



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROJETO DE CIRCUITOS FOTÔNICOS EM SILÍCIO

**Professor:** Adolfo Herbster

**Aluno:** Caio Rodrigues Correia de Oliveira

## **Relatório de projeto:**

Acoplador direcional 2x2 de banda larga  
utilizando estrutura de grade em regime de  
subcomprimento de onda (SWG) projetado em  
dispersões

30 de março de 2022

Campina grande, PB

## 1. Introdução

As aplicações dos acopladores direcionais são diversas, sendo as principais envolvendo monitoramento, medição de energia, entre outros. Sua facilidade de manufaturamento eleva bastante sua difusão na área de fotônica e consequentemente a necessidade cada vez mais intensificada de pesquisa de desenvolvimento e aprimoramento da tecnologia.

Dentre os mais diversos ramos explorados para essa tecnologia, é consideravelmente forte o mesmo com o objetivo de expandir os atributos necessários para a sua utilização em maior escala e diversidade, isto pode ser realizado de diversas maneiras. Um exemplo é o aumento de sua banda de operação eficiente, onde seria possível utilizar mais pontos de frequências para usufruir das operações do acoplador direcional.

Tal feito pode ser realizado de inúmeras formas, como por meio de um MZI, conversão de modos adiabáticos, dobra de guia, topologia SWG, etc. Em particular, tratar-se-á em diante da última citada, pois relativo às outras demais metodologias apresentadas, esta se destaca pelo balanço atraente de propriedades como performance, custo espacial e fabricação.

SWGs são estruturas de grade feitas de material com alto índice de refração, dispostas em um período especificado de maneira a ser comparável metricamente com o comprimento de onda da luz incidente. Dessa forma, a propagação transversal gera fenômenos que simultaneamente defasam e intensificam a distribuição de potência nos dois guias paralelos do acoplador direcional.

## 2. Objetivos

Este projeto objetiva um estudo acerca da utilização de uma estrutura de grade em regime de subcomprimento de onda com o intuito de aumento considerável e aplicável da banda de operação de um acoplador direcional em uma designada proporção de potência. Sendo posto em foco a obtenção de uma distribuição 50/50 para fins demonstrativos.

O trabalho a seguir, à princípio utiliza majoritariamente dados, suposições, e configurações topológicas apresentadas e argumentadas no trabalho [\[1\]](#), referenciado na seção *referências* posteriormente.

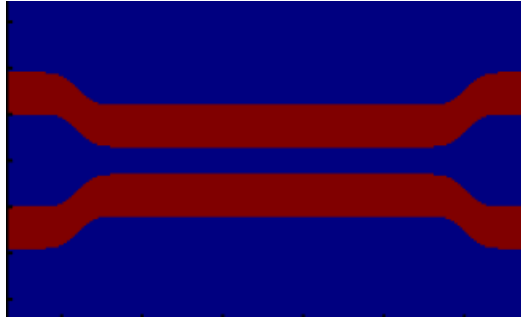
Serão apresentados em suma os desenvolvimentos de dois tipos de acopladores direcionais: um simples e um estruturado com o SWG, ambos acompanhados de análises particulares acerca de escolhas dimensionais e categorização dos parâmetros mais importantes. E finalmente, será demonstrado um comparativo entre os seus resultados resgatados na banda 1500nm – 1600nm (a mesma especificada no trabalho referenciado). As ferramentas utilizadas para a obtenção dos dados característicos serão, em nível puramente matemático e visual de dados, o software MatLab®, e em nível alto visual físico, os softwares dipostos pelo Lumerical®, utilizando mais especificamente, o MODE.

### 3. Desenvolvimento

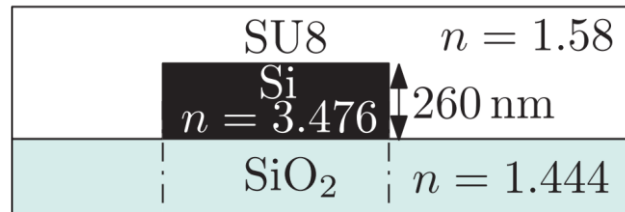
#### 3.1. Modelo do acoplador direcional simples

Para o acoplador direcional simples, utilizou-se as dimensões especificadas abaixo:

- Largura dos guias =  $0.45\mu\text{m}$
- Altura dos guias =  $0.26\mu\text{m}$
- Comprimento central do guia =  $20\mu\text{m}$



Transversalmente, para quaisquer seções do acoplador, tem-se:



As demais dimensões serão determinadas em virtude das necessidades a diante. O primeiro desafio a ser enfrentado, é forçar um comprimento de batimento no qual ocasione uma potência dividida em uma proporção de 50/50 em cada porta de saída. Para isso, recorre-se à seguinte expressão determinante do comprimento de batimento:

$$L_{\pi} = \frac{\lambda/2}{n_{\text{eff},1} - n_{\text{eff},2}}$$

Esta expressão se baseia no pressuposto que todo comprimento de batimento está associado a um ponto (ou no máximo, uma faixa minúscula) de frequência específico, sendo qualquer alteração significativa para o perfil de campo final. Apesar desse pressuposto, o mesmo não influenciará nos resultados da simulação, e logo, será utilizado somente como um dado comparativo.

