

PROCESADORES ÓPTICOS EN REDES NEURONALES PROFUNDAS: ARQUITECTURA Y APLICACIONES

OPTICAL PROCESSORS IN DEEP NEURAL NETWORKS: ARCHITECTURE AND APPLICATIONS

Daniel A. Valencia-Mora¹

Resumen:

El presente artículo brinda un análisis sobre los procesadores ópticos enfocándose en su arquitectura, aplicaciones, ventajas y desafíos dentro del contexto actual de la computación óptica, que será explorada como un paradigma capaz de aprovechar las propiedades únicas de la luz, como su velocidad, paralelismo inherente y eficiencia energética para el procesamiento de la información. Mediante una revisión del estado del arte, son analizados algunos de los avances tecnológicos que posicionan a la computación óptica como una alternativa ante las limitaciones que comprende la computación electrónica. Uno de estos aspectos es la creciente demanda de cargas de trabajo intensivas en datos, particularmente en inteligencia artificial, donde el desarrollo de soluciones efectivas y robustas lleva a la computación electrónica y óptica a sus límites.

Palabras claves: Procesadores electrónicos, procesadores ópticos, arquitectura de computadores, inteligencia artificial

Abstract

This article provides an analysis of optical processors focusing on their architecture, applications, advantages and challenges within the current

context of optical computing, which will be explored as a paradigm capable of harnessing the unique properties of light, as its speed, inherent parallelism and energy efficiency for information processing. Through a review of the state of the art, some of the technological advances that position optical computing as an alternative to the limitations of electronic computing are analyzed. One such aspect is the growing demand for data-intensive workloads, particularly in artificial intelligence, where the development of effective and robust solutions pushes electronic and optical computing to its limits.

Keywords: Electronic processors, optical processors, computer architecture, artificial intelligence.

1. Introducción

Los avances tecnológicos buscan implementar soluciones eficaces para satisfacer necesidades específicas, las más eficientes tienden a consolidarse y las demás son descartadas, mejoradas o reemplazadas. La computación busca satisfacer las necesidades de los usuarios por medio de innovaciones constantes ahondando en aspectos clave como la velocidad y eficiencia de los equipos informáticos, siendo determinante para fomentar nuevas investigaciones en pro del desarrollo tecnológico.

¹ Tecnólogo en Sistematización de Datos, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, Bogotá.
Estudiante: Universidad, Colombia. Correo electrónico personal e institucional e-mail: davalenciam@udistrital.edu.co
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9549-2396>

La evolución histórica de la computación ha impulsado la búsqueda de mayor potencia de procesamiento y eficiencia en una máquina, generando hitos importantes en la innovación que son fundamentales para las tecnologías actuales y futuras. En la computación electrónica, o tradicional, surgió la arquitectura de Von Neumann, que revolucionó por completo el campo de la computación, permitiendo el almacenamiento de conjuntos de datos e instrucciones en una memoria específica, y paralelamente, con la invención del transistor se consolidaron los fundamentos principales de la electrónica, contribuyendo ampliamente al desarrollo de la computación [6].

Las innovaciones también traen retos tecnológicos en campos complejos como la inteligencia artificial, la explosión de macrodatos (big data), y otras necesidades sofisticadas que llevan al límite los componentes de cómputo, como las unidades centrales de procesamiento (CPU) y las unidades de procesamiento gráfico (GPU). Dichas necesidades pueden ser puntuales, para tareas específicas (por ejemplo, el procesamiento de datos en un centro de inteligencia artificial), o masivas, de propósito general (como sucede en el mercado de equipos informáticos).

El presente artículo tiene como objetivo proporcionar un análisis de los procesadores ópticos al examinar sus principios fundamentales, componentes arquitectónicos, características de rendimiento e implementaciones actuales. Se busca dilucidar sus respectivas fortalezas, limitaciones y el potencial para su futura coexistencia y posible integración híbrida en la resolución de los desafíos computacionales más exigentes.

2. Metodología

Para el desarrollo del presente artículo se emplea un enfoque analítico basado en la revisión de literatura sobre la computación óptica. Se analizará sobre este paradigma mediante, sus principios fundamentales, componentes arquitectónicos y características operativas detallando cómo esta tecnología procesa, almacena y transfiere información, destacando sus ventajas y desventajas.

