

UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE CIENCIA DE LA COMPUTACIÓN



**Diseño de dispositivos nanofotónicos resilientes a errores
de fabricación usando algoritmos de optimización y
computación de alto desempeño**

TESIS

Para optar el título profesional de Licenciado en Ciencia de la
Computación

AUTOR:

José Leonidas García Gonzales

ASESOR

Jorge Luis Gonzalez Reaño

Lima - Perú

10 de abril de 2022

Índice general

	Pág.
CAPÍTULO 1 Motivación y Contexto	1
1.1 Introduction	1
1.2 Descripción del Problema	5
1.3 Justificación	6
1.4 Objetivos	7

Índice de tablas

Índice de figuras

1.1	Diseños tradicionales y obtenidos a partir de diseño inverso de un <i>bend</i> y un WDM	3
1.2	<i>Bend</i> con una región de diseño discretizada en 18×18 píxeles. Cada píxel negro representa la presencia de <i>Si</i> y cada píxel blanco de <i>SiO₂</i>	5

Capítulo 1

Motivación y Contexto

1.1 Introduction

La fotónica es la ciencia que estudia la generación, detección y manipulación de la luz. Los principales beneficios que ofrece son ([Shen et al., 2019](#)): (i) elevado ancho de banda en comunicaciones, (ii) bajo consumo energético, (iii) interconexiones ópticas independientes de la distancia. Asimismo, existen propuestas que aprovechan estos beneficios, por ejemplo: (i) interconexiones ópticas en centrales de datos ([Shen et al., 2019](#)), (ii) redes neuronales ópticas ([Shen et al., 2017](#)), (iii) internet de las cosas ([Li et al., 2021](#)).

Un problema presentado en el Top500 sistemas de computación de alto desempeño (HPC, por sus siglas en Inglés) es que desde el año 2010, el ratio entre el ancho de banda entre nodos y el poder de procesamiento por nodo (*byte/FLOP*) ha decrecido en un factor de seis. Se está llegando a un punto donde la capacidad para interconectar nodos está limitando el desempeño de sistemas HPC en programas que hacen uso extensivo de transferencias de memoria. Ante este problema, los avances en la fotónica en silicio (SiP) integrada se presenta como una de las principales alternativas de solución. Esta propuesta puede realizar interconexiones a distancias del orden de metros, manteniendo un elevado ancho de banda y bajo consumo energético ([Anderson et al., 2018](#), [Shen et al., 2019](#)).

A pesar del avance en el diseño e integración de dispositivos SiP, en términos de cantidad de dispositivos por chip, la fotónica integrada aún se encuentra en la misma etapa de expansión que tenía la electrónica en los años 1970s ([Lukas Chrostowski, 2010](#)). Sin embargo, ya existen procesos de fabricación estándar en *foundries* para fabricar chips SiP, a un precio accesible, utilizando procesos CMOS a través del *process design kit* (PDK)

(Bogaerts and Chrostowski, 2018). De este modo, se facilita el desarrollo de esta tecnología.

En el área de SiP integrada, la alta densidad de fabricación es un desafío porque se requiere mantener eficiencia en el chip a nivel de sistema fotónico; por ello, se está buscando optimizar dispositivos fundamentales que lo compongan (Vuckovic, 2019). Para esto existen dos estrategias principales: (i) diseño tradicional (Huang and Ouyang, 2018, Hughes and Fan, 2016, Song and Xie, 2008) y (ii) diseño inverso (Gregory *et al.*, 2015, Malheiros-Silveira and Delalibera, 2020, Su *et al.*, 2020).

La figura 1.1 presenta una comparación de los dos tipos de diseño (tradicional e inverso) en dos dispositivos: (i) *bend-90°* y (ii) *wavelength demultiplexer* de dos canales (WDM). Como se observa en la figura 1.1, en el diseño tradicional (izquierda) se define el dispositivo con geometrías simples que permiten obtener funciones analíticas de sus propiedades físicas (Hughes and Fan, 2016, Song and Xie, 2008). Esto se realiza para poder optimizar la función obtenida a partir de los parámetros que la definan. Dicha optimización se suele ejecutar haciendo un barrido de los parámetros, con algoritmos genéticos o usando *particle swarm optimization*. Esta técnica es un enfoque simple, pero que ha obtenido buenos resultados (Su *et al.*, 2020).

Sin embargo, existen tres grandes inconvenientes con el diseño tradicional. Primero, solamente se explora una pequeña fracción de todos los posibles diseños. Segundo, por lo general no es conocido el límite de rendimiento del dispositivo (Molesky *et al.*, 2018). Tercero, al trabajar en la escala de nanómetros, existen casos como el *bend-90°* y WDM que presentan un bajo rendimiento (Su *et al.*, 2020).

