

Medida da velocidade de fase da luz em linhas de transmissão

(Measurement of the phase velocity of light in transmission lines)

D.O.S. Gomes¹, W.S. Santos², A.C.F. Santos³ e C.E. Aguiar³

¹Colégio Estadual Guilherme da Silveira Filho, Bangu, RJ, Brasil

²Colégio Pedro II, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

³Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Recebido em 20/7/2010; Aceito em 29/8/2011; Publicado em 6/10/2011

Propomos uma discussão sobre o conceito de velocidade de fase e a forma como a velocidade da luz é apresentada nos cursos de nível médio. Um método para medida da velocidade de fase de ondas eletromagnéticas é desenvolvido experimentalmente.

Palavras-chave: linhas de transmissão, velocidade da luz, índice de refração.

We propose a discussion on the concept of phase velocity and the way the speed of light is introduced in high-school physics. A method for measuring the phase velocity of electromagnetic waves is experimentally developed.

Keywords: transmission lines, speed of light, index of refraction.

1. Introdução

Nos cursos de nível médio, quando falamos em velocidade da luz, geralmente nos referimos ao seu valor no vácuo, ou seja, $c = 299\,792\,458$ m/s. A constante c (origina-se do latim – *celeritas* – velocidade ou rapidez) é a velocidade máxima com que se pode transmitir um sinal, e é a velocidade de partículas de massa nula. Em se tratando de propagação em um dielétrico, a referência é a velocidade de fase de uma onda monocromática, isto é, $v_{fase} = c/n$ [1], onde n é o índice de refração do meio. Em termos da frequência f e do comprimento de onda λ , a velocidade de fase é dada por $v_{fase} = \lambda f$. Facilmente encontramos afirmações do tipo: “a luz sempre se propaga mais lentamente através de um material do que no vácuo” ou, ainda, “o valor do índice de refração é sempre maior do que 1, caso contrário poderia haver velocidade maior do que c , o que contradiz a teoria da relatividade de Einstein”. A maioria dos textos fala simplesmente na velocidade da luz ao invés de velocidade *de fase* da luz. Talvez seja esta a origem de boa parte da confusão a respeito da propagação da luz. De fato, na faixa do visível, a maioria dos materiais conhecidos possui índice de refração maior do que a unidade. Mas isso não significa que o índice de refração seja sempre maior do que 1. Por exemplo, para o alumínio e para a água, $n < 1$ para comprimentos de onda em torno de $1\ \mu\text{m}$ e $70\ \text{nm}$, respectivamente [2]. Uma crítica mais aprofundada quanto

à maneira de como os livros didáticos são produzidos e como os conceitos errôneos são apresentados, em particular no que concerne ao índice de refração e à velocidade da luz, pode ser encontrada na Ref. [3]. Também encontramos nos livros didáticos uma explicação sobre o fenômeno da dispersão, que indica como a velocidade de fase e o índice de refração dependem da frequência da onda eletromagnética. Se escolhermos um “ponto” em particular para a fase, por exemplo, um máximo, a velocidade de fase é a velocidade com a qual este “ponto” se propaga no espaço. A rigor, a velocidade de fase não possui significado físico, ou seja, não carrega informação. Se a fase de uma onda monocromática levou um tempo para alcançar um determinado ponto no espaço, isso não significa necessariamente que a energia emitida pela fonte leva o mesmo tempo para chegar a esse ponto. Em algumas situações a fase até pode mover-se em sentido contrário ao fluxo de energia.

As TVs a cabo tornaram-se bastante comuns nos dias de hoje. Nelas, o aparelho de TV recebe um sinal através de um cabo coaxial conectado à sua entrada. O cabo coaxial (Fig. 1) consiste de um tubo cilíndrico metálico envolvendo um fio de cobre, isolados entre si por um material dielétrico. A função do cabo é transportar o sinal, na forma de energia eletromagnética, de um extremo ao outro. Assim como uma fibra ótica, o cabo serve de guia para a onda eletromagnética, que se propaga através do dielétrico. Associado aos campos elétricos e magnéticos da onda, há também o sinal na

³E-mail: toni@if.ufrj.br.

