



ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DE ACOPLAMENTO DE LUZ VIS-NIR EM UMA FIBRA MULTIMODO USANDO DIFERENTES TIPOS DE LENTES POR MEIO DE SIMULAÇÕES NO OPTICSTUDIO

Jéssica G. S. Ramalho¹; Afonso O. de Matos²; Valéria L. da Silva³

^{1,2,3} SENAI CIMATEC; Salvador/Bahia

¹jessica.ramalho@fbter.org.br

Resumo: O objetivo deste trabalho é modelar a eficiência de acoplamento de uma fonte de luz com banda larga (650nm-920nm) para uma fibra ótica multimodo com quatro diferentes tipos de lentes: Bi-Convexa, Plano-Convexa, Asférica e Dupleto Acromático. A fibra modelada possui diâmetro de 100 μ m e NA = 0,21 e o software de traçamento de raios OpticStudio foi usado para a modelagem. Os resultados mostram que à medida que a abertura numérica da lente aumenta, as diferenças entre as lentes se tornam mais significativas e a eficiência geral do acoplamento começa a cair. Quando a posição longitudinal da fibra é otimizada, as lentes asféricas apresentam melhor desempenho de acoplamento mesmo para fontes de luz com grande largura espectral.

Palavras-Chave: Eficiência de acoplamento; Lentes; Fibra ótica; Zemax.

VIS-NIR LIGHT COUPLING EFFICIENCY ANALYSIS ON A MULTIMODE FIBER BY USING DIFFERENT TYPES OF LENS BY OPTICSTUDIO SIMULATIONS

Abstract: The objective of this work is to model multimode optical fiber coupling efficiency for a broadband light source (650nm-920nm) with four different types of lenses: Bi-Convex, Plane-Convex, Aspherical and Achromatic Doublet. The modeled fiber has a 100 μ m diameter and 0,21 NA and the OpticStudio ray tracing software was used for the modeling. The results show that as the lens numerical aperture increases, the differences between the lenses become more significant and the overall coupling efficiency begins to fall. When the fiber longitudinal position is optimized, the aspherical lenses have show better coupling performance even for light sources with wide spectral width.

Keywords: Coupling efficiency; Lenses; Optical fiber; Zemax.



1. INTRODUÇÃO

No desenvolvimento de qualquer produto comercial composto por sistema óptico que demande o acoplamento de luz em fibras óptica é sempre desejável obter o melhor equilíbrio entre compactação de dimensões, facilidade de alinhamento, e alta eficiência no acoplamento de luz.

O acoplamento da luz em fibra óptica a partir de um laser colimado não é em si uma tarefa difícil, desde que os raios marginais da lente estejam dentro do cone da abertura numérica da fibra e atingindo seu diâmetro útil, a eficiência do acoplamento estará assegurada [1]. No entanto, quando a fonte de luz tem faixa espectral larga e deseja-se acoplar todo o espectro na fibra, a escolha da lente torna-se crítica. Cada lente é projetada para otimizar um aspecto diferente na análise do acoplamento, variando potência de transmissão, banda espectral, redução de aberrações cromáticas ou esféricas, etc., dessa forma, uma análise comparativa mais apurada deve ser realizada buscando o balanceamento entre os parâmetros relevantes para a aplicação do sistema óptico.

As lentes mais comuns como as plano-convexas e biconvexas, não possuem qualquer tipo de correção para aberrações cromáticas ou esféricas. As lentes duplo acromáticas e asféricas são fabricadas com tecnologia que permite tais correções separadamente, mas podem ser significativamente mais caras. As lentes asféricas, no entanto, são projetadas para operar de forma ótima em faixa espectral estreita enquanto os dupletos acromáticos operam com melhor desempenho em faixa espectral larga.

O objetivo deste trabalho é comparar de forma quantitativa a eficiência de acoplamento de luz na região do vermelho ao NIR, desses quatro tipos de lentes em sistemas ópticos: Singleto Bi-Convexa, Singleto Plano Convexa, Asférica e Duplo Acromática, buscando minimizar dimensões e custo do sistema total. Em sistemas onde a fibra adotada é do tipo multimodo, o modelo computacional e a análise desse problema podem ser realizados via simulação de traçamento de raios. A plataforma de software escolhida para a tarefa foi o OpticStudio da Zemax[2].

