

ELECTRODINÂMICA FLUÍDICA: INTERPRETAÇÃO DAS FORÇAS ELECTROMAGNÉTICAS E DE INÉRCIA EM TERMOS HIDROMECAÑICOS

ALEXANDRE A. MARTINS

Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear - Instituto Superior Técnico de Lisboa

RESUMO

Este artigo irá tentar fornecer uma interpretação física das forças electromagnéticas e de inércia, mostrando um paralelo entre a equação da força electromagnética para uma partícula carregada e a equação da força hidrodinâmica para uma massa que se move imersa num fluido perfeito. As semelhanças entre estas duas equações contém evidências de que o vácuo se comporta como um fluido perfeito e de que as forças electromagnéticas e de inércia podem ser interpretadas como tendo a sua origem em gradientes de pressão neste fluido que constitui o vácuo, o qual ganha um significado físico muito forte no contexto desta teoria. É mostrado que o vector potencial criado por uma partícula carregada em movimento age como a velocidade deste fluido. A interacção entre uma partícula e o fluido que a rodeia dá origem às propriedades observadas da inércia e do aumento relativista da massa. A derivada temporal do vector potencial gera a força de reacção de inércia com a aceleração, e a derivada convectiva do vector potencial está relacionada com o aumento relativista da massa com a velocidade. De forma correspondente, é demonstrado que a força de resistência exercida numa partícula que se move num fluido perfeito produz dois efeitos: resistência à aceleração e um aumento da massa com a velocidade, consequência do arrastamento do fluido pela partícula. Esta nova perspectiva sobre a origem física das forças electromagnéticas e de inércia representa uma via promissora na criação de novos conceitos de propulsão.

1. INTRODUÇÃO

Este artigo irá desenvolver e definir a teoria e aplicação da electrodinâmica fluídica. Inicialmente o termo “fluídica” foi introduzido – com um fim em analogia com “electrónica” – dirigido principalmente para os sistemas de controlo hidráulico e pneumático que usam fluidos em vez de electrões para a transmissão e processamento de sinais. De forma geral envolve técnicas para lidar com os fluxos de fluido, a geração do fluxo (bombas), a sua canalização em condutas ou canais e (o mais importante) o controlo do fluxo (Zimmerman, 2006). Assim, a electrodinâmica fluídica significa a geração e manipulação do fluxo hidrodinâmico do vácuo ou do espaço-tempo através do uso das interacções e forças electromagnéticas, com o objectivo de controlar esse fluxo.

James Clerk Maxwell criou um modelo hidrodinâmico empírico do electromagnetismo enquanto desenvolvia as suas equações electromagnéticas, a *teoria dos vórtices moleculares*, a qual pretendia dar um significado físico às forças electromagnéticas com base num modelo físico hidrodinâmico (Maxwell, 1861; Siegel, 2002). Na sua teoria, o campo magnético é representado por vórtices de fluido em rotação, cuja velocidade rotacional é equivalente ao vector potencial magnético.

Mais recentemente vários autores tentaram construir modelos hidrodinâmicos parciais ou interpretações do electromagnetismo. Kaufman (1970a, 1970b) fornece uma abordagem hidrodinâmica da massa de um electrão clássico e do campo electromagnético relativista. Marmanis (1996, 1998a, 1998b) desenvolveu uma analogia entre a turbulência hidrodinâmica e o electromagnetismo, mas sem tentar retirar qualquer significado físico.

Vários autores ligaram o vácuo ou a energia do ponto zero com a hidrodinâmica. Froning (1989, 2003), Froning e Roach (2002, 2007) relacionam a dinâmica dos fluidos com os campos do ponto zero como tendo propriedades semelhantes, e Kelly (1976) mostrou como as equações do electromagnetismo no vácuo podem ser derivadas exclusivamente a partir das propriedades de um fluido ideal. Para mais, Culetu (1994), Volovik (2001), Alvarenga e Lemos (1998), Huang e Wang (2006) trataram o vácuo e fenómenos cosmológicos como um superfluido. De forma equivalente, Jacobson e Parentani (2005) sugeriram que o espaço-tempo pode ser um tipo de fluido com as propriedades de um éter, e Jacobson (1999) mostrou que partículas com a massa de Planck formam a espuma quântica de Planck-Wheeler do espaço-tempo, uma espécie de “átomos” do espaço-tempo que formam um vácuo físico com características de um fluido. Outros autores também tentaram fornecer interpretações físicas do electromagnetismo. Wang (2008) derivou as equações de Maxwell com base num modelo mecânico contínuo do vácuo numa tentativa de extrair algum significado físico. Christov (2007) relaciona um meio viscoelástico incompressível com as equações de Maxwell.

A teoria derivada neste artigo é muito diferente das teorias mencionadas anteriormente e segue directamente o caminho original de Maxwell, mas por um trajecto diferente. De forma a comparar as equações hidrodinâmicas e electromagnéticas, temos que escolher as equações válidas e próprias em cada campo. Existem muitas versões diferentes para a equação de força electromagnética (Heaviside, 1912; Trammel, 1964; Calkin, 1966; Breitenberger, 1968; Konopinski, 1978; Jefimenko, 1989; Carpenter, 1989, 2006; Phipps, 1993, 1998; Semon e Taylor, 1996). Tendo em conta o formalismo Lagrangeano, podemos encontrar a equação correcta que fornece a força total numa partícula carregada usando a equação de Euler-Lagrange (Breitenberger, 1968; Konopinski, 1978; Semon e Taylor, 1996; Martins, 2009a):

$$\frac{d}{dt}(m\mathbf{v} + q\mathbf{A}) = -q\nabla V + \nabla_{\mathbf{A}}(q\mathbf{v} \cdot \mathbf{A}). \quad (1)$$

Onde m é a massa da partícula, q é a carga da partícula, \mathbf{v} é a velocidade da partícula, e V é o potencial eléctrico. O operador de divergência $\nabla_{\mathbf{A}}$ age somente no vector potencial magnético \mathbf{A} . O momento canónico $m\mathbf{v} + q\mathbf{A}$ é a quantidade do momento associada geralmente à partícula.