Por el otro lado, en el diseño inverso, mostrado en la figura 1.1 (derecha), las geometrías resultantes no están limitadas a diseños intuitivos o regulares. Esta técnica busca hacer una mayor exploración de todos los posibles diseños. Para ello, se define geometrías arbitrarias y se usa simulaciones computacionales para determinar las propiedades físicas del dispositivo, propiedades que son usadas para formular una función objetivo.

Finalmente, se aplican algoritmos de optimización para encontrar valores óptimos de esta función (Molesky *et al.*, 2018, Su *et al.*, 2020). Para una descripción detallada de los distintos algoritmos de optimización comúnmente empleados, por favor revisar Campbell *et al.* (2019), Elsaywy *et al.* (2020), Schneider *et al.* (2019).

El diseño inverso ha logrado conseguir mejores resultados que los obtenidos por el diseño tradicional por lo que ha ganado interés en el área de fotónica durante los últimos 20 años (Campbell *et al.*, 2019, Molesky *et al.*, 2018, Su *et al.*, 2018). Sin embargo, existen cuatro grandes desafíos con este planteamiento: (i) el espacio de búsqueda es exponencial (Vuckovic, 2019), (ii) las simulaciones computacionales son costosas en términos de tiempo y memoria (Kudyshev *et al.*, 2020), (iii) el espacio de búsqueda es no convexo (Su *et al.*, 2018), (iv) no todos los diseños son fabricables (Su *et al.*, 2020).

Aún cuando una cantidad considerable de investigaciones estudian dispositivos SiP (Malheiros-Silveira and Delalibera, 2020, Su *et al.*, 2018), sigue siendo necesario estudiar dispositivos SiP fundamentales para conseguir chips de SiP integrada densos y eficientes. Los avances en esta área beneficiarán indirectamente al desarrollo de Ciencia de la Computación con mejoras en el *hardware* utilizado para ejecutar eficientemente, por ejemplo, programas de inteligencia artificial o de computación de alto desempeño.

De este modo, el presente trabajo se centra en estudiar dos dispositivos SiP fundamentales: (i) *bend-90°* y (ii) *wavelength demultiplexer* de dos canales. De aquí en adelante nos referiremos a estos simplemente como *bend* y WDM. Así, el objetivo de esta tesis es aplicar el conocimiento en computación para encontrar diseños de estos dispositivos con eficiencias mayores al 90 % y resilientes a errores de fabricación, trabajando en la escala de nanómetros. Con el fin de solucionar este problema se empleará diseño inverso para encontrar geometrías con las eficiencias deseadas, para ello se realizará simulaciones computacionales con cinco algoritmos de optimización populares. De este modo, se espera obtener diseños cuyas simulaciones presenten las características señaladas y que, potencialmente, muestren propiedades similares al fabricarse.



(a) *Bend* con diseño tradicional



(b) *Bend* obtenido con diseño inverso. Extraído de (Su *et al.*, 2020)



(c) WDM con diseño tradicional



(d) WDM obtenido con diseño inverso. Extraído de (Su *et al.*, 2020)

FIGURA 1.1: Diseños tradicionales y obtenidos a partir de diseño inverso de un *bend* y un WDM

El documento está organizado de la siguiente manera:

El capítulo 1 brinda una introducción al tema de investigación, describe el problema a detalle, justifica la relevancia de resolverlo, define los objetivos y señala los aportes del trabajo.

El capítulo 2 desarrolla conceptos fundamentales en fotónica necesarios para entender el resto del documento.

El capítulo 3 presenta una revisión del estado del arte en diseño inverso para optimizar un *bend* y WDM.

El capítulo 4 describe la metodología usada en la investigación.

El capítulo 5 muestra los resultados obtenidos con los distintos casos de estudio.

1.2 Descripción del Problema

Para poder describir el funcionamiento de un dispositivo se calcula la distribución del campo eléctrico, para ello se resuelven las ecuaciones de Maxwell ([Schneider *et al.*, 2019](#)). Una forma de encontrar la solución a estas ecuaciones en cualquier geometría es utilizando un método numérico llamado diferencias finitas en el dominio de frecuencias (FDFD) ([Su *et al.*, 2020](#)). Con este planteamiento se selecciona una región rectangular a optimizar y se la divide en $n \times m$ píxeles como si fuera una imagen, ver Figura 1.2. Luego, cada píxel se rellena con dos posibles materiales: óxido de silicio (SiO_2) o silicio (Si) ([Molesky *et al.*, 2018](#)).

