

MATERIAIS E MÉTODOS

UM POUCO DE LUZ NA LEI DE GAUSS

Carla Goldman, Eliana Lopes e Manoel R. Robilotta

Instituto de Física - USP

I. Introdução

O estudo da lei de Gauss eletrostático constitui uma parte importante dos cursos de eletromagnetismo básico de nível universitário. Entretanto, os textos em português frequentemente adotados, embora formalmente corretos, deixam muito a desejar no que se refere à discussão de certos aspectos importantes desse tópico⁽¹⁾. Como consequência, torna-se difícil a apropriação efetiva, por parte do estudante, do conteúdo desses textos, ou seja, ele aprende, mas não sabe.

A abordagem didática da lei de Gauss eletrostática começa, tipicamente, pela introdução do conceito de fluxo de um vetor, particularizado para o caso do campo elétrico. Em seguida, é deduzida a lei de Gauss na forma integral para o caso de uma partícula puntiforme no centro de uma superfície esférica. O passo seguinte consiste em mostrar que a lei integral não muda se a forma da superfície gaussiana for alterada e, também, que cargas externas a ela não contribuem para o fluxo total. Finalmente, por meio do princípio da superposição, a lei é generalizada para o caso de uma distribuição de cargas qualquer.

Deste modo, diferindo apenas quanto a peculiaridade do estilo, os livros-texto examinados chegam à lei de Gauss na forma integral, que no sistema MKS pode ser escrita como:

$$\phi_E \equiv \int_S \vec{E} \cdot \vec{n} ds = \frac{q_{int}}{\epsilon_0}$$

onde ϕ_E é o fluxo do campo elétrico através da superfície fechada S , e q_{int} representa a carga elétrica total encerrada por essa superfície.

Sabemos que uma lei física corresponde a um certo modo de conceber a natureza. Os livros-texto, entretanto, ao tratar a lei de Gauss, se ocupam muito pouco com esse aspecto. Sua preocupação maior consiste em aplicá-la a determinadas situações como, por exemplo, no cálculo do campo elétrico criado por distribuições de cargas tais como pla

nos e fios infinitos, esferas e outras. Nesses cálculos menciona-se frequentemente o tema simetria, sem entretanto explicitar se ela se refere ao campo, às cargas ou à superfície gaussiana.

Hã, portanto, diversos pontos relacionados à lei de Gauss que não são devidamente abordados pelos livros-texto. Essas falhas comprometem gravemente a possibilidade de compreensão pelos estudantes dos seguintes aspectos dessa lei:

- a visão da natureza associada a ela
- a sua validade
- a sua utilidade.

Estes aspectos são discutidos na seção seguinte, de modo a evidenciar a possibilidade do uso de uma analogia entre cargas elétricas e lâmpadas, para fins didáticos⁽²⁾, que será explorada nas seções III e IV.

II. A lei de Gauss

A lei de Gauss para o campo eletrostático pode, no caso de uma carga puntiforme, ser deduzida a partir da lei de Coulomb por manipulações puramente matemáticas. Para distribuições de carga, ambas as leis podem ser generalizadas por meio do princípio da superposição. Assim, no caso eletrostático, a lei de Gauss tem caráter de teorema. Contudo, é conveniente ressaltar que ela também é válida quando o campo elétrico depende do tempo, o que não acontece com a lei de Coulomb.

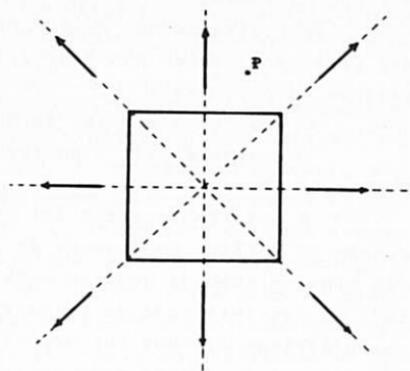
A dedução da lei de Coulomb a partir da lei de Gauss só pode ser feita, entretanto, com o auxílio de hipóteses adicionais. Na forma integral, por exemplo, isso ocorre porque a lei de Gauss contém in formação somente a respeito da componente do campo elétrico normal à superfície gaussiana, por ser esta a única a contribuir para o fluxo.

No caso geral, o campo de Coulomb pode ser obtido a partir da lei de Gauss suplementada pela hipótese de que o campo eletrostático é conservativo, que corresponde a uma situação particular da lei de Faraday. Existem, então, dois modos, equivalentes do ponto de vista físico, para calcular o campo eletrostático.

