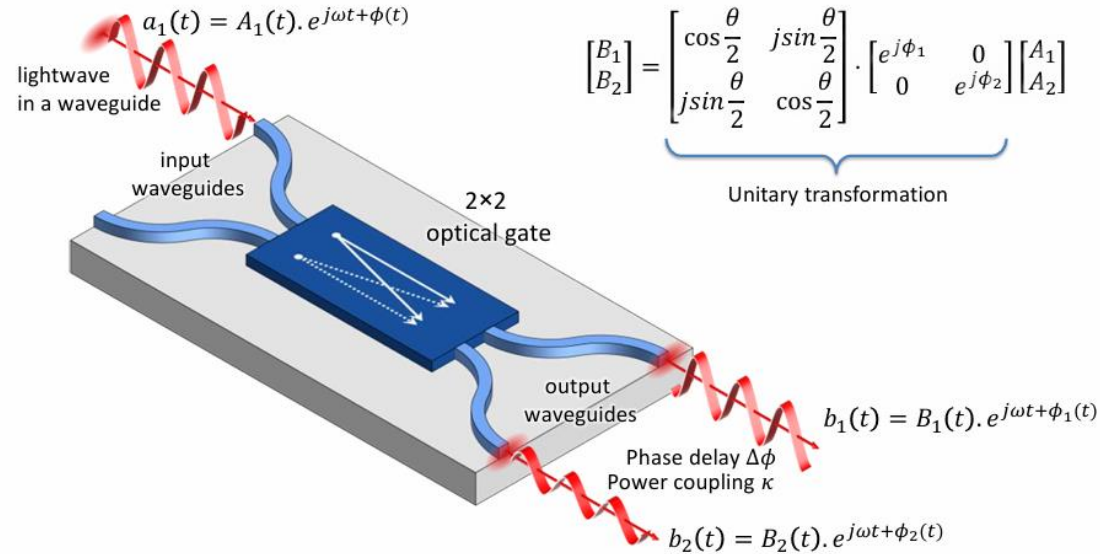


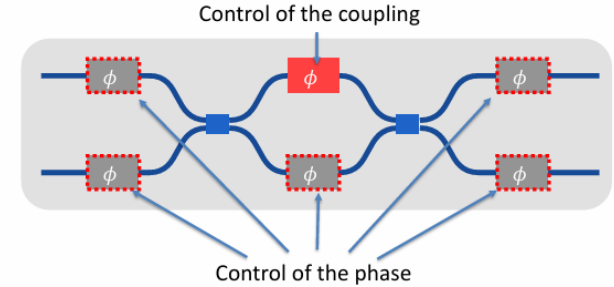
Programmable Photonic Circuits (PPC)

Semana 1 - Introdução

Unidade básica de célula (2x2 optical gate)



Fonte: Bogaerts et al, Nature 2020

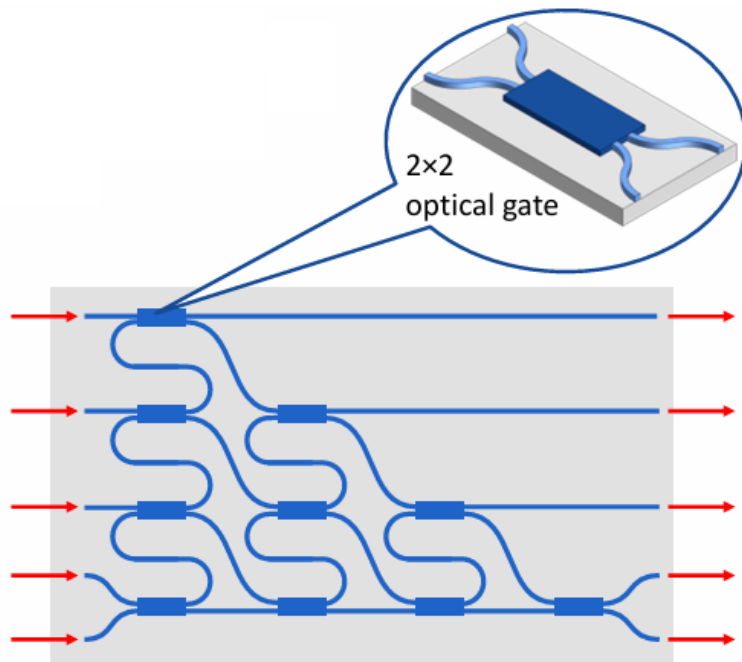


São necessários dois pontos de controle

Algumas tecnologias de tuning que se destacam são:

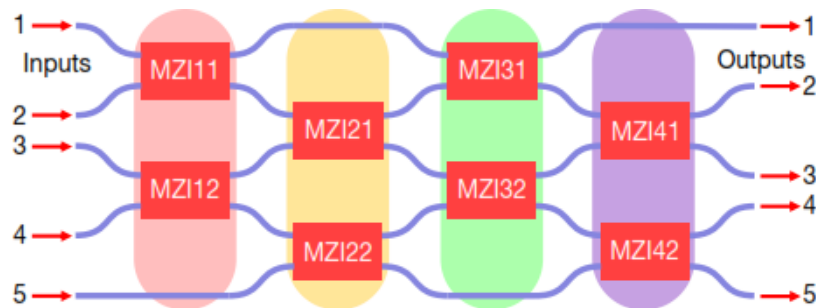
- Thermal Phase-shifters
- Eletromechanical systems (MEMS, NEMS) (Couplers e Phase-shifters)
- Cristais Líquidos

Forward-Only PPC



Feed-Forward PPC

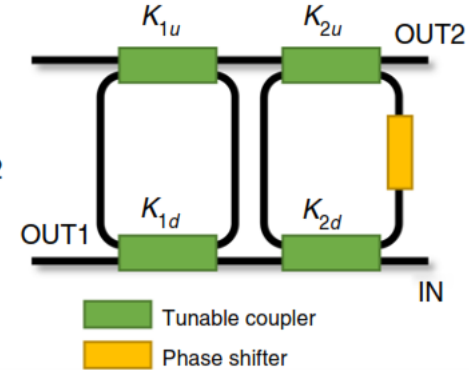
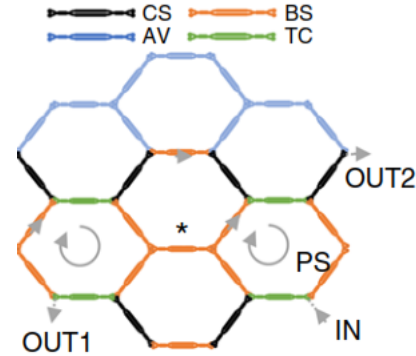
São mais simples de analisar e modelar matricialmente porém limitados em aplicações



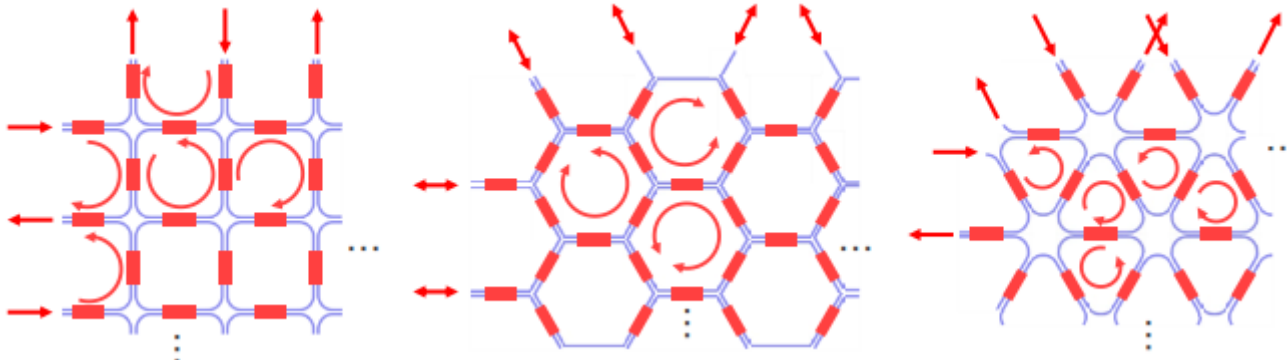
Forward-Only Rectangular unitary meshes

Recirculating PPC

Possuem uma complexidade maior devido à circulação de potência e a maior dificuldade em realizar um controle por feedback. Porém são mais genéricos e desejáveis para mais aplicações.

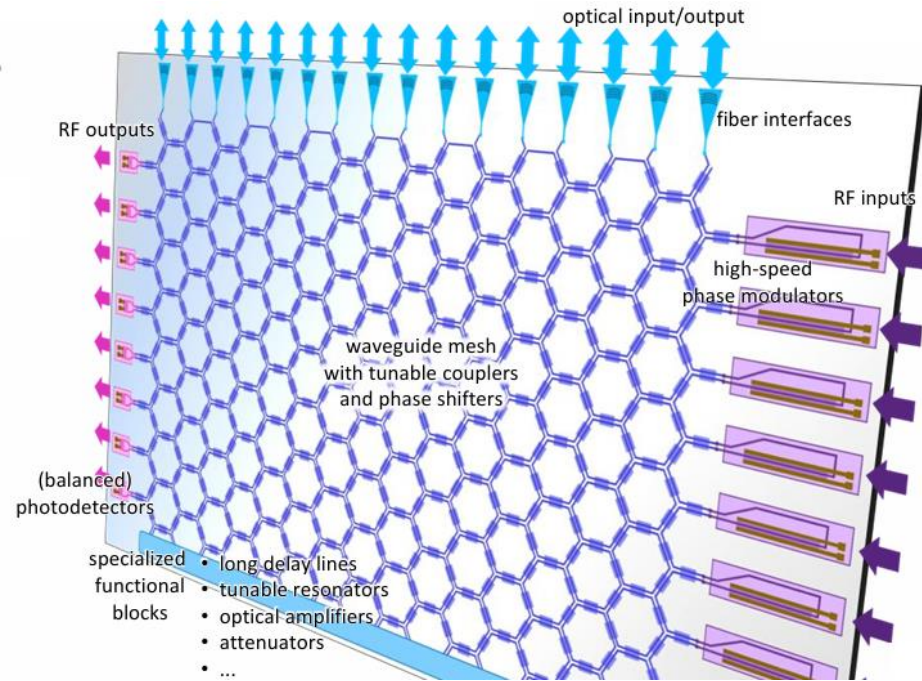


Fonte: Pérez, D., Gasulla, I., Crudgington, L. *et al.* Multipurpose silicon photonics signal processor core. *Nat Commun* **8**, 636 (2017).

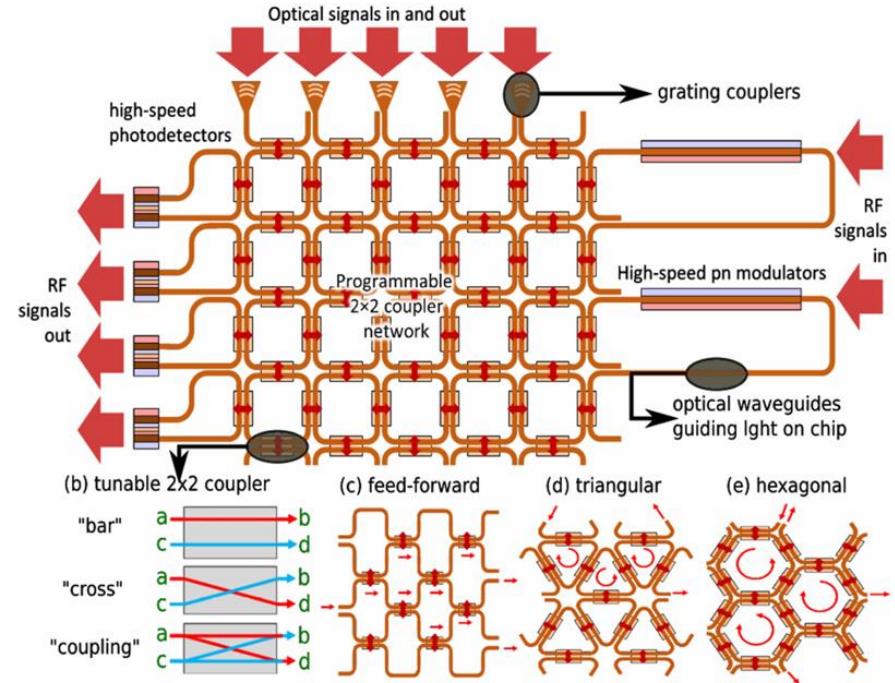


Fonte: Bogaerts, W., Pérez, D., Capmany, J. *et al.* Programmable photonic circuits. *Nature* **586**, 207–216 (2020).

PPC Genérico



Fonte: Bogaerts, W., Pérez, D., Capmany, J. *et al.* Programmable photonic circuits. *Nature* **586**, 207–216 (2020).



Fonte: Chen, Xiangfeng et al. "Graph Representations for Programmable Photonic Circuits." *Journal of Lightwave Technology* 38 (2020): 4009-4018.

Proposta de cronograma

Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	
						<ul style="list-style-type: none"> Pesquisa bibliográfica e propostas de aplicações
						<ul style="list-style-type: none"> Estudo sistêmico e matricial das células (Couplers, Phase-shifters)
						<ul style="list-style-type: none"> Estudo do Forward-Only PPC: Aplicação de circuitos de roteamento
						<ul style="list-style-type: none"> Estudo do Recirculating PPC: Aplicação de filtros
						<ul style="list-style-type: none"> Estudo do PPC Genérico: Aplicação de modulações OOK, 4-PAM, etc.