Os termos à direita dependem do gradiente da energia de interacção total (Martins, 2009a) entre a partícula de interesse e as partículas e campos envolventes. Breitenberger (1968) mostrou como a força de Lorentz não obedece à terceira lei de Newton e que o momento Newtoniano não é a quantidade conservada. Somente o momento canónico total será a quantidade conservada preservando a terceira lei de Newton pelo uso da equação de Euler-Lagrange para a força electromagnética total no sistema. Se a derivada espacial do Lagrangeano for zero (o termo à direita), então o momento canónico ou generalizado $\mathbf{p} = m\mathbf{v} + q\mathbf{A}$ será conservado para uma dada partícula, de outra forma este não será conservado. A interacção de uma partícula com qualquer fonte externa irá mudar o seu momento generalizado. No entanto, mesmo se o momento canónico não for conservado para uma dada partícula, o somatório do momento canónico total do sistema (todos os campos e partículas) será sempre conservado (Semon e Taylor, 1996; Martins, 2009a).

2. O VECTOR POTENTIAL COMO A VELOCIDADE DO “VÁCUO”

Foi sugerido no passado que o vector potencial magnético representa algum tipo de campo de velocidades (Maxwell, 1861; Cook, Fearn e Millonni, 1995; Leonhardt e Piwnicki, 1999, 2000, 2001; Belot, 1998; Siegel, 2002), mas as consequências desta comparação não foram propriamente analisadas e verificadas, não existindo até agora qualquer prova para além de uma analogia teórica conveniente. Neste artigo iremos apresentar uma nova perspectiva teórica alicerçada em observações experimentais que ilustram e suportam o nosso ponto de vista, de tal forma que o nosso modelo fornece uma representação fiável de factos observáveis. Na discussão que se segue, iremos formular uma teoria que nos levará a considerar o vector potencial como a componente da velocidade de um superfluido quântico, que preenche o espaço, a partir do qual a propriedade da inércia e das forças electromagnéticas aparecem.

Fizeau (1851) mostrou experimentalmente pela primeira vez que a água em movimento pode arrastar a luz consigo. Ele mediu a interferência entre raios de luz que vão a favor e contra o movimento da água, provando que este processo altera a propagação da luz (ver figura 1.a)). A medida do arrastamento da luz por um meio em movimento é dada pelo coeficiente de arrastamento de Fresnel (1818), que previu o efeito tão cedo como 1818. A velocidade da luz v num meio com índice de refração n é dada por:

$$v = \frac{c}{n} + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)u = \frac{c}{n} + \alpha u, \quad (2)$$

Onde c/n é a velocidade da luz num meio dieléctrico e αu é o arrastamento da luz pelo meio com velocidade u .

Maxwell (1861) foi o primeiro a sugerir que o vector potencial magnético \mathbf{A} , se comporta como um meio em movimento ou como a velocidade de um fluido que rodeia ou circula à volta de uma

linha de campo magnético. Desta forma, o padrão de velocidade circular do vector potencial à volta de um solenoide pode ser considerado equivalente (comparar a figura 1.(a) com a figura 1.(c)) à velocidade circular da água na experiência de Fizeau de arrastamento da luz (Cook, Fearn e Millonni, 1995). O efeito Aharonov-Bohm (AB) (1959) é o efeito correspondente no electromagnetismo, o qual consiste na mudança de fase entre duas ondas de electrões (figura 1.b)), observada como um padrão de interferência.

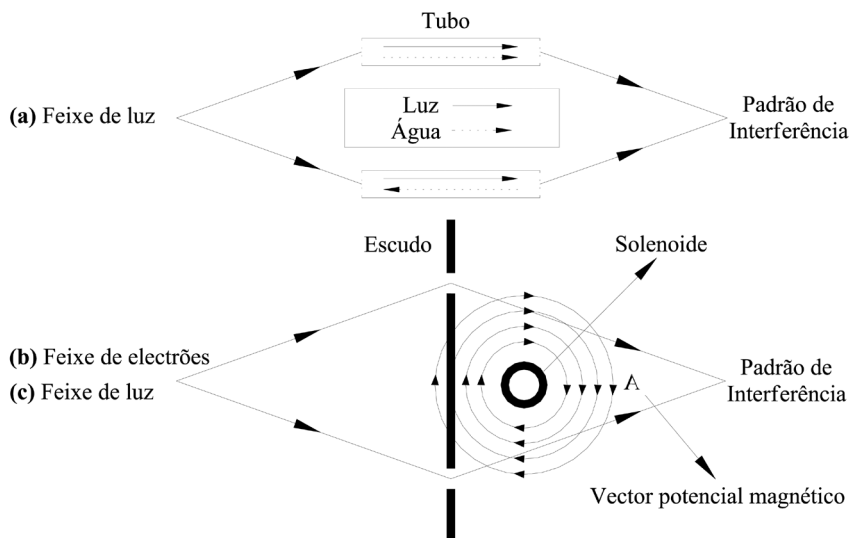


FIGURE 1. (a) A experiência de Fizeau, (b) o efeito Aharonov-Bohm, (c) o efeito Aharonov-Bohm óptico.

O mesmo fenómeno de interferência com ondas de luz existe, o efeito óptico AB. No seu trabalho muito interessante sobre o estudo da propagação da luz em fluidos em movimento não uniforme, Leonhardt e Piwnicki (1999, 2000, 2001) derivaram as fórmulas para a mudança de fase que a luz sofre no efeito óptico AB, estudando a luz que se propaga num vórtice líquido. A diferença de fase φ_{AB} é dada por:

$$\varphi_{AB} = 2\pi v_{AB}, \quad (3)$$

com,

$$v_{AB} = \frac{\omega}{c} (n^2 - 1) \frac{w}{c}, \quad (4)$$

Onde \mathbf{v}_{AB} é a velocidade da luz, w é a força do vórtice definida por $\mathbf{u} = \mathbf{w}/r\mathbf{e}_\phi$ em coordenadas cilíndricas, r é o raio para o qual a velocidade do meio é considerada e ω é a frequência óptica da luz. O efeito é pequeno e poderá ser amplificado permitindo que a luz percorra várias voltas no interior do vórtice de forma a conseguir efeitos cumulativos. Até ao presente não existe um consenso se a luz sofre realmente uma mudança de velocidade ou simplesmente uma diferença de fase quando passa por um meio físico em movimento como a água ou o vector potencial do electromagnetismo (Spavieri e Gillies, 2007; Boyer, 2007).