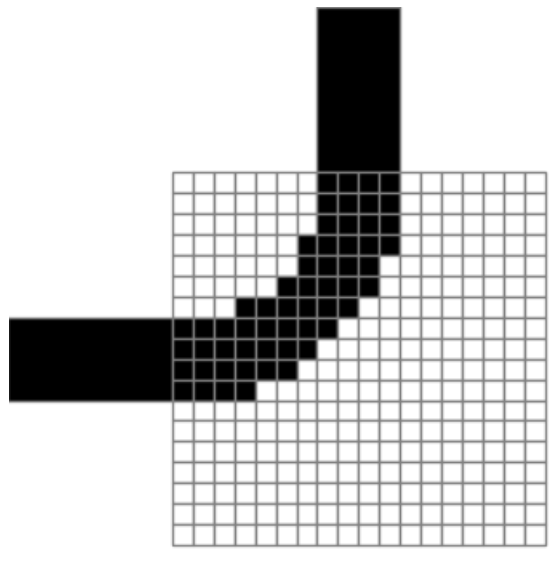


FIGURA 1.2: *Bend* con una región de diseño discretizada en 18×18 píxeles. Cada píxel negro representa la presencia de Si y cada píxel blanco de SiO_2

El diseño inverso comienza definiendo los requerimientos del dispositivo para luego tratar de buscar entre los $2^{n \times m}$ posibles diseños algún candidato que se adapte a lo que se busca (Molesky *et al.*, 2018, Su *et al.*, 2020). Como prueba de concepto, trabajos como el de Malheiros-Silveira and Delalibera (2020) parametrizaron $2^{10 \times 10}$ posibles geometrías. Así, se presentan algunas dificultades con esta estrategia:

1. No es viable evaluar todos los posibles diseños por haber un número excesivamente elevado de ellos (Vuckovic, 2019).
2. Las simulaciones computacionales son muy costosas en términos de memoria y tiempo (Kudyshev *et al.*, 2020).
3. El espacio de búsqueda es no convexo (Su *et al.*, 2018).
4. No todos los diseños son fabricables por limitaciones físicas (Su *et al.*, 2020).
5. Cada dispositivo es una clase distinta de problema, es decir, no necesariamente funcionará la misma estrategia para cada dispositivo (Molesky *et al.*, 2018).

Además, la fabricación viene con otros desafíos, principalmente:

1. Errores de precisión (Piggott *et al.*, 2017).
2. Sensibilidad ante cambios de temperatura (Vuckovic, 2019).

Considerando las anteriores dificultades, el problema es usar diseño inverso y encontrar geometrías que muestren buen desempeño en simulaciones computacionales y que puedan asegurar mantener un óptimo funcionamiento al ser fabricados. Este problema se estudiará para dos dispositivos nanofotónicos (i) *bend* y (ii) WDM.

1.3 Justificación

El *bend* y WDM son dispositivos SiP fundamentales que tienen aplicación directa, por ejemplo, en sistemas HPC (Shen *et al.*, 2017). Así, las mejoras de estos ayudará indirectamente al desarrollo de Ciencia de la Computación brindando, potencialmente, un mejor *hardware* para programas de inteligencia artificial, HPC, entre otros. Por otro lado, desde el punto de vista computacional, este problema es interesante porque ya hay estrategias computacionales conocidas para resolverlo, desde algoritmos evolutivos (Hansen, 2016) hasta redes neuronales (Goodfellow *et al.*, 2015) y *depth learning* (Malkiel *et al.*, 2018). Además, debido al alto costo computacional de las simulaciones (Schneider *et al.*, 2019), el trabajo requiere de computación de alto desempeño. Así, es probable que se pueda obtener buenos resultados en la investigación aplicando el conocimiento ya existente en computación.

1.4 Objetivos

- Diseñar un *bend* y WDM con eficiencias mayores al noventa por ciento y resiliente a errores de fabricación.
 - Seleccionar una estrategia de parametrización que asegure facilidad de fabricación.
 - Definir una función objetivo que encapsule las propiedades buscadas en cada dispositivo.
 - Encontrar geometrías con valores óptimos de la función objetivo en simulaciones computacionales.
 - Encontrar geometrías resilientes a posibles errores de fabricación de dilatación o contracción.

