



ROTEIRO DIDÁTICO DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS APLICADAS AO ENSINO DE FENÔMENOS ÓPTICOS EM FIBRAS MONOMODO COM O MÉTODO SPLIT-STEP FOURIER

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2025.6389

Autores: DIEGO PINHEIRO NUNES, VICTOR DANIEL V. DA SILVA, DANIEL DO NASCIMENTO, SÁ CAVALCANTE

Resumo: A crescente demanda por alta largura de banda requer o uso cada vez maior de fibras ópticas, especialmente nas redes de backbone, de forma que se faz necessário que os futuros projetistas de redes ópticas dominem os fenômenos que regem a propagação de pulsos ópticos em longas distâncias. Tais conceitos apresentam alta complexidade teórica, e a falta de recursos laboratoriais nas universidades é um fator agravante. Assim, este trabalho propõe a aplicação de roteiros didáticos baseados em simulações computacionais, visando facilitar a compreensão dos principais efeitos lineares e não lineares que ocorrem na fibra óptica, utilizando o método numérico Split-Step Fourier por meio de roteiros práticos. Os resultados demonstram que a metodologia contribuiu significativamente para a aprendizagem dos alunos, além de incentivar seu engajamento. Concluímos que a proposta adotada é eficaz, acessível e viável para o ensino de comunicações ópticas, podendo ser expandida para diversos outros contextos.

Palavras-chave: fibras ópticas, simulação computacional, NLSE, SSFM, fibras ópticas, NLSE, Split-Step Fourier Method

ROTEIRO DIDÁTICO DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS APLICADAS AO ENSINO DE FENÔMENOS ÓPTICOS EM FIBRAS MONOMODO COM O MÉTODO SPLIT-STEP FOURIER

1 INTRODUÇÃO

A partir do século XX, com a descoberta e o avanço na fabricação das fibras ópticas, as comunicações ópticas passaram por uma verdadeira revolução tecnológica. Esse avanço substituiu gradualmente os sistemas de transmissão baseados em fios metálicos, especialmente após a identificação das chamadas janelas espectrais de baixa perda — como a terceira janela, em 1550 nm, que apresenta atenuação de apenas 0,2 dB/km (COSTA et al., 2015). Atualmente, estas fibras formam a base das telecomunicações, consolidando-se como infraestrutura essencial para a sociedade moderna.

Com o crescimento da demanda por conectividade e altas larguras de banda, enlaces ópticos cada vez mais longos e com maior capacidade vêm sendo demandados e implementados, de forma que entender os fenômenos físicos que afetam a propagação dos pulsos ópticos se torna indispensável para os futuros projetistas de redes ópticas.

No entanto, o ensino destes conceitos no nível superior enfrenta desafios significativos devido à complexidade teórica destes fenômenos, o que torna o aprendizado exclusivamente conceitual difícil, e a visualização prática é ainda mais limitada pela ausência de equipamentos apropriados nos ambientes de ensino, muitas vezes inviáveis devido ao seu alto custo. Neste contexto, o uso de simulações surge como uma alternativa viável para o ensino e a aprendizagem destes conceitos. Contudo, essas simulações podem ser complexas e pouco acessíveis, visto que a visualização de fenômenos complexos pode se tornar algo não palpável caso apresentada de uma forma não elaborada.

Neste sentido, este trabalho apresenta uma abordagem estruturada e simplificada para a aplicação de simulações numéricas, utilizando roteiros de prática desenvolvidos com o software GNU Octave para estudar e analisar os principais efeitos lineares e não lineares na propagação de pulsos ópticos em fibras monomodo em longas distâncias, visando promover um aprendizado mais intuitivo, aplicado e conectado às necessidades do ensino técnico e superior.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, explicaremos alguns conceitos específicos necessários para o bom entendimento da metodologia adotada neste trabalho.

A propagação de pulsos ópticos em fibras monomodo é influenciada por diversos efeitos físicos que podem comprometer a qualidade da transmissão, sendo os principais a atenuação, a dispersão e os efeitos não lineares (RIBEIRO, 2003).

A atenuação, representada pelo coeficiente α (alpha), consiste na redução gradual da potência do sinal óptico ao longo da fibra, sendo causada por propriedades físicas do material, como absorção e espalhamento. Este efeito reduz a intensidade do pulso e dificulta sua recepção com fidelidade. A correta mensuração da influência da atenuação no enlace é fundamental para o dimensionamento da distância máxima do enlace e entre amplificadores ópticos, os quais restauram a potência do sinal (RIBEIRO, 2003).

A dispersão é outro fator que afeta a integridade do sinal, provocando o alargamento dos pulsos no tempo. Ela ocorre devido à diferença nos tempos de chegada dos componentes do pulso, o que pode ter origem nos modos de propagação distintos (dispersão modal) ou na variação dos comprimentos de onda (dispersão cromática). Na dispersão modal, os modos percorrem trajetórias diferentes; já na cromática, os comprimentos de onda viajam com velocidades distintas, resultando em defasagem temporal. A dispersão causa sobreposição entre pulsos consecutivos, e a forma mais simples de mitigá-la é reduzir a taxa de transmissão. Em fibras monomodo, cujo núcleo possui menos de 20 μm de diâmetro, apenas um modo é guiado, eliminando a dispersão modal e restando apenas a cromática, representada pelo parâmetro β_2 (beta2), também conhecida como dispersão de velocidade de grupo. Trabalhar com comprimento de onda em torno de 1550 nm é vantajoso, pois essa faixa apresenta baixa perda e mínima dispersão (RIBEIRO, 2003).