A mudança de fase dos electrões no efeito AB é considerada um efeito quântico topológico onde os electrões não sentem qualquer força ou mudança de velocidade no seu percurso. No entanto, existe uma explicação clássica que também pretende explicar o efeito, a qual sustenta que a mudança de fase é provocada por um atraso temporal nos tempos de trânsito dos feixes, os quais possuem velocidades diferentes (em analogia com uma onda de um dos feixes que passa por uma peça dielétrica e muda de velocidade no processo) (Liebowitz, 1965, 1966; Boyer, 1973, 1987, 2002, 2005, 2006). De acordo com Boyer (2007), a mudança na velocidade dos electrões, no efeito AB, seria:

$$m\Delta\mathbf{v}_q = (q/c)\mathbf{A}_\mu(\mathbf{r}_q(t)). \quad (5)$$

Onde m é a massa da partícula, \mathbf{v}_q é a velocidade da carga \mathbf{q} e $\mathbf{A}_\mu(\mathbf{r}_q(\mathbf{t}))$ é o vector potencial, na condição (gauge) de Coulomb, gerado pelo solenoide, e avaliado na posição $(\mathbf{r}_q(\mathbf{t}))$ da carga em movimento. Estas mudanças de velocidade são consistentes com o princípio de conservação de energia, do momento linear e da relatividade especial. Este resultado explica exactamente a mudança de fase no efeito AB de forma clássica. Mas experiências preliminares (Gronniger et al, 2007; Caprez, Barwick e Batelaan, 2007) não detectaram uma força clássica nos electrões que passam por um solenoide macroscópico. Estes resultados foram contestados por Boyer (2007), pelo que permanece uma questão em aberto.

Se for experimentalmente verificado que um dielétrico em movimento (água, por exemplo) muda a velocidade da luz em vez de efectuar uma mera mudança de fase, então é razoável assumir, de forma correspondente, que o vector potencial deverá ter um efeito semelhante. O trabalho de Davidowitz e Steinberg (1997), que reporta uma analogia do efeito AB em hélio no estado de superfluido, suporta a noção de que o vector potencial magnético se comporta como a velocidade de um espaço-tempo superfluido. Um meio dielétrico em movimento parece para a luz como um campo gravitacional, modificando a métrica do espaço-tempo que as ondas electromagnéticas sentem. A luz que viaja por um vórtice dielétrico sofre uma mudança de fase AB. Da mesma forma, átomos que passam por este vórtice circular do vector potencial também sofrem uma mudança de fase (Wilkins, 1994; Wei, Han e Wei, 1995; Spavieri, 1999).

No seu artigo sobre a compreensão do electromagnetismo, Belot (1998) sugeriu três interpretações diferentes do electromagnetismo, as quais correspondem a três estratégias diferentes na interpretação das teorias de condição (gauge). Na primeira interpretação ele considerou o vector potencial como um campo físico no espaço físico no qual ele representa a velocidade de um éter material e onde o campo electrocinético, $\mathbf{E} = -\partial\mathbf{A}/\partial t$, corresponde à aceleração deste éter material. A segunda interpretação é tradicional, onde os campos eléctrico e magnético são considerados como as entidades físicas reais. E a terceira interpretação é baseada em holonomias onde o campo electromagnético é considerado como uma atribuição de números reais a curvas fechadas no espaço e a vectores a pontos do espaço (campo eléctrico). As holonomias são usadas porque, embora o vector potencial A num dado ponto do espaço não ser invariante na sua condição (gauge), o integral de A à volta de uma curva fechada é considerado como invariante na sua condição (gauge).

O efeito AB mostra que na mecânica quântica o vector potencial do electromagnetismo é fisicamente real, pelo que a interpretação dois é falsa. Embora pareça que Aharonov e Bohm tenham favorecido a primeira interpretação, Belot escolheu a terceira devido à invariância da condição (gauge) em termos de holonomias, onde os campos são vistos como sendo propriedades de círculos fechados. No entanto esta perspectiva destrói a localidade sincrónica, porque se o campo é um loop, então o estado do sistema depende de regiões do espaço muito longe da área de interesse. Isto não faz qualquer sentido, na nossa perspectiva, preferindo escolher uma perspectiva local como a fornecida pela primeira interpretação, a qual é fortemente suportada pelo facto de o vector potencial possuir componentes longitudinais para além das componentes circulares (Schwab, Fuchs e Kistenmacher, 1997; Rousseaux, 2003), mostrando desta forma a impossibilidade da interpretação três.

Não é conhecido do grande público mas Einstein, depois de negar o conceito de éter imobilizado do século 19, voltou a aceitar a existência de um éter (Einstein, 1922; Granek, 2001) em 1916 com propriedades diferentes e específicas permitidas pela sua teoria da relatividade geral. Citando Einstein (Kostro, 2000):

... in 1905 I was of the opinion that it was no longer allowed to speak about the ether in physics. This opinion, however, was too radical, as we will see later when we discuss the general theory of relativity. It does remain allowed, as always, to introduce a medium filling all space and to assume that the electromagnetic fields (and matter as well) are its states. [...] once again "empty" space appears as endowed with physical properties, i.e., no longer as physically empty, as seemed to be the case according to special relativity. One can thus say that the ether is resurrected in the general theory of relativity. [...] Since in the new theory, metric facts can no longer be separated from "true" physical facts, the concepts of "space" and "ether" merge together.