É importante observar que, para gerar uma divisão de potência na proporção desejada (50/50), é necessário definir o comprimento central do acoplador como sendo a metade o comprimento de batimento. Nesse caso em particular, como o dispositivo em questão fora especificado com um comprimento central de  $20\mu\text{m}$ , conclui-se que  $L_{\pi}$  deverá assumir o valor de  $40\mu\text{m}$ . Dessa forma, a diferença de índice torna-se determinística, com o valor de 0.019 para o comprimento de onda de  $1.515\mu\text{m}$ .

A partir dessa conclusão, a questão agora recai sobre qual ou quais alterações serão atribuídas no acoplador para objetivar esse modelo. Com certa prudência e pragmática, é desejável utilizar como grau de liberdade, a fenda (*gap*) entre os guias da parte central do acoplador, que diretamente influencia nos índices.

Para esse intuito, realizou-se uma varredura de *gaps*, resgatando cada diferença de índices efetivos dos dois primeiros supermodos para uma o comprimento de onda de  $1,55\mu\text{m}$  e gerando o seguinte gráfico:

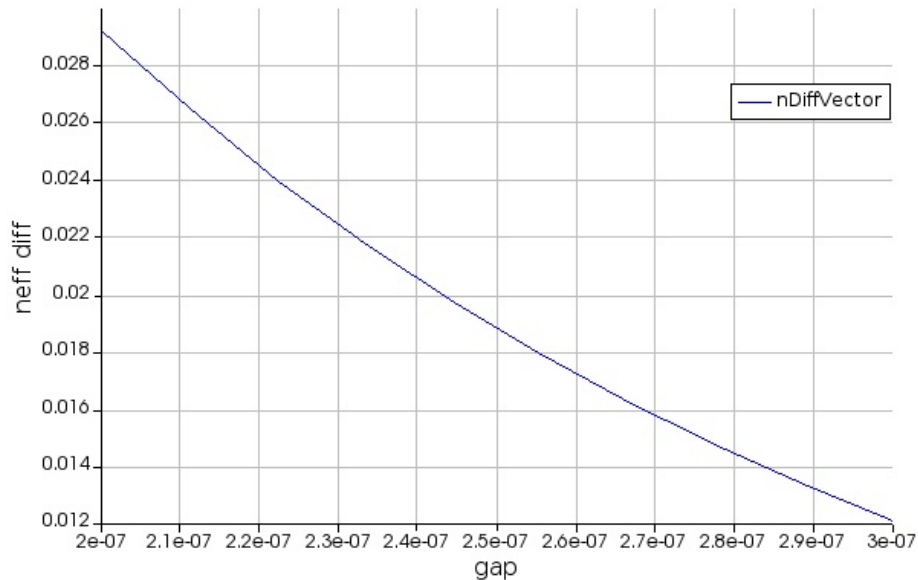


Gráfico gap ( $\mu\text{m}$ ) x Diferença de Neff entre dois primeiros supermodos

É observável que para atingir a diferença de índices equivalente a 0.019, pode-se utilizar um *gap* de aproximadamente  $0.25\mu\text{m}$ . Com isso, é analisado por um *frequency sweep* esta configuração de acoplador:

