

ESTRUTURA CONCEITUAL DO ELETROMAGNETISMO

Maria Inês Nobre Ota*

Resumo Este trabalho é uma tentativa de apresentar a estrutura conceitual do Eletromagnetismo no contexto da Teoria da Relatividade Restrita. Uma estrutura conceitual permite diferentes interpretações que marcam as diversas facetas em que a teoria pode manifestar-se e estas interpretações determinam e são determinadas pelas várias visões de mundo que estão incorporadas na estrutura. Com a apresentação de algumas leituras que um mapa conceitual permite, pretende-se explicitar a estrutura do Eletromagnetismo Relativístico e discutir a ruptura conceitual entre esta teoria e a teoria eletromagnética clássica.

Palavras-chaves: Eletromagnetismo e Relatividade; Estrutura conceitual; Mapa conceitual.

Abstract This work is an attempt to present the conceptual structure of Electromagnetism in the context of the Special Theory of Relativity. A conceptual structure permits a variety of interpretations which mark the different faces in which theory can be manifest and these interpretations determine and are determined by several world views that are incorporated in the structure. With the presentation some readings which a conceptual map permits, we intend to make explicit the Relativistic Electromagnetism structure and to discuss the conceptual rupture between this theory and the Classical Electromagnetic Theory.

Descriptors: Eletromagnetism and Relativity; Conceptual Structure; Conceptual Map.

O Conhecimento do Universo Físico

A Física é o conhecimento de uma parte do mundo natural. Quando ensina-se Física, a idéia de natureza está sempre presente. O ser humano também constitui a natureza, participa dela, tem-na incorporada dentro de si. Ao percebê-la, ao interferir em seus processos, ao conhecê-la, ele de algum modo se distancia dela. Por isso, ao se dizer que o conhecimento da natureza material é o objeto da Física, isto se refere também a uma dualidade, qual seja, à aproximação distanciada (*sic*) desta natureza.

Os instrumentos que a Física utiliza para conhecer o mundo material são as suas teorias. Uma teoria envolve um conjunto de relações, algumas das quais são internas à teoria, enquanto que outras estabelecem o contato com o seu exterior. O interior das teorias é o domínio da lógica, da matemática e os elementos que estabelecem o contato com o seu exterior são as leis, os conceitos, os fenômenos, etc. É através de uma lei que

as informações sobre a natureza fecundam as estruturas lógicas da teoria.

O objetivo deste trabalho é apresentar alguns subsídios na tentativa de se compreender uma das características de uma teoria física, ou seja, seu caráter estrutural. Para isto, utiliza-se uma estratégia baseada na discussão de um exemplo concreto: a *teoria eletromagnética* e analisa-se uma forma de representação desta teoria através de um mapa conceitual, que representa a teoria como um objeto, como uma coisa. A teoria é um tipo de conhecimento que possui uma estrutura. A estrutura permite um desenho, um mapa. O mapa conceitual reifica a teoria. Ao ser reificada, a teoria é caracterizada com uma coisa, que se torna típica da realidade objetiva.

O mapa, por ser mapa, é coisa. Por representar a estrutura conceitual da teoria,

* Doutoranda do Instituto de Física da USP e Professora do Departamento de Física da Universidade Estadual de Londrina

ele ajuda a coisifica-la. O importante deste fato é que quando reificada, uma teoria pode ser manipulada. A estrutura conceitual, representada pelo mapa, constitui um saber espacializado. Talvez a característica mais fascinante de um objeto seja o fato dele transcender o tempo, ser estável. A representação da estrutura através de mapas conceituais evidencia a existência de relações simultâneas, sincrônicas e estáveis no interior da estrutura. Assim, por meio do mapa, é possível apreender, como objeto, o conjunto de relações que constitui o esqueleto estrutural da teoria.

Na relação mapa-objeto a visão desempenha um papel fundamental. A razão é que à visão está associado um modo de pensar característico, que poderia ser classificado simultaneamente de consciente e racional. O tipo de consciência associado à visão é caracterizado por um tipo de ordem multidimensional, onde elementos têm relações estáveis e bem definidas entre si. Este tipo de consciência é importante, porque nela as estruturas são tratadas como objetos. E este é um ingrediente essencial à prática do distanciamento crítico.