Dicha revisión de literatura se realizó a partir de una amplia gama de fuentes, principalmente artículos académicos, libros, y comunicados públicos de instituciones de investigación líderes, lo que permitirá la inclusión de ejemplos concretos de prototipos anteriores y actuales, el estado del arte, y aplicaciones comerciales emergentes para comprender la computación óptica. Este enfoque está diseñado para revelar no solo las fortalezas y debilidades de la computación óptica, sino también, identificar su aplicación, áreas de sinergia potencial y campos computacionales específicos donde esta tecnología podría

superar a la computación electrónica (o tradicional). Esto sienta las bases implícitamente para comprender el futuro de la computación óptica ya sea en el ámbito académico-investigativo o comercial, e incluso futuras aplicaciones para este tipo de computación.

3. Desarrollo del tema

3.1. Fundamentos e historia de la Computación Óptica

El procesamiento de la información óptica utiliza las propiedades de velocidad y paralelismo de la luz, representando la información como señal óptica o imagen donde se emplea a su vez el procesamiento inherente que busca realizar múltiples operaciones al mismo tiempo sin necesidad de dividir la tarea a realizar [1]. Los aspectos anteriormente mencionados convierten a la computación óptica en un campo potencial para el procesamiento de grandes cantidades de datos en tiempo real. [1] expone que “la propiedad de la transformada de Fourier de una lente es la base de la computación óptica. Al usar luz coherente una lente realiza en su plano focal posterior la transformada de Fourier de una transparencia 2D ubicada en su plano frontal. La transformada de Fourier exacta, con la amplitud y fase se calcula de forma analógica mediante la lente”.

La computación óptica es un campo de investigación con más de 70 años de antigüedad, tuvo un periodo considerado la época dorada entre 1980 y 2004 donde emergieron tecnologías nuevas y procesadores ópticos innovadores diseñados y construidos para aplicaciones reales [1]. Las etapas más relevantes de la computación óptica son las siguientes: el auge de la óptica informática (1945-1980), la edad de oro de la computación óptica (1980-2004) y la computación óptica actual. Este campo según [2] no posee una definición formal así que propone definirlo como el “uso de radiación electromagnética para procesar información”. A la computación óptica también se le denomina procesamiento óptico de la información, óptica de la información o fotónica de la información [1].

3.2. Arquitectura de los Procesadores Ópticos

La arquitectura de un procesador óptico se compone principalmente de tres partes que pueden ser visualizadas en la Ilustración 1: plano de entrada, plano de procesamiento y plano de salida. En el plano de entrada la señal puede ser unidimensional o bidimensional, el plano de procesamiento puede componerse por lentes, hologramas (grabados ópticamente o generados por computadora), o componentes no lineales, siendo este el núcleo del procesamiento que puede realizarse a la velocidad de la luz, y, por último, el plano de salida puede ser un fotodetector, un array de fotodetectores o una cámara donde se detectan los resultados del procesamiento [1].

La Ilustración 2 “muestra el correlador básico denominado 4-f dado que la distancia entre el plano de entrada y de salida es cuatro veces la distancia focal de las lentes

[...]. La escena de entrada se muestra en el plano de entrada, donde la lente 1 realiza la transformada de Fourier, y, por lo tanto, se multiplica por la transformada de Fourier de la escena de entrada. La lente 2 realiza una segunda transformada de Fourier que proporciona, en el plano de salida, la correlación entre la escena de entrada y la referencia”.

Existe otra arquitectura de correlador óptico nombrado como el correlador de transformada conjunta (JTC), [1] explica que “las dos imágenes, la de referencia $r(x,y)$ y la de escena $s(x,y)$ se colocan una junto a la otra en el plano de entrada, se aplica la transformada de Fourier a la primera lente. Se detecta la intensidad del espectro conjunto y, a continuación, se realiza su transformada de Fourier. Esta segunda transformada de Fourier se compone de varios términos incluyendo las correlaciones cruzadas entre la escena y referencia. Utilizando un SLM (Modulador Espacial de Luz o Spatial Light Modulator por sus siglas en inglés), esta transformada de Fourier puede implementarse ópticamente, como se muestra en la Ilustración 3(a). La Ilustración 3(b) muestra el plano de salida del JTC cuando la referencia y la escena son idénticas”.