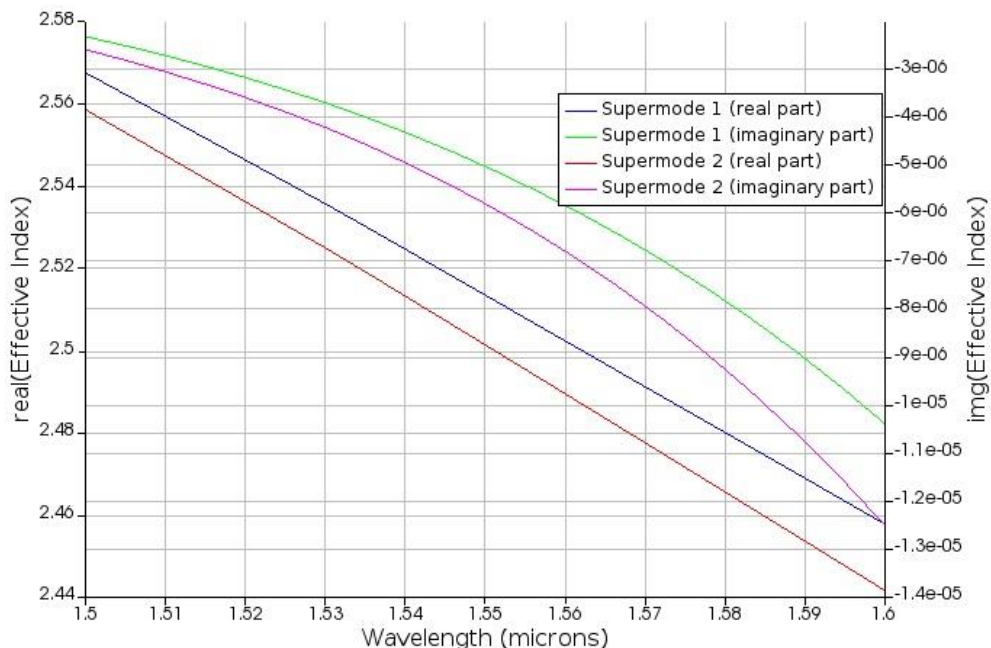


Gráfico Neff x Comprimento de onda ( $\mu\text{m}$ )

Conclui-se o esperado: os índices efetivos dos dois supermodos se comportam de forma a se aproximarem a medida que a frequência aumenta, o que impacta diretamente na banda de transmissão 50/50.

Assim, atribuindo os monitores de transmissão na entrada e nos outputs, gera-se um gráfico representante desse fenômeno. Percebe-se que somente o comprimento de onda selecionado para a projeção do comprimento do guia adequado para a transmissão simétrica (50/50) é eficiente para esse propósito, mais uma vez enfatizando a limitação do acoplador direcional.

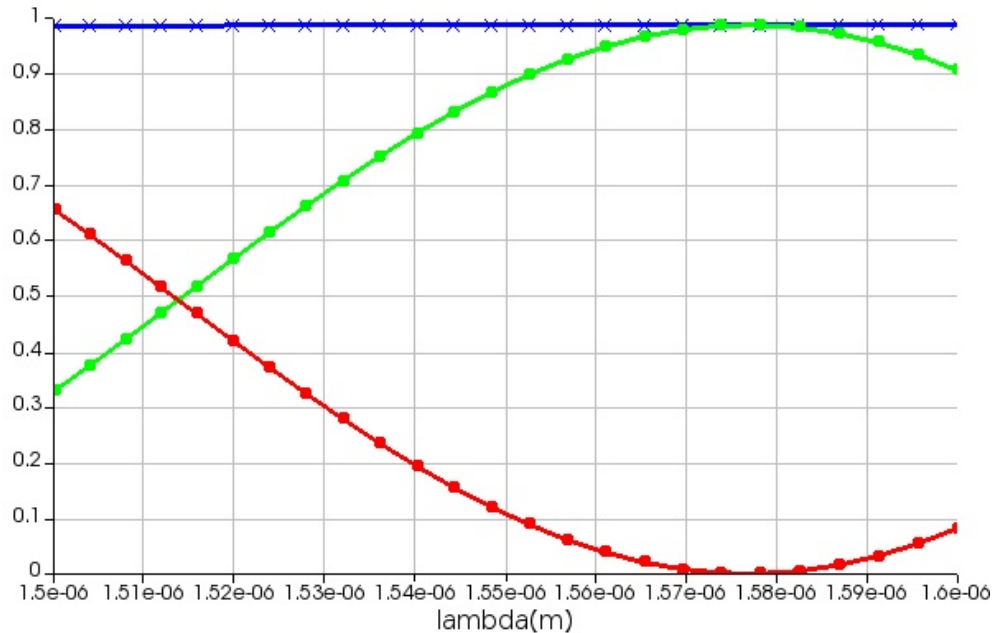
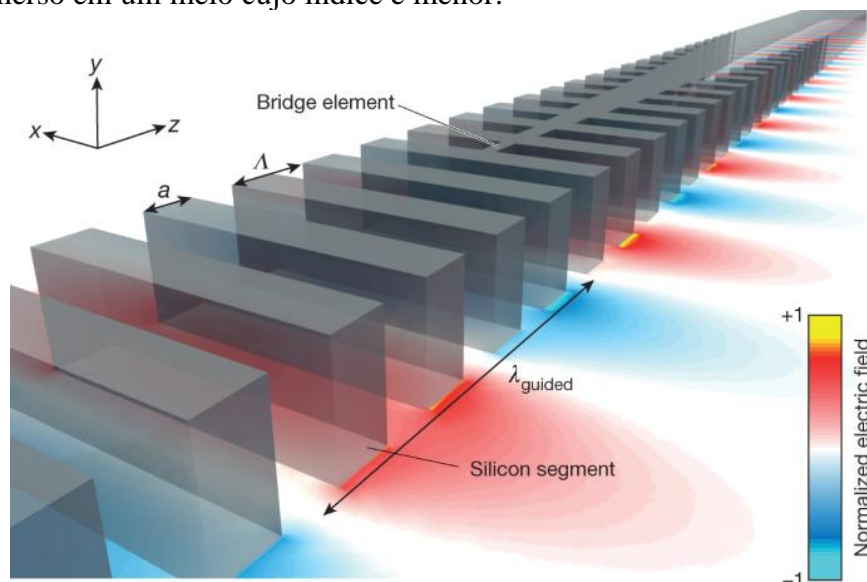