- Comparar el desempeño y la convergencia de cinco algoritmos de optimización populares usados para optimizar dispositivos nanofotónicos.
 - Implementar el proceso de optimización de los dispositivos asegurando aprovechar los recursos CPU de un *cluster*.
 - Implementar el proceso de optimización de los dispositivos asegurando aprovechar los recursos GPU de un *cluster*.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, E., González, J., Gazman, A., Azevedo, R., and Bergman, K. (2018). Optically connected and reconfigurable gpu architecture for optimized peer-to-peer access. In *Proceedings of the International Symposium on Memory Systems, MEMSYS '18*, page 257–258, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- Bogaerts, W. and Chrostowski, L. (2018). Silicon photonics circuit design: Methods, tools and challenges. *Laser & Photonics Reviews*, 12(4):1700237.
- Campbell, S. D., Sell, D., Jenkins, R. P., Whiting, E. B., Fan, J. A., and Werner, D. H. (2019). Review of numerical optimization techniques for meta-device design [invited]. *Opt. Mater. Express*, 9(4):1842–1863.
- Elsawy, M. M., Lanteri, S., Duvinneau, R., Fan, J. A., and Genevet, P. (2020). Numerical Optimization Methods for Metasurfaces. *Laser and Photonics Reviews*, 14(10):1–17.
- Goodfellow, I. J., Vinyals, O., and Saxe, A. M. (2015). Qualitatively characterizing neural network optimization problems. *3rd International Conference on Learning Representations, ICLR 2015 - Conference Track Proceedings*.
- Gregory, M. D., Martin, S. V., and Werner, D. H. (2015). Improved Electromagnetics Optimization. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 57(june):48–59.
- Hansen, N. (2016). The CMA Evolution Strategy: A Tutorial.
- Huang, H. and Ouyang, Z. (2018). General method for eliminating wave reflection in 2d photonic crystal waveguides by introducing extra scatterers based on interference

- cancellation of waves. *Optics Communications*, 406:260–270. Optoelectronics and Photonics Based on Two-dimensional Materials.
- Hughes, T. W. and Fan, S. (2016). Plasmonic circuit theory for multiresonant light funneling to a single spatial hot spot. *Nano Letters*, 16(9):5764–5769.
- Kudyshev, Z. A., Kildishev, A. V., Shalaev, V. M., and Boltasseva, A. (2020). Machine learning-assisted global optimization of photonic devices. *Nanophotonics*, 10(1):371–383.
- Li, N., Ho, C. P., Wang, I.-T., Pitchappa, P., Fu, Y. H., Zhu, Y., and Lee, L. Y. T. (2021). Spectral imaging and spectral lidar systems: moving toward compact nanophotonics-based sensing. *Nanophotonics*, 10(5):1437–1467.
- Lukas Chrostowski (2010). *Silicon Photonics Design: From Device to System*.
- Malheiros-Silveira, G. N. and Delalibera, F. G. (2020). Inverse design of photonic structures using an artificial bee colony algorithm. *Applied Optics*, 59(13):4171.
- Malkiel, I., Mrejen, M., Nagler, A., Arieli, U., Wolf, L., and Suchowski, H. (2018). Plasmonic nanostructure design and characterization via Deep Learning. *Light: Science and Applications*, 7(1).
- Molesky, S., Lin, Z., Piggott, A. Y., Jin, W., Vucković, J., and Rodriguez, A. W. (2018). Inverse design in nanophotonics. *Nature Photonics*, 12(11):659–670.
- Piggott, A. Y., Petykiewicz, J., Su, L., and Vučković, J. (2017). Fabrication-constrained nanophotonic inverse design. *Scientific Reports*, 7(1):1–7.
- Schneider, P. I., Garcia Santiago, X., Soltwisch, V., Hammerschmidt, M., Burger, S., and Rockstuhl, C. (2019). Benchmarking Five Global Optimization Approaches for Nano-optical Shape Optimization and Parameter Reconstruction. *ACS Photonics*, 6(11):2726–2733.

- Shen, Y., Harris, N. C., Skirlo, S., Prabhu, M., Baehr-Jones, T., Hochberg, M., Sun, X., Zhao, S., Larochelle, H., Englund, D., and Soljačić, M. (2017). Deep learning with coherent nanophotonic circuits. *Nature Photonics*, 11(7):441–446.
- Shen, Y., Meng, X., Cheng, Q., Rumley, S., Abrams, N., Gazman, A., Manzhosov, E., Glick, M. S., and Bergman, K. (2019). Silicon photonics for extreme scale systems. *J. Lightwave Technol.*, 37(2):245–259.
- Song, W. and Xie, K. (2008). Optimal design of a multi-mode interference splitter based on SOI. *Optoelectronics Letters*, 4(2):92–95.
- Su, L., Piggott, A. Y., Sapra, N. V., Petykiewicz, J., and Vučković, J. (2018). Inverse Design and Demonstration of a Compact on-Chip Narrowband Three-Channel Wavelength Demultiplexer. *ACS Photonics*, 5(2):301–305.
- Su, L., Vercruysse, D., Skarda, J., Sapra, N. V., Petykiewicz, J. A., and Vučković, J. (2020). Nanophotonic inverse design with SPINS: Software architecture and practical considerations. *Applied Physics Reviews*, 7(1).
- Vuckovic, J. (2019). From inverse design to implementation of practical (quantum) photonics (Conference Presentation). In Soci, C., Sheldon, M. T., and Agio, M., editors, *Quantum Nanophotonic Materials, Devices, and Systems 2019*, volume 11091. International Society for Optics and Photonics, SPIE.