LEI DE COULOMB > CAMPO ELETROSTÁTICO
LEI DE GAUSS + CAMPO CONSERVATIVO

Hã situações, entretanto, em que a direção do campo elétrico pode ser inferida diretamente a partir da distribuição de cargas. Isso ocorre quando esta exibe algum tipo de simetria pois, então, a direção do campo ao longo dos eixos de simetria coincide com a direção

dos mesmos. Por exemplo, se a superfície quadrada abaixo estiver uniformemente carregada, o campo elétrico ao longo das linhas pontilhadas será paralelo às mesmas. No ponto P, contudo, por onde não passa um eixo de simetria, é impossível conhecermos a direção do campo elétrico sem algum tipo de cálculo quantitativo. Deste modo, se o quadrado for envolvido por uma superfície gaussiana, não será possível saber a priori a direção do campo em todos os seus pontos, mas sim, em apenas alguns deles.



Em um problema de eletrostática o conhecimento prévio da direção do campo elétrico em todos os pontos de uma região do espaço é útil, porque permite a construção de uma superfície gaussiana tal que, em cada ponto, sua normal seja paralela ao campo. A lei de Gauss, então, passa a conter informação sobre o módulo do campo elétrico.

Assim, nos casos em que há simetria, temos à nossa disposição um terceiro método de cálculo do campo elétrico, usando-se a simetria para determinar a sua direção e a lei de Gauss para determinar o seu módulo.

Os métodos de cálculo do campo elétrico usando a lei de Coulomb, a lei de Gauss complementada pelo fato de o campo ser conservativo ou por sua simetria, quando isso é possível, são fisicamente equivalentes. Entretanto, as características matemáticas desses métodos são diferentes, sendo este o critério que faz com que um deles possa ser mais conveniente que os outros em uma dada aplicação.

Esse caráter unitário das leis de Gauss e Coulomb é um dos aspectos menos enfatizados nos livros-texto. Mais do que isso, suas estruturas são de tal modo compartimentadas e as aplicações tão dirigidas que o estudante é induzido a se esquecer da validade simultânea das duas leis. Esse fato fica evidente quando se propõe ao aluno um problema de cálculo do campo eletrostático sem se especificar a lei que deve ser usada na sua solução. Ele fica, então, sem saber qual a lei válida no caso em questão. Esse é um falso dilema pois, em problemas de eletrostática, são simultaneamente válidas as leis de Coulomb e Gauss, sendo que o problema está em saber qual delas permite o cálculo do campo mais facilmente.

Os livros-texto, deste modo, não conduzem os estudantes a distinguir a utilidade da lei de Gauss de sua validade. A correção des-

ta distorção requer a intervenção do professor, o mesmo acontecendo com o desenvolvimento, por parte dos alunos, da habilidade em identificar as situações em que é conveniente o uso da lei de Gauss para o cálculo do campo.

Acreditamos que a apropriação do conhecimento desse assunto por parte dos alunos não ocorre se eles não sabem responder com desenvoltura às perguntas:

- quando vale a lei de Gauss?
- quando é útil o emprego da lei de Gauss na solução de problemas?

A primeira questão foi abordada anteriormente, quando da discussão do caráter de teorema da lei de Gauss eletrostática. A reflexão sobre a segunda questão pode ser estimulada, por exemplo, pelo estudo da possibilidade de se usar a lei de Gauss nos cálculos dos campos elétricos criados por uma esfera e um cubo, ambos uniformemente carregados. O professor pode solicitar ao aluno que explique em que casos a lei de Gauss é válida; a direção do campo pode ser conhecida a priori; é possível achar uma superfície gaussiana na qual o módulo do campo seja constante; é fácil achar tal superfície; é conveniente o cálculo do campo pela lei de Gauss.

A concepção da natureza implícita na lei de Gauss também é abordada de maneira deficiente nos livros-texto. Na sua forma integral ela afirma que o fluxo do campo elétrico através de uma superfície fechada é proporcional à carga interna à mesma. Essa proporcionalidade entre o fluxo e a carga interna permite que esta última possa ser interpretada como sendo a causa do fluxo. Neste sentido as leis de Gauss e Coulomb são equivalentes, pois ambas guardam a idéia de que a carga é a fonte ou causa do campo eletrostático.