forma de corrente e tensão propagando-se pelo fio interno. A velocidade de propagação do sinal depende do dielétrico através da permissividade elétrica ϵ e da permeabilidade magnética μ e é dada por $v = (\epsilon\mu)^{-1/2}$. O valor típico para a velocidade de propagação para um cabo *RG58U* é $v = 0,66c$. Normalmente, descreve-se a velocidade de propagação através do fator de velocidade (*VF*) que é definido como $VF = v/c$ [4]. Como em geral o cabo não é perfeito, pois o material dielétrico possui uma resistência finita, e da mesma forma o fio de cobre, que também possui uma resistência não nula, as equações de onda para o campo elétrico, o campo magnético, a tensão e a corrente não são homogêneas, dando origem ao fenômeno da dispersão [5]. No caso limite, onde o material dielétrico é um isolante perfeito, e desprezando a resistividade do fio de cobre, o cabo é chamado de cabo ideal e não ocorre dispersão. Desta forma, o cabo coaxial nada mais é do que um meio onde ondas (energia) são transmitidas de um ponto a outro. Quando ondas que se propagam em um determinado meio encontram uma interface com outro meio diferente, ocorre reflexão e somente uma parte da energia é transmitida. Ao contrário do que se afirma em vários livros didáticos, a reflexão de ondas numa interface é determinada, não pelo índice de refração relativo entre os meios, mas geralmente por suas impedâncias relativas. Por exemplo, a antena de TV deve ter uma impedância igual à impedância do ar, que vale 377Ω , de modo a absorver o sinal eficientemente. O cabo que leva o sinal captado pela antena até o aparelho de TV deve também ser apropriadamente “terminado”, ou seja, a sua impedância deve ser “casada” com a do aparelho de TV de modo a evitar reflexões indesejadas. No caso dos cabos coaxiais *RG58U*, a impedância é 50Ω .

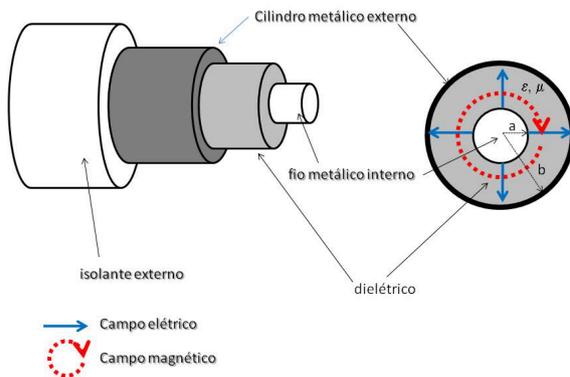


Figura 1 - Esquema de um cabo coaxial em corte.

Na maioria dos circuitos corriqueiros (CC or CA de baixa frequência), o comprimento do cabo que conecta os diversos componentes e dispositivos não é importante. Naqueles casos, a tensão no fio em um determinado instante é suposta igual ao longo de sua extensão. No entanto, quando a variação temporal do sinal é comparável ao tempo de propagação do sinal no cabo, o comprimento deste torna-se importante e ele se comporta como uma linha de transmissão. Em

termos mais quantitativos, o comprimento do cabo é significativo quando o comprimento de onda típico do sinal é muito menor do que as dimensões do cabo. Uma regra prática é que o cabo comporta-se como uma linha de transmissão se o comprimento do cabo for pelo menos um décimo do comprimento de onda do sinal. Neste caso, o atraso do sinal é significativo bem como as reflexões na linha, podendo levar a um comportamento imprevisível em sistemas que não são cuidadosamente confeccionados dentro dos padrões de uma linha de transmissão.

Neste artigo propomos uma metodologia experimental, fácil de implementar no ensino médio, para a introdução do conceito de dispersão e medida da velocidade de fase de ondas eletromagnéticas. Um dos autores (D.O.S.G.), aluno do ensino médio da rede pública estadual do Rio de Janeiro e bolsista do programa Jovens Talentos da Ciência da FAPERJ, participou ativamente do experimento.

2. Aparatos e métodos

Embora o equipamento utilizado não seja de baixo custo, seu preço não é exatamente proibitivo. O equipamento consiste de um gerador de ondas, um osciloscópio de duplo traço, dois cabos coaxiais, 1 terminador de 50Ω e dois conectores “T”. O esquema do aparato é mostrado na Fig. 2. Ondas senoidais de frequência variável (até $5,8 \text{ MHz}$) são produzidas pelo gerador de ondas. Um cabo coaxial de 20 cm é conectado à saída do gerador e na entrada no osciloscópio através de um conector “T”. Conecta-se um segundo cabo coaxial (no presente caso de $13,2 \text{ m}$, mas quanto mais longo melhor) na segunda saída do conector “T” e a outra extremidade do cabo é conectada no canal 2 do osciloscópio. O osciloscópio, assim como qualquer bom voltímetro, possui uma alta impedância de entrada ($\sim 1 \text{ M}\Omega$) e o cabo coaxial utilizado possui uma impedância de 50Ω . Um detalhe bastante importante neste experimento é que para evitar reflexões no canal, no final do cabo coaxial deve ser inserido um terminador de 50Ω , de modo a casar a impedância do osciloscópio com a do cabo [4]. Isto equivale a colocar uma impedância de 50Ω em paralelo com a impedância de entrada do osciloscópio, de modo que a onda incidente “veja” uma impedância efetiva de 50Ω .