Já os efeitos não-lineares podem ser originados pela não linearidade do índice de refração ou pela difusão estimulada quando trabalhamos com valores elevados na potência do campo elétrico. Dentre os diversos efeitos não lineares possíveis, destacamos a automodulação de fase (SPM – *Self-Phase Modulation*), a qual faz com que o índice de refração varie de acordo com o comprimento de onda e com a intensidade do campo elétrico, modificando a fase do pulso em função da potência instantânea (RIBEIRO, 2003).

A Equação Não Linear de Schrödinger (*Nonlinear Schrödinger Equation* – NLSE) descreve matematicamente a propagação de pulsos ópticos em fibras com efeitos não lineares, onde os parâmetros alfa (α), beta (β) e gama (γ) exercem um papel fundamental. Como essa equação é uma equação diferencial parcial complexa e raramente possui soluções analíticas, adotamos métodos numéricos para obter simulações realistas (KEISER, 2010).

Dentre esses métodos, destacamos o Método Split-Step Fourier (*Split-Step Fourier Method* – SSFM), o qual aplica a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* – FFT) para resolver a NLSE de forma eficiente (AGRAWAL, 2001). O SSFM separa os efeitos lineares e não lineares ao longo da fibra em pequenos intervalos de propagação, permitindo uma simulação precisa e com baixo custo computacional. De acordo com Komninos (2010), este método supera, em desempenho, a maioria dos métodos de diferenças finitas em muitos casos práticos, especialmente para enlaces longos de fibra óptica.

Embora os efeitos lineares e não lineares atuem simultaneamente, a proposta do SSFM consiste em tratá-los separadamente, de forma alternada. A ideia principal é que, ao considerar pequenas etapas de propagação ao longo da fibra, os efeitos de dispersão (lineares) e de não linearidade podem ser analisados de maneira independente (KOMNINOS, 2010).

Desta forma, os termos associados à dispersão e à não linearidade, presentes na ENLS, são separados, viabilizando a aplicação eficiente do método SSFM para sua resolução (MUSLU; ERBAY, 2005).

3 METODOLOGIA

Dividimos a metodologia desta pesquisa em duas etapas: 1) Elaboração dos roteiros; 2) Coleta de dados.

3.1 Elaboração dos roteiros

Como base para o estudo de caso, escolhemos uma disciplina pertencente à matriz curricular de um curso de nível superior na área de Tecnologia da Informação, 16 horas da carga horária da disciplina é dedicada a fornecer aos discentes fundamentos teóricos e práticos sobre os princípios da comunicação óptica, com ênfase nos efeitos físicos que impactam a propagação de sinais em fibras ópticas.

As simulações foram desenvolvidas para o software GNU Octave, por ser uma ferramenta de código aberto amplamente utilizada na área acadêmica para a análise de sinais. Os códigos seguiram uma lógica matricial que possibilitou a variação de parâmetros essenciais para o SSFM, como comprimento da fibra, comprimento de onda central, número de passos de propagação (h), e os coeficientes α , β e γ .

Para tornar mais claro o funcionamento do código e os parâmetros utilizados nas simulações, resumimos no Quadro 1 as principais variáveis empregadas, suas descrições e respectivas unidades.

Quadro 1 – Variáveis definidas no código de simulação da propagação de pulsos ópticos

Variável	Descrição	Unidade
alfa	Coeficiente de atenuação da fibra	dB/m
beta2	Parâmetro de dispersão de segunda ordem	s ² /m
gama	Coeficiente de não linearidade da fibra	W ⁻¹ ·km ⁻¹
L	Comprimento total da fibra	m
pulse_width	Largura do pulso óptico (FWHM – <i>Full Width at Half Maximum</i>)	s
m	Fator de multiplicação para definição da janela temporal	adimensional
h	Passo de propagação ao longo da fibra	m

Fonte: Autoria própria

As variáveis numéricas apresentadas estão diretamente relacionadas à discretização temporal e espectral, bem como aos parâmetros físicos da fibra óptica. Além disso, o código incorpora operadores de propagação e mecanismos para medir a energia do pulso antes e após a propagação, o que é essencial para a análise da conservação de energia ao longo do processo simulado.

Para fins didáticos, utilizamos exclusivamente a variação N-D (Não linear-Dispersivo), na qual o pulso óptico é propagado considerando inicialmente os efeitos não lineares no domínio do tempo e, em seguida, os efeitos dispersivos no domínio da frequência. Essa abordagem proporciona uma estrutura pedagógica clara, permitindo que os alunos compreendam, de forma segmentada, os impactos de cada fenômeno físico sobre a forma e o espectro do pulso.

O código base utilizado para as simulações foi organizado em blocos que espelham a lógica do método SSFM. Primeiramente, o script define os parâmetros físicos da fibra óptica e os parâmetros numéricos para a janela temporal e espectral. Em seguida, é gerado o pulso óptico inicial, e sua energia é calculada para posterior comparação. Os efeitos lineares da dispersão de segunda ordem são modelados no domínio da frequência, enquanto os efeitos não lineares são tratados no domínio do tempo, respeitando a estrutura N-D do método SSFM. A propagação do pulso é simulada iterativamente, alternando transformadas de Fourier (FFT e IFFT) e aplicando os respectivos efeitos a cada passo da fibra. Ao final, o código permite visualizar o pulso resultante no domínio do tempo e compara a energia antes e depois da propagação, verificando a conservação do sinal.

O Quadro 2 apresenta o trecho do código em que é aplicado o método SSFM.