Uma interpretação mais sutil da lei de Gauss está associada ao fato de os fluxos do campo através de diferentes superfícies fechadas envolvendo a mesma carga serem iguais. Matematicamente, esta propriedade é consequência de a força de Coulomb ser proporcional ao inverso do quadrado da distância. Para interpretar fisicamente este fato convém lembrar que uma dada superfície gaussiana envolve, além da carga interna a ela, o meio que a circunda. Quando a carga está no vácuo, esse meio é o espaço vazio. Diferentes superfícies gaussianas contendo uma mesma carga envolvem diferentes quantidades de espaço, mas isso não influi sobre o fluxo. Assim, o fluxo do campo através de uma superfície fechada não pode depender da quantidade de espaço encerrado por essa superfície. Em outras palavras, o espaço vazio não cria nem sorve campo elétrico.

A fim de mostrar aos alunos que essa interpretação física não é tão óbvia como pode parecer à primeira vista, o professor pode sugerir

rir que eles determinem as consequências de "leis de Coulomb" alternativas. Uma dessas "leis" poderia, por exemplo, descrever um mundo onde a força entre as cargas elétricas fosse proporcional ao inverso do cubo da distância. Não é difícil ver que neste mundo o espaço vazio funcionaria como um sorvedouro de campo elétrico, pois o seu fluxo diminuiria com a distância à carga.

Um outro aspecto da lei de Gauss que, em geral, não é suficientemente discutido é o da identificação do símbolo \vec{E} que aparece na expressão matemática da lei. É claro que \vec{E} representa um campo elétrico; o problema consiste em saber que campo elétrico é esse. É comum que os estudantes tenham dúvidas se \vec{E} representa o campo criado pelas cargas internas à superfície gaussiana ou se é o campo devido a todas as cargas porventura existentes no sistema. Esse tipo de dúvidas é alimentado pelas aplicações da lei de Gauss encontradas nos livros. Por exemplo, no cálculo do campo de uma carga puntiforme, \vec{E} descreve o campo criado pela carga interna à superfície gaussiana. Já no caso do campo de um plano infinito, \vec{E} descreve o campo criado por todas as cargas do sistema. A intervenção do professor é também necessária aqui, para fazer ver aos alunos que não existe contradição nessas aplicações.

III. A Luz e a Lei de Gauss

Existem alguns aspectos análogos entre os raios de luz emitidos por uma lâmpada pequena e as linhas de campo criadas por uma carga puntiforme. Essa analogia parcial pode ser utilizada para fins didáticos, no ensino da lei de Gauss, sendo conveniente explorar os seguintes aspectos:

- tanto as linhas de campo criadas por uma carga puntiforme como os raios de luz emitidos por uma lâmpada pequena são isotropicamente distribuídos no espaço.
- ambos partem radialmente da fonte.
- o espaço vazio não cria nem absorve linhas de campo ou raios de luz. Assim, nos dois casos, há uma variação da intensidade com o inverso do quadrado da distância à fonte.
- tanto linhas de campo como raios de luz obedecem ao princípio da superposição.

Deste modo, pela identificação de cargas com lâmpadas e de linhas de campo com raios de luz é possível a discussão de uma lei de Gauss "luminosa", em analogia à lei de Gauss elétrica. Antes de se explorar essa analogia, entretanto, é preciso ressaltar que há aspectos importantes em que a analogia entre raios de luz e linhas de cam-

po deixa de ser válida e que devem ser discutidos com os estudantes. Como exemplos, podem ser citados:

- a luz exibe propriedades ondulatórias, o que não acontece com o campo eletrostático. Assim, a analogia só é boa na medida em que a luz é tratada geometricamente.

- quando se faz referência ao fluxo de luz através de uma superfície, há efetivamente algo passando de um lado a outro. Já no caso do campo eletrostático, nada passa através da superfície.

- lâmpadas podem ser desligadas, mas cargas não.

- a lâmpada é análoga a uma carga positiva, não há nada análogo a cargas negativas.

A analogia entre lâmpadas e cargas elétricas permite a discussão dos seguintes aspectos relativos às duas leis de Gauss.