Embora possamos usar o termo éter, preferimos em vez disso usar um termo mais objectivo que reflecte as propriedades observadas do vector potencial como o movimento direccionado do espaço provocado pelo movimento das cargas eléctricas. Como Einstein disse (Kostro, 2000), o espaço físico está ligado com o tempo, formando o espaço-tempo interdependente como é conhecido. O vector potencial manipula o espaço-tempo porque este é um movimento de espaço, o que por sua vez altera o tempo, como demonstrado pela contracção do espaço-tempo com a

velocidade. A energia do ponto zero (EPZ) parece ser a única presença prevalente no Universo, e o vector potencial comporta-se como um agente polarizador desta EPZ gerando o que poderia ser chamado como um fluxo de energia do ponto zero.

3. EQUAÇÃO DA FORÇA HIDRODINÂMICA PARA UMA MASSA EM MOVIMENTO

Seguindo também uma formulação Lagrangeana, é possível derivar a equação da força hidrodinâmica que actua numa massa m_p em movimento com velocidade \mathbf{v}_p envolvida por um fluido perfeito de massa m_f e velocidade \mathbf{v}_f . Usando a equação de Euler-Lagrange obtemos (Martins, 2009b):

$$\frac{d}{dt}(m_p \mathbf{v}_p + m_f \mathbf{v}_f) = -m_f \nabla \left(\frac{p_s}{\rho_f} \right) + m_f \nabla_{\mathbf{v}_f} (\mathbf{v}_p \cdot \mathbf{v}_f). \quad (6)$$

A equação (6) representa a força hidrodinâmica total que actua numa partícula de massa m_p e velocidade \mathbf{v}_p . A quantidade $m_p \mathbf{v}_p + m_f \mathbf{v}_f$ representa o momento generalizado, equivalente ao momento canónico electromagnético $m\mathbf{v} + q\mathbf{A}$. É o somatório do momento da partícula com o momento do fluido envolvente. Desta forma não é o momento da partícula (Newtoniano) que é conservado, mas o momento generalizado ou o momento total do sistema constituído pela partícula e pelo fluido envolvente. A mudança do momento generalizado é provocada pelo gradiente da energia de interacção hidrodinâmica (termos à direita) entre a partícula considerada e as partículas de fluido envolventes. Em fluidos perfeitos somente forças de pressão podem existir. O primeiro termo à direita representa qualquer força induzida na partícula por gradientes espaciais na pressão estática p_s do fluido, que não dependem da velocidade da partícula, e o segundo termo representa forças induzidas na partícula pela pressão dinâmica resultante provocada pelo movimento dos fluidos, quando a partícula está em movimento. A partícula sentirá uma força na direcção da menor pressão estática e na direcção das maiores pressões dinâmicas, as quais provocam uma pressão estática efectiva menor. Dividindo a equação (6) pelo volume, podemos rearranjar os seus termos em função de forças volúmicas (Nm^{-3}):

$$\frac{d}{dt}(\rho_p \mathbf{v}_p + \rho_f \mathbf{v}_f) = -\rho_f \nabla \left(\frac{p_s}{\rho_f} \right) + \rho_f \nabla_{\mathbf{v}_f} (\mathbf{v}_p \cdot \mathbf{v}_f) \quad (7)$$

Se o fluido for incompressível, podemos simplificar o termo de pressão:

$$\frac{d}{dt}(\rho_p \mathbf{v}_p + \rho_f \mathbf{v}_f) = -\nabla p_s + \rho_f \nabla_{\mathbf{v}_f} (\mathbf{v}_p \cdot \mathbf{v}_f). \quad (8)$$

A partícula sentirá sempre uma força na direcção da pressão estática menor. De acordo com a equação de Bernoulli (White, 1988) para um segmento de fluido estável, incompressível e sem fricção (ignorando o termo de gravidade):

$$\frac{p_s}{\rho_f} + \frac{v^2}{2} = \text{constante}. \quad (9)$$

Multiplicando esta relação pela densidade do fluido, obtemos:

$$p_t = p_s + p_d = p_s + \rho_f \frac{v^2}{2} = \text{constante}. \quad (10)$$

Esta relação importante diz-nos que a pressão total p_t é constante ao longo de uma streamline, o que significa que onde o fluido estiver em movimento com a velocidade v , a pressão estática correspondente será menor do que se a velocidade do fluido fosse zero. Desta forma, ambos os termos à direita na equação (6) representam forças induzidas na partícula pelo gradiente de pressão resultante provocado pelo movimento do fluido, onde a partícula irá mover-se na direcção das maiores pressões dinâmicas, que induzem uma pressão estática efectiva menor.

4. INTERPRETAÇÃO FÍSICA DA EQUAÇÃO DE FORÇA

Rearranjando os termos da equação (6), a densidade de força hidrodinâmica \mathbf{f}_{hyd} que age na partícula de densidade de massa \mathbf{r}_p é:

$$\mathbf{f}_{\text{hyd}} = \frac{d}{dt}(\rho_p \mathbf{v}_p) = -\nabla p_s + \rho_f \nabla_{\mathbf{v}_f} (\mathbf{v}_p \cdot \mathbf{v}_f) - \frac{d}{dt}(\rho_f \mathbf{v}_f). \quad (11)$$

Se a densidade de massa da partícula for constante, então:

$$\mathbf{f}_{\text{hyd}} = \rho_p \mathbf{a}_p = -\nabla p_s + \rho_f \nabla_{\mathbf{v}_f} (\mathbf{v}_p \cdot \mathbf{v}_f) - \rho_f \frac{d\mathbf{v}_f}{dt} - \mathbf{v}_f \frac{d\rho_f}{dt}. \quad (12)$$

Esta equação mostra todas as forças que agem no corpo onde qualquer força externa pode ser incluída num destes termos. Como estamos a considerar somente fluidos perfeitos, qualquer força estacionária deverá ser derivada de um gradiente de pressão, como os dois primeiros termos à direita que foram analisados na secção anterior. O terceiro termo inclui as forças derivadas de mudanças na velocidade do fluido e inclui a força de inércia \mathbf{f}_i que actua no corpo ou a resistência do fluido devido ao movimento acelerado da massa. Esta força tem a forma:

$$\mathbf{f}_i = -\rho_f \frac{d\mathbf{v}_f}{dt}, \quad (13)$$

É foi estudada profundamente por Brennen (1982). Este termo é responsável pela força de inércia sentida pelo corpo e também pelo aumento de massa em velocidade constante. Estes são aspectos importantes para superfluidos, porque o fluido não oferece qualquer força de resistência se a velocidade da massa for constante. Por outro lado, se o corpo induz uma aceleração do fluido, então será submetido a uma força:

$$\mathbf{f}_{\text{hyd}} = -\rho_f \frac{d\mathbf{v}_f}{dt} = -\rho_f \mathbf{a}_f, \quad (14)$$

na direcção oposta ao vector da aceleração do fluido \mathbf{a}_f , conservando o momento total. Um exemplo desta força será qualquer avião com propulsão a jacto. Finalmente o quarto termo está relacionado com gradientes na densidade do fluido, os quais são geralmente considerados para fluidos compressíveis.