Quadro 2: Trecho do código em que se aplica o método Split-Step Fourier.

```
h = L / 100; % tamanho do passo no eixo Z
for k = 1:h:L
    N = 1i * gama * ((abs(y)).^2); % efeitos não lineares (ENL)
    y = exp(h * N) * y; % aplicação dos ENL no domínio do tempo
    y = fft(y); % transformação para o domínio da frequência
    y = exp(h * D) * y; % aplicação dos efeitos lineares no domínio da frequência
    y = ifft(y); % transformação para o domínio do tempo

    plot(t, abs(y).^2, 'b'); % impressão do pulso a cada iteração
    ylim([0 1]); % deixa os valores dos eixos da Figura fixos
    xlim([-0.5e-10 0.5e-10]);
    drawnow
end
```

Fonte: Autoria própria

A partir deste código, desenvolvemos 3 roteiros de práticas, focados, respectivamente, na aprendizagem dos fenômenos de atenuação, dispersão e efeitos não lineares.

O Roteiro 1 foca no efeito da atenuação, isolando os efeitos de dispersão e de não-linearidades, visando permitir aos estudantes uma visão clara sobre os efeitos da atenuação de forma isolada dos demais efeitos. A partir da variação dos valores de comprimento de propagação, os estudantes podem visualizar os efeitos da atenuação na propagação do pulso. Neste roteiro, o valor do coeficiente α foi mantido fixo, visto que as fibras monomodo apresentam coeficientes bem definidos para cada comprimento de onda de propagação, especialmente para os comprimentos de onda de 1550 nm, que é o comprimento de onda central utilizado para longas distâncias.

Já o Roteiro 2, focado no fenômeno de dispersão cromática, objetiva isolar os efeitos de atenuação e de não-linearidades, de forma a permitir aos estudantes a visualização clara do que apenas o efeito de dispersão provoca no sinal, que é o seu alargamento proporcional ao comprimento. Como a fibra utilizada é monomodo, a análise concentrou-se exclusivamente na dispersão cromática, também chamada de dispersão de velocidade de grupo. As simulações visam demonstrar os impactos de diferentes valores de β sobre o pulso, evidenciando alterações em sua forma no domínio da frequência, visando à observação do alargamento temporal do pulso causado pela diferença nas velocidades de propagação dos seus componentes espectrais.

Por fim, o Roteiro 3 visa apresentar aos estudantes o fenômeno da automodulação de fase. Com este roteiro, os alunos são estimulados a modificar os parâmetros de não linearidade da fibra (parâmetro γ), a distância percorrida (parâmetro L) e a potência do pulso inicial (parâmetro P), e com isso observar os diferentes impactos dos efeitos não lineares sobre a propagação do pulso. Esta atividade buscava evidenciar como a alta intensidade do pulso pode alterar o índice de refração do meio e provocar distorções no espectro.

3.2 Coleta de dados

Para o estudo de caso, selecionamos a turma da disciplina de Comunicações Ópticas do semestre letivo 2025.1. Participaram das atividades 5 (cinco) alunos regularmente matriculados na disciplina.

As atividades ocorreram em ambiente supervisionado, no Laboratório de Fibra Óptica do Campus, equipado com computadores Desktop com processadores Intel Core i5, 8 GB de memória RAM e sistema operacional Windows. Os equipamentos já estavam previamente conFigurados com o software GNU Octave, utilizado para as simulações. Visando evitar problemas adicionais e disparidades nas simulações, não permitimos que os estudantes utilizassem notebooks próprios. Nenhum outro recurso adicional foi necessário. A coleta de dados foi dividida em 4 (quatro) etapas, apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3: Etapas da coleta de dados.

1. Atividade prática simulando o efeito da atenuação
2. Atividade prática simulando o efeito da dispersão cromática
3. Atividade prática simulando os efeitos não lineares
4. Aplicação de questionário

Fonte: Autoria própria.

As quatro etapas foram distribuídas em três encontros. No primeiro encontro, os alunos simularam o efeito de atenuação; no segundo, os efeitos de dispersão; no terceiro, os estudantes simularam os efeitos não lineares isolados e depois em combinação com os efeitos de dispersão. Ao final do terceiro encontro, aplicamos um questionário para coletar as impressões dos estudantes acerca das atividades.

Cada encontro teve a duração de 1 hora e 30 minutos. No início de cada encontro, os monitores ministraram uma explicação introdutória sobre o fenômeno físico que seria explorado, contextualizando o tema da prática. Em seguida, os roteiros das atividades eram liberados por meio da plataforma Google Sala de Aula, garantindo acesso individualizado a cada aluno. As práticas foram desenvolvidas individualmente, promovendo maior necessidade de autonomia e responsabilidade no processo de aprendizagem.

Durante as primeiras três etapas, os alunos contaram com o suporte de 2 (dois) monitores, cuja função era auxiliar os estudantes na resolução de dúvidas, realizar correções sem fornecer diretamente as respostas, além de verificar a coerência dos resultados obtidos.

Visando coletar dados quanto às impressões dos estudantes acerca da efetividade dos roteiros elaborados, elaboramos um questionário com 15 itens, com afirmações relacionadas à clareza das instruções, à compreensão dos conceitos após a simulação, à utilidade do código fornecido, à ordem das tarefas e ao nível de confiança adquirido pelos alunos. As questões são apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4: Perguntas utilizadas no questionário.

1. O roteiro da prática foi claro e fácil de seguir?
2. As instruções fornecidas no roteiro ajudaram você a entender os objetivos da simulação?
3. Após a simulação da atenuação, consegui entender melhor o efeito causado pela atenuação no sinal óptico?
4. Após a simulação da dispersão, consegui entender melhor o efeito causado pela dispersão no sinal óptico?
5. Após a simulação de efeitos não lineares, consegui entender melhor o efeito causado por estes efeitos no sinal óptico?
6. Me sinto mais confiante em relação aos conceitos teóricos após realizar as simulações?
7. A presença do monitor durante as práticas foi de suma importância para realização da prática?
8. O código inicial na primeira simulação, contendo vários trechos a serem corrigidos, foi desafiador e me estimulou a compreender melhor o código e a simulação como um todo?
9. Após as simulações, sou capaz de entender e explicar as principais linhas do código?
10. A simulação me ajudou a visualizar conceitos que antes eram abstratos ou difíceis de entender?