1. Fluxo: uma lâmpada e uma folha de papel podem motivar a discussão do conceito de fluxo de raios de luz através de uma superfície. Nesse caso, a iluminação do papel serve como uma medida do fluxo, permitindo que sejam salientados os seguintes pontos:

- a importância da orientação do papel relativamente aos raios de luz. Quando o papel está paralelo aos raios ele não é iluminado; quando ele está perpendicular, a iluminação é máxima.

- o fluxo também depende da intensidade da luz. Assim, o papel será tanto mais iluminado quanto mais próximo da fonte ele estiver.

A discussão desses pontos possibilita aos estudantes entenderem porque o fluxo do campo elétrico \vec{E} através de um elemento de superfície ds cuja normal é \vec{n} é dado por:

$$d\phi_E = \vec{E} \cdot \vec{n} ds$$

2. A neutralidade do espaço e a variação com o inverso do quadrado da distância: a idéia que o espaço vazio não emite nem absorve luz, que é bastante conhecida, pode ser usada para motivar a discussão do significado da dependência da lei de Coulomb com o inverso do quadrado da distância.

A intensidade da luz emitida por uma lâmpada pequena varia com o inverso do quadrado da distância porque os raios por ela emitidos se distribuem isotropicamente segundo todas as direções do espaço, onde se propagam livremente. Essa propriedade do espaço faz com que duas superfícies esféricas com centro na fonte de luz, sendo uma delas de raio pequeno e outra de raio grande, sejam atravessadas pelos mesmos raios de luz. Entretanto, a densidade de raios de luz, definida como

o número de raios de luz por unidade de área, é maior na esfera menor, uma vez que aí os raios de luz estão concentrados em uma área menor. Como essa área cresce com o quadrado do raio da esfera, a intensidade da luz diminui com o quadrado da distância à fonte. Tal dependência é idêntica à do campo elétrico criado por uma carga puntiforme, enfatizando a analogia entre raios de luz e linhas de força.

Neste ponto, é importante que o professor oriente os alunos no sentido de fazê-los notar que é a "quantidade" de raios de luz o fator relevante à nossa percepção de que um objeto é mais ou menos iluminado. Assim, por exemplo, um livro colocado próximo a uma lâmpada fica mais iluminado do que quando é colocado longe dela porque próximo à lâmpada a densidade de raios de luz é grande, fazendo com que um grande número de raios incida sobre o livro.

A discussão acima mostra que a dependência da intensidade da luz com o inverso do quadrado da distância é consequência de sua propagação no espaço ser livre, o que permite que um raio de luz emitido pela lâmpada chegue até o infinito. Em outras palavras, não existem raios de luz que "nasçam" ou "morram" no espaço livre.

Para tornar esta idéia mais clara, é interessante a discussão de um exemplo de luz se propagando na neblina. Neste caso, o número total de raios que atravessa uma superfície esférica com centro na lâmpada diminui à medida que o seu raio aumenta, pois agora o meio no qual a luz se propaga tem a propriedade de absorvê-la. Isso faz com que a intensidade da luz diminua com a distância à fonte mais rapidamente que com o inverso do quadrado, o que pode ser facilmente percebido pelos alunos, dada a sua familiaridade com o fenômeno.

A analogia entre o campo elétrico e a intensidade da luz facilita a compreensão das propriedades elétricas do espaço vazio. No caso do campo elétrico a dependência com o inverso do quadrado da distância, que é observada experimentalmente, significa que o espaço vazio não absorve nem cria esse campo. Essa característica pode ser ressaltada ao se considerar uma situação hipotética em que isso não aconteça. Por exemplo, o espaço vazio não seria eletricamente neutro num universo onde o campo elétrico criado por uma carga puntiforme variasse com o inverso do cubo da distância. Neste caso, ter-se-ia

$$\vec{E} = k \frac{q}{r^3} \left(\frac{\vec{r}}{r} \right)$$

e o fluxo desse campo através de uma superfície esférica de raio R e com centro na carga seria dado por:

$$\begin{aligned}\phi_E &\equiv \int_s \vec{E} \cdot \vec{n} \, ds = \int_s k \frac{q}{R^3} R^2 \sin\theta \, d\theta \, d\phi \\ &= \frac{1}{R} 4\pi kq\end{aligned}$$

Conclui-se, então, que neste caso o fluxo diminuiria com o aumento de R , mostrando que o espaço atuaria como um sorvedouro de campo elétrico.

Essa discussão permite ao estudante verificar a estreita conexão entre a dependência do campo elétrico com o inverso do quadrado da distância, a neutralidade do espaço vazio e a constância do fluxo desse campo através de qualquer superfície que envolva a carga que o produz.