5. INÉRCIA HIDRODINÂMICA E ELECTRODINÂMICA

O primeiro princípio de Newton diz-nos que um corpo permanece em repouso ou em movimento a uma velocidade e direcção constantes a não ser que seja actuado por uma força. No caso de uma partícula elementar, um próton por exemplo, que viaja a uma velocidade uniforme e que está imerso no seu próprio vector potencial permite-nos retirar algumas analogias hidrodinâmicas úteis. O facto de uma partícula carregada não sentir uma força de arrastamento quando em velocidade uniforme significa que o movimento do espaço-tempo gerado pelo seu vector potencial não tem

perdas por atrito. Isto significa que a partícula será sujeita a uma recuperação perfeita de pressão na parte traseira, a qual irá ser igual ao aumento de pressão na frente, resultando numa resistência nula do fluido. Esta informação sugere que em velocidade constante o movimento do espaço não mostra qualquer viscosidade, comportando-se como um fluido ideal. Podemos encontrar na hidrodinâmica um efeito semelhante, o fenómeno de não resistência de uma esfera em movimento uniforme através de um fluido ideal, referido como “paradoxo de Dirichlet” (Prandtl e Tietjens, 1934).

Para um fluido sem viscosidade, uma acção no corpo só pode acontecer pela acção de forças de pressão na sua superfície. Um resultado conhecido da teoria hidrodinâmica (Pandtl e Tietjens, 1934) mostra que uma partícula que é acelerada num fluido ideal será sujeita a duas forças diferentes: uma força de inércia proporcional ao produto da sua massa pela sua aceleração, e uma força de resistência adicional a velocidade constante devido ao aumento de massa pelo arrastamento de partículas de fluido pela massa. Desta forma, uma dissipação de energia é provocada quando uma carga acelerada interage com o vector potencial que a rodeia, tendo a viscosidade necessária nesta aceleração para arrastar as partículas de fluido consigo.

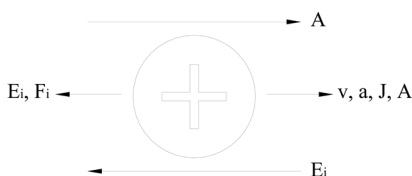


Figure 2. Ilustração do mecanismo de inércia electromagnética para uma partícula positiva em movimento.

Em artigos anteriores (Martins e Pinheiro, 2007; 2008a; 2008b) foi mostrado que a força de inércia e o aumento de massa relativista para uma partícula carregada tem a sua origem em forças electromagnéticas, onde a derivada temporal do vector potencial da partícula gera uma força de reacção inercial à aceleração, e a derivada espacial convectiva do vector potencial, relacionada com a velocidade da partícula, é responsável pelo aumento relativista da sua massa. Isto está ilustrado na figura 2 para uma carga positiva em movimento, onde \mathbf{a} é o vector da aceleração, \mathbf{J} é o vector da densidade de corrente, \mathbf{E}_i é o campo eléctrico induzido pelo vector potencial da partícula em aceleração, e \mathbf{F}_i é a força que o campo \mathbf{E}_i transmite à partícula positiva, e que corresponde à força de inércia relacionada com a aceleração. No caso de matéria neutra consideramos que o campo eléctrico induzido criado pelas cargas em aceleração tem importância somente a nível local para cada carga, criando inércia a nível microscópico, uma vez que a nível macroscópico o campo eléctrico induzido criado pela aceleração das cargas positivas e negativas terá um valor somado nulo. Como um neutrão é composto por partículas positivas e negativas (Miller, 2007), será também sujeito a forças de inércia de origem electromagnética.

O aumento de massa relativista em partículas carregadas está relacionado com a energia magnética gerada pela velocidade das cargas (Breitenberger, 1968; Marmet, 2003), sendo apreciável

somente para velocidades elevadas. Froning e Roach (2002) compararam o arrastamento aerodinâmico dado pela regra de Prandtl-Glauert com o aumento de massa relativista proporcional ao factor gama de Lorentz e verificaram que ambos têm o mesmo desenvolvimento abaixo da velocidade crítica correspondente, respectivamente, a velocidade do som e da luz. Aqui seguimos uma abordagem diferente e mostramos que a derivada convectiva do vector potencial é responsável pelo aumento relativista da massa, o qual possui um termo equivalente em hidrodinâmica. Considerando que a derivada total é dada por:

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla), \quad (15)$$

A seguinte comparação pode ser feita:

$$\rho_f \left(\frac{\partial \mathbf{v}_f}{\partial t} + (\mathbf{v}_f \cdot \nabla) \mathbf{v}_f \right) \propto \rho_q \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{A} \right). \quad (16)$$

A equação (16) mostra a equivalência entre o termo completo da inércia hidrodinâmica (à esquerda) e o termo completo da inércia electromagnética (à direita). O primeiro termo dentro de parêntesis à esquerda representa a aceleração do fluido com o tempo e o segundo termo representa a aceleração do fluido convectiva, cuja soma fornece a força total de arrastamento ou de inércia pelo fluido. À direita, temos a derivada temporal do vector potencial da partícula responsável pela força de inércia de reacção à aceleração, e a derivada espacial do vector potencial, relacionada com a velocidade da partícula, que é responsável pelo aumento relativista de massa.