Sugestão para trabalhos futuros ou paralelos:

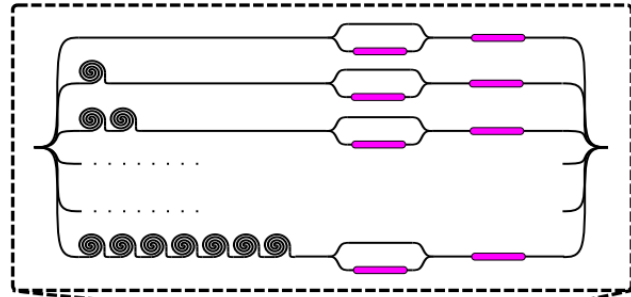
- Análise de interferência em regiões do circuito (Térmica, Crosstalk, etc.)
- Propostas para sistemas de controle de feedback

Programmable Photonic Circuits (PPC)

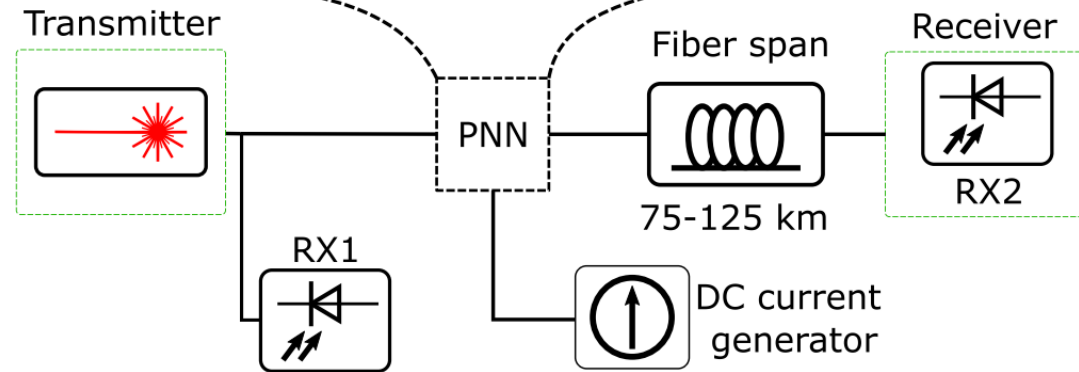
Semana 3 - Primeira proposta de arquitetura

Modelo de rede neural para CD Compensation

A quantidade de caminhos diferenciados por um atraso múltiplo de Δt define o número de taps



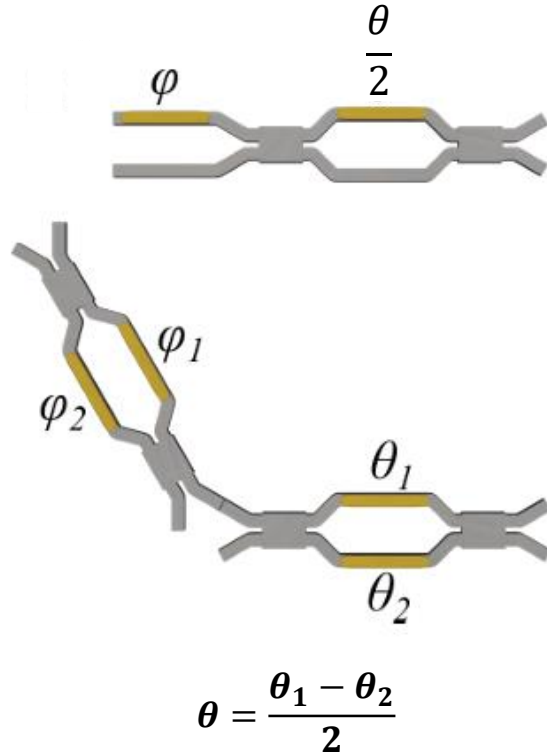
$$y(t) = \sum_{i=1}^N x[t - (i-1)\Delta_t] a_i \exp(j\phi_i)$$



Número mínimo de Taps

$$N_T = \text{int} \left(\frac{1/B + |L\beta_2\Delta\omega|}{\Delta_t} \right)$$

Equivalência de dois BULs em série



Através de dois BULs ligados em série, contanto que $\varphi_1 = \varphi_2$, o modelo é matematicamente idêntico ao de um MZI com controle interno e externo

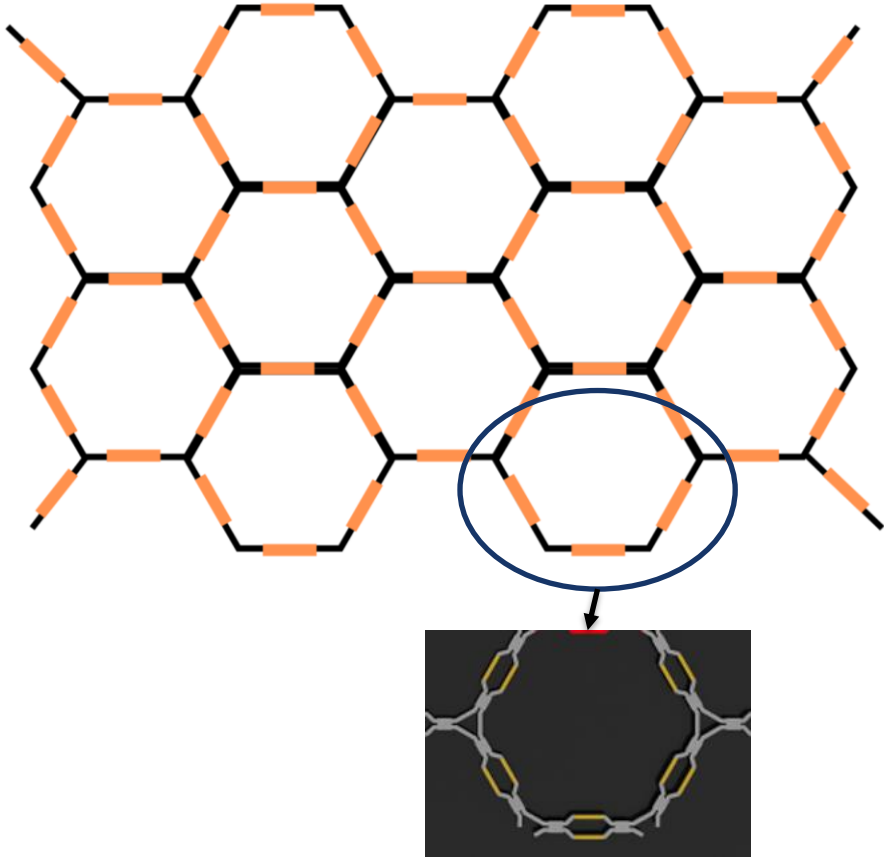
Controle sucedido

$$\begin{bmatrix} a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = -je^{j\Delta} \begin{bmatrix} e^{j\phi} \text{sen}\theta & e^{j\phi} \text{cos}\theta \\ \text{cos}\theta & -\text{sen}\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}$$

Controle precedido

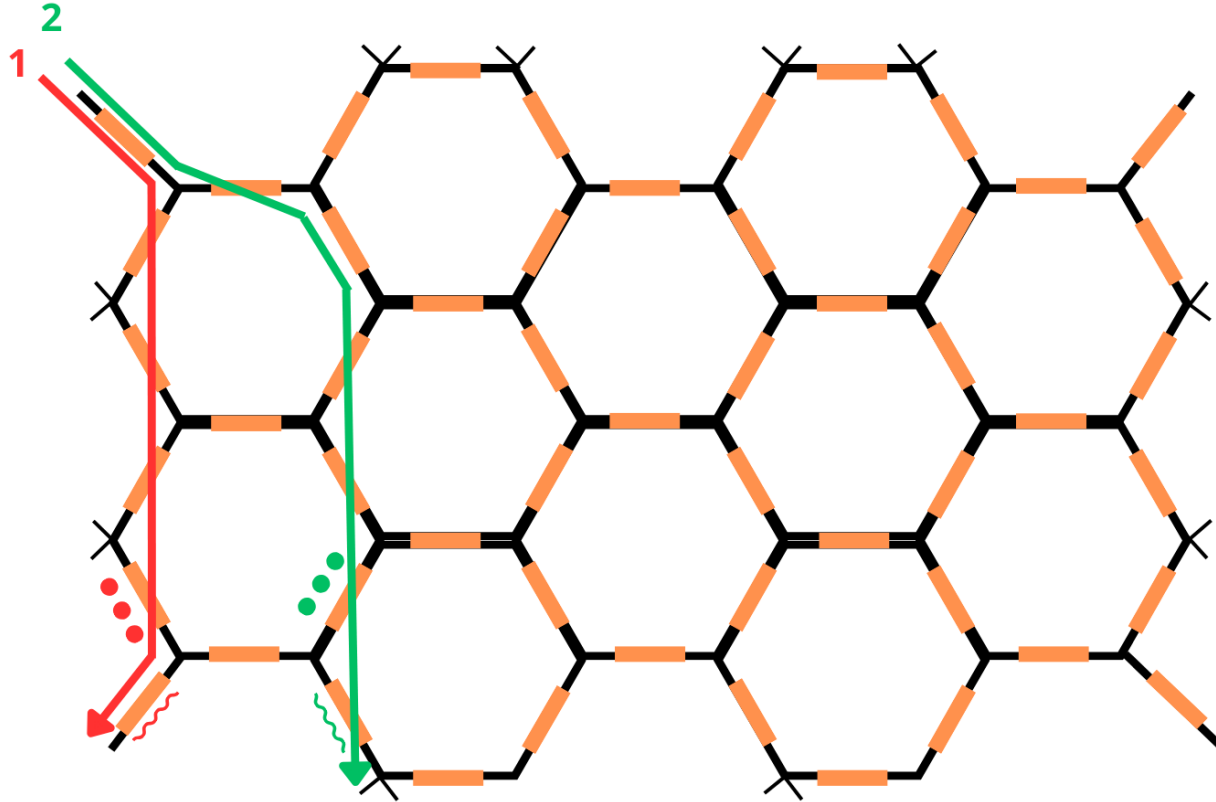
$$\begin{bmatrix} b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = -je^{j\Delta} \begin{bmatrix} e^{j\phi} \text{sen}\theta & \text{cos}\theta \\ e^{j\phi} \text{cos}\theta & -\text{sen}\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

Modelo comercializado pela ipronics (Versão reduzida)



- **Número de BULs:** 53
- **Número de portas ópticas:** 32
- **Número de contatos elétricos (phase-shifters):** 106

Exemplo com 2 taps



Caminho 1: 6 BULs
Caminho 2: 7 BULs

Programmable Photonic Circuits (PPC)

Semana 4 - Estudo acerca do número de taps

Análise de grandezas determinantes para o número de taps

Número mínimo de Taps

$$N_T = \text{int} \left(\frac{1/B + |L\beta_2\Delta\omega|}{\Delta t} \right)$$

Em um contexto geral:

$B \rightarrow$ Taxa binária (Desejado o máximo possível)

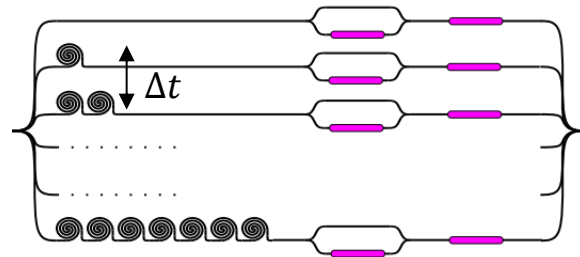
$L \rightarrow$ Comprimento da Fibra (Desejado o máximo possível)

$\Delta\omega \rightarrow$ Banda de pulso (Desejado o mínimo possível)

$\beta_2 \rightarrow$ GVD da fibra (Constante)

$\Delta t \rightarrow$ Múltiplo de delay (Relativo à disponibilidade da topologia)

A grandeza que possui **maior dependência** com a escolha da topologia e configuração do circuito programável é o **delay Δt entre os caminhos possíveis**. Sendo assim, o conhecimento dessa grandeza de antemão é determinante para a estimativa do número de taps mínimos do circuito.



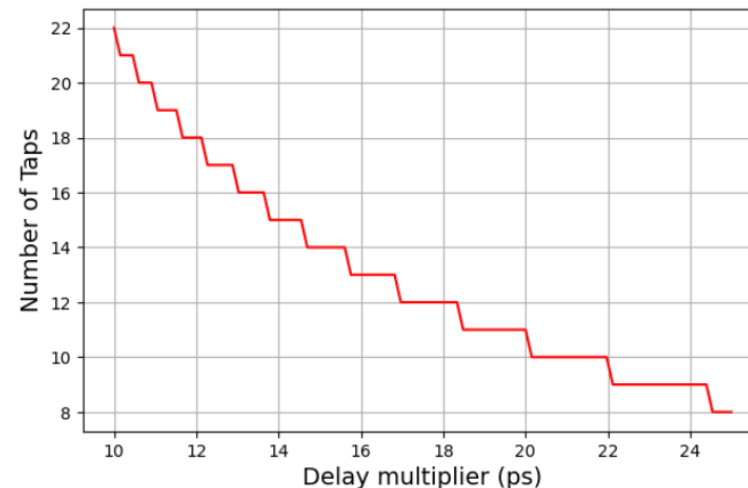
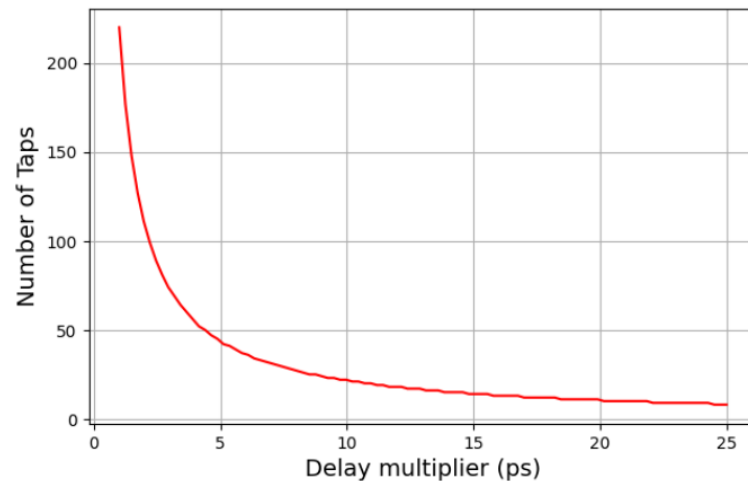
Análise do delay Δt

Tomando-se os seguintes parâmetros:

- $B = 100Gbps$
- $L = 100km$
- $\Delta\omega = 100GHz$ (2-PAM)
- $\beta_2 = -0.021 ps^2/m$

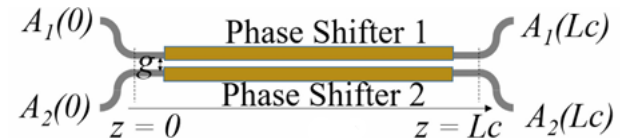
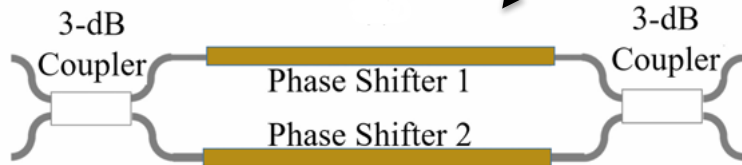
Para um delay $\Delta t = 25ps$, $N_T = 8 \text{ taps}$