2. METODOLOGIA

A iluminação do sistema em questão sendo simulado será com feixe colimado de 9 mm de diâmetro e largura espectral variando de 650 nm a 900 nm. O feixe deve ser condensado através de uma das lentes em estudo e acoplada eficientemente em uma fibra multimodo com abertura numérica (NA) de 0,22 e diâmetro de 100 μm . A regra geral para acoplamento eficiente é o casamento da lente com o NA da fibra, que no caso simulado significa ter uma distância focal (f) de [3]:

$$f = n * \phi_{iluminado} / 2 * NA \approx 30,7 \text{ mm} \quad (1)$$



em que n é o índice de refração do vidro da lente, normalmente em torno de 1,5 e $\Phi_{iluminado}$ é o diâmetro iluminado na lente. Note que se a faixa espectral for grande, haverá variação no índice de refração e distância focal ótima.

A partir das lentes disponíveis nos catálogos dos principais fornecedores optomecânicos, doze lentes foram selecionadas a fim de extrapolar esse limite focal para menos, buscando entre os tipos de lentes mencionadas, aquela que além de manter eficiência de acoplamento também minimize as dimensões e custo do sistema final. As lentes selecionadas estão organizadas na Tabela 1 a seguir.

Na simulação do OpticStudio, cada lente foi iluminada da forma mencionada e o plano da imagem, que representa a fibra óptica multimodo, posicionado inicialmente na distância focal especificada pelo fornecedor de cada lente. No entanto, esta é uma variável crítica para a eficiência do acoplamento e alinhamento do sistema. O software da Zemax possui uma complexa ferramenta de otimização de variáveis, através dela é possível configurar algoritmos que minimizam a Função de Mérito, uma função composta por valores targets ponderados e configuráveis. Os doze sistemas foram otimizados individualmente através do operador IMAE na Função de Mérito. Esse operador busca o posicionamento ótimo da fibra na qual a eficiência de acoplamento para todos os comprimentos de onda, simultaneamente, seja a maior possível. Nessa otimização, o operador IMAE estima a eficiência do sistema lançando centenas de raios na pupila de entrada e computando o percurso das frações que atravessam todas as superfícies até o destino [4].

Tabela 1. Lentes selecionadas para simulação da eficiência de acoplamento

Fornecedor	Tipo	Superfícies/Materiais	Modelo	Diâmetro (mm)	Dist. Focal Otimizada (mm)	NA	Preço (USD)
Edmund	Asférica	Plano - Asférica/FUSED SILICA	#49-594	25,0	30,13	0,15	485,00
Thorlabs	Dub. Acromática	N-BAF10/N-SF6HT	AC254-030-B	25,4	29,2	0,15	91,67
Thorlabs	Biconvexa	N-BK7	LB1757-B	25,4	29,6	0,15	37,30
Thorlabs	Plano Convexa	N-BK7	LA1805-B	25,4	29,4	0,15	35,46
Edmund	Asférica	Plano - Asférica/FUSED SILICA	48-535	15,0	20,08	0,22	415,00
Thorlabs	Dub. Acromática	N-BAF10/N-SF6HT	AC127-019-B	12,7	18,89	0,24	59,63
Thorlabs	Biconvexa	N-BK7	LB1450-B	12,7	19,5	0,23	34,14
Thorlabs	Plano Convexa	N-BK7	LA1074-B	12,7	18,9	0,24	32,31
Edmund	Asférica	Plano - Asférica/L-BAL35	#69-863	12,5	12,56	0,36	195,00
Edmund	Dub. Acromática	N-BASF64/N-SF66	#65-550	12,5	12,17	0,37	90,00
Edmund	Biconvexa	N-SF5	#49-474	12,0	11,44	0,39	35,50
Edmund	Plano Convexa	N-SF11	#88-830	12,0	11,11	0,41	42,00

As lentes estão divididas em três grupos de acordo com a distância focal e diâmetros aproximados, cada grupo contém uma lente de cada tipo:

As lentes esféricas biconvexas e plano-convexas, são as mais comuns e baratas, nessas lentes o ponto focal de uma fonte de luz branca é mal definido em função da aberração cromática da lente. Duas geometrias foram selecionadas para o



estudo, as biconvexas, populares para aplicações com imageamento finito e as plano convexas, mais adotadas para focalizar luz colimada.

Nas dubletos acromáticas duas lentes com vidros diferentes são combinadas para minimizar o efeito da aberração cromática. Essas lentes apresentam bom desempenho em largura espectral e melhor desempenho óptico do que as singletos, mas à um custo mais elevado.