Gráfico Transmissão x Comprimento de onda (μm)

## 3.2. Modelo do acoplador direcional com estrutura SWG

### 3.2.1. Definindo uma estrutura SWG

Uma estrutura SWG (subwavelength gratings) é formada por uma grade com dentes subsequentes, e nesse caso, igualmente espaçados por uma distância  $\Lambda$  suficientemente pequena para ser comparado ao comprimento de onda da luz incidente. A estrutura posicionada de forma perpendicular à direção de propagação da luz, pode ser utilizada para auxiliar no guiamento da luz incidente, quando seu material possui um alto índice de refração e estando imerso em um meio cujo índice é menor.



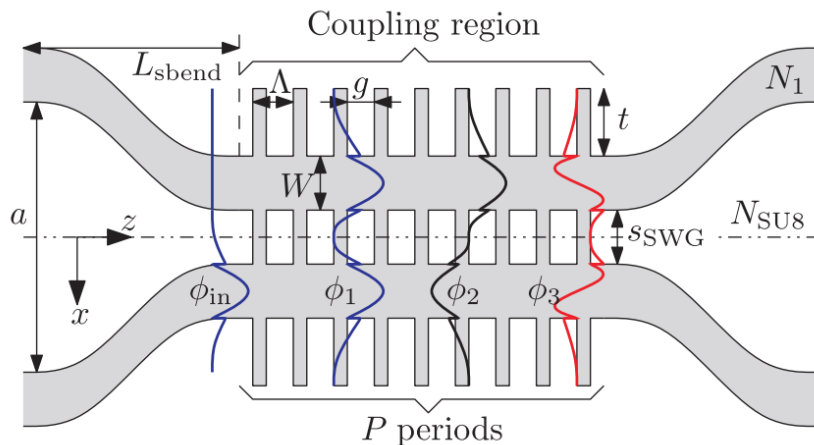
A estrutura SWG possui diversas funcionalidades na área de fotônica integrada a circuitos, pois dispõe de sortidos modos de operação em função da frequência de onda incidente. Chama-se o modo de operação onde a estrutura se comporta, para a onda, como um meio homogêneo, podendo assim ser modelado como um *strip waveguide* convencional, de **regime de subcomprimento de onda** (subwavelength regime). Essa propriedade pode ser alcançada para a banda de  $1.5\mu\text{m} - 1.6\mu\text{m}$  (na qual inclui completamente a banda C, e partes das bandas S e L), sendo essa a faixa de comprimento de onda utilizada para este trabalho.

### 3.2.2. Analisando uma estrutura SWG no acoplador

Para justificar o uso do SWG em um acoplador, é necessário entender dois importantíssimos fenômenos associados. O primeiro fenômeno, mostrado na seção 3.1, fundamenta-se no fato dos índices efetivos dos dois primeiros supermodos do acoplador tenderem a se aproximar (reduzindo a diferença de ambos, aumentando  $L_\pi$ ) a medida que a frequência aumenta.

O segundo fenômeno, em contrapartida ao primeiro, caracteriza-se pelo aumento da intensidade de campo do primeiro supermodo (par), enquanto que no segundo supermodo (ímpar) não o acontece. Isso se deve ao fato do segundo supermodo ser assimétrico em relação ao centro da região de *gap*, cancelando assim os incrementos de sua intensidade de ambos os lados do acoplador.

Com a superposição desses dois fenômenos, o que se observa é que, para um ajuste certo nas dimensões e espaçamentos do SWG, é possível igualar a influência de ambos os efeitos para o comprimento de batimento do acoplador, assim gerando uma planificação efetiva na transmissão x frequência pelas portas de saída. Na prática, uma estrutura de grades em regime de subcomprimento de onda pode ser aplicada em um acoplador direcional da forma ilustrada abaixo.