11. Fui capaz de interpretar os gráficos das simulações?
12. A ordem das atividades (aula teórica → roteiro teórico → simulação prática) foi adequada para o meu processo de aprendizado?
13. Acredito que práticas como essa deveriam ser mais frequentes nas disciplinas técnicas?
14. A prática contribuiu para desenvolver minha capacidade de análise e interpretação de resultados físicos?
15. Se eu fosse explicar para um colega o que é dispersão em fibra óptica, acho que eu conseguiria usar esta simulação como apoio para essa explicação?

Fonte: Autoria própria

O questionário foi adaptado para afirmações com respostas em uma escala de Likert (1932) de cinco pontos, composta pelas opções: “Discordo totalmente”, “Discordo”, “Neutro”, “Concordo” e “Concordo totalmente”, visando mensurar o nível de concordância dos participantes em relação aos diferentes aspectos da atividade prática. A Figura 2 apresenta um extrato de algumas das perguntas, conforme eram visualizadas no questionário aplicado. O questionário foi aplicado no terceiro encontro, após a última prática de simulação.

Figura 1 – Estrutura do Questionário de Avaliação do Roteiro.

	Discordo totalmente	Discordo	Neutro	Concordo	Concordo totalmente
O roteiro da prática foi claro e fácil de seguir	☐	☐	☐	☐	☐

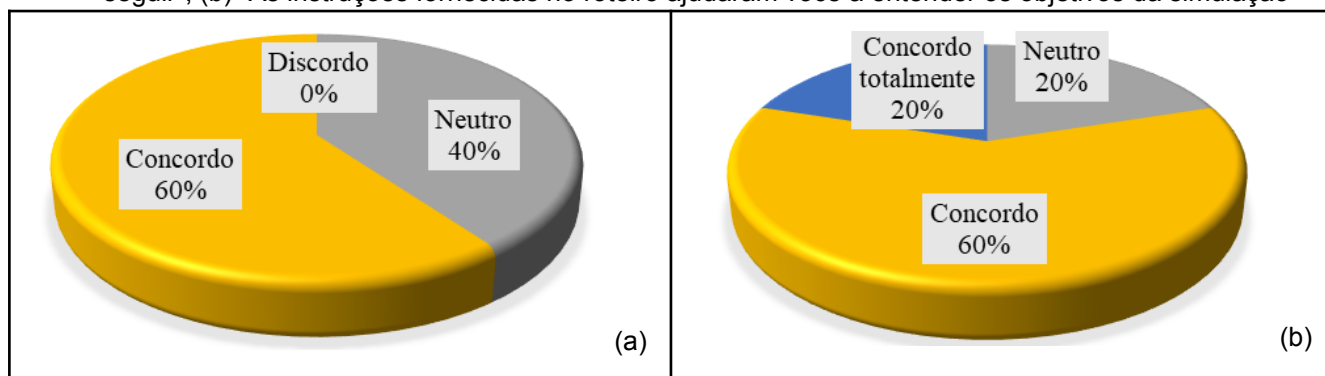
Fonte: Autoria própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, apresentamos e discutimos os resultados obtidos a partir da aplicação do roteiro de simulação junto aos participantes. A análise busca compreender, à luz dos objetivos propostos, como os estudantes perceberam a atividade prática e quais foram os impactos em sua aprendizagem.

Um dos pontos avaliados foi relacionado à atuação dos monitores. As Figuras 2a-b apresentam a percepção dos participantes quanto à clareza e à eficácia das instruções fornecidas no roteiro da simulação.

Figura 2: Reações dos participantes quanto às afirmações: (a) “O roteiro da prática foi claro e fácil de seguir”; (b) “As instruções fornecidas no roteiro ajudaram você a entender os objetivos da simulação”