Percebe-se a alta correlação do delay com o número de taps, que cresce hiperbolicamente a medida que o valor se torna pequeno



Análise do delay Δt em um PPC

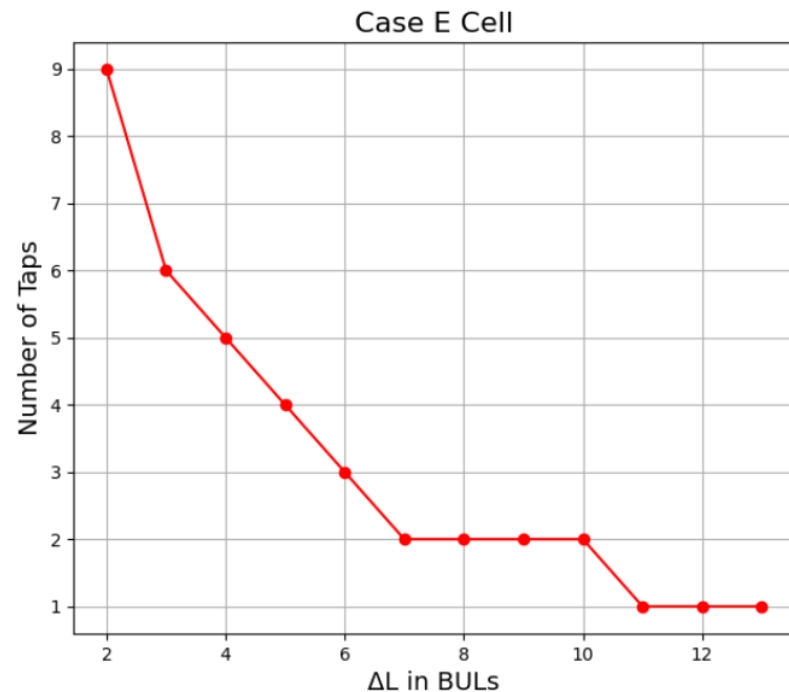
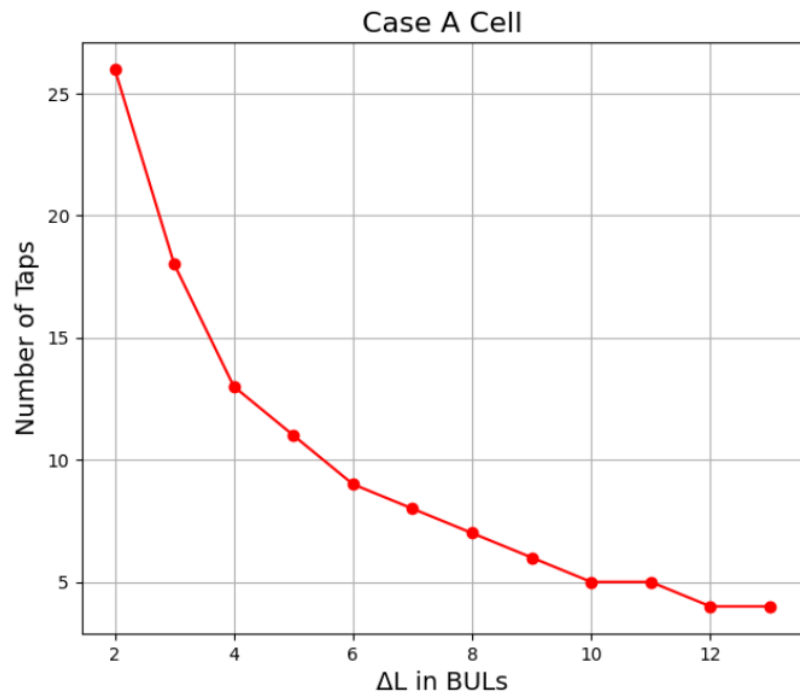
Caso	Material (ng)	Arquitetura	BUL (μm)	IL (dB/Cell)	Δt (ps)
A _[1]	SOI (4.18)	MZI	300	0.20	4.18
B _[2]	SOI (4.18)	Tunable DC	100	0.05	1.39
C _[3]	SiN (1.93)	MZI	1000	0.20	6.43
D _[4]	SiN (1.93)	Tunable DC	700	0.05	4.50
E _[5]	SOI (4.18)	MZI	811	0.48	11.25



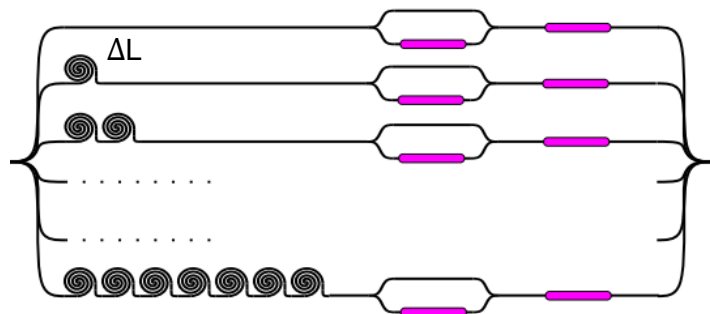
Fonte: Daniel Pérez-López, Erica Sánchez, and José Capmany, "Programmable True Time Delay Lines Using Integrated Waveguide Meshes," J. Lightwave Technol. 36, 4591-4601 (2018)

Análise do delay Δt em um PPC

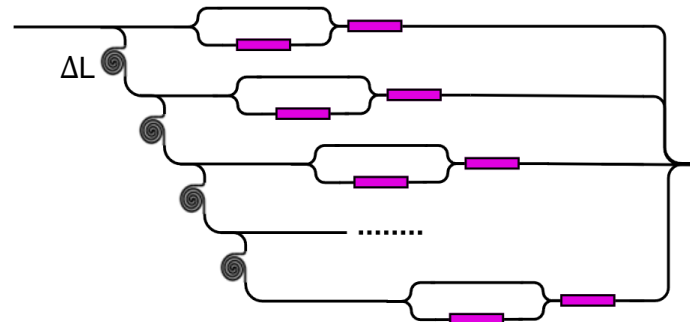
Caso	Material (ng)	Arquitetura	BUL (μm)	IL (dB/Cell)	Δt (ps)
A _[1]	SOI (4.18)	MZI	300	0.20	4.18
E _[5]	SOI (4.18)	MZI	811	0.48	11.25



Proposta de novo modelo de rede neural



Modelo paralelo



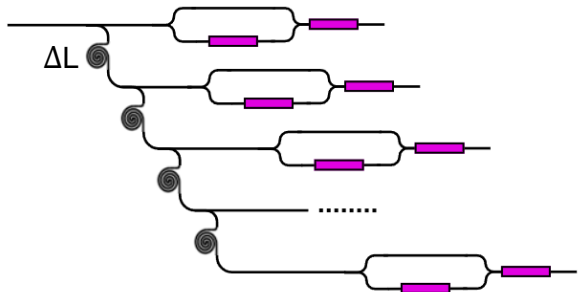
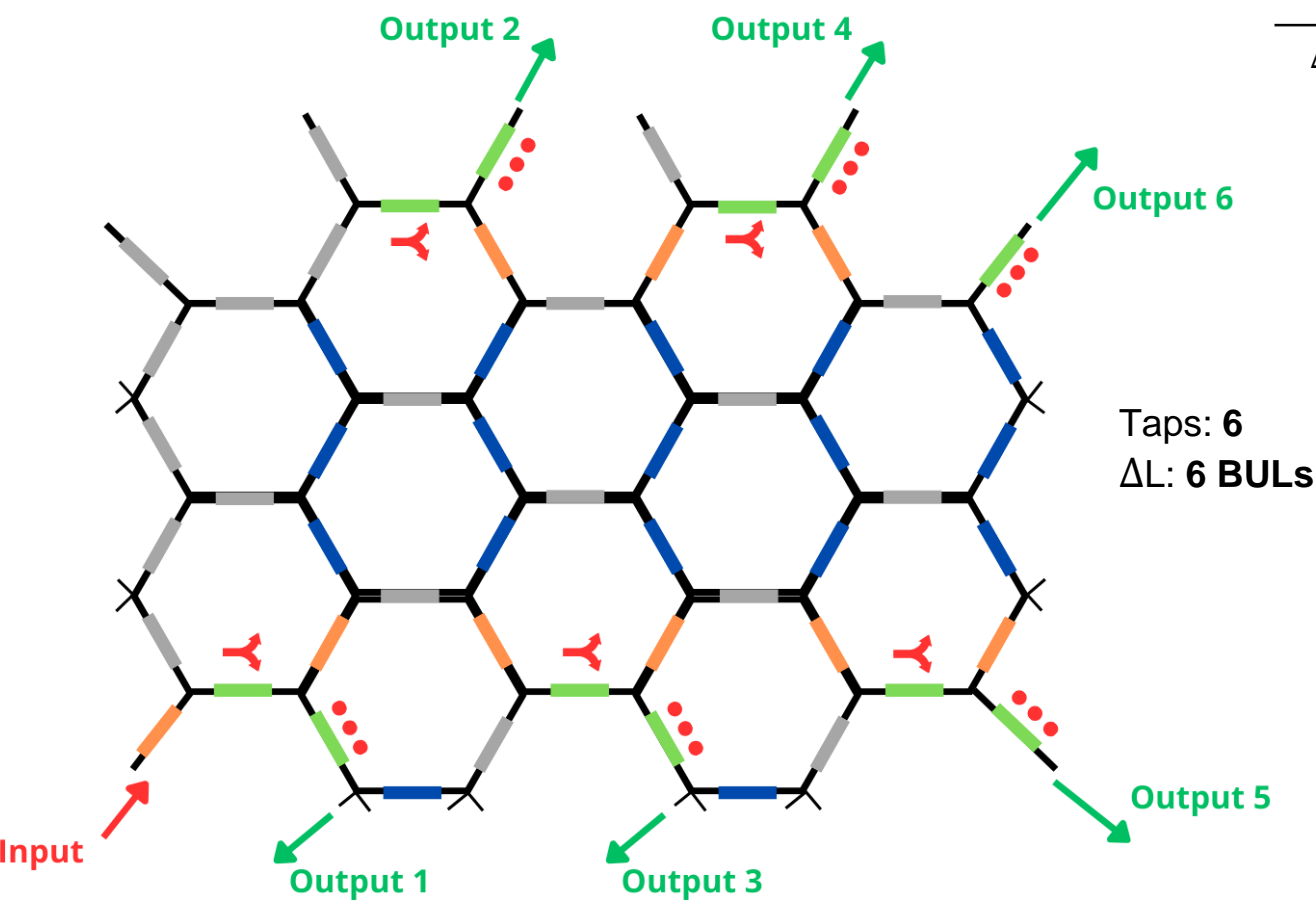
Modelo série

A motivação para a transição de um modelo paralelo para um modelo em série reside na capacidade de encaixar, topologicamente, mais taps em um circuito hexagonal.

Teoricamente, para se realizar essa transição é necessário considerar alguns pontos:

- Ao invés de um splitting de potência **1:N**, seriam necessários N-1 splittings **1:2**. Isso implica que para resultar no mesmo efeito (saídas homogêneas), as proporções de splittings devem ser diferentes para cada estágio de splitting.
- A presença de diversos estágios de splitting no caminho percorrido de um sinal poderá implicar em **efeitos adicionais** (como mudança de fase), que poderiam ser compensados pelos phase-shifters a posteriori. Caso contrário isso resultará necessariamente em uma nova representação do sinal final $y(t)$

Proposta de topologia: Saídas em várias direções



Para esta topologia, não há a presença de um combiner dos sinais de saída, sendo necessário um circuito externo para cumprir esse papel

- Coupler para Pesagem ● ● ●
- Coupler para Splitting Y
- Não utilizado —
- Coupler —
- Bar —
- Crossing —

Referências

1. Horikawa T, Shimura D, Mogami T. Low-loss silicon wire waveguides for optical integrated circuits. *MRS Communications*. 2016;6(1):9-15. doi:10.1557/mrc.2015.84
2. Chris G. H. Roeloffzen, Leimeng Zhuang, Caterina Taddei, Arne Leinse, René G. Heideman, Paulus W. L. van Dijk, Ruud M. Oldenbeuving, David A. I. Marpaung, Maurizio Burla, and Klaus -J. Boller, "Silicon nitride microwave photonic circuits," *Opt. Express* 21, 22937-22961 (2013)
3. Z. Sheng et al., "A Compact and Low-Loss MMI Coupler Fabricated With CMOS Technology," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 4, no. 6, pp. 2272-2277, Dec. 2012, doi: 10.1109/JPHOT.2012.2230320.
4. G. W. Cong, K. Suzuki, S. H. Kim, K. Tanizawa, S. Namiki, and H. Kawashima, "Demonstration of a 3-dB directional coupler with enhanced robustness to gap variations for silicon wire waveguides," *Opt. Express* 22, 2051-2059 (2014)
5. Pérez-López, D., Gutierrez, A., Sánchez, D. et al. General-purpose programmable photonic processor for advanced radiofrequency applications. *Nat Commun* 15, 1563 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-45888-7>

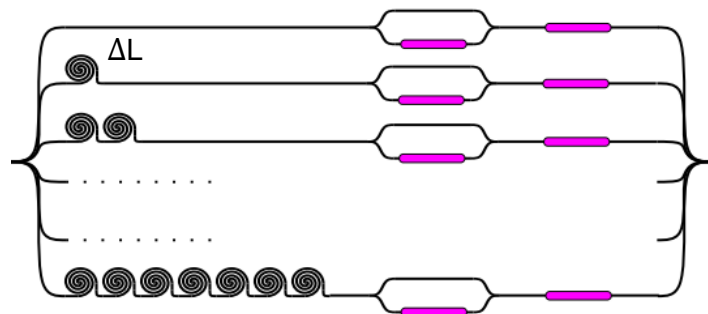
Programmable Photonic Circuits (PPC)