3. *A formulação da lei de Gauss:* a lei de Gauss propriamente dita, que trata do fluxo devido a cargas externas e internas a uma superfície fechada, pode ser mais facilmente compreendida a partir das idéias desenvolvidas no item anterior.

A lei de Gauss para a eletrostática afirma que o fluxo através de uma superfície fechada do campo criado por cargas externas a ela é nulo. O mesmo acontece no caso da luz; pode-se considerar, por exemplo, uma caixa de vidro fino e transparente que esteja entre uma fonte de luz e um observador. Se não houver lâmpadas internas a esta superfície, a luz que chega a ele é a luz que saiu da fonte, entrou na caixa, atravessou o espaço contido no seu interior, saiu dela e atingiu o observador. Assim sendo, o que é visto pelo observador não depende da caixa estar entre ele e a fonte mostrando que o fluxo total de luz através da caixa é nulo. A razão do mesmo comportamento ser verificado no caso do campo elétrico também se deve ao fato de o espaço não interagir com esse campo.

Quando se considera uma superfície fechada contendo uma carga elétrica, a lei de Gauss afirma que o fluxo do campo elétrico através dela é proporcional à carga e não depende da forma da superfície. Algo análogo ocorre no caso da luz, como pode ser visto ao se considerar o caso em que a caixa de vidro do exemplo anterior envolve algumas lâmpadas. Agora, o fluxo de luz através da caixa é não nulo, pois só há luz indo de dentro para fora. Além disso, a "quantidade" de raios de luz que sai da caixa é proporcional ao número de lâmpadas contido em seu interior. Por fim, o fato de o fluxo independe da forma da superfície é explicado novamente pela propagação livre de raios de luz através do espaço vazio. No caso do campo elétrico é a neutralidade do espaço que explica essa independência entre o fluxo e a forma da superfície.

4. *A imagem do surgimento do campo*: até o momento, foram enfatizados os aspectos análogos entre luz e campo elétrico. É importante salientar, entretanto, que essa analogia não é total; a discussão das suas limitações pode, também, ser utilizada para aprofundar o entendimento do assunto.

Um primeiro aspecto em que essa analogia é apenas parcial refere-se à existência de dois tipos de cargas elétricas, positivas e negativas, e somente um tipo de lâmpadas. Deste modo, fica impossível a existência de sistemas tais como "dipolos luminosos".

O segundo aspecto a ser ressaltado refere-se aos diferentes modos como a luz e o campo eletrostático podem vir a ocupar uma certa região do espaço. Ao se acender uma lâmpada ocorre a propagação da luz por ela emitida em todas as direções, ocupando regiões previamente escuras. Por outro lado, no que tange ao campo elétrico, não ocorre o surgimento de linhas de campo, pois estas são eternas. Ou seja, a carga sempre provoca uma alteração de todo o espaço.

Essa idéia não é, em geral, discutida nos livros-texto. Isto, associado ao fato de o estudante estar habituado a "criar" cargas no desenho esquemático em seus problemas de eletromagnetismo, o induz à não percepção de que elas já existiam anteriormente à formulação dos problemas. Desta forma, pode-se esquecer que a conservação da carga elétrica implica na existência de linhas de campo eternas.

A discussão precedente leva à questão de como ocorre a ocupação de uma certa região do espaço por linhas de campo. Por exemplo, quando uma caneta de plástico previamente atritada a um pedaço de tecido é aproximada de pequenos pedaços de papel, nota-se que estes são atraídos por ela. Pode-se pensar, então, que o atrito tenha criado campo elétrico. O que ocorre (durante o atrito), entretanto, é apenas uma redistribuição da carga elétrica e a consequente redistribuição das linhas de campo no espaço. Durante essa redistribuição cada carga arrasta consigo suas linhas de campo*. Em resumo, linhas de campo não se propagam; o que pode se propagar é a informação a respeito de eventuais mudanças na posição da carga elétrica.

Esta diferença entre o comportamento de raios de luz e linhas de campo faz com que o emprego da palavra fluxo em ambos os casos tenha significados distintos. No caso da luz, há realmente algo passando de um lado a outro da superfície considerada. O campo elétrico, por outro lado, não flui; apenas "espeta" estaticamente a superfície.