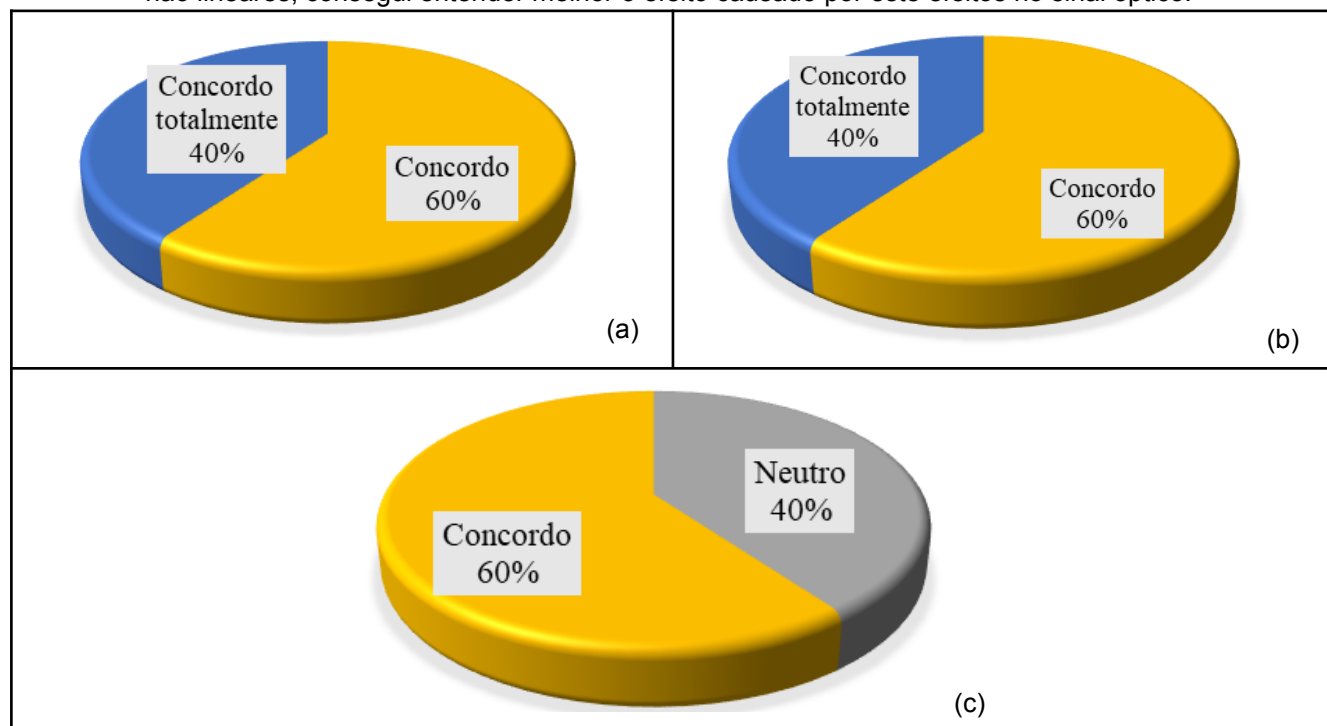
Fonte: Autoria própria

Após a análise da Figura 2a, notamos que 60% dos respondentes concordaram que o roteiro da prática foi claro e fácil de seguir, enquanto os 40% restantes adotaram uma postura neutra. Não houve manifestações de discordância, o que indica que, apesar da ausência de unanimidade, a maioria dos participantes considerou as instruções compreensíveis e adequadas, reforçando a qualidade do roteiro como instrumento de orientação inicial. Já na Figura 2 b, verificamos que 60% dos participantes concordaram que as instruções os ajudaram a compreender os objetivos da simulação, 20% concordaram totalmente, enquanto os outros 20% permaneceram neutros. Esses dados sugerem que 80% perceberam o roteiro como uma ferramenta útil na assimilação dos objetivos propostos, embora parte dos participantes ainda demonstre necessidade de maior clareza ou reforço didático.

Com base nas respostas dos participantes e também nas percepções qualitativas de observação durante a realização das práticas, acreditamos que a atuação dos monitores foi fundamental para o andamento eficiente das práticas, especialmente nos momentos em que os alunos enfrentavam dificuldades na definição e identificação das variáveis corretas nos scripts de simulação foi uma das principais barreiras observadas. O perfil de interação com os monitores variou entre os participantes, pois, enquanto alguns solicitavam auxílio com frequência, outros preferiam esgotar todas as tentativas antes de solicitar ajuda.

As Figuras 3a-c trazem a avaliação dos participantes em relação à eficácia das simulações práticas na compreensão dos principais fenômenos que afetam o sinal óptico: atenuação, dispersão e efeitos não lineares.

Figura 3: Reações dos participantes quanto às afirmações: (a) “Após a simulação da atenuação, consegui entender melhor o efeito causado pela atenuação no sinal óptico.”; (b) “Após a simulação da dispersão, consegui entender melhor o efeito causado pela dispersão no sinal óptico.”; (c) “Após a simulação de efeitos não lineares, consegui entender melhor o efeito causado por estes efeitos no sinal óptico.”



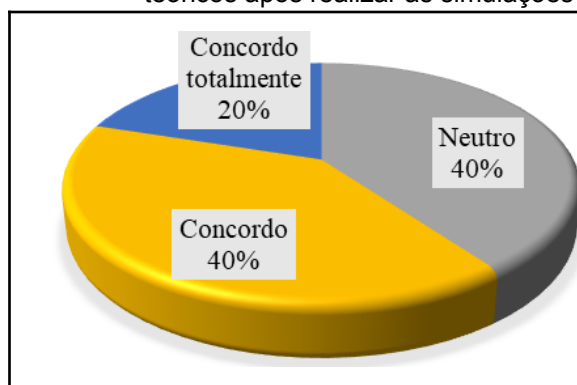
Fonte: Autoria própria

A partir da Figura 3a, observamos que 100% dos participantes acreditam que simulação contribuiu para a compreensão dos efeitos da atenuação e da dispersão (Roteiros 1 e 2), com a mesma distribuição percentual.

Por outro lado, embora a maioria (60%) tenha concordado com a afirmação de que a simulação dos efeitos não lineares contribuiu para a compreensão do fenômeno, 40% dos participantes optaram por uma resposta neutra, conforme ilustrado na Figura 3c. Isso nos indica que ainda há considerável margem para aperfeiçoamento da abordagem adotada para o Roteiro 3, possivelmente em virtude da complexidade conceitual dos efeitos não lineares e ao pouco tempo dedicado às explicações destes fenômenos.

Quando perguntados sobre os benefícios pedagógicos obtidos com a realização das simulações, observamos que a maioria dos participantes (60%) reconhece as simulações como um recurso eficaz na consolidação da compreensão teórica, ainda que parcela significativa (40%) tenha se mostrado neutra (Fig. 4).