Semana 5 - Estudo acerca das topologias de rede neural

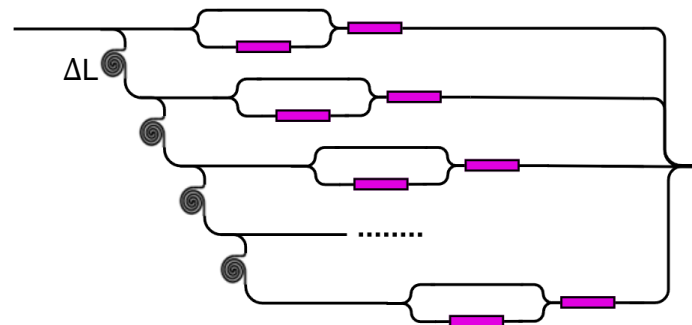
Comparação entre modelos de NN (Neural Network)

É realizado uma comparação entre os dois modelos com base nos seguintes pontos:

- **Footprint efetiva**
- **Equação característica**
- **Quantidade e configuração de splitters**
- **Perdas (ditada pela quantidade de células)**



Modelo paralelo

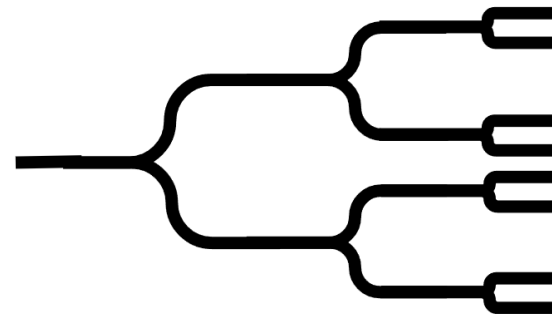
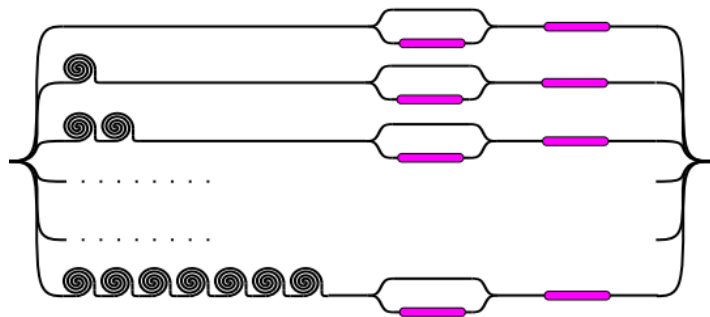


Modelo série

Comparação entre modelos de NN: Número de Splitters

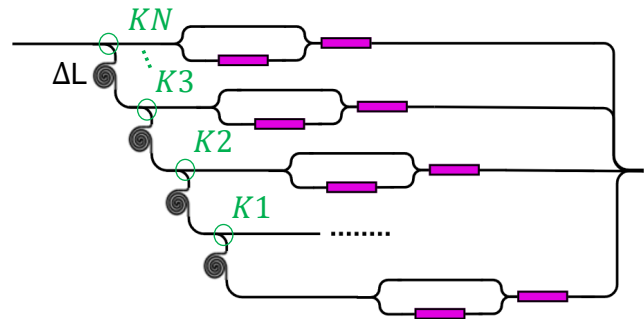
Em relação ao número de splitters **na entrada** da topologia, é necessário observar pela aplicação. Em um circuito fotônico programável, desconsiderando a utilização de um HPB (*High Performance Block*), como as divisões são feitas a partir de um MZI em modo coupler, deve limitar-se somente a utilizar conjuntos de **splitters 1:2**.

Dessa forma, é interessante representar um splitter 1:N como um conjunto de splitters 1:2, quantificando $N - 1$ splitters de entrada no total



Splitter 1:8 representado por 7 splitters 1:2

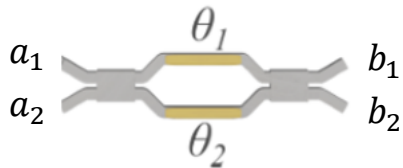
Comparação entre modelos de NN: Número de Splitters



	ΔL (BULs)							
K	0	2	4	6	8	10	12	14
K1	0.500	0.523	0.454	0.431	0.409	0.387	0.365	0.344
K2	0.500	0.470	0.274	0.247	0.221	0.196	0.174	0.153
K3	0.500	0.697	0.186	0.158	0.132	0.110	0.091	0.074
K4	0.667	0.783	0.134	0.107	0.084	0.065	0.050	0.038
K5	0.333	0.835	0.100	0.075	0.055	0.039	0.028	0.019
K6	0.600	0.869	0.077	0.054	0.037	0.024	0.016	0.010
K7	0.375	0.814	0.060	0.039	0.025	0.015	0.009	0.005

Para IL = 0.20dB/cell

No modelo em série, cada splitter possui sua própria constante de acoplamento, necessárias assim para **dividir igualmente a potência em cada ramo**, o que implica em diferenças nas defasagens dos phase-shifters θ_1 e θ_2 . No total, $N - 1$ splitters 1:2 são necessários.

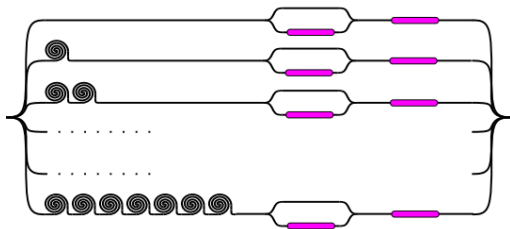


$$\theta = \frac{\theta_1 - \theta_2}{2}$$

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = -je^{j\Delta} \begin{bmatrix} \text{sen}\theta & \text{cos}\theta \\ \text{cos}\theta & -\text{sen}\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

Comparação entre modelos NN: Equação característica e splitters

Ambos os modelos possuem a mesma quantidade de splitters: $N - 1$.

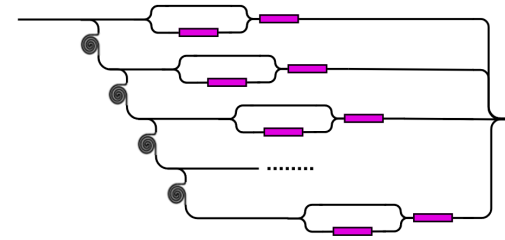


Modelo paralelo

$$y(t) = \sum_{i=1}^N x[t - (i-1)\Delta t] \cdot a_i e^{j\phi_i} \cdot e^{j\phi_s}$$

Abaixo da equação, há três grupos de termos indicados por braceletes e legendados:

- Atraso por ΔL** : Indica o termo $x[t - (i-1)\Delta t]$.
- Pesos**: Indica o termo $a_i e^{j\phi_i}$.
- Atraso por Splitters**: Indica o termo $e^{j\phi_s}$.



Modelo série

$$y(t) = \sum_{i=1}^N x[t - (i-1)\Delta t] \cdot a_i e^{j\phi_i} \cdot e^{j\phi_{s_i}}$$

Abaixo da equação, há três grupos de termos indicados por braceletes e legendados:

- Atraso por ΔL** : Indica o termo $x[t - (i-1)\Delta t]$.
- Pesos**: Indica o termo $a_i e^{j\phi_i}$.
- Atraso por Splitters**: Indica o termo $e^{j\phi_{s_i}}$.

Em um caso sem perdas, a diferença é dada pelo **atraso nos splitters**. No modelo paralelo, quando N é uma potência de 2 (2,4,8,16,...) o atraso ϕ_s é igual para cada ramo.

Comparação entre modelos NN: Equação característica e splitters

No modelo em série, para cada ramo, há um atraso ϕ_{Si} associado. Devido à inerência do atraso causado pelos componentes do MZI (representado por Δ). Se considerarmos cada MZI com o mesmo Δ tem-se:

$$\phi_{Si} = i \cdot \Delta \qquad \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = -je^{j\Delta} \begin{bmatrix} \sin\theta & \cos\theta \\ \cos\theta & -\sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

Para compensar isso sugere-se inserir algum nível DC nos pesos de cada ramo da rede neural, de forma que em cada ramo, com todos os pesos ϕ_i de fase nulos, o atraso final seja o mesmo. Ou seja:

$$\phi_{i_{new}} = \phi_i + \phi_{i_{DC}} = \phi_i + (N - i) \cdot \Delta$$

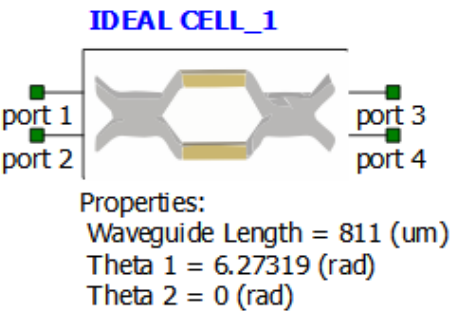
De forma que, por fim, para o modelo em série:

$$y(t) = \sum_{i=1}^N x[t - (i - 1)\Delta t] \cdot a_i e^{j\phi_i} \cdot e^{j(N \cdot \Delta)}$$

Programmable Photonic Circuits (PPC)

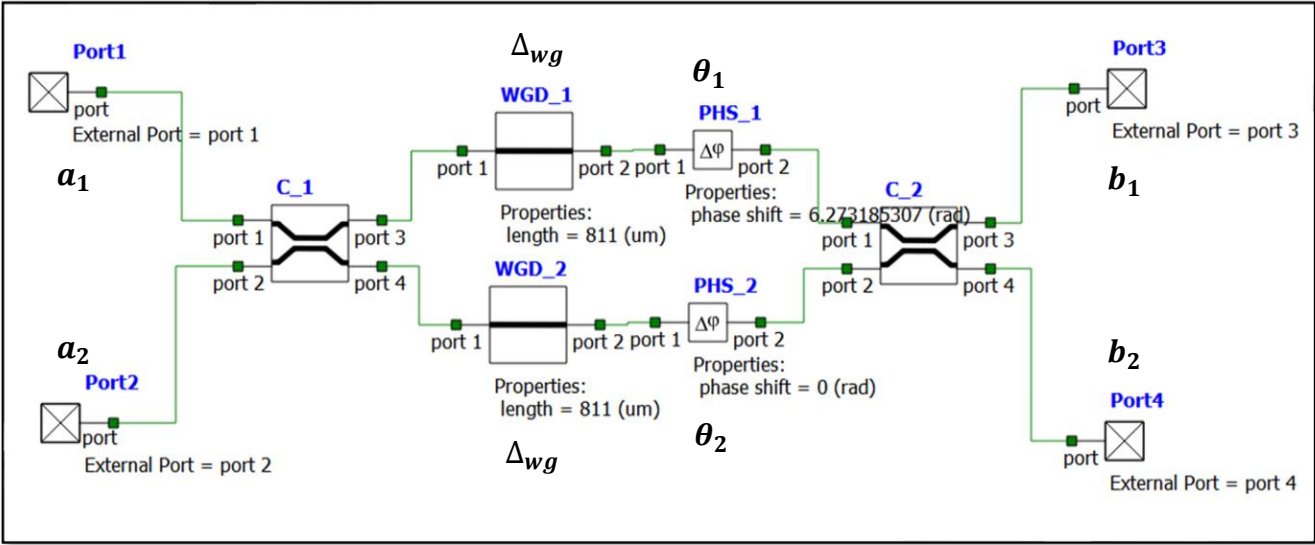
Semana 6 - Simulação com PCC Cell ideal

Modelo PPC Cell ideal

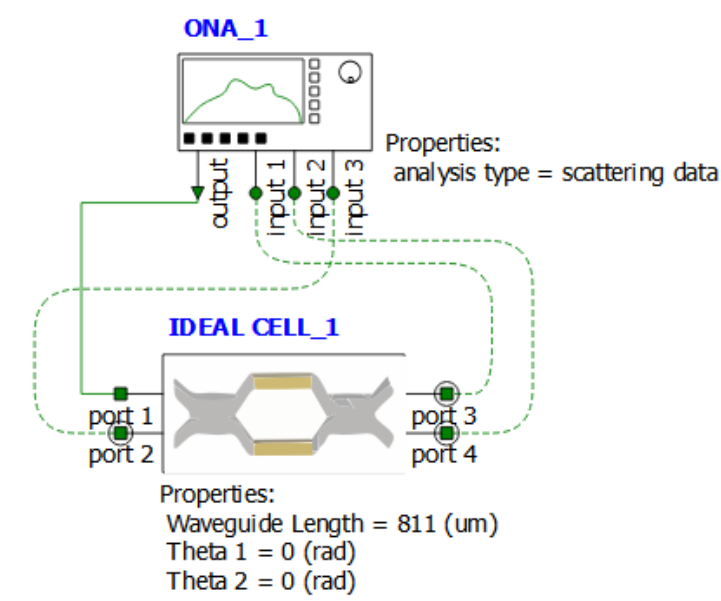


$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = -je^{j\Delta} \begin{bmatrix} \sin\theta & \cos\theta \\ \cos\theta & -\sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

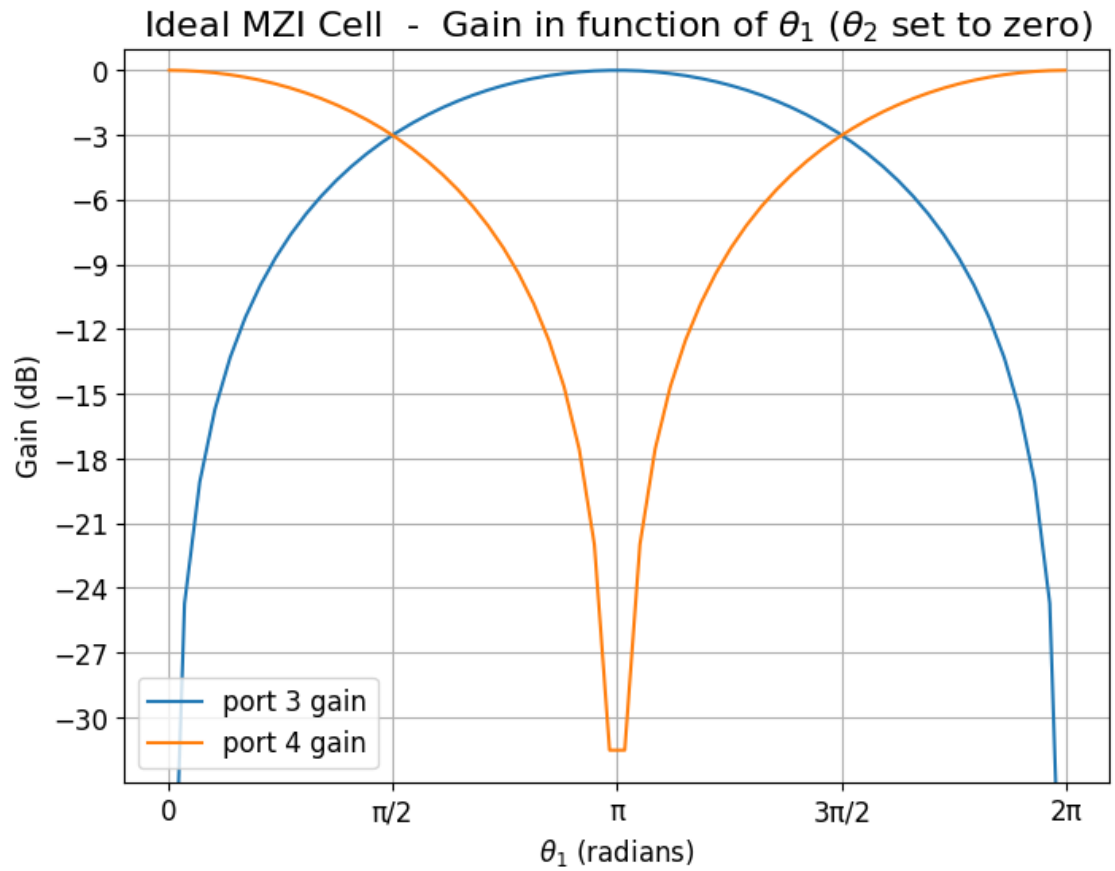
Onde, $\Delta = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} + \Delta_{wg}$ e $\theta = \frac{\theta_1 - \theta_2}{2}$