6. ANALOGIA ENTRE AS EQUAÇÕES DE FORÇA HYDRODINÂMICAS E ELECTROMAGNÉTICAS

A comparação entre as equações de força electromagnéticas e hidrodinâmicas permite a observação de uma analogia completa entre elas:

$$\frac{d}{dt} (\rho_m \mathbf{v} + \rho_q \mathbf{A}) = -\rho_q \nabla V + \rho_q \nabla_A (\mathbf{v} \cdot \mathbf{A}) \leftrightarrow \frac{d}{dt} (\rho_p \mathbf{v}_p + \rho_f \mathbf{v}_f) = -\rho_f \nabla \left(\frac{p_s}{\rho_f} \right) + \rho_f \nabla_{\mathbf{v}_f} (\mathbf{v}_p \cdot \mathbf{v}_f). \quad (17)$$

Onde a carga electromagnética aparece como uma concentração local do fluido, o vector potencial \mathbf{A} corresponde à velocidade do fluido, o momento canónico electromagnético é equiva-

lente ao momento hidrodinâmico generalizado, sendo os respectivos gradientes nas energias de interação equivalentes na sua forma e função. O potencial eléctrico \mathbf{V} equivale ao termo \mathbf{p}/ρ que representa a energia de pressão (\mathbf{J}/\mathbf{kg}) ou o trabalho necessário para mover o fluido; é conhecido como “flow work”, representando a energia do trabalho exercida no fluido para o mover de um ponto para outro (Saleh, 2002). A equação (17) implica também uma correspondência completa entre as diferentes formas ou simplificações possíveis, entre elas a forma mais corrente da força electromagnética:

$$\mathbf{f}_{em} = -\rho_q \nabla V + \mathbf{J} \times \mathbf{B} - \rho_q \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \leftrightarrow \mathbf{f}_{hyd} = -\rho_f \nabla \left(\frac{p_s}{\rho_f} \right) + \rho_f \mathbf{v}_p \times (\nabla \times \mathbf{v}_f) - \rho_f \frac{\partial \mathbf{v}_f}{\partial t}. \quad (18)$$

Onde:

$$\mathbf{J} \times \mathbf{B} = \rho_q \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}). \quad (19)$$

A partir dos paralelos identificados neste artigo, e considerando que a vorticidade \mathbf{w} é definida como o rotacional da velocidade do fluido ($\nabla \times \mathbf{v}_f$), podemos descrever as correspondências avançadas na Tabela 1.

TABELA 1. Comparação entre variáveis hidrodinâmicas e electromagnéticas.

Hidrodinamica	Electromagnetismo
Velocidade hidrodinâmica, \mathbf{v}	Vector potencial magnético, \mathbf{A}
Vorticidade, \mathbf{w}	Indução magnética, \mathbf{B}
Energia de pressão (flow work), $\mathbf{p}_s/\mathbf{r}_f$	Potencial eléctrico, \mathbf{V}
Massa do fluido, \mathbf{m}_f	Carga eléctrica, \mathbf{q}
Densidade do fluido, \mathbf{r}_f	Densidade de carga, \mathbf{r}_q
Força hidrodinâmica, \mathbf{f}_{hyd}	Força electromagnética, \mathbf{f}_{em}

7. CONCLUSÃO

A comparação entre as equações de Euler-Lagrange electromagnéticas e hidrodinâmicas fornece uma analogia completa entre ambas as equações válidas em dois campos supostamente diferentes da física. A análise fornecida aqui permite uma unificação do electromagnetismo com a hidrodinâmica, de forma que as forças electromagnéticas podem ser interpretadas como tendo uma origem hidrodinâmica, considerando que o vácuo ou espaço-tempo se comporta como um

superfluido. Desta forma, as interações eléctricas e magnéticas podem ser interpretadas como forças de pressão do vácuo induzidas pelas modificações que cargas eléctricas estacionárias ou em movimento induzem no fluido que é o espaço-tempo.

Foi mostrada a equivalência matemática entre as equações de força hidrodinâmicas e electro-magnéticas para uma massa imersa num fluido perfeito e uma carga eléctrica, respectivamente. Ambas as equações encaixam perfeitamente uma na outra, pelo que é razoável assumir que a propriedade física da inércia pode ser interpretada como sendo o resultado da interacção entre as cargas e o superfluido electromagnético do espaço-tempo, polarizado pelo vector potencial magnético. Várias indicações experimentais suportam a noção de um espaço-tempo superfluido: a primeira lei de Newton permite a uma partícula movimentar-se a velocidade constante sem perder velocidade; o aumento de massa relativista, o qual não depende da aceleração mas da velocidade; e finalmente a força de inércia onde uma massa resiste sempre à aceleração. Todas estas três propriedades observadas experimentalmente são consistentes com a nossa formulação electromagnética e hidrodinâmica. Neste contexto, o vector potencial pode ser considerado como um campo físico no espaço físico tendo como propriedade física, ser a velocidade de um fluido. O vector potencial pode ser interpretado como uma polarização do vácuo, gerando um movimento de “partículas” do espaço a partir do qual a propriedade de inércia aparece. Esta abordagem e analogia fornecem um melhor entendimento da origem física da inércia.

De igual forma, com esta nova teoria estruturada no conceito do vector potencial magnético, como a componente de velocidade do fluido ideal que é o espaço-tempo, acreditamos que irá contribuir para a manipulação do vácuo para fins de propulsão. A indústria aeronáutica está baseada no controlo da velocidade do fluido atmosférico que envolve uma massa com formas (asas) adequadas. Esta teoria abre pela primeira vez, de acordo com o nosso conhecimento, a perspectiva de realizar a mesma coisa com o vector potencial magnético, de forma a conseguir propulsão no espaço.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece o apoio financeiro da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) na forma de uma bolsa de doutoramento.

BIBLIOGRAFIA

AHARONOV Y., e BOHM, D., “Significance of electromagnetic potentials in the quantum theory,” *Phys. Rev.* 115 (3), 485-491, (1959).

ALVARENGA, F. G., e LEMOS, N. A., “Dynamical Vacuum in Quantum Cosmology,” *General Relativity and Gravitation* 30 (5), pp. 681-694, 1998.