Estrutura Conceitual do Eletromagnetismo

Como exemplo concreto de estrutura conceitual, foi selecionada uma teoria física em particular: a Teoria da Relatividade Restrita (TRR), com ênfase especial à parte referente ao Eletromagnetismo. A Relatividade foi escolhida por ser ela uma teoria revolucionária. Seu surgimento abalou a comunidade científica, numa época em que grande parte de seus integrantes se via imersa em um processo contínuo de aproximação cumulativa à verdade absoluta sobre a natureza. Historicamente, o contraste entre as descrições clássica e

relativística permitiu que a atividade científica fosse entendida como um processo de construção do conhecimento. A experiência da revolução relativística, ao derrubar uma teoria muito respeitada e consistente, tornou inviável a busca de teorias de conteúdo absolutamente verdadeiro. Um outro motivo para a escolha da TRR é que ela permite a transcendência de seu formalismo, o que constitui fonte de estímulo à imaginação e à criatividade e permite um enfoque qualitativo e ao mesmo tempo rico em significado.

Neste trabalho, é dado um enfoque especial à parte da teoria referente ao Eletromagnetismo. O Eletromagnetismo Relativístico tem uma característica especial pois, embora tenha sido construído antes da Relatividade, isto aconteceu em um formalismo compatível com esta teoria. O Eletromagnetismo, como teoria revolucionária, representa simultaneamente ruptura e continuidade com a teoria da qual se originou. A ênfase dada a cada um destes aspectos depende de quem trata da teoria, o que faz com que ela seja apresentada sob diferentes interpretações, como é discutido a seguir.

Eletromagnetismo e Relatividade

Antes de começar a explorar o Eletromagnetismo, esta teoria será situada dentro da TRR. Para fazer isto, poderia ter sido construído um mapa conceitual da Teoria da Relatividade Restrita¹ mas para atingir os objetivos deste trabalho, a apresentação desta teoria, considerando apenas suas grandes partes ou subestruturas, é suficiente para situar o Eletromagnetismo no contexto da Relatividade. Um mapa conceitual relativo a TRR poderia ser dividido em várias regiões que

corresponderiam a partes com autonomia relativa. Estas regiões correspondem aos princípios fundamentais e suas consequências na estrutura do espaço-tempo (cinemática), no movimento da partícula

(dinâmica), na criação e propagação dos campos (eletromagnetismo) e na interação partícula-campo. Os polígonos da Figura 1 representam a delimitação destas regiões em um mapa conceitual.

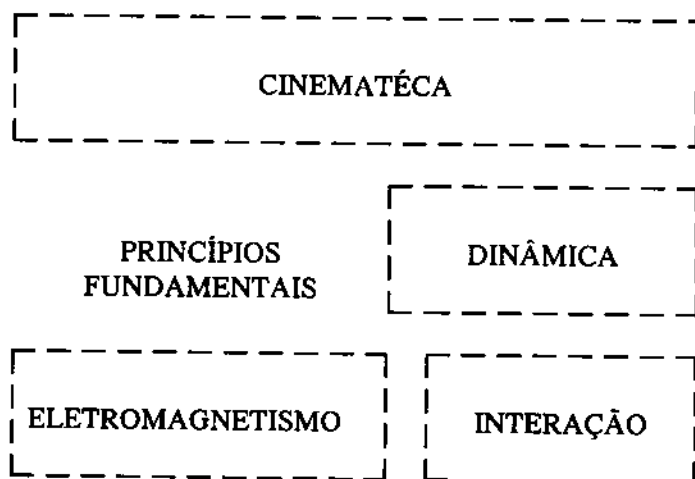


Figura 1 - Representação de Subestruturas da TRR

Os princípios fundamentais da TRR determinam as propriedades de cada uma das outras suas partes. As várias partes estão relacionadas entre si, o que reflete a totalidade da teoria. As propriedades do espaço-tempo são derivadas dos princípios fundamentais. Estas propriedades e o princípio da homogeneidade do espaço-tempo determinam as características da dinâmica. Os princípios fundamentais e suas consequências a nível de espaço-tempo estabelecem as propriedades do campo eletromagnético e sua fonte. Das propriedades da partícula e do campo, quando considerados em conjunto, resulta a equação de movimento da partícula.

Os elementos e as relações em cada subestrutura podem apresentar diferentes interpretações, que marcam as diversas facetas em que a teoria pode manifestar-se. Estas diferentes interpretações determinam

e são determinadas pelas diversas visões de mundo que estão incorporadas nele. A seguir, são apresentadas algumas destas visões presentes na parte relativa ao eletromagnetismo.