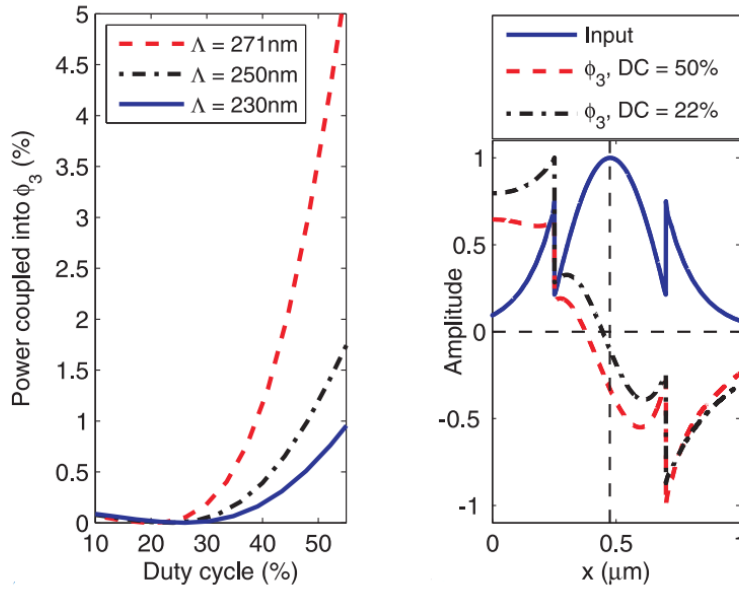
Outra variável que galvaniza-se a partir da adição da estrutura é um terceiro supermodo, no qual, ainda que presente no modelo isento da estrutura, neste caso é consideravelmente mais influente nos resultados. Esse supermodo pode ser entendido como uma superposição de modos de segunda ordem dos guias individuais quem compoem o acoplador. Em suma, sua influência é malevolente para a eficiência do dispositivo, e por isso é estimulado realizar-se um estudo acerca de sua minimização.

Em termos práticos, o controle da potência acoplada neste terceiro supermodo pode ser controlado a partir de uma relação bastante importante nas dimensões de espaçamento de grade da estrutura SWG, na caracteriza-se como **duty-cycle**, que nada mais é que a porcentagem de cobertura na região de grade.

$$DC = (\Lambda - g)/\Lambda$$

Onde o parâmetro  $\Lambda$  é a distância de centro a centro de cada dente da grade, e  $g$  o espaço vazio entre dois dentes. Atribuir  $DC = 1$  gera uma região homogênea nas bordas e no centro do acoplador, e  $DC = 0$  um acoplador direcional simples (isento da estrutura).

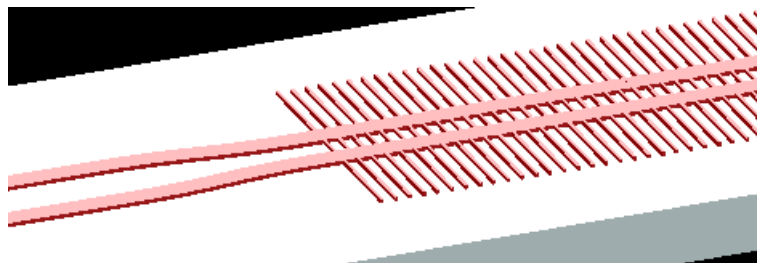
Para amenizar o efeito do terceiro supermodo sobre a transmissão de potência, deve-se maximizar a sua anti-simetria em relação ao centro da região de *gap*. O efeito do *duty-cycle* sobre essa topologia é ilustrado no gráfico abaixo, junto com a influencia do parâmetro  $\Lambda$  sobre o DC:



### 3.2.3. Aplicação e simulação da estrutura SWG no acoplador

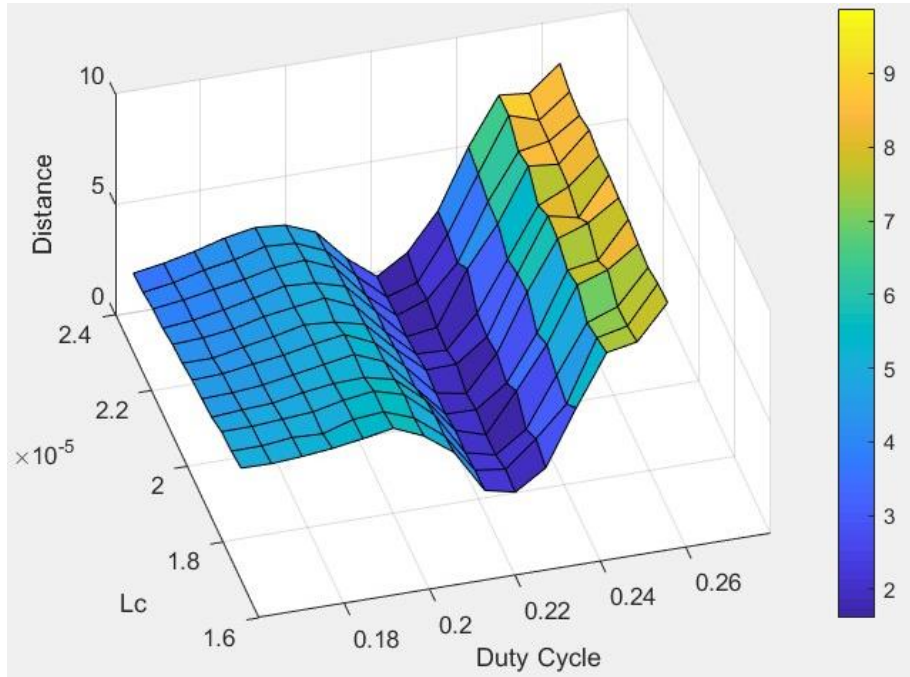
Para simulação, utilizou-se o Lumerical MODE. As dimensões dos braços do acoplador permaneceram as mesmas relativamente ao acoplador simples da seção 3.1. Devido a um certo risco de acoplamento antecipado em função das grades presentes na região de *gap*, mostrou-se necessário dobrar o espaçamento do mesmo, resultando assim em um *gap* de  $0.5\mu\text{m}$ .