BELLOT, G., “Understanding Electromagnetism,” *British Journal for the Philosophy of Science* 49, pp. 531-555, 1998.

BOYER, T. H., "Classical electromagnetic deflections and lag effects associated with quantum interference pattern shifts: considerations related to the Aharonov-Bohm effect," *Phys. Rev. D* 8, pp. 1679-1693, 1973.

BOYER, T. H., "The Aharonov-Bohm effect as a classical electromagnetic lag effect: an electrostatic analogue and possible experimental test," *Il Nuovo Cimento* 100B, pp.685-701, 1987.

BOYER, T. H., "Semiclassical explanation of the Matteucci-Pozzi and Aharonov Bohm phase shifts," *Found. Phys.* 32, pp.41-49, 2002.

BOYER, T. H., "The paradoxical forces for the classical electromagnetic lag associated with the Aharonov-Bohm phase shift," (2005), <http://arxiv.org/abs/physics/0506180>, accessed April 17, 2007.

BOYER, T. H., "Proposed experimental test for the paradoxical forces associated with the Aharonov-Bohm phase shift," *Found. Phys. Lett.* 19 (5), 491-498, 2006.

BOYER, T. H., "Unresolved classical electromagnetic aspects of the Aharonov-Bohm phase shift," (2007), <http://arxiv.org/abs/0709.0661>, accessed September 17, 2007.

BREITENBERGER, E., "Magnetic interactions between charged particles," *Am. J. Phys.* 36 (6), pp. 505-515, 1968.

BRENNEN, C. E., "A review of added mass and fluid inertial forces," Report Number CR 82.010, Naval Civil Engineering Laboratory - USA, 1982.

CALKIN, M. G., "Linear momentum of quasistatic electromagnetic fields," *Am. J. Phys.* 34 (10), pp. 921-925, 1966.

CAPREZ, A., BARWICK, B., e BATELAAN, H., "Macroscopic test of the Aharonov-Bohm effect," *Phys. Rev. Lett.* 99, 210401, 2007.

CARPENTER, C. J., "Comparison of the practical advantages of alternative descriptions of electromagnetic momentum," *IEE Proceedings*, 136, Pt. A, No. 3, pp. 101-113, 1989.

CARPENTER, C. J., "Action-reaction forces between current-carrying conductors," *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.*, 153 (2), pp. 73-80, 2006.

CHRISTOV, C. I., "Maxwell-Lorentz electrodynamics as a manifestation of the dynamics of a viscoelastic metacontinuum," *Mathematics and Computers in Simulation*, 74, pp. 93-104, 2007.

COOK, R. J., FEARN, H., e MILLONNI, P. W., "Fizeau's experiment and the Aharonov-Bohm effect," *American Journal of Physics*, 63 (8), 1995.

CULETU, H., "A "conformal" perfect fluid in the classical vacuum," *General Relativity and Gravitation* 23 (3), pp. 283-290, 1994.

DAVIDOWITZ, H., e STEINBERG, V., "On an analog of the Aharonov-Bohm effect in superfluid helium," *Europhys. Lett.* 38 (4), pp. 297-300, 1997.

EINSTEIN, A., "*Sidelights on Relativity – Ether and the Theory of Relativity + Geometry and Experience*," 1922, Elegant Ebooks, 2004.

FIZEAU, M. H., "Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse avec laquelle la lumière se propage dans leur intérieur," *Comptes. Rendus de l'Academie des Science de Paris* 33, pp. 349-355, 1851.

FRESNEL, A. J., "Lettre de M. Fresnel à M. Arago, sur l'influence du mouvement terrestre dans quelques phénomènes d'optique," *Ann. de Chimie et Physique* 9 (57), 1818.

FRONING, H. D., "Application of Fluid Dynamics to the Problems of Field Propulsion and Ultra High Speed Flight," *American Institute of Aeronautics and Astronautics* AIAA-90-0563, 1989.

FRONING, H.D., e ROACH, R.L., "Preliminary simulations of vehicle interactions with the quantum vacuum by fluid dynamic approximations" in proceedings of 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE *Joint Propulsion Conference*, AIAA-2002-3925, 2002.

FRONING, H. D., "The "Quantum Interstellar Ramjet" Revisited," *American Institute of Aeronautics and Astronautics* AIAA-2003-4883, 2003.

FRONING, H. D., e ROACH, R. L., "Fluid Dynamic Simulations of Warp Drive Flight Through Negative Pressure Zero-Point Vacuum," in proceedings of *Space Technology and Applications International Forum (STAIF-2007)*, edited by M. S. El-Genk, AIP Conference Proceedings 880, New York, 2007, pp. 1125-1131.

GRANEK, G., "Einstein's Ether: Why did Einstein Come Back to the Ether?," *Apeiron* 8 (3), 2001.

GRONNIGER, G., SIMMONS, Z., GILBERT, S., CAPREZ, A., BATELANN, H., "The Aharonov-Bohm effect, phase or force," (2007), <http://www.unl.edu/hbatelaan/pdf/ABpaperv3.pdf>, accessed September 17, 2007.

HEAVISIDE, O., *Electromagnetic Theory*, Chelsea Publishing Co., Vol. III, 1912.

HUANG, W.-H., e WANG, I.-C., "Quantum Perfect-Fluid Kaluza-Klein Cosmology," *International Journal of Modern Physics A* 21 (22), pp.4463-4478, 2006.

JACOBSON, T. A., "Trans-Planckian Redshifts and the Substance of the Space-Time River," *Progress of Theoretical Physics Supplement*, No. 136 (1), 1999.

JACOBSON, T. A., e PARENTANI, R., "An Echo of Black Holes," *Scientific American*, December 2005.

JEFIMENKO, O. D., *Electricity and magnetism*, 2nd ed., Electret Scientific Co., Star City, 1989.

KAUFMAN, H. R., "Fluid-dynamic approach to mass of classical electron," *Physics Letters*, 33A (1), pp. 9-10, 1970a.

KAUFMAN, H. R., "Fluid-dynamic approach to the relativistic electromagnetic field," *Lettere Al Nuovo Cimento*, IV (24), pp. 9-10, 1970b.