Possíveis Interpretações do Mapa do Eletromagnetismo

O mapa conceitual, apresentado na Figura 2, relaciona os seus diversos elementos por meio de linhas, sem indicar a natureza desta relação. Assim, no primeiro contato com o mapa, é possível constatar que certos elementos estão relacionados, mas não como ou porque isso ocorre. Este tipo de abordagem permite uma visão global da teoria tornando possível situar cada um dos elementos dentro do todo e reconhecer a existência de vários caminhos entre duas partes quaisquer.

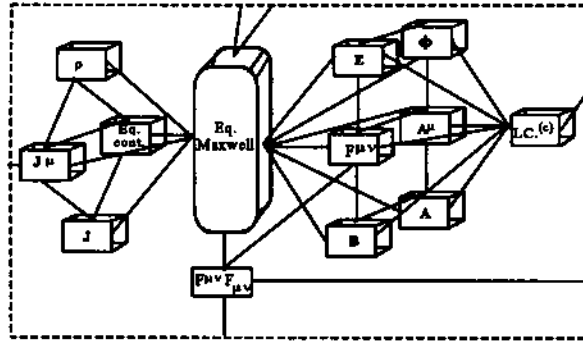


Figura 2 - Mapa Conceitual do Eletromagnetismo Relativístico

Neste mapa estão representadas as propriedades do campo eletromagnético e sua fonte. O campo eletromagnético é uma grandeza cujas componentes são os campos tridimensionais elétrico e magnético. A fonte do campo é a carga elétrica que é um invariante. Sua distribuição no espaço-tempo é descrita pela quadricorrente, cujas componentes são as densidades de carga e corrente. As propriedades do campo e sua fonte são descritas pelas Equações de Maxwell, em conjunto com as leis de conservação da carga e do momento-energia do campo.

Nesta seção é investigado mais profundamente o mapa conceitual, buscando as possíveis interpretações que ele permite e as várias visões de mundo a elas associadas. As diversas interpretações que o mapa do eletromagnetismo pode ter estão associadas a concepções diferentes da natureza, que determinam os significados dos vários elementos e das relações entre eles. Algumas destas interpretações são descritas a seguir:

1. As linhas e os elementos indicados na Figura 3, são considerados como fundamentais.

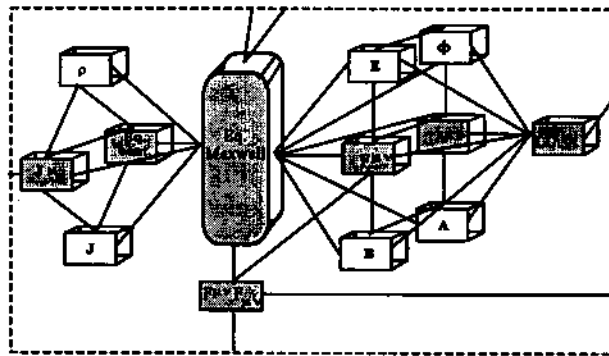


Figura 3 - Destaque para uma leitura do mapa conceitual que privilegia o campo $F^{\mu\nu}$

Nesta interpretação, os conceitos básicos da teoria são o campo eletromagnético, descrito

pelo tensor $F^{\mu\nu}$, e a carga elétrica, descrita por J^μ . Estes conceitos estão relacionados

entre si através de duas equações, cujos significados são: (1) *A fonte do campo eletromagnético é a carga elétrica;* (2) *O campo eletromagnético é conservativo no espaço-tempo quadridimensional.*

Ao campo eletromagnético estão associados dois invariantes, representados no mapa pelo elemento $F^{\mu\nu} F_{\mu\nu}$. A equação da continuidade (eq. cont.) representa que a carga se conserva e também incorpora a idéia de sua invariância. A lei de conservação (L.C.^(C)) estabelece que o momento-energia do campo eletromagnético se conserva. Estes elementos já são suficientes a uma descrição completa do eletromagnetismo relativístico. Entretanto, ela pode ser estendida, associando-se ao campo eletromagnético $F^{\mu\nu}$ um campo potencial A^μ . Nesta interpretação, há uma priorização do campo eletromagnético em relação ao campo potencial, sendo este considerado apenas como uma grandeza auxiliar.