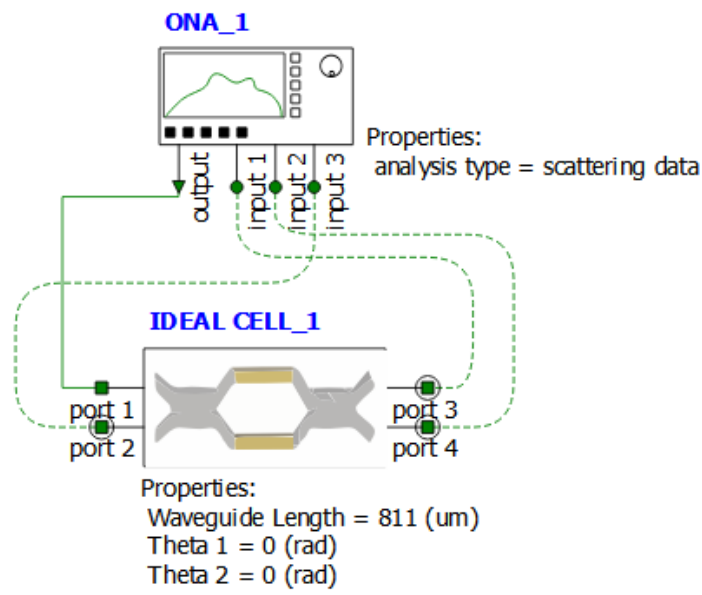
Simulação: PPC Cell ideal - Ganho



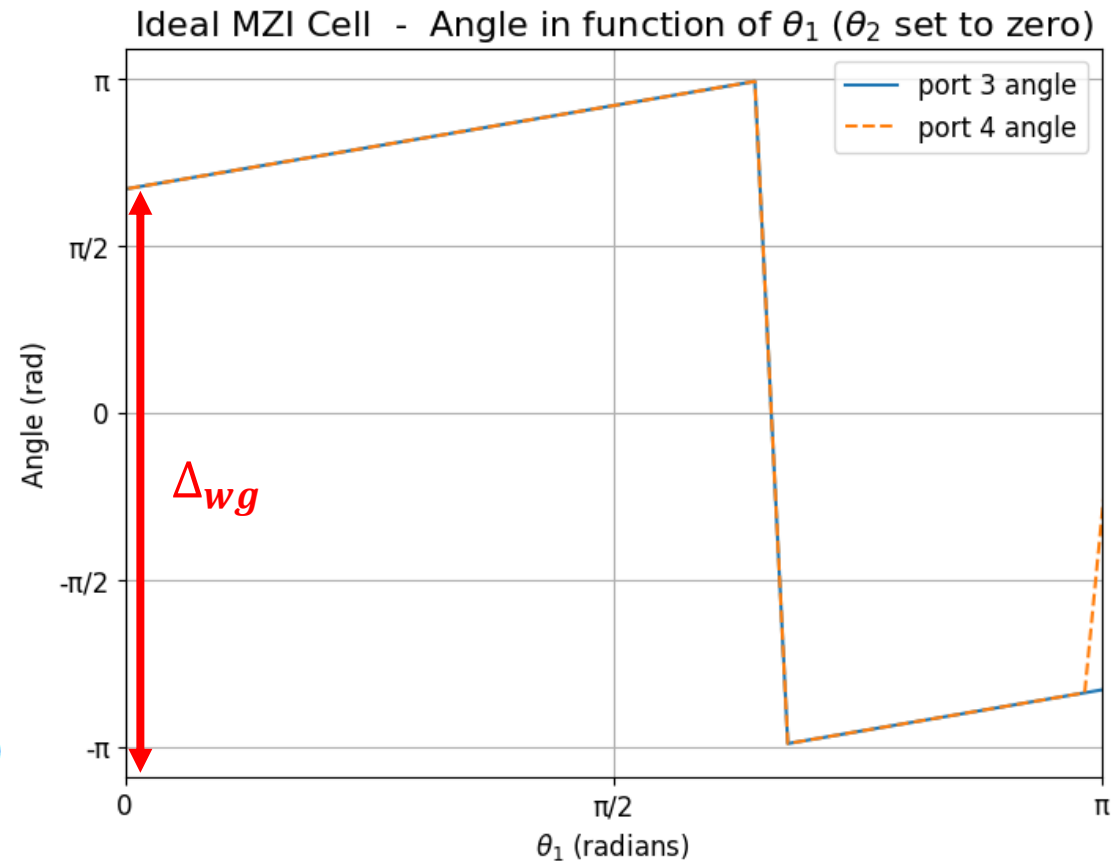
$$\begin{cases} b_1 = -ja_1 \cdot e^{j(\frac{\theta_1+\theta_2}{2}+\Delta_{wg})} \cdot sen(\frac{\theta_1-\theta_2}{2}) \\ b_2 = -ja_2 \cdot e^{j(\frac{\theta_1+\theta_2}{2}+\Delta_{wg})} \cdot cos(\frac{\theta_1-\theta_2}{2}) \end{cases}$$



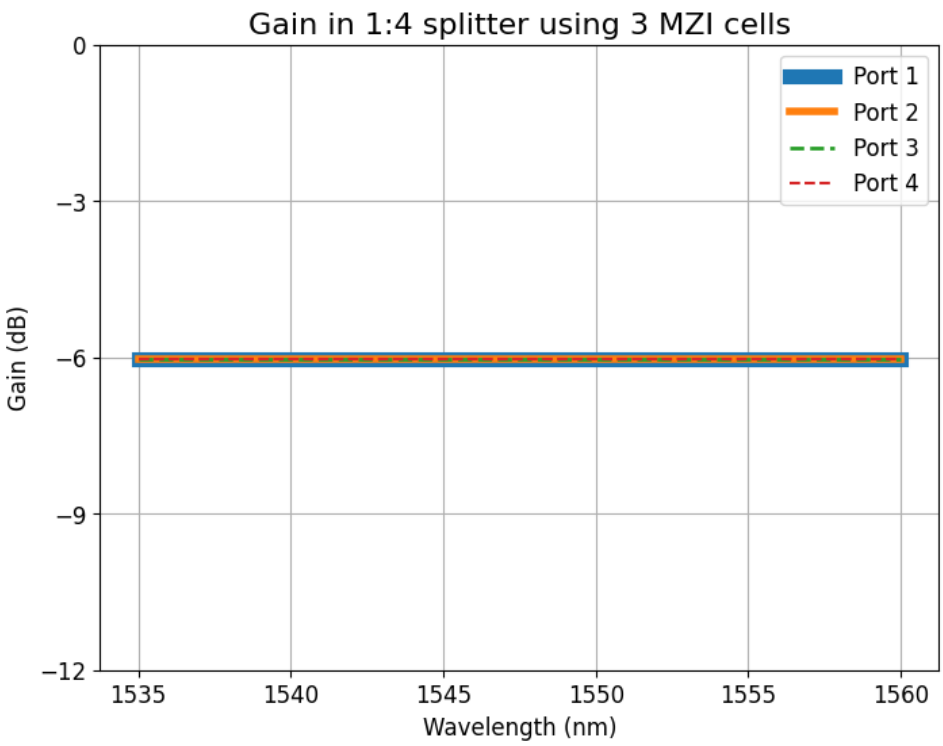
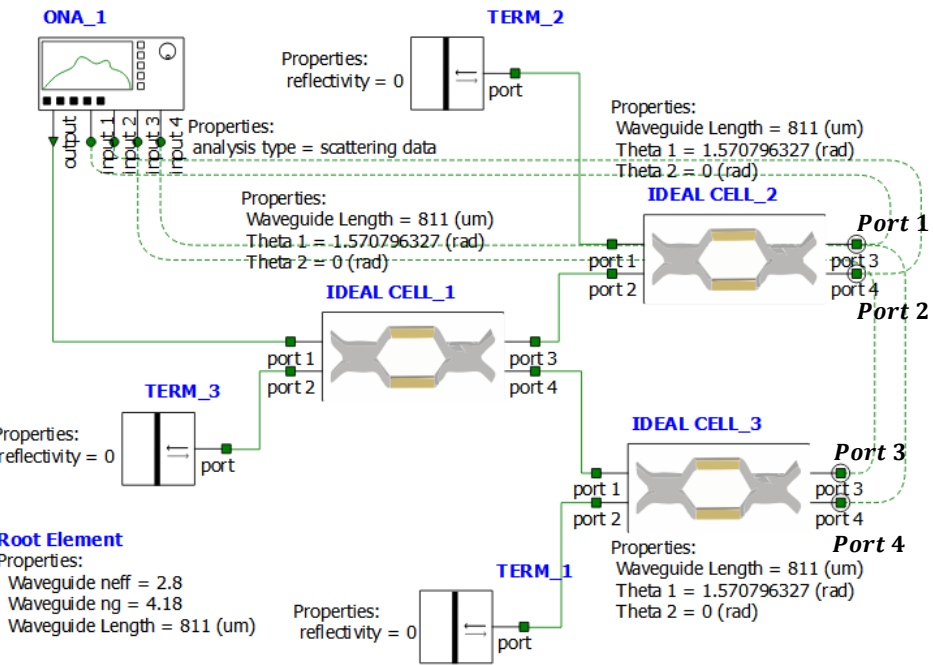
Simulação: PPC Cell ideal - Fase



$$\begin{cases} b_1 = -ja_1 \cdot e^{j(\frac{\theta_1+\theta_2}{2} + \Delta_{wg})} \cdot \text{sen}(\frac{\theta_1-\theta_2}{2}) \\ b_2 = -ja_2 \cdot e^{j(\frac{\theta_1+\theta_2}{2} + \Delta_{wg})} \cdot \text{cos}(\frac{\theta_1-\theta_2}{2}) \end{cases}$$

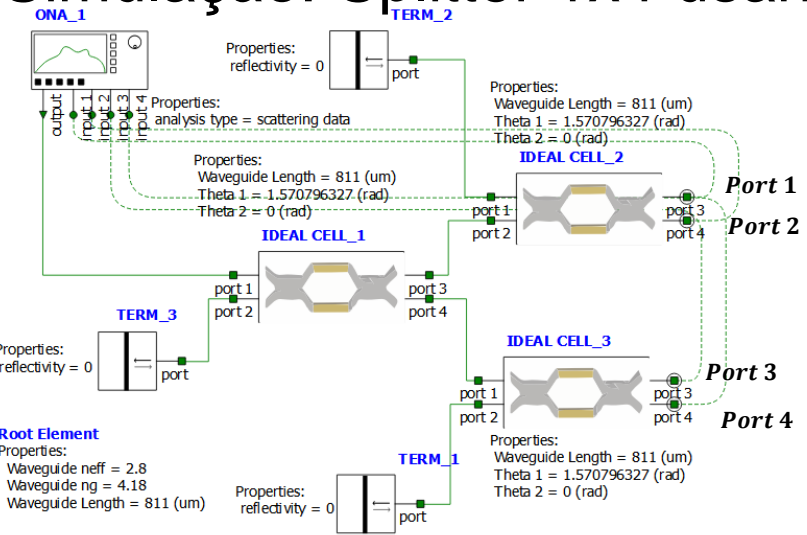


Simulação: Splitter 1x4 usando 3 PPC Cells ideais



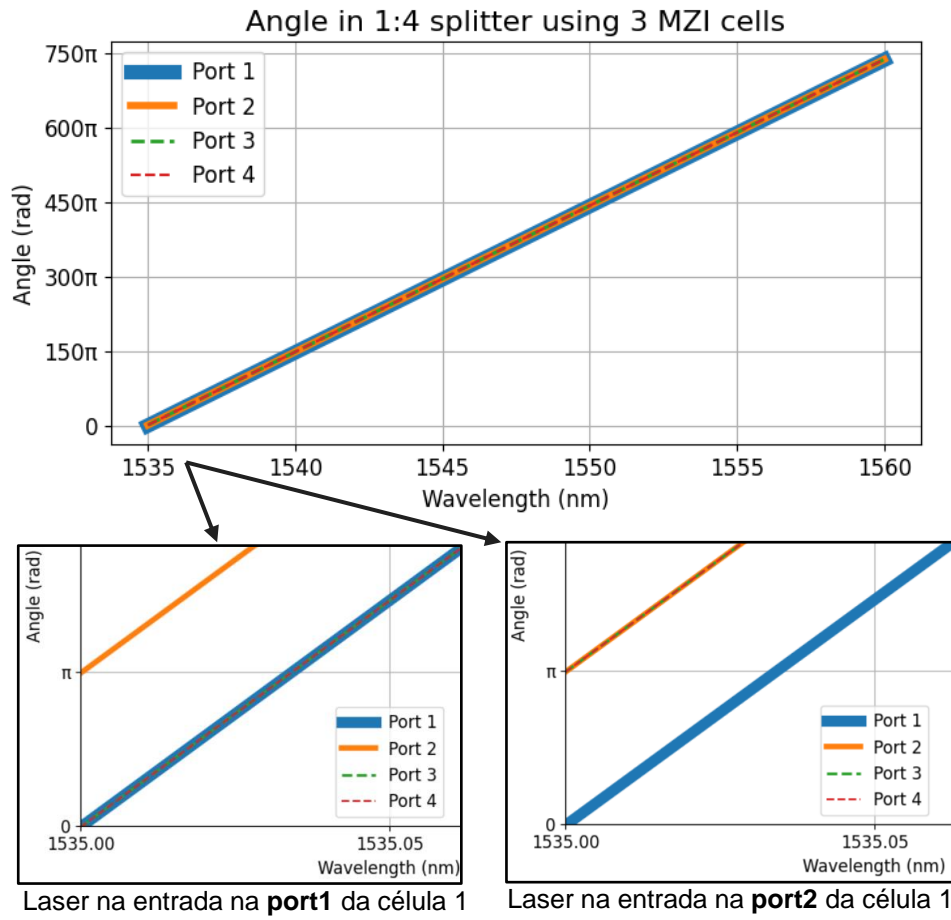
Idealmente, o splitting 1x4 é replicado perfeitamente utilizando 3 splitters