KELLY, E. M., "Vacuum electromagnetics derived exclusively from the properties of an ideal fluid," *Nuovo Cimento* 32B No 1, pp. 117-137, 1976.

KONOPINSKI, E. J., "What the electromagnetic vector potential describes," *American Journal of Physics*, 46 (5), pp. 499-502, 1978.

KOSTRO, L., *Einstein and the Ether*, *Apeiron* 2000.

LEONHARDT, U., e PIWNICKI, P., "Optics of nonuniformly moving media," *Phys. Rev. A* 60, pp. 4301-4312, 1999.

LEONHARDT, U., e PIWNICKI, P., "Light in Moving Media," *Contemporary Physics* 41 (5), pp. 301-308, 2000.

LEONHARDT, U., e PIWNICKI, P., "Optics of Moving Media," *Applied Physics B* 72, pp. 51-59, 2001.

LIEBOWITZ, B., "Significance of the Aharonov-Bohm effect," *Nuovo Cimento* 38, pp. 932-950, 1965.

LIEBOWITZ, B., "Significance of the Aharonov-Bohm effect. Rebuttal of a criticism," *Nuovo Cimento* 46B, pp. 125-127, 1966.

MARMANIS, H., "On the analogy between electromagnetism and turbulent hydrodynamics," arXiv:hep-th/9602081v1, pp. 1-14, 1996.

MARMANIS, H., "Analogy between the Navier-Stokes equations and Maxwell's equations: application to turbulence," *Physics of Fluids*, 10 (6), pp. 1428-1437, 1998a.

MARMANIS, H., "Erratum: Analogy between the Navier-Stokes equations and Maxwell's equations: application to turbulence," *Physics of Fluids*, 10 (11), pp. 3031, 1998b.

MARMET, P., "Fundamental nature of relativistic mass and magnetic fields," *Problems in Nonlinear Analysis in Engineering Systems* N° 3 (19), Vol. 9, 2003.

MARTINS, A. A., e PINHEIRO, M. J., "The connection between inertial forces and the vector potential," in proceedings of *Space Technology and Applications International Forum (STAIF 2007)*, edited by M. El-Genk, AIP Conference Proceedings 880, New York, 2007, pp. 1189-1200.

MARTINS, A. A., e PINHEIRO, M. J., "Inertia, electromagnetism and fluid dynamics," in proceedings of *Space Technology and Applications International Forum (STAIF-2008)*, edited by M. S. El-Genk, AIP Conference Proceedings 969, New York, 2008a, pp. 1154-1162.

MARTINS, A. A., e PINHEIRO, M. J., "On the electromagnetic origin of inertia and inertial mass," *Int. J. Theor. Phys.*, 47 (10), pp. 2706-2715, 2008b.

MARTINS, A. A., "On a coherent electromagnetic force formulation," submetido para publicação, 2009a.

MARTINS, A. A., "Fluidic electrodynamics: Interpretation of the electromagnetic force equation in hydrodynamic terms," submetido para publicação, 2009b.

MAXWELL, J. C., "On Physical Lines of Force, Part I: The theory of molecular vortices applied to magnetic phenomena," *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 21 No. 139, pp. 161-175, March 1861.

MILLER, G. A., "Charge densities of the neutron and proton," *Phys. Rev. Lett.* 99, 112001, 2007.

PHIPPS, T. Jr., "On Hertz invariant form of Maxwell's equations," *Physics Essays* 6 (2), pp. 249-256, 1993.

PHIPPS, T. Jr., "Physical significance of the vector potential," *Electric Spacecraft Journal*, 26, pp. 20-22, 1998.

PRANDTL, L., e TIETJENS, O. G., *Applied hydro and aeromechanics*, Dover Publications, New York, 1934.

ROUSSEAU, G., "On the physical meaning of the gauge conditions of classical electromagnetism: the hydrodynamics analogue viewpoint," *Annales de la Fondation Louis de Broglie* 28 (2), pp. 261-270, 2003.

SALEH, J., *Fluid flow handbook*, McGraw-Hill Professional, 2002.

SCHWAB, A., FUCHS, C., e KISTENMACHER, P., "Semantics of the irrotational component of the magnetic vector potential, A," *IEEE Antennas and Propagation Magazine* 39 (1), pp. 46-51, 1997.

SEMON, M. D., e TAYLOR, J. R., "Thoughts on the magnetic vector potential," *American Journal of Physics*, 64 (11), pp. 1361-1369, 1996.

SIEGEL, D. M., *Innovation in Maxwell's electromagnetic theory: Molecular vortices, displacement current, and light*, Cambridge University Press, 2002.

SPAVIERI, G., "Quantum Effect of the Aharonov-Bohm Type for Particles with an Electric Dipole Moment," *Phys. Rev. Lett.* 82 (20), pp. 3932-3935, 1999.

SPAVIERI, G., e GILLIES, G. T., "A Test of the Fizeau Type for the Magnetic Model of Light in Moving Media," *Chinese Journal of Physics* 45 (1), pp.12-31, 2007.

TRAMMEL, G. T., "Aharonov-Bohm Paradox," *Physical Review*, 134 (5B), pp. B1183-B1184, 1964.

VOLOVIK, G.E., "Superfluid analogies of cosmological phenomena," *Physics Reports* 351 (4), pp. 195-348, 2001.

WANG, X. S., "Derivation of Maxwell's equations based on a continuum mechanical model of vacuum and a singularity model of electric charges," *Progress in Physics*, 2, pp. 111-120, 2008.

WILKENS, M., "Quantum phase of a moving dipole," *Phys. Rev. Lett.* 72 (1), pp.5-8, 1994.

WEI, H., HAN, R., e WEI, X., "Quantum Phase of Induced Dipoles Moving in a Magnetic Field," *Phys. Rev. Lett.* 75 (11), pp. 2071-2073, 1995.

WHITE, F. M., *Fluid Mechanics*, 2th edition, McGraw-Hill International Editions, 1988.

ZIMMERMAN, W. B., *Microfluidics: History, theory and applications*, SpringerWien New York, 2006.