2. Uma outra interpretação do mapa seria considerar os mesmos elementos da anterior mas agora, o campo potencial vetor A^μ é

considerado fundamental. Nesta interpretação as equações dinâmicas que relacionam o campo com a carga são expressas através do campo A^μ que representam que a fonte do campo potencial é a carga elétrica. O potencial vetor ainda relaciona-se com o campo eletromagnético, mas agora é $F^{\mu\nu}$ o campo auxiliar, não essencial. A lei de conservação da energia-momento do campo é escrita em função do campo potencial e a equação da continuidade não se modifica, uma vez que está relacionada apenas com a carga elétrica.

Nas duas maneiras de encarar o problema descritas acima, a descrição da teoria pode ser considerada completa com apenas um dos campos, sem que seja necessária qualquer referência ao outro.

3. Os campos elétrico e magnético e as densidades de carga e corrente podem ser considerados relevantes à interpretação da teoria. As relações e elementos importantes nesta interpretação estão representadas na Figura 4.

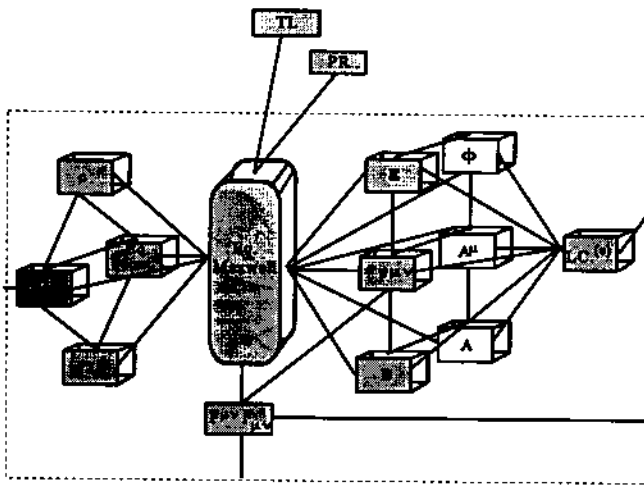


Figura 4 - Destaque para uma leitura onde as grandezas tridimensionais são relevantes

Neste caso, o campo eletromagnético $F^{\mu\nu}$ é associado às suas componentes, os campos elétrico \mathbf{E} e magnético \mathbf{B} . Analogamente, a descrição da carga, através do vetor $F^{\mu\nu}$, é decomposta em termos das densidades de carga ρ e de corrente \mathbf{J} .

Se o campo eletromagnético e a quadricorrente podem ser escritos em função das suas componentes, o mesmo ocorre com as Equações de Maxwell e a equação da continuidade. A lei de conservação do momento-energia do campo eletromagnético é escrita em função do vetor de Poynting, que representa a taxa de variação da energia do campo através do espaço; da densidade de energia do campo e do tensor de *stress* de Maxwell, que expressa a densidade do fluxo do momento do campo através de um elemento de superfície.

Considerando a ligação das equações de Maxwell com o Princípio da Relatividade (um dos princípios fundamentais) e com as Transformações de Lorentz (presentes na subestrutura da cinemática), representadas na figura 4, é possível ampliar o alcance desta interpretação do mapa. A relação entre o Princípio da Relatividade (P R), Transformações de Lorentz (T L) e Equações de Maxwell indica que, se as componentes do espaço-tempo forem modificadas através das transformações de

Lorentz, esta modificação propaga-se a toda a estrutura, por que as leis do eletromagnetismo obedecem o princípio da relatividade. Isto é, se coordenadas espaço-temporais são transformadas, o campo eletromagnético e a quadricorrente transformam-se também; e com estas transformações, as leis físicas do eletromagnetismo permanecem com a mesma forma por mudança de referencial.

Esta é a interpretação razoavelmente abrangente do mapa conceitual pois são considerados a maioria de seus elementos. Numa leitura mais completa poderiam ser considerados também o campo potencial e suas componentes. Esta interpretação é rica em significado pois o campo eletromagnético, por exemplo, pode ser imaginado como sendo o conjunto de dois outros campos que, por mudança de referencial, misturam-se um ao outro.

4. Uma outra possibilidade de estruturação do mapa conceitual seria dispensar, no contexto descrito no caso anterior, o campo $F^{\mu\nu}$ e a quadricorrente J^{μ} como conceitos independentes, ficando apenas com as suas componentes. Nesta situação tem-se, com o mesmo formalismo, duas visões da natureza bastante diferentes entre si. Neste caso alguns elementos do mapa ficariam transparentes, como mostra a Figura 5.