Simulação: Splitter 1x4 usando 3 PPC Cells ideais



Por fim, é analisado a **defasagem para cada caminho**. A diferença da port 2 geral em π radianos é hipotetizado ser um erro de referência do INTERCONNECT. Se for o caso, é prudente dizer que a defasagem em cada caminho é a mesma (como analisado anteriormente para NN Paralelo).

$$y(t) = \sum_{i=1}^N x[t - (i - 1)\Delta t] \cdot a_i e^{j\phi_i} \cdot \underbrace{e^{j\phi_s}}$$

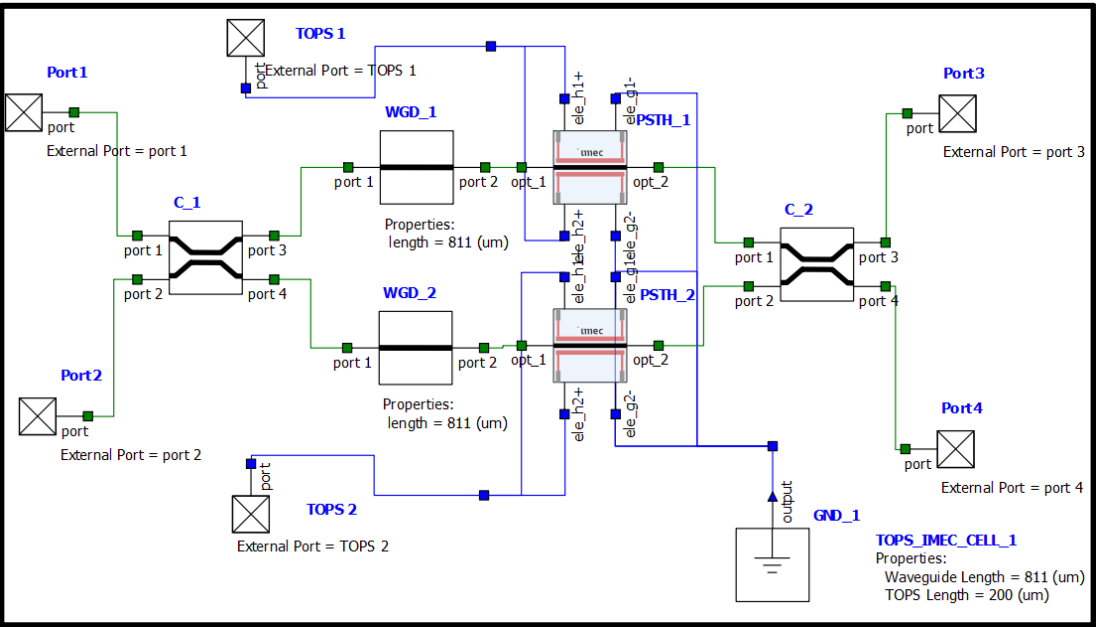
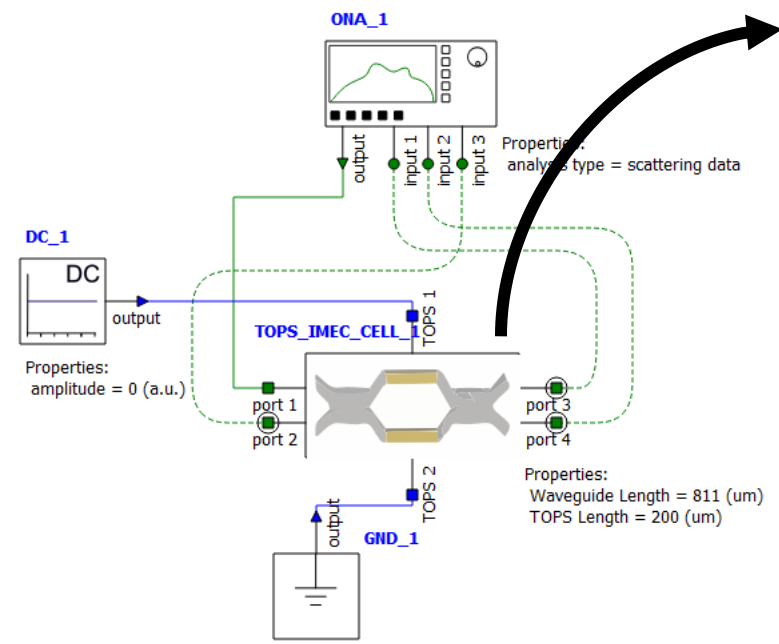


Programmable Photonic Circuits (PPC)

Semana 7 - Simulação com PCC Cell (TOPS IMEC)

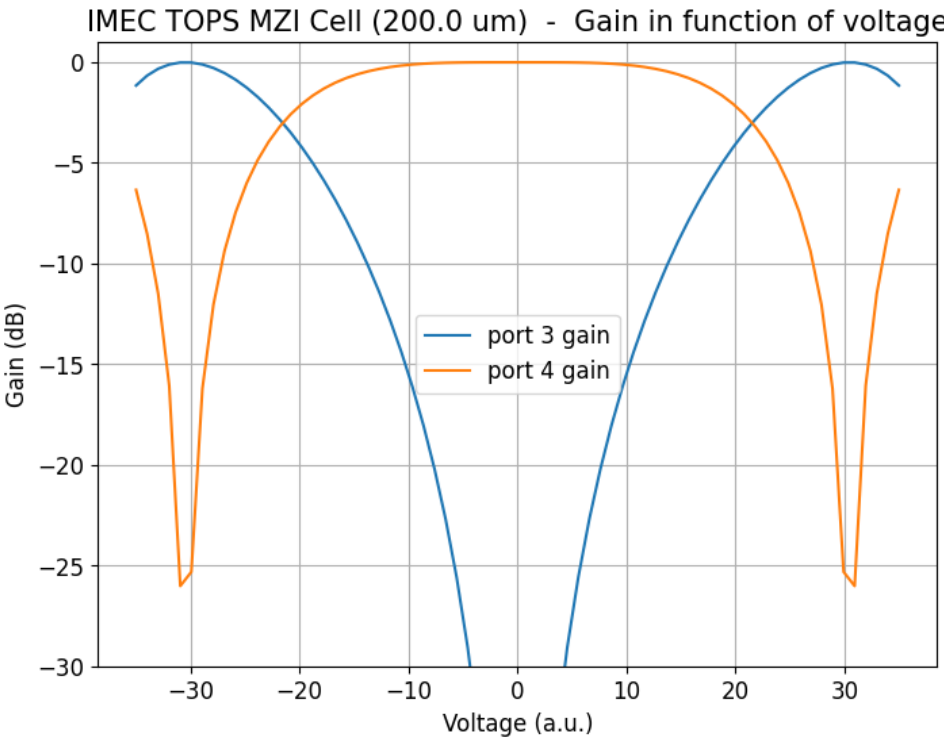
Modelo PPC Cell com TOPS do IMEC

O modelo do phase-shifter escolhido é o **SWGCTE_WGNPLUS_450_600_200K**, que opera na banda C

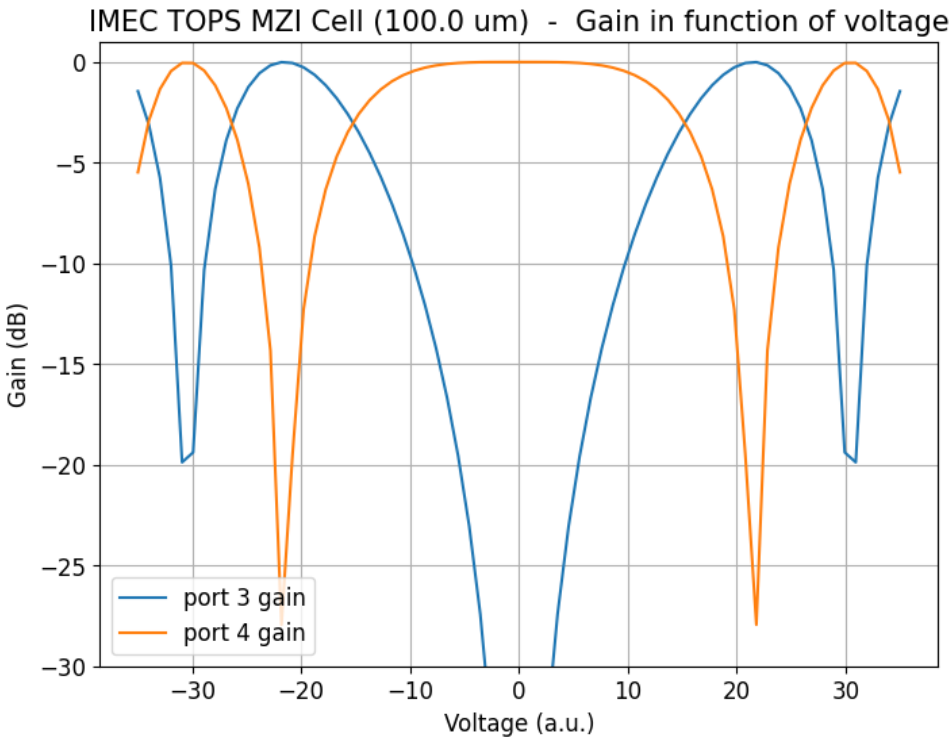


Modelo PPC Cell com TOPS do IMEC

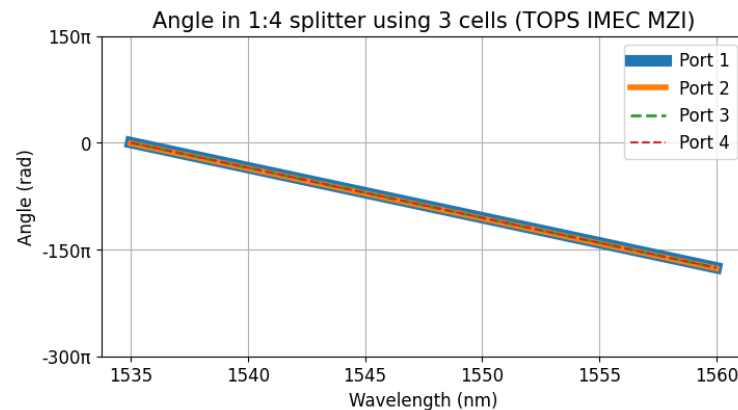
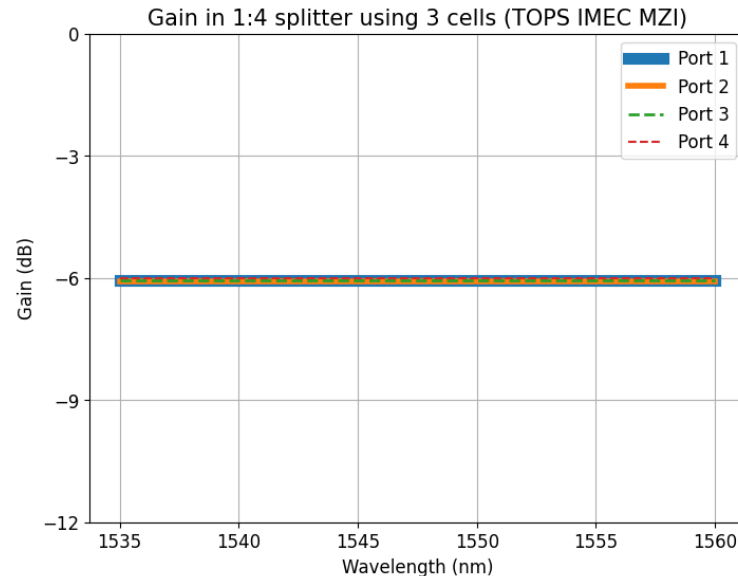
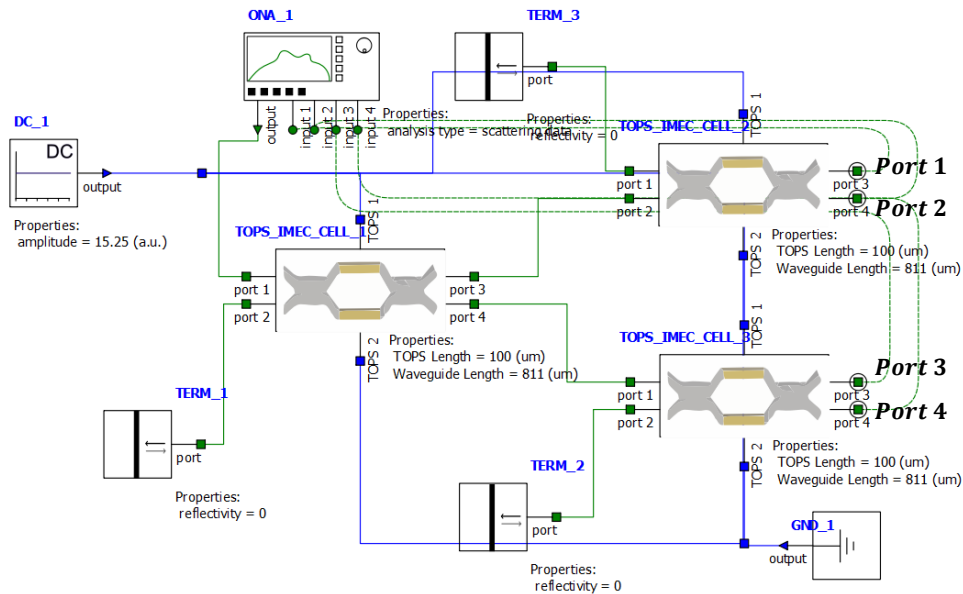
TOPS com 200um



TOPS com 100um



Simulação: Splitter 1x4 usando 3 PPC Cells TOPS IMEC



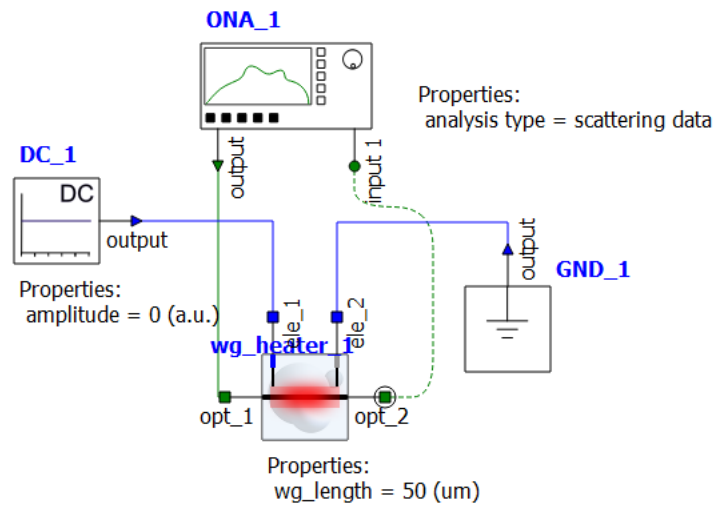
Para replicar um splitter 1x4 utilizando TOPS de 100um do pdk do IMEC, no melhor dos casos é necessário aplicar **15.25 V** em cada porta elétrica.