As lentes esféricas, por sua vez, fornecem desempenho limitado por difração para focalização do feixe monocromático. Para fontes monocromáticas, a aberração esférica é muitas vezes o que impede que uma lente esférica alcance um desempenho limitado por difração ao focar ou colimar luz. A superfície de uma lente esférica é projetada para eliminar a aberração esférica, proporcionando tamanhos de pontos limitados pela difração. Comuns em aplicações que precisam colimar luz saindo de laser díodo ou de fibra óptica, essas lentes têm custo ainda mais elevado que as anteriores e não possuem nenhuma correção cromática.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A eficiência de acoplamento da luz na fibra não depende somente da incidência dos feixes em um diâmetro menor que o da fibra óptica; o ângulo de incidência deve estar dentro do cone formado pela abertura numérica da fibra para garantir que a luz se propagará dentro da fibra por Reflexão Interna Total [1;5].

A distância focal mínima que otimiza a eficiência desse sistema é aproximadamente 31 mm, como visto em (1). De fato, a eficiência de acoplamento simulada, nas condições citadas anteriormente, para as lentes de *effective focal lens (EFL)* \cong 30 mm, foi de 100% em todo o espectro de interesse, de 650 nm a 920 nm.

Para as lentes com $f \cong$ 20 mm, o gráfico da Figura 1 mostra que as lentes Dupleto Acromática, Esférica e Plano-Convexa tem eficiência aproximadamente constante dentro da largura espectral 650 nm a 920 nm. Isso se deve à otimização da posição da fibra feita no OpticStudio. O diagrama de *spot* dessas três lentes tem comportamento semelhante e pode ser analisado pelo diagrama de *spot* da lente Esférica mostrado na Figura 2. O diagrama mostra que para 650 nm, o *spot size* é muito menor que o diâmetro da fibra, sugerindo que o acoplamento não é de 100% porque está limitado pelo NA da lente. Como o diâmetro do feixe de luz incidente é de aproximadamente 9 mm e a distância focal é de aproximadamente 20 mm, o NA desse sistema óptico é próximo a 0,23, ligeiramente maior que o NA de 0,22 da fibra. Já em 900 nm, o diâmetro do feixe se aproxima do diâmetro da fibra, sugerindo que nesse caso, o acoplamento está limitado pelo tamanho do *spot*. Dentre as quatro lentes avaliadas, a lente esférica apresenta eficiência global em torno de 95%. As demais lentes tem eficiência semelhante, dentro da precisão da simulação, exceto pela biconvexa que apresenta uma degradação na eficiência à partir de 850 nm.



Figura 1. Eficiência de acoplamento simulada no OpticStudio Zemax das lentes com *effective focal lens* (EFL) \cong 20 mm

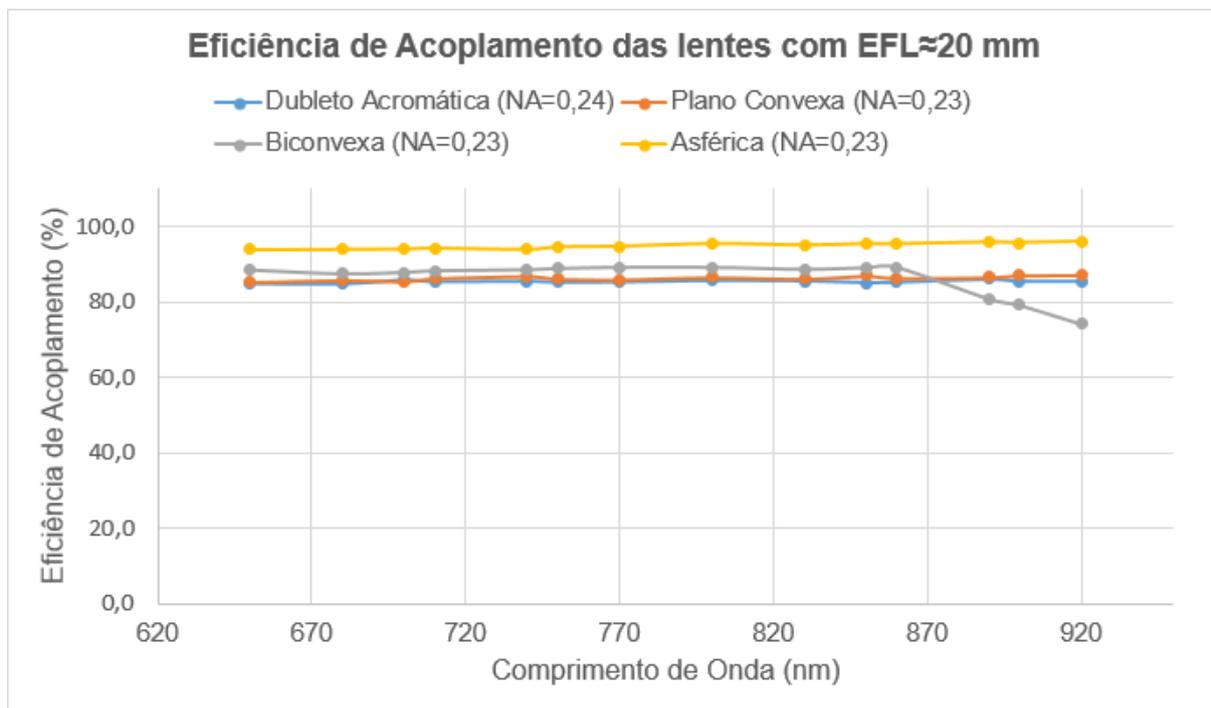
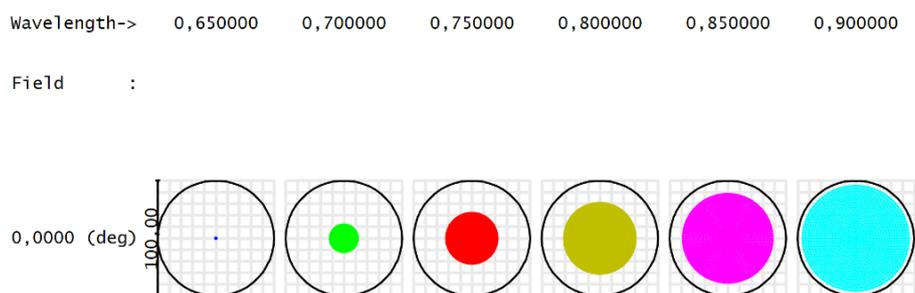