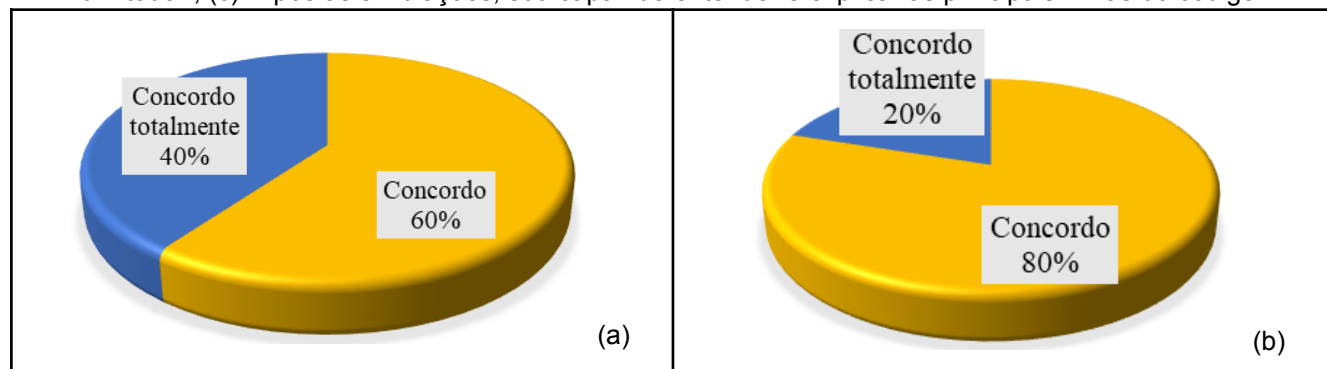
Figura 4: Reações dos participantes quanto às afirmação: “Me sinto mais confiante em relação aos conceitos teóricos após realizar as simulações”;

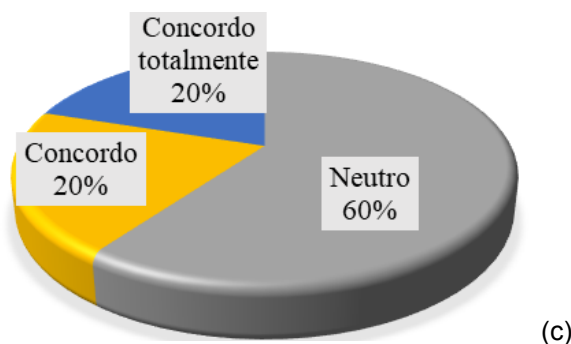


Fonte: Autoria própria

Ao questionar os participantes sobre aspectos específicos da prática, como a presença da monitoria, o desafio com o código inicial e a compreensão das simulações, obtivemos os resultados expressos nas Figuras 5a-c.

Figura 5: Reações dos participantes quanto às afirmações: (a) “A presença do monitor durante as práticas foi de suma importância pra realização da prática”; (b) “O código inicial na primeira simulação, contendo vários trechos a serem corrigidos, foi desafiador e me estimulou a compreender melhor o código e a simulação como um todo” ; (c) “Após as simulações, sou capaz de entender e explicar as principais linhas do código”





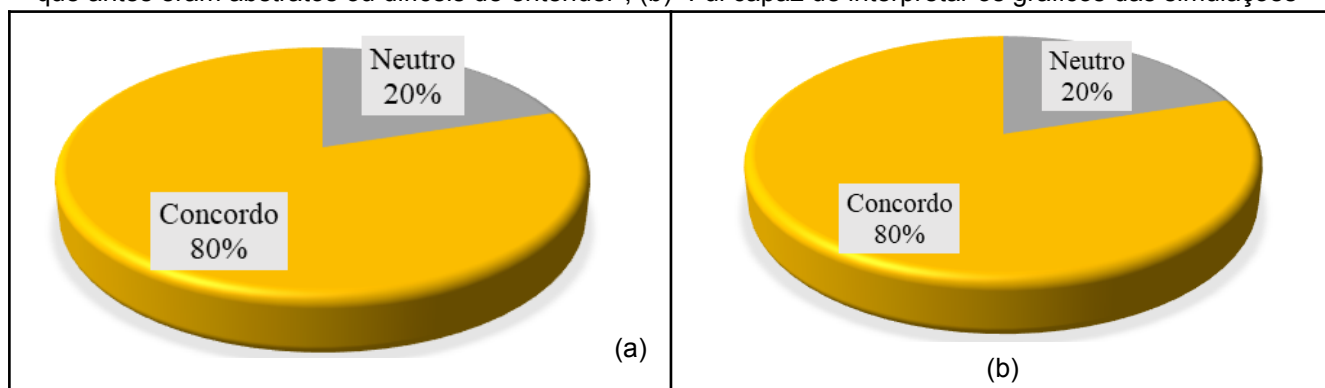
(c)

Fonte: Autoria própria

A partir destes resultados, constatamos que 100% dos participantes concordaram que a presença do monitor foi de suma importância para a realização da prática (Figura 5a). Observamos que a grande maioria (80%) concordaram que o desafio de iniciar cada prática corrigindo um código com erros contribuiu positivamente para a compreensão. Este dado reforça a eficácia da estratégia em promover o engajamento e o raciocínio lógico dos alunos. Por outro lado, a Figura 5c revela que, quando questionados sobre sua capacidade de explicar as principais linhas do código após a simulação, 60% permaneceram neutros, enquanto apenas 40% se sentem seguros para explicar o que entenderam do código. Tal distribuição sugere a necessidade de estratégias complementares que favoreçam uma compreensão mais aprofundada do código-fonte.

As percepções sobre o impacto das simulações na visualização de conceitos abstratos, interpretação de gráficos e autonomia dos estudantes são representadas nas Figuras 6a-b. A Figura 6a mostra que a maioria dos participantes (80%) concordaram que a simulação contribuiu para a visualização de conceitos anteriormente considerados abstratos ou difíceis, enquanto a Figura 6b indica que 80% dos respondentes concordam que foram capazes de interpretar os gráficos gerados nas simulações, o que corrobora com percepção da eficácia da simulação como ferramenta visual de aprendizagem.