Em algumas aplicações, um limite convencional para o *drive voltage* é de **5V**, um valor abaixo do utilizado, inviabilizando o uso do phase-shifter do IMEC como modelo.

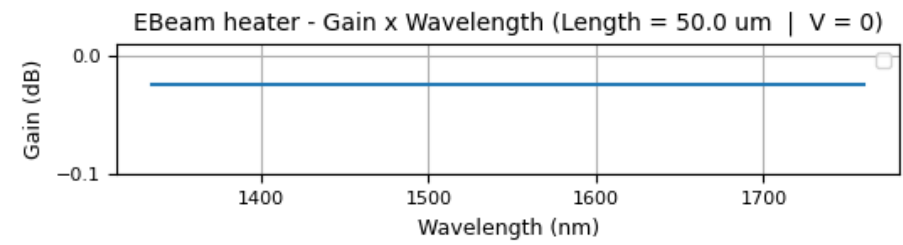
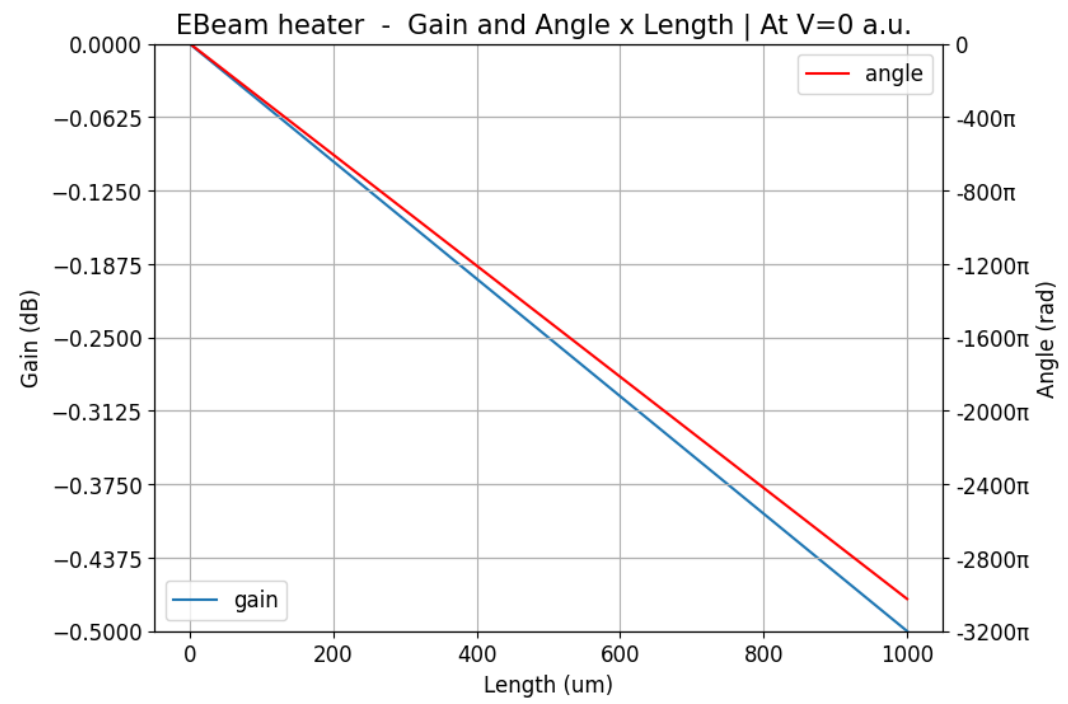
Programmable Photonic Circuits (PPC)

Semana 8 - Simulação com PCC Cell (Ebeam heater)

Modelo Waveguide heater do EBeam

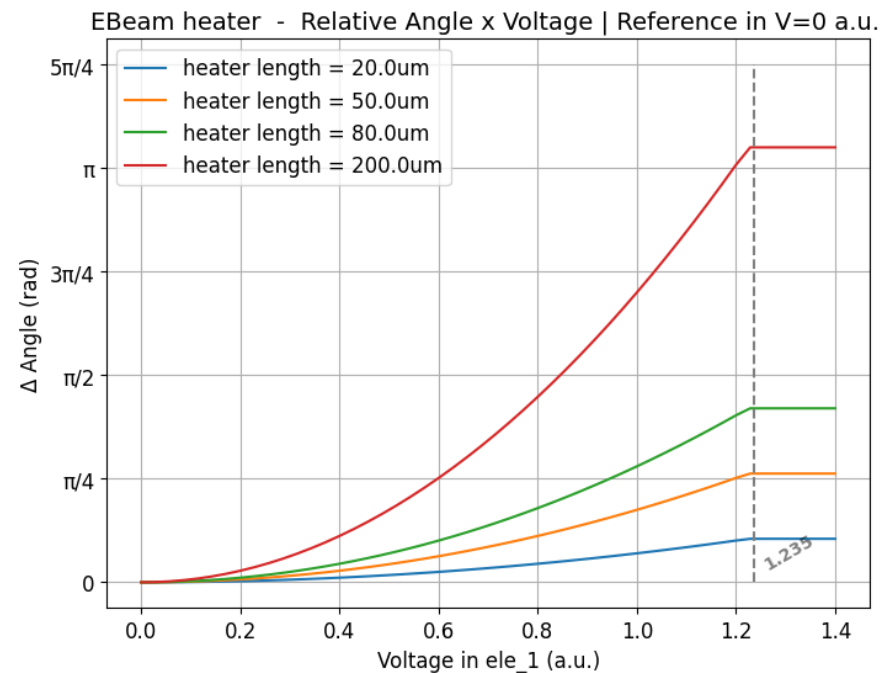
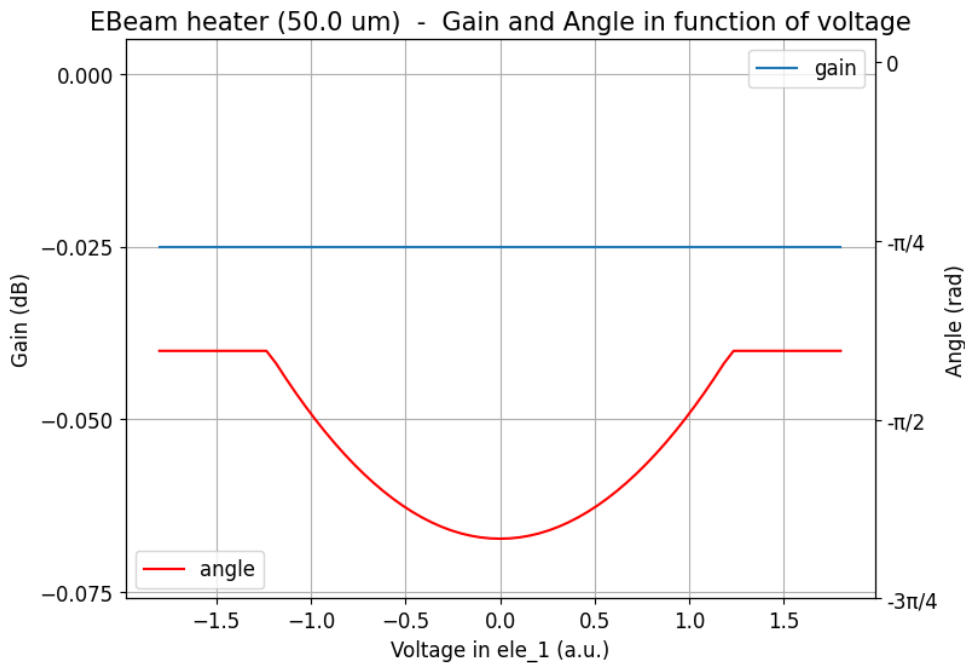


- **Insertion Loss = 5dB/cm**
- **Ganho invariante na frequência**

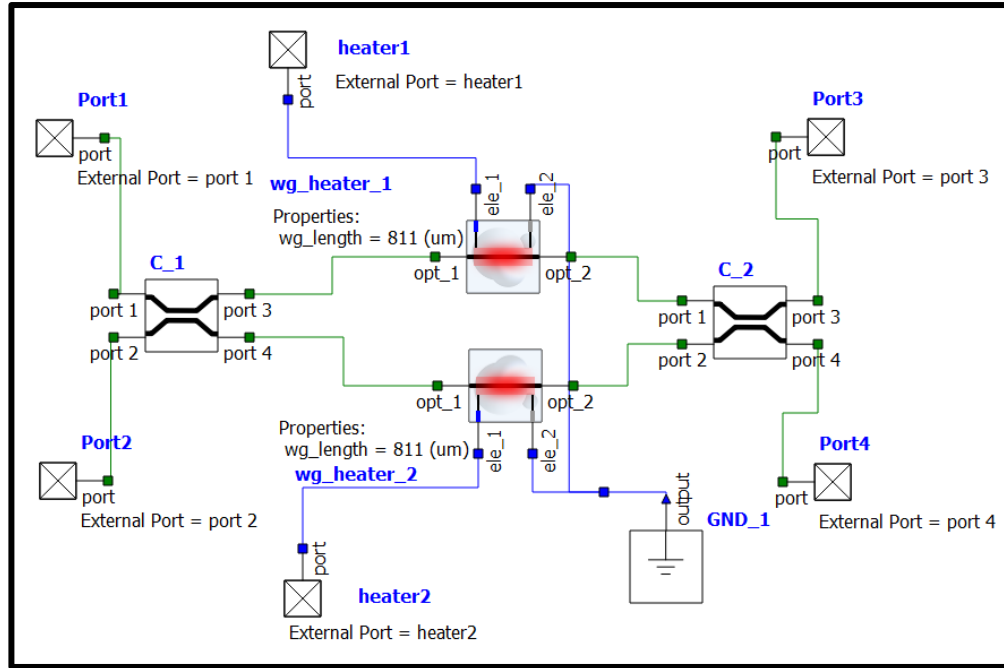
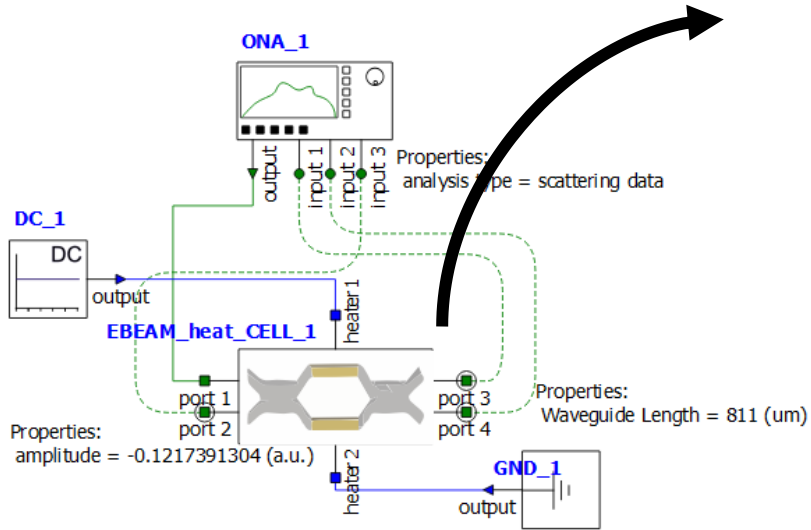


Modelo Waveguide heater do EBeam

Por limitação do modelo, a tensão máxima permitida pelo heater é aproximadamente 1.235 V.