Figura 2. Diagrama de Spot simulado pelo OpticStudio da Zemax para a lente Asférica com $f \cong 20$ mm, na posição otimizada na fibra



Para as lentes com distâncias focais de aproximadamente 12 mm, a queda da eficiência de acoplamento é significativa. As lentes asféricas e dubleto acromáticas mantêm eficiência constante em $\sim 38\%$ ao longo da faixa espectral. Na Figura 4 nota-se que mais uma vez o spot de luz está completamente contido no diâmetro da fibra, representado pelo círculo preto, evidenciando que nesses casos o NA elevado (0,36 e 0,37) está limitando a eficiência de acoplamento. Já as lentes esféricas apresentam desempenho ainda pior, pois além do NA muito superior ao da fibra, as aberrações esféricas e cromáticas se tornam significativas, conforme ilustrado na Figura 4.



Figura 3. Eficiência de acoplamento simulada no OpticStudio Zemax das lentes com *effective focal lens* (EFL) $\cong 12$ mm

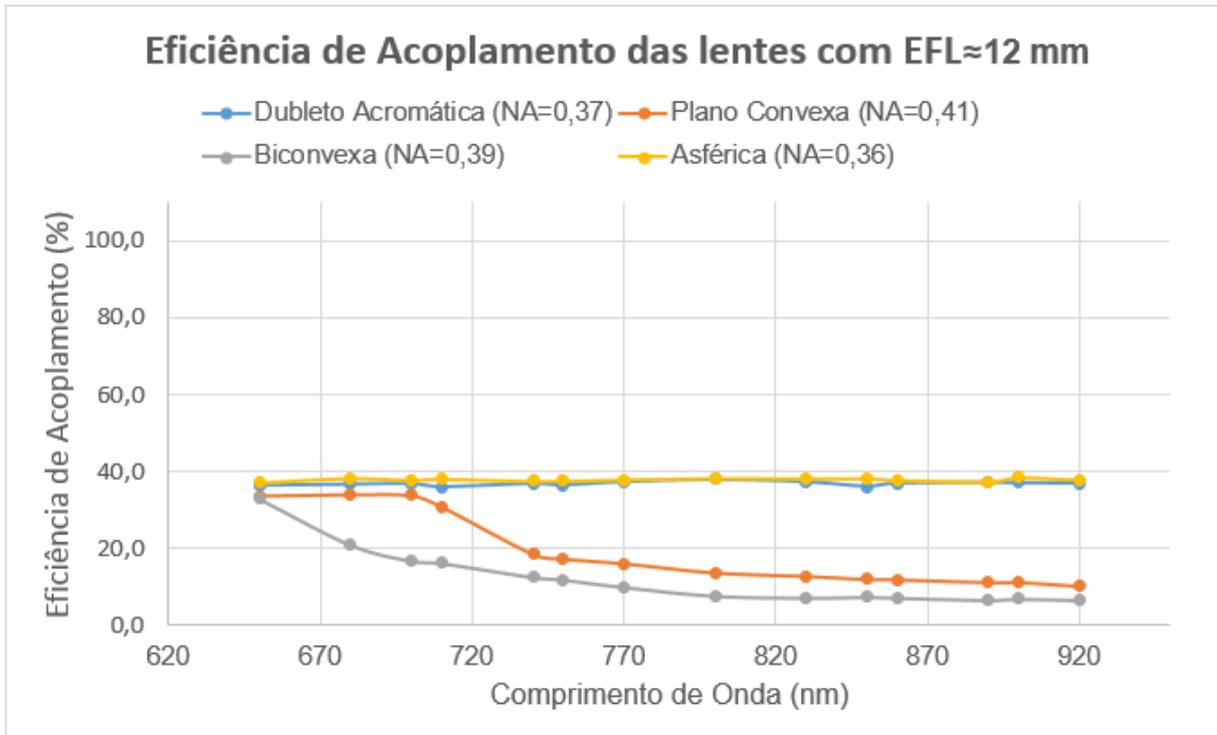
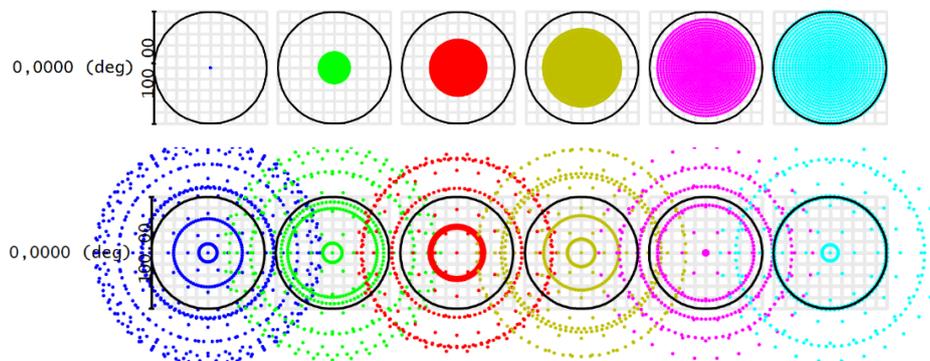


Figura 4. Diagrama de Spot para a lente Asférica com $f \cong 12$ mm (NA=0,36) acima e para a lente Esférica Biconvexa com $f \cong 12$ mm (NA=0,39) abaixo

Wavelength-> 0,650000 0,700000 0,750000 0,800000 0,850000 0,900000

Field :





Uma alternativa para minimizar as aberrações esféricas usando essa lente esférica seria selecionar uma lente com diâmetro muito superior ao diâmetro de entrada da fonte. Essa solução, no entanto, aumentaria consideravelmente a dimensão transversal do sistema. Há ainda as lentes dubletos acromáticas asféricas capazes de corrigir os dois tipos de aberrações, mas esses componentes ópticos chegam a custar 10 vezes mais do que as lentes com correções individuais [6], sendo proibitivamente caras para sistemas comerciais.