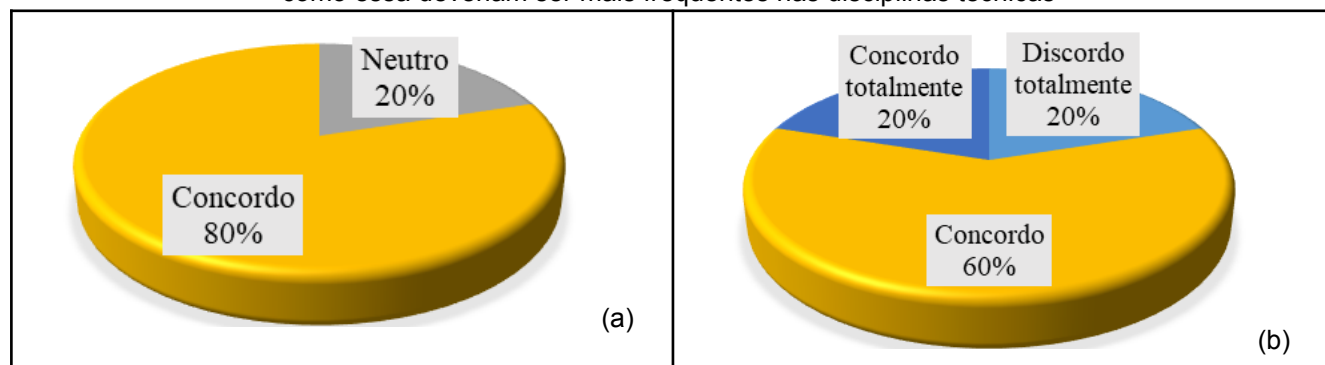
Figura 6: Reações dos participantes quanto às afirmações: (a) “A simulação me ajudou a visualizar conceitos que antes eram abstratos ou difíceis de entender”; (b) “Fui capaz de interpretar os gráficos das simulações”



Fonte: Autoria própria

Em seguida, avaliamos as percepções dos participantes sobre a organização e relevância da proposta metodológica, cujos resultados são apresentados nas Figuras 7a-b.

Figura 7: Reações dos participantes quanto às afirmações: (a) “A ordem das atividades (aula teórica → roteiro teórico → simulação prática) foi adequada para o meu processo de aprendizagem”; (b) “Acredito que práticas como essa deveriam ser mais frequentes nas disciplinas técnicas”

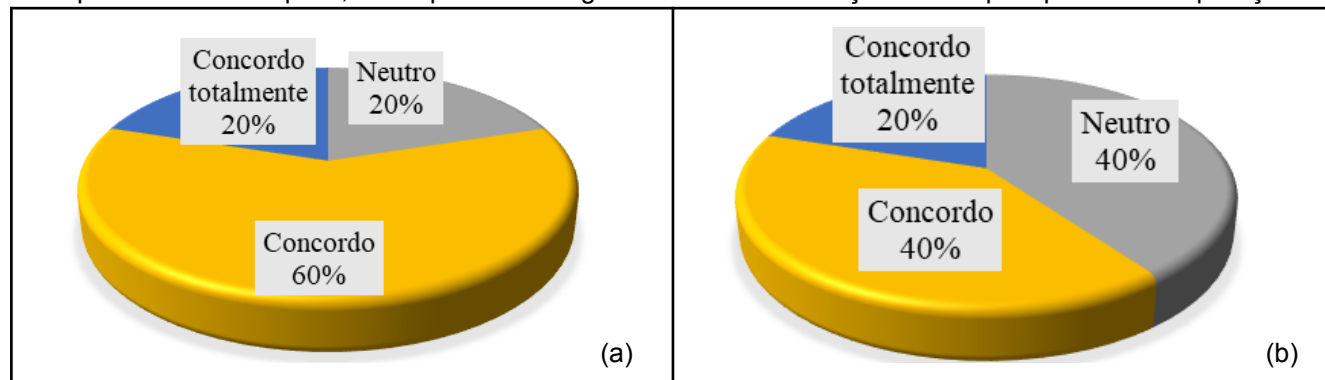


Fonte: Autoria própria

A partir dos resultados expostos na Figura 7, percebemos que a grande maioria (80%) dos participantes concordaram que a sequência “aula teórica → roteiro teórico → simulação prática” foi adequada ao seu processo de aprendizagem, o que evidencia a eficácia da estrutura metodológica proposta.

Por fim, as Figuras 8a-b apresentam dados relativos ao impacto da prática na capacidade de análise e na aplicação do conhecimento adquirido.

Figura 8: Reações dos participantes quanto às afirmações: (a) “A prática contribuiu para desenvolver minha capacidade de análise e interpretação de resultados físicos”; (b) “Se eu fosse explicar para um colega o que é dispersão em fibra óptica, acho que eu conseguiria usar esta simulação como apoio para essa explicação”



Fonte: Autoria própria

A partir da Figura 8a, constatamos que a grande maioria (80%) aponta ganhos significativos na competência de análise e interpretação de resultados físicos a partir da prática. Além disso, a maioria (60%) confirma conseguiria usar esta simulação como apoio para a explicação do conceito de dispersão em fibra óptica, embora uma parcela menor (20%) tenha se mostrado mais seguro e uma parcela maior (40%) tenha se mostrado menos seguro.

5 CONCLUSÃO

A análise dos questionários aplicados aos participantes confirma que a metodologia adotada — baseada em simulações práticas guiadas por roteiro e acompanhadas por

monitoria — mostrou-se eficaz no processo de ensino-aprendizagem dos fenômenos que afetam a propagação óptica.