Como base da referência [1], atribui-se a altura das grades nas bordas como  $1.8\mu\text{m}$ , juntamente com um *gap* entre elas ( $g$ ) de  $0.21\mu\text{m}$ .





Utilizando um script para personalizar varreduras de variáveis, escolheu-se utilizar o comprimento central do guia  $L_s$  e o *Duty-Cycle* da estrutura SWG como as variáveis para obter uma relação de eficiência relativo à distância da curva de transmissão ao ponto desejado, tomando 0.5 de transmissão como esse ponto. Com isso, obteve-se o espectrograma abaixo, utilizando um mesh de precisão relativamente baixa.

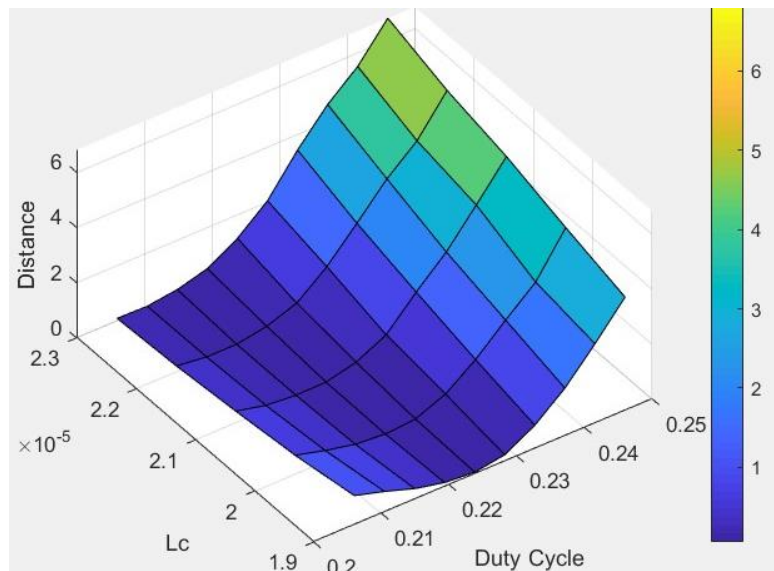


De maneira contextualizada, o parâmetro *Distance* remete à soma dos quadrados da diferença da transmissão de cada ponto de frequência ao valor 0.5. Ou seja:

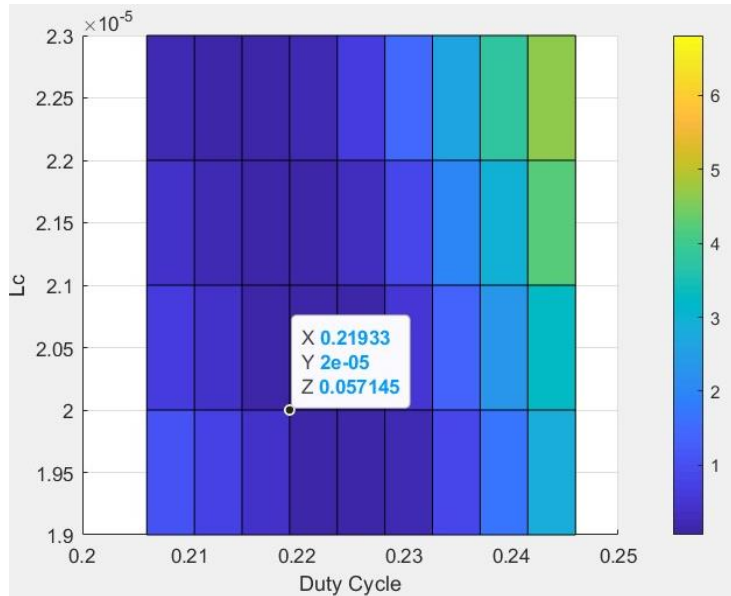
$$D = \sum (X_i - 0.5)^2$$

Onde  $D$  é o parâmetro *Distance* e  $X$  a transmissão do ponto  $i$  de frequência para um *output*. O somatório é composto das duas séries de pontos dos dois *outputs*. Percebe-se pelo espectrograma que o *Duty-Cycle* que gera resultados mais próximos é em torno de 22% (0.22).