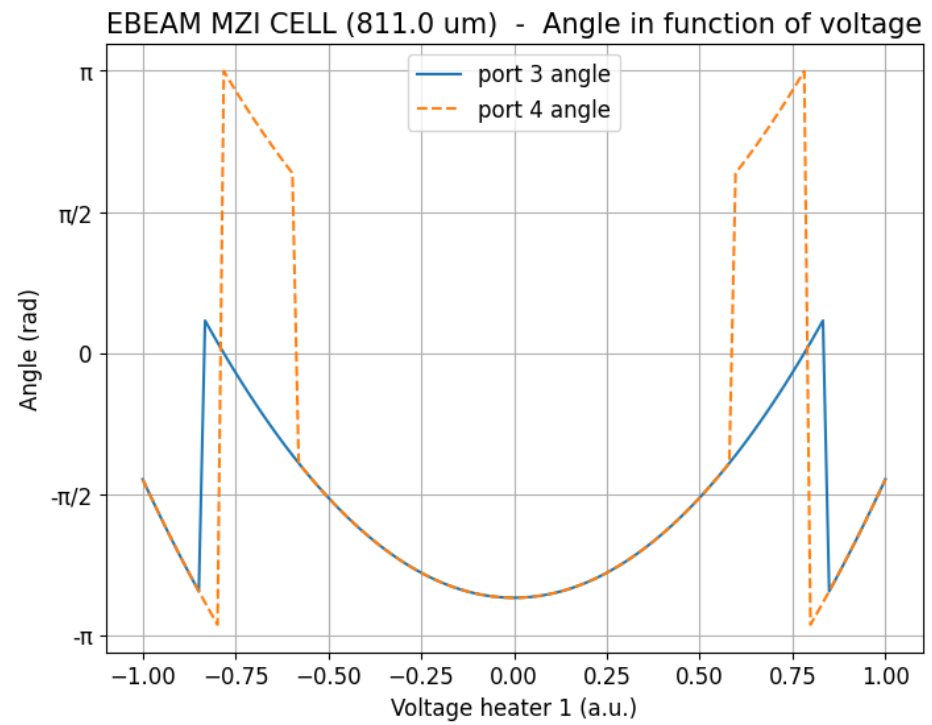
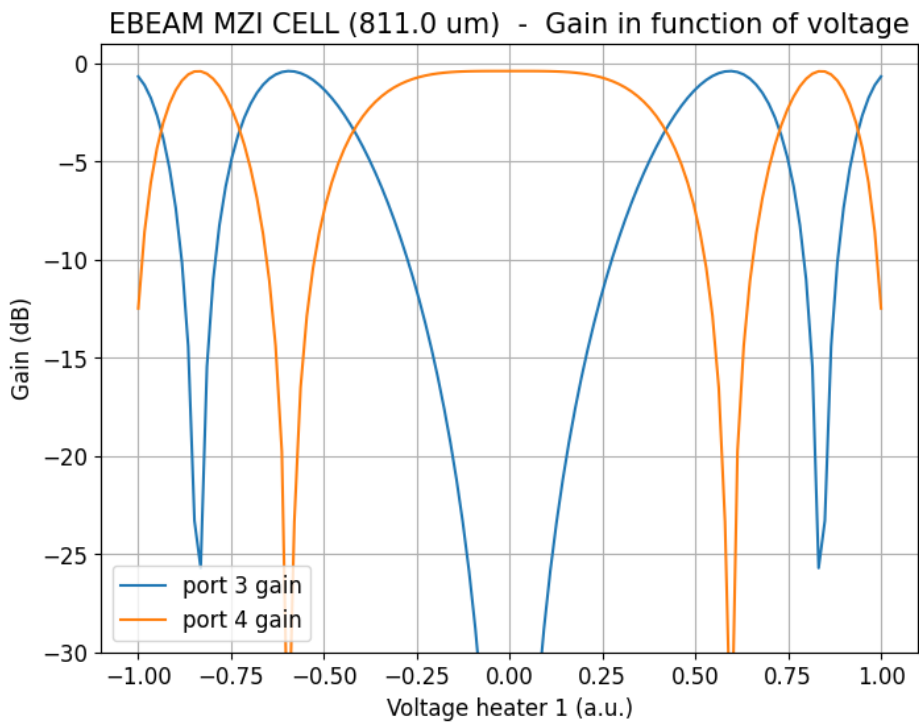


Modelo PPC Cell com heater do EBeam

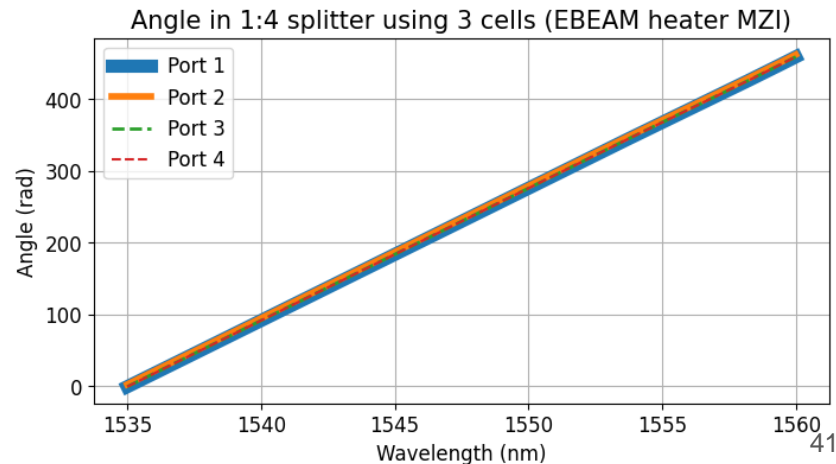
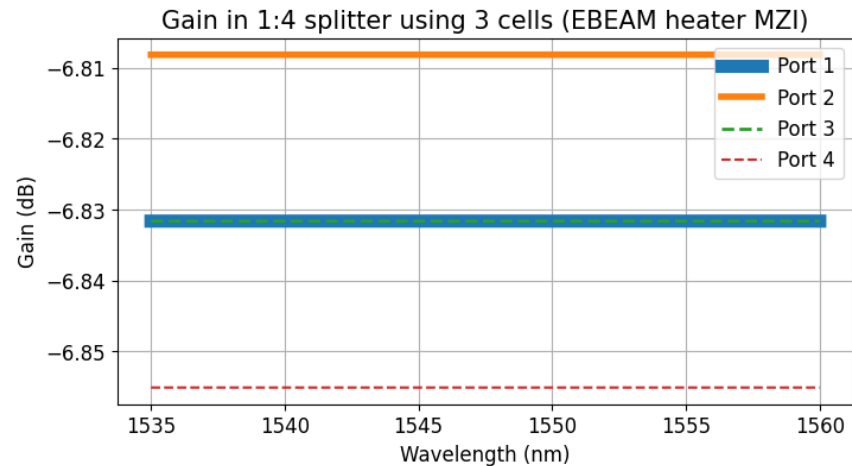
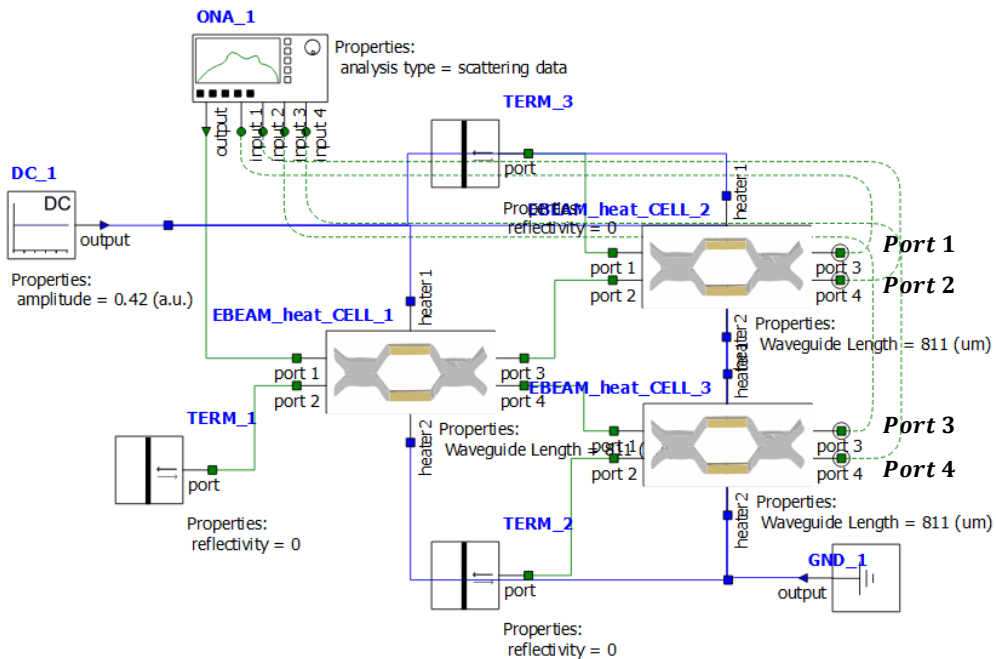


Modelo PPC Cell com heater do EBeam

Tensão CROSS = 0 V Tensão COUPLING \approx 0.420 V Tensão BAR \approx 0.595 V

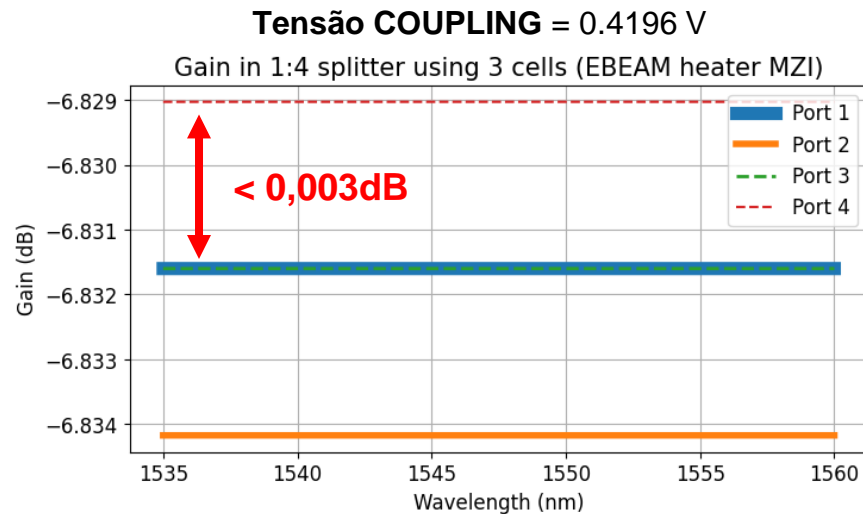
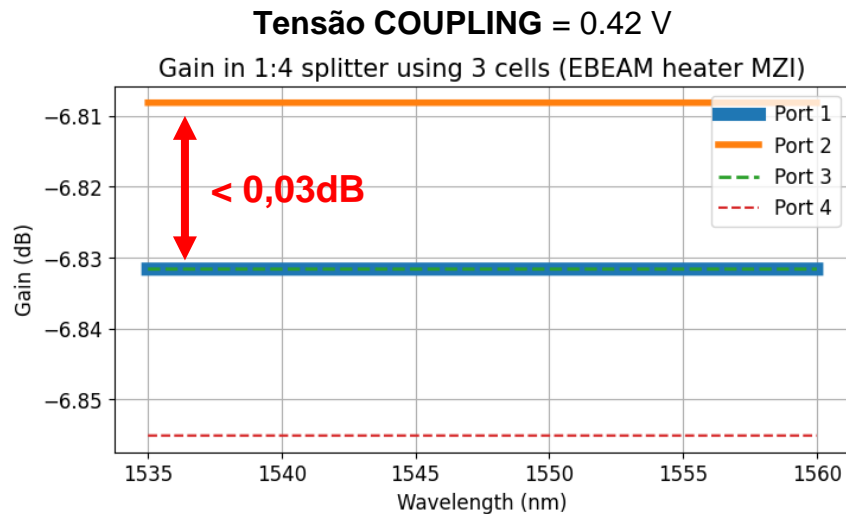


Simulação: Splitter 1x4 usando 3 PPC Cells com heater EBeam

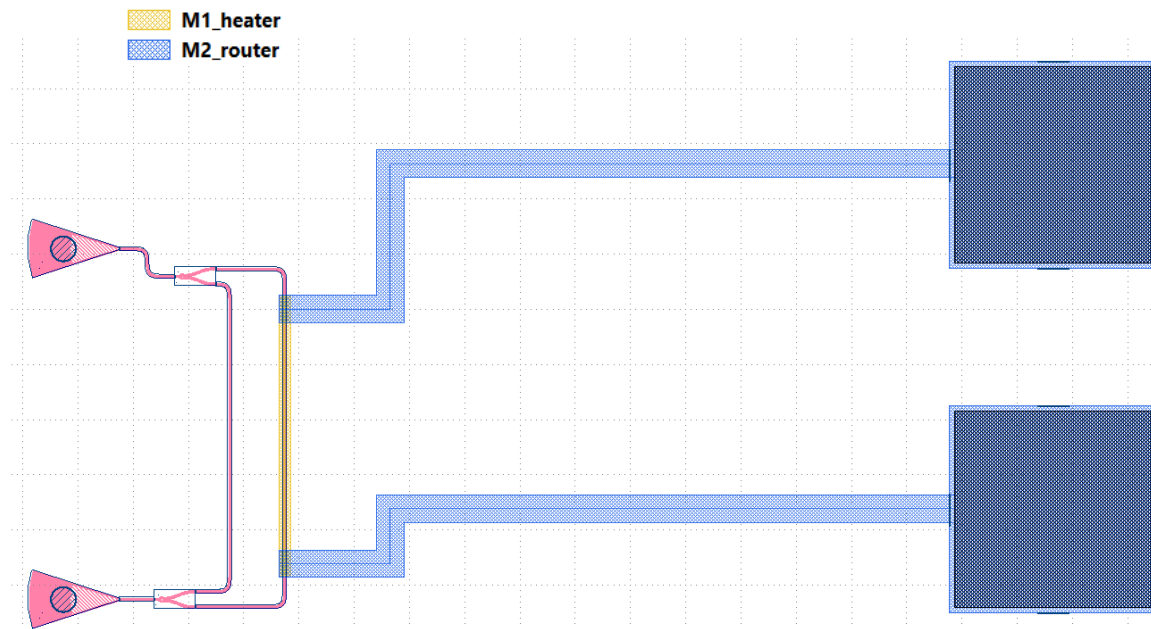


Simulação: Splitter 1x4 usando 3 PPC Cells com heater EBeam

A razão pela qual existe uma diferença de ganho entre as portas se remete ao nível de imprecisão imposta na tensão do heater. A depender do ruído de tensão inerente à fonte, o mesmo pode ocasionar um desbalanceamento entre as portas, principalmente quando se considera mais splitters em série.



Cálculo de potência dos heaters: estimativa inicial



Modelo .gds disponibilizado no PDK do EBEAM: exemplo de phase-shifter aplicado a um braço de um MZI

Apesar de não estar atualizado, acerca do material M1, é dito:

- Molibdênio (Mo) – **250nm de espessura**
- Sheet resistance: **21 ohm/sq.**
- Alinhado ao guia de silício

Cálculo da resistência do heater:

Com $W = 0.5\mu m$:

$$R = R_s \frac{L}{W} = 21 \frac{811 * 10^{-6}}{0.5 * 10^{-6}} = 34.062 \text{ ohms}$$