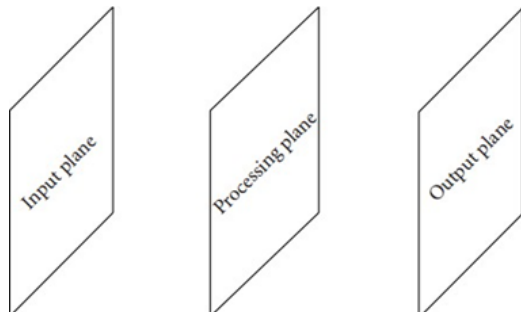


Ilustración 1: Arquitectura de un procesador óptico

Fuente: [1]

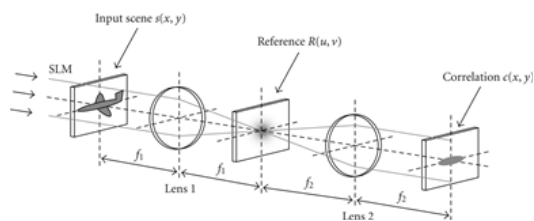


Ilustración 2: Correlador 4-f básico: Montaje óptico

Fuente: [1]

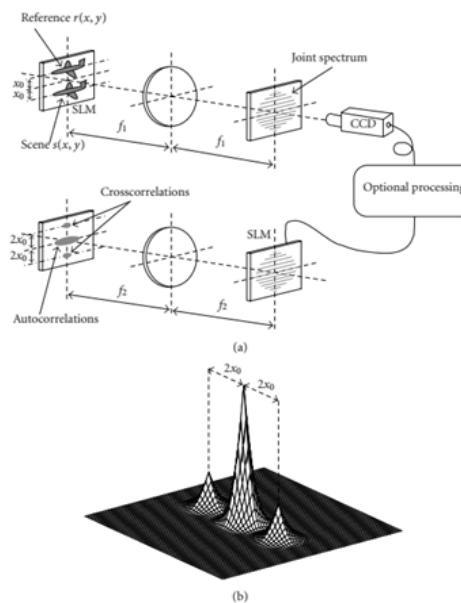


Ilustración 3: Correlador de transformada conjunta (JTC); (a) Montaje óptico. (b) Plano de salida del JTC

Fuente: [1]

Las Ilustración 2 y 3 anteriormente visualizadas representan procesadores ópticos coherentes en donde la información se transmite mediante amplitudes de onda complejas, por otro lado, también existen los procesadores inherentes que emplean la transmisión de la información mediante intensidades de onda [1]. Además [1] expone que “los procesadores incoherentes no son sensibles a las variaciones de fase en el plano de entrada y no representan ruido coherente”.

3.4. Ejemplos de Implementación

3.4.1 Redes neuronales ópticas para rotación de imágenes (1983)

La computación óptica puede ser una solución al problema de rotación de imágenes digitalizadas haciendo uso de redes neuronales ópticas, [4] asegura que “su paralelismo les confiere una alta velocidad de procesamiento. El hecho de que sean ópticas se refiere a que, a diferencia de las electrónicas, las señales son ópticas y se utilizan para su tratamiento dispositivos optoelectrónicos”, adoptando ambos tipos de computación para resolver este problema.

[4] explica que la tecnología de moduladores ópticos 256x256 píxeles “permite fabricar una neurona compuesta por nueve micro lentes binarias capaz de procesar la luz emitida por nueve píxeles [...]. Una red compuesta por 30.000 de estas neuronas, directamente unidas a fotodetectores, bastaría para procesar una imagen de 512x512. A continuación, de la red de micro lentes y fotodetectores se inserta una matriz holográfica, que facilita las conexiones sinápticas y los pesos entre neuronas, dos parámetros esenciales en toda red neuronal [...]. Finalmente, la salida de la red

neuronal consiste en una pantalla de visualización donde la imagen se presenta". El autor también explica que la red de 30.000 micro lentes comprende dificultades de fabricación especialmente con la conexión a la matriz de fotodetectores, por este motivo se busca reducir su número, esto implica que la operación de rotación no puede aplicarse a toda la imagen y para ello la reducción solo es posible si el algoritmo de rotación usado en la red neuronal es mejorado [4]. Dadas las anteriores circunstancias es aplicado el algoritmo de variación espacial, el cual "es una técnica de tratamiento de imágenes que permite contextualizar los conjuntos de píxeles" [4]

Finalmente, el autor hace énfasis en que "la sinergia entre la algorítmica, la arquitectura física neuronal y el enfoque puramente óptico del problema da como resultado una técnica potente, eficaz y rápida para tratar un problema usual en tratamiento de imágenes digitalizadas, cual es la corrección geométrica de dichas imágenes"

3.4.2 Redes neuronales nano fotónicas que varían espacialmente (2024)

Para este trabajo, los autores tuvieron en cuenta las limitaciones de los diseños de redes neuronales ópticas y su poca precisión en contraste con las redes neuronales electrónicas modernas. Enfocaron sus esfuerzos en desarrollar una