5. *O papel da simetria*: para encerrar a discussão do uso da luz no ensino da lei de Gauss eletrostática, vamos analisar em que con

* Uma discussão de como cargas elétricas em movimento arrastam consigo suas linhas de campo pode ser encontrada no Berkeley...

dições esta lei é útil para o cálculo do campo elétrico criado por distribuição de cargas. Este cálculo consiste de duas partes: na primeira, usamos a lei de Gauss para conhecer o fluxo do campo elétrico através de uma superfície gaussiana; em seguida, precisamos extrair informações sobre o campo a partir desse conhecimento do fluxo.

A primeira parte não apresenta maiores problemas, pois ela se resume ao cálculo da carga interna à superfície gaussiana, uma vez que

$$\phi_E = \frac{q_{int}}{\epsilon_0}$$

Nem sempre, entretanto, existe solução para a segunda parte, que consiste em conhecer o campo elétrico num dado ponto a partir do conhecimento do fluxo ou, equivalentemente, a partir do campo elétrico normal médio sobre a superfície, dado por

$$\bar{E} = \frac{\phi_E}{S} = \frac{\int_S \vec{E} \cdot \vec{n} \, ds}{S}$$

O problema, neste caso, advém do fato de desejarmos calcular \vec{E} num dado ponto a partir do conhecimento de uma grandeza relativa a toda a superfície, como é o caso do fluxo.

A analogia entre raios de luz e linhas de campo pode ajudar os estudantes a perceber a natureza deste problema. Imaginemos, por exemplo, que soubéssemos que 300 raios de luz incidem sobre uma superfície de 30cm^2 e desejássemos saber quantos raios de luz atravessam um buraco de 1cm^2 sobre ela. Neste caso, nada nos permite afirmar que 10 ou outro número qualquer de raios de luz atravessa o buraco, uma vez que não sabemos de que modo os 300 raios estão distribuídos pela superfície.

Um problema semelhante a este seria o de procurarmos saber a idade de uma pessoa num grupo de 10, sabendo que a soma das idades de todas as pessoas é 200 anos. Neste caso, apesar de sabermos que a idade média das pessoas é 20 anos, não podemos conhecer a idade de uma pessoa em particular. Um problema deste tipo somente tem solução se houver alguma informação adicional acerca das idades dos diversos indivíduos. Por exemplo, se soubermos além da soma das idades, que todas as pessoas têm a mesma idade, então poderemos afirmar que cada uma tem 20 anos.

O problema do cálculo, por meio da lei de Gauss, do campo elétrico criado por uma distribuição de cargas é totalmente análogo a esses exemplos, uma vez que desejamos saber o valor do campo em cada pon

to a partir do conhecimento de seu valor médio. Isto só é possível quando utilizamos uma superfície gaussiana que possua trechos normais ao campo e ao longo dos quais seu módulo seja constante. Quando a primeira propriedade é satisfeita, temos:

$$\bar{E} = \frac{\oint E}{S} = \frac{1}{S} \int_S \vec{E} \cdot \vec{n} \, ds = \frac{1}{S} \int_S E \, ds$$

A segunda propriedade permite-nos escrever

$$\bar{E} = \frac{1}{S} \int_S E \, ds = \frac{E}{S} \int_S ds = E$$

Vemos, então, que neste caso o campo médio \bar{E} e o campo num dado ponto são iguais. Finalmente, a lei de Gauss determina o valor do módulo do campo:

$$E = \frac{1}{S} \frac{q_{int}}{\epsilon_0}$$

O vetor campo elétrico num ponto é obtido multiplicando-se o valor acima pelo versor normal à superfície gaussiana naquele ponto.

Esta discussão evidencia que o problema de calcular o campo elétrico usando lei de Gauss somente é solúvel quando for possível encontrar uma superfície gaussiana com as características mencionadas acima. Este aspecto do problema é, em geral, difícil de ser aprendido pelos estudantes.

A analogia entre raio de luz e linhas de campo elétrico pode, deste modo, ser usada para ensinar os estudantes a perceber em problemas o uso da lei de Gauss é conveniente. Para tanto, poderiam ser escolhidas diversas fontes de luz tais como uma lâmpada puntiforme, duas lâmpadas puntiformes, uma lâmpada fluorescente (cilindro longo), uma janela e, em seguida, propor aos estudantes que tentassem determinar para cada uma delas a superfície conveniente à aplicação da lei de Gauss. O problema elétrico seria totalmente análogo.