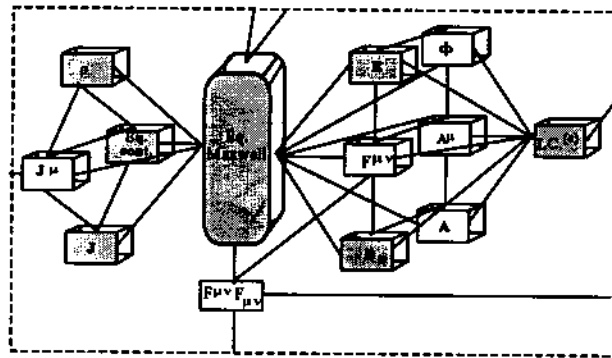


Figura 5 - Mapa conceitual envolvendo apenas os elementos tridimensionais

Nesta interpretação, os campos fundamentais são os campos elétrico e magnético, que estão relacionados às densidades de carga e corrente através de quatro equações de Maxwell; a equação da continuidade é expressa em termos das densidade de carga e corrente e há duas leis de conservação, uma para a energia e outra para o momento do campo eletromagnético.

Como foi visto no caso anterior, transformações do espaço-tempo refletem-se em toda a estrutura. Para que as Equações de Maxwell permaneçam da mesma forma em todos os referenciais inerciais, é necessário um canal de comunicação entre os campos elétrico e magnético e o mesmo ocorrendo com as densidades de carga e corrente.

6. Nas várias interpretações do mapa conceitual realizadas até aqui, variou-se a importância relativa de alguns conceitos, eliminou-se alguns elementos ou introduziu-se relações mas a teoria não foi mutilada. Assim, embora algumas interpretações possam ser mais ricas de significados que outras, todas elas são manifestações da Relatividade. Isto quer dizer que a teoria é compatível com uma certa classe de modificações de seus elementos e relações. É importante notar, entretanto, que nem todas as relações são dispensáveis e que não é qualquer elemento que pode ser eliminado. Por exemplo, caso uma interpretação do mapa considere apenas as relações mostradas na Figura 6, ela deixa de se referir à Teoria da Relatividade.

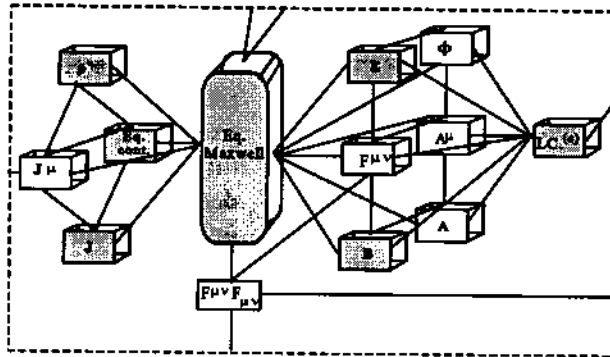


Figura 6 - Mapa Conceitual do Eletromagnetismo fora do contexto da TRR

O que caracteriza esta interpretação como não relativística é que a falta de relações entre os campos elétrico e magnético e entre as densidades de carga e corrente está associada ao desmembramento do Eletromagnetismo do restante da teoria. No mapa da TRR isso corresponde a uma ruptura nas linhas que ligam as equações de Maxwell com o princípio da relatividade e as transformações de Lorentz. Isto ocorre porque se os campos elétrico e magnético

não estiverem relacionados entre si, as equações de Maxwell não podem ser covariantes por transformações de Lorentz. Portanto, elas somente podem ser consideradas leis físicas fora do contexto da Relatividade.

Considerações Finais

A última interpretação da estrutura conceitual coincide com o eletromagnetismo

clássico, tal como apresentado nos cursos de graduação, onde os fenômenos eletromagnéticos são descritos apenas em um referencial fixo. Por isso, neste contexto, suas leis são perfeitamente satisfatórias sem que haja necessidade de haver a possibilidade de transformações recíprocas entre os campos elétrico e magnético. Comparando esta interpretação com aquelas discutidas anteriormente, fica clara a reestruturação do eletromagnetismo devida à Relatividade. Ela é percebida tanto através da existência de elementos representando conceitos novos, tais como o campo eletromagnético $F^{\mu\nu}$, a quadricorrente J^μ , o campo potencial A^μ , como através das relações indicando a possibilidade de comunicação entre os campos elétrico e magnético. A reestruturação é passível de ser percebida por considerar-se como um todo uma teoria reificada. É esta uma das vantagens de se tratar de modo estrutural o conhecimento da teoria, pois isto permite a comparação entre objetos relativamente estáveis. Se o acesso a esta teoria tivesse sido apenas em relação aos seus elementos, sem conhecer o conjunto de suas relações que dá origem ao todo, ficaria mais difícil perceber a sua reestruturação. No caso do Eletromagnetismo esta dificuldade seria amplificada pelo fato de suas equações fundamentais serem formalmente compatíveis nos contextos clássico e relativístico.