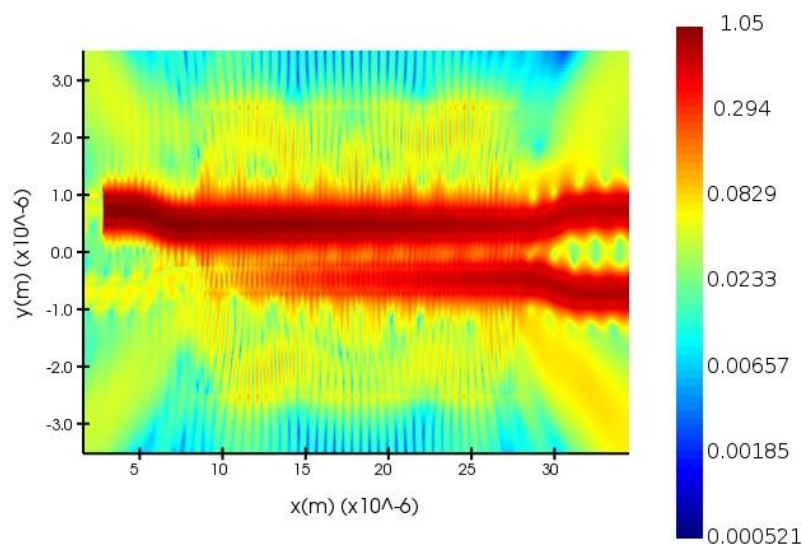
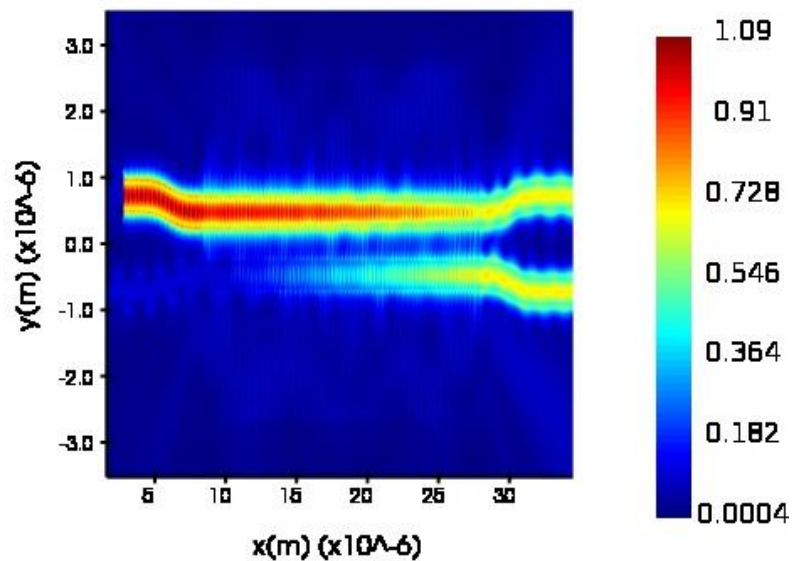
Utilizando uma varredura de maior precisão, geram-se:







Percebe-se que a partir desses dados, o parâmetro  $L_s$  é significativo para a obtenção dos melhores dimensionamentos. Utilizando os dados obtidos pelo ponto ótimo do espectrograma acima, geram-se os espectrogramas abaixo (em escalas linear e log), válidos aproximadamente para quaisquer pontos de frequência para a banda estabelecida ( $1.5\mu\text{m} - 1.6\mu\text{m}$ ).