IV. Conclusão

Muitas vezes, ao término de um curso, alunos e professores compartilham a sensação de que o árduo trabalho desenvolvido não foi plenamente recompensado; que não se aprendeu o suficiente. Essa sensação

existe ainda que ambas as partes possam reconhecer que o curso tenha levado aos estudantes muitas informações novas e que estas tenham sido devidamente reproduzidas em provas e exercícios. O curso parece in formar aos estudantes da existência de uma série de conhecimentos, mas estes, por algum motivo, não se tornam operacionais, não são efetivamente apropriados. Sente-se que o conhecimento assim adquirido não se sustenta sobre pernas próprias, não permitindo que o pensamento ande livremente.

Existem muitos aspectos que contribuem para esta situação. Um dentre eles consiste na apresentação fragmentada do corpo de conhecimentos da física, fragmentação essa que aparece tanto na relação entre os diversos cursos como no interior de um único curso. O resulta do dessa falta de unidade não pode ser outro que a impotência perante o conhecimento. O reparo desta falha requer, evidentemente, uma rees truturação ampla do currículo de física, sendo portanto apenas exe quível por uma equipe de professores e alunos.

Outras causas da não apropriação do conhecimento pelos estu dantes podem ser situadas em níveis mais modestos, ainda que não menos importantes. Uma delas, por exemplo, deve-se ao fato de, em ge ral, não haver uma preocupação explícita por parte do professor em trans mitir aos estudantes uma imagem da natureza, ou seja, um sentimento de que a natureza é de um jeito e não de outro. É importante que uma ima gem da natureza esteja associada ao conhecimento físico, principalmente no período de formação do estudante, porque ela está intimamente ligada ao que se entende por intuição física. Ela pode, por conse quinte, servir como um ponto de referência que transcenda a formu lação matemática das leis físicas. A unidade do conhecimento passa a ser possível, então, como consequência da unidade do objeto estudado.

Poder-se-ia objetar a um conhecimento físico fortemente apoi a do em uma imagem da natureza argumentando-se que com isso poder-se-ia estar sugerindo a sua imutabilidade ou impossibilidade de evolução. O que ocorre, na verdade, é exatamente o contrário, pois a existência de uma imagem da natureza tem papel importante no processo evolutivo que pode culminar com sua substituição por uma outra. Em outras palavras, para que uma visão do mundo possa mudar, é preciso que ela exista.

No presente artigo tentou-se explicitar alguns aspectos da ima gem da natureza associada à lei de Gauss eletrostática. Dois deles, em particular, mereceram especial atenção: a concepção de vácuo impli citamente contida na lei e a eternidade das linhas de campo. No que tange à apresentação desses aspectos aos estudantes, mostrou-se que a compara ção entre as características de cargas elétricas e fontes de luz pode ser bastante útil.

A relação entre a validade e a utilidade da lei de Gauss eletrostática também foi discutida aqui, uma vez que tal discussão, quando levada aos estudantes, favorece a apropriação desse corpo de conhecimento. Neste caso, novamente, mostrou-se que o estudo de uma "lei de Gauss luminosa" pode vir a facilitar a compreensão da lei eletrostática, em particular no que diz respeito à escolha de superfícies gaussianas.

Acreditamos que o tratamento de um tópico da física, particularizado neste trabalho para o caso da lei de Gauss, possa e deva ser estendido para outras áreas. Isso possibilitaria que os estudantes se apropriassem efetivamente dos conhecimentos a eles ministrados.

REFERÊNCIAS

- (1) - R. Resnick e D. Halliday - Física, vol. 3, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1980.
 - M. Alonso e E. Finn - Física, vol. 2, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1972.
 - P.A. Tipler - Física, vol. 2, Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1978.
 - J.P. Mc Kelvey e H. Grotch - Física, vol. 3, Harper & Row do Brasil, São Paulo, 1979.
 - E.M. Purcell - Curso de Física de Berkeley, vol. 2, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1973.
- Este livro constitui uma notável exceção em relação aos demais, não sendo aplicáveis a ele muitas das críticas colocadas no presente artigo.
- (2) A utilização didática da analogia entre cargas elétricas e fontes de luz aparece também em "The Feynman Lectures on Physics" - R.P. Feynman, R.B. Leighton e M. Sands, Addison-Wesley, Massachusetts, 1964.