Em resumo, foi visto que o Eletromagnetismo pode ter diferentes interpretações, relacionadas às sub-estruturas identificadas na estrutura conceitual. Esta teoria pode manifestar-se em função apenas das descrições covariantes do campo eletromagnético ($F^{\mu\nu}$ e A^μ) e da carga elétrica (J^μ); em uma outra interpretação, os conceitos covariantes são associados às suas componentes (E , B , Φ ,

A , ρ , J), fazendo com que o mesmo ocorra com as suas leis básicas. A teoria ainda pode manifestar-se em função apenas das suas componentes, que são mais familiares. Isto faz com que não seja difícil associar a elas imagens de natureza bastante fortes. Nestas interpretações da teoria eletromagnética, o campo apresenta-se em diversas facetas, ora como campos elétrico e magnético, ora como campo eletromagnético, ora descrito como potenciais. A cada uma destas interpretações existe associada uma visão de mundo. Uma apresentação da teoria reflete uma determinada visão de mundo, resultado de uma opção de interpretação da estrutura.

Estas diferentes visões de mundo que o eletromagnetismo pode ter foram percebidas, no presente trabalho, através da investigação de vários livros que abordam o assunto. Cada autor apresenta uma faceta da teoria, caracterizada pelos elementos e relações que considera fundamentais. A existência de várias apresentações nos diferentes livros possibilitaram a construção deste mapa conceitual, que as reúne em um único conjunto, o mapa que representa a estrutura da teoria. A estrutura conceitual incorpora as várias visões de mundo da teoria e, por reuni-las em um só todo, ela transcende cada particular manifestação. A estrutura é a teoria tornada objeto. A procura deste objeto é um processo muito rico e pode ser realizada através da construção do mapa conceitual, como foi feito para o Eletromagnetismo.

Nota

1. Na dissertação de mestrado "Um Texto de Eletromagnetismo e Relatividade Baseado no Conhecimento Estrutural" - M. I. N. Ota - IFUSP/FEUSP - 1985 - é apresentado um mapa da TRR.

Referências Bibliográficas

- Feynman, R. P.; Leighton, R. B. e Sands, M. (1972). *Lectures on Physics, Mainly Electromagnetism and Matter*. Fondo Educativo Interamericano S. A.
- Jackson, J. (1975). *Classical Electrodynamics*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Kittel, C.; Knight, W. D. e Ruderman, M. A. (1973). *Curso de Física de Berkeley, Vol. 1 Mecânica*. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda.
- Kuhn, T. S. (1975). *A Estrutura das Revoluções Científicas*. São Paulo: Ed. Perspectiva.
- Landau, L. e Lifshitz, E. (1980). *Teoria de Campo*. Moscou: Mir.
- Moller, C. (1972). *The Theory of Relativity*. Oxford: Clarendon Press.
- Muirhead, H. (1973). *The Special Theory of Relativity*. London: The Macmillan Press Ltd.
- Ota, M. I. N. (1985). Um Texto de Eletromagnetismo e Relatividade Baseado no Conhecimento Estrutural. Dissertação de Mestrado, IFUSP/FEUSP, São Paulo.
- Purcell, E. M. (1973). *Curso de Física de Berkeley, Vol. 2 Eletricidade e Magnetismo*. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda.
- Reitz, J. R.; Milford, F. J. (1975). *Foundations of Electromagnetic Theory*. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company.
- Resnick, R. (1971). *Introdução à Relatividade Especial*. São Paulo: EDUSP-Polígono.
- Rindler, W. (1966). *Special Relativity*. Edinburgh: Oliver and Boyd Ltd.
- Robilotta, M. R. (1985). *Construção e Realidade no Ensino de Física*. São Paulo: IFUSP.
- Ugarov, V. A. (1979). *Special Theory of Relativity*. Moscou: Mir Publishers.
- Wheeler, J. A. e Taylor, E. (1966). *Spacetime Physics*. San Francisco: W. H. Freeman and Company.