A maioria dos alunos considerou o roteiro claro e útil, e avaliou positivamente as simulações relacionadas à atenuação e dispersão, que alcançaram unanimidade nas respostas favoráveis. No entanto, a simulação dos efeitos não lineares obteve uma quantidade significativa de respostas neutras, sinalizando que esse conteúdo ainda demanda maiores refinamentos e/ou estratégias pedagógicas mais robustas.

Os dados também revelam benefícios pedagógicos importantes, como o aumento da confiança em relação aos conceitos teóricos e a percepção de que a prática favoreceu o aprendizado em comparação com aulas exclusivamente expositivas. A presença do monitor foi considerada essencial, e o uso de códigos com erros intencionais mostrou-se uma estratégia eficaz para estimular o raciocínio e o engajamento dos estudantes.

Por outro lado, aspectos como a compreensão aprofundada do código-fonte e a autonomia para explorar os conceitos apresentaram menor concordância entre os participantes. Isso sugere a necessidade de melhorias, como atividades com menor intervenção dos monitores e desafios que promovam maior protagonismo discente.

A estrutura metodológica adotada (aula teórica → roteiro → simulação) foi bem avaliada por 80% dos participantes, e a maioria indicou o desejo de que práticas como essa sejam mais frequentes no ensino técnico. De forma geral, os resultados apontam para a efetividade da abordagem, ao mesmo tempo em que evidenciam possibilidades concretas de aprimoramento para potencializar ainda mais a aprendizagem ativa e significativa.

Uma limitação do trabalho foi a quantidade reduzida de participantes (apenas 5), o que pode ser atribuída a características específicas da turma, composta majoritariamente por estudantes do turno noturno que conciliam os estudos com atividades profissionais durante o dia, principal fator que contribui para a evasão e a diminuição do número de concluintes nas etapas mais avançadas do curso. Além disso, sendo a disciplina ofertada no quarto semestre, observa-se uma menor retenção de alunos nesse período, reflexo de desistências acumuladas ao longo da trajetória acadêmica.

Como trabalhos futuros, recomendamos a revisão dos roteiros visando deixá-los ainda mais interativos, além de outros formatos de variação dos parâmetros. Sugerimos, ainda, a aplicação das práticas dividindo a turma em duplas e em solo, visando verificar se a aplicação em duplas é mais eficiente. Além disso, a aplicação da metodologia em várias turmas de semestres diferentes pode trazer maior segurança sobre a efetividade das conclusões aqui trazidas. A aplicação de um minicurso de comunicações ópticas, onde a turma poderia ter 20 ou mais alunos, pode contribuir também para uma maior assertividade dos percentuais. Outra estratégia interessante seria, ainda, dividir a turma em grupo de teste e grupo de controle, com questionários objetivos e subjetivos ao final para avaliar a aprendizagem dos conceitos e não apenas a percepção dos estudantes acerca da prática.

Por fim, acreditamos que este trabalho, apesar de suas limitações, propõe um método que se mostrou eficiente e que pode ser facilmente replicado para outras disciplinas onde os conceitos teóricos sejam de difícil compreensão e onde simulações numéricas podem auxiliar a compreensão dos estudantes.

REFERÊNCIAS

AGRAWAL, G. P. Nonlinear Fiber Optics. 3rd ed. San Diego: Academic Press, 2001.

COSTA, J. D. M.; OLIVEIRA, J. C. S.; LOPES, E. J. Sistemas de Comunicações Ópticas. São Paulo: Érica, 2015.

HECKLER, M. V.; SARAIVA, C. C. M.; OLIVEIRA FILHO, J. A. Utilização de Simulações Computacionais Interativas no Ensino de Física: Um Estudo de Caso. Revista Brasileira de Informática na Educação, v. 15, n. 1, p. 27–44, 2007.

KEISER, G. Optical Fiber Communications. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2010.

LIKERT, R. A technique for the measurement of attitudes. Archives of Psychology, 22(140), 1-55, 1932.

MUSLU, G. M.; ERBAY, H. A. A Split-Step Fourier Method for the Nonlinear Schrödinger Equation. Mathematical and Computational Applications, v. 10, n. 2, p. 183–193, 2005.

RIBEIRO, J. M. P. Fibras Ópticas: Tecnologia e Projeto de Sistemas. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

RIEZNIK, A.; REIS, S. C. dos; VILLUMSEN, J. L. Visualização de Fenômenos Não Lineares em Fibras Ópticas Usando Simulações com o MATLAB. Revista de Ensino de Física, v. 27, n. 4, p. 543–555, 2005.

TEACHING GUIDE FOR NUMERICAL SIMULATIONS APPLIED TO TEACHING OPTICAL PHENOMENA IN SINGLE-MODE FIBERS WITH THE SPLIT-STEP FOURIER METHOD

Abstract: *The growing demand for high bandwidth requires the increasing use of optical fibers, especially in backbone networks, so it is necessary for future optical network designers to master the phenomena that govern the propagation of optical pulses over long distances. Such concepts present high theoretical complexity, and the lack of laboratory resources in universities is an aggravating factor. Thus, this work proposes the application of didactic scripts based on computer simulations, aiming to facilitate the understanding of the main linear and nonlinear effects that occur in optical fiber, using the Split-Step Fourier numerical method through practical scripts. The results demonstrate that the methodology contributed significantly to student learning, in addition to encouraging their engagement. We conclude that the adopted proposal is effective, accessible and viable for teaching optical communications, and can be expanded to several other contexts.*

Keywords: *optical fibers, NLSE, SSFM.*