E finalmente, a nova relação de transmissão:

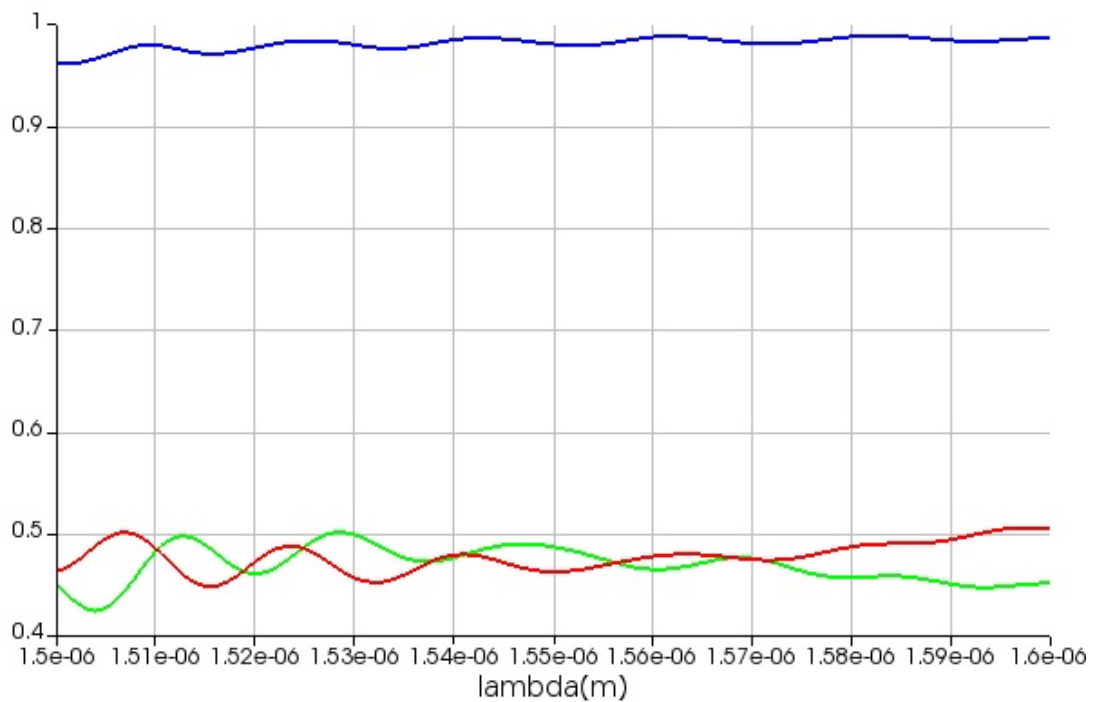
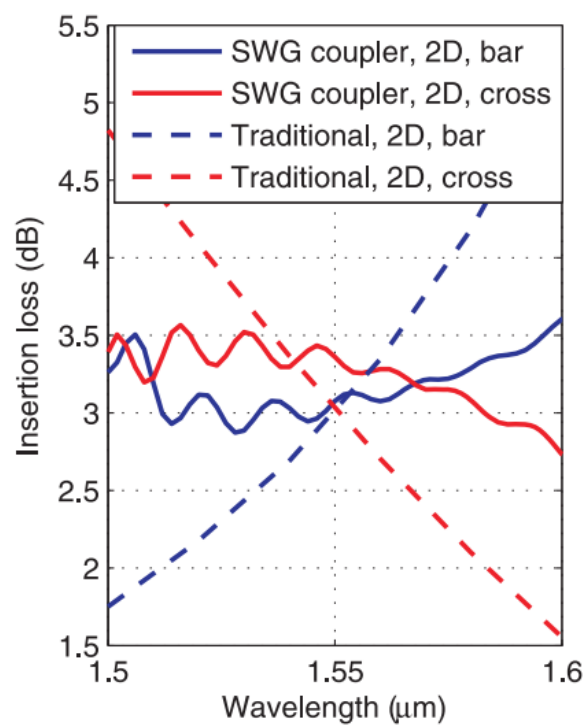


Gráfico Transmissão x Comprimento de onda ( $\mu\text{m}$ ) com SWG

Que se mostra semelhante, ao gráfico disposto pela referência [1]:



## 4. Conclusões

Com este trabalho, mostrou-se possível a planificação e o alargamento da banda de operação em certas tolerâncias utilizando a estrutura SWG.

As simulações trouxeram resultados condizentes com o esperado, adicionando camadas novas de desafios devido aos métodos diferenciados de simulação em relação ao trabalho de referência principal. Entretanto, ainda é visível a necessidade de uma simulação 3D bem parametrizada para expandir a aplicabilidade e aumentar a acurácia para os contextos em que se utilizariam a tecnologia.

## 5. Referências

1. R. Halir, A. Maese-Novo, A. Ortega-Moñux, I. Molina-Fernández, J. G. Wangüemert-Pérez, P. Cheben, D.-X. Xu, J. H. Schmid, and S. Janz, "Colorless directional coupler with dispersion engineered sub-wavelength structure", *Optics Express* Vol. 20 Issue 12 pp. 13470-13477 (2012)
2. Wang, J., Glesk, I., & Chen, L. R. (2016). "Subwavelength grating devices in silicon photonics". *Science Bulletin*, 61(11), pp. 879–888.
3. KAM-SU-8-2-25-Datasheet-9.3.20-final.pdf (kayakuam.com)