4. CONCLUSÃO

Utilizando a otimização do posicionamento da lente, é possível praticamente eliminar a variação da eficiência de acoplamento com o comprimento de onda. O tipo de lente utilizado não é crítico para sistemas com NA menor que o NA da fibra óptica. À medida que o NA fica próximo ao da fibra, as diferenças entre as lentes se tornam mais significativas e a eficiência de acoplamento começa a cair. As lentes asféricas são as que possuem melhor desempenho, ou seja, melhor eficiência de acoplamento seguidas dos dubletos acromáticos. No entanto, como o custo das lentes asféricas é também o mais alto. A vantagem de utilizar lentes com NA maior é a de redução da distância focal e tamanho do sistema, que pode ser um requisito importante para alguns sistemas.

Agradecimentos

À CAPES, CNPq, EMBRAPPII, CODEMGE e SENAI CIMATEC pelo apoio financeiro e institucional.

5. REFERÊNCIAS

¹NIU, Jinfu e Xu, Jianqiu. Coupling efficiency of laser beam to multimode fiber. **Opt. Comm.**, v. 274, p. 315-319, 2007

² OpticStudio. Zemax. Disponível em <<https://www.zemax.com/products/opticstudio>>.

³SMITH, W.J. **Modern optical engineering**. NewYork: McGraw-Hill,, 2000.

⁴ZEMAX, **Zemax OpticStudio 18.7 User Manual**. 2018.

⁵SALEH, B. E. A, e TEICH, N.C. **Fundamentals of Photonics**. John Wiley & Sons, Inc, 1991.

⁶Optical Lenses. Acesso em 13 set. 2019. Disponível em:
<<https://www.edmundoptics.com/c/optical-lenses/603/>>