado e as cinzas espalhadas em local escolhido pela família, numa cerimônia íntima. As teorias de Einstein são hoje levadas em conta no desenvolvimento do sistema de posicionamento global que guia navios, aviões

e carros (GPS), na sincronização de relógios atômicos, na transmissão de sinais por longuíssimas distâncias – seja para TV, telefone ou internet, como satélites georreferenciados, entre outros. Promoveu assim uma revolução nas ciências básicas bem como nas engenharias. Foi um iconoclasta em ciência, política e religião. Aceitando sua posição no assunto como um legado, pode ser considerado criador de um novo campo de pesquisas, abrindo as portas de um novo universo de conhecimentos. Modestamente, mudou a forma de vermos o mundo.

Uma boa referência, embora bastante técnica, apenas sobre a Teoria da Relatividade Especial, foi elaborada por Resnick [8]. No entanto, o leitor que desejar uma maior familiaridade com os conceitos da Teoria da Relatividade pode ter acesso em português à obra “A Teoria da Relatividade Especial e Geral”, traduzido de texto escrito pelo próprio Einstein em 1916 [9], após a finalização da Teoria Geral, com o objetivo de “dar uma ideia, a mais exata possível, da Teoria da Relatividade àqueles que, de um ponto de vista geral científico e filosófico, se interessam pela teoria mas não dominam o aparato matemático da física teórica”. Einstein ainda afirmou que essa “leitura pressupõe que o leitor tenha formação equivalente à do ensino médio e – apesar da brevidade do livro – paciência e força de vontade”.





REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Pais. Sutil É o Senhor... A Ciência e a Vida de Albert Einstein. Trad. F. Parente, V. Esteves. Rio de Janeiro, Nova Fronteira, 6^a reimpressão (1995) 637 págs.
- [2] A. Einstein. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden Heuristischen Gesichtspunkt (Sobre um Ponto de Vista Heurístico a Respeito da Criação e Conversão da Luz). Ann. Phys. 17 (1905) 132-148.
- [3] A. Einstein. Über die von der Molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen (Investigações sobre a Teoria do Movimento Browniano). Ann. Phys. 17 (1905) 549-560.
- [4] A. Einstein. Zur Elektrodynamik bewegter Körper (Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento). Ann. Phys. 17 (1905) 891-921.
- [5] A. Einstein. Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt Abhängig? (A Inércia de um Corpo depende de seu Conteúdo Energético?). Ann. Phys. 18 (1905) 639-641.
- [6] P. Frank. Einstein: His Life and Times. Trad. G. Rosen. Alfred Knopf, New York (1947) 311 págs.
- [7] J. Magueijo. Mais Rápido que a Velocidade da Luz – a História de uma Especulação Científica. Trad. P. I. Teixeira. Record (2003) 303 págs.
- [8] R. Resnick. Introdução à Relatividade Especial. Trad. S. Watanabe. Editoras USP/ Polígono (1971) 167 págs.
- [9] A. Einstein. A Teoria da Relatividade Especial e Geral. Trad. C. A. Pereira. Editora Contraponto, 6^a reimpressão (2007) 136 págs.

mlfn@ufba.br

Professor do Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica - UFBA