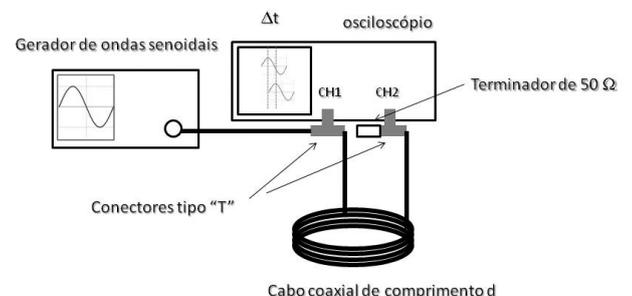


Figura 2 - Esquema do aparato experimental.

Para determinar o atraso do sinal no canal 2 em relação ao canal 1, medimos a diferença de fase entre os respectivos máximos, conforme ilustrado na Fig. 3. O cabo utilizado tem comprimento $d = 13,2$ m. Os resultados para a velocidade de fase $v_f = d/\Delta t$, são mostrados na Fig. 4, em função da frequência da onda, onde a linha horizontal ilustra o valor do recíproco do índice de refração, n^{-1} , [4] para este cabo. Podemos observar que, para a presente faixa de frequências, o cabo não exhibe dispersão de forma significativa a ser medida pelo método proposto.

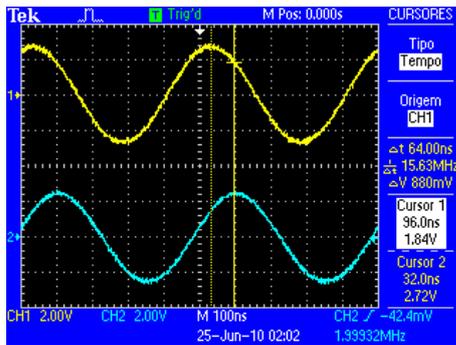


Figura 3 - Exemplo de medida do tempo de atraso em um cabo coaxial usando ondas senoidais. Os dois cursores tipo tempo (linhas verticais) indicam as posições dos máximos utilizados na medida do atraso Δt .

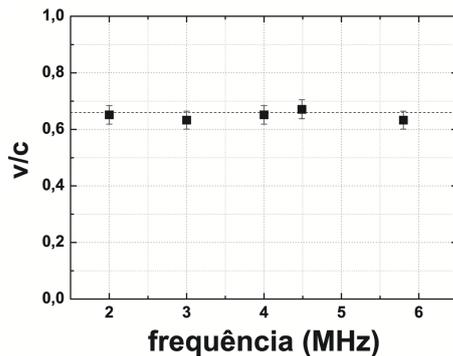


Figura 4 - Velocidade de fase em um cabo coaxial RG58U em função da frequência de uma onda senoidal. A linha horizontal indica o valor do recíproco do índice de refração, $n^{-1} = v/c = (\mu_o \epsilon_o / \mu \epsilon)^{1/2}$, para este cabo, onde c é a velocidade da luz no vácuo.

3. Conclusão

Apresentamos uma metodologia experimental para a introdução no ensino médio do conceito de velocidade de fase. Embora muito simples na sua concepção, o procedimento envolve vários “truques” experimentais, como casamentos de impedância e a escolha do comprimento do cabo e da faixa de frequências a ser estudada. Esperamos que o experimento ajude a elucidar conceitos envolvendo a velocidade da luz que não costumam ser discutidos de forma suficientemente clara e completa nos cursos introdutórios de física.

4. Agradecimentos

D.O.S. Gomes agrade à FAPERJ pela bolsa Jovens Talentos de pré-iniciação científica. Os demais autores são gratos aos comentários do árbitro anônimo.

Referências

- [1] E. Hecht, *Óptica* (Fundação Calouste Gulbekian, Lisboa, 2002).
- [2] <http://refractiveindex.info/>.
- [3] C.F. Bohren, *Am. J. Phys.* **77**, 103 (2009).
- [4] P. Fonseca, A.C.F. Santos e E.C. Montenegro, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **29**, 373 (2007).
- [5] K.D. Machado, *Teoria do Eletromagnetismo* (Editora UEPG, Ponta Grossa, 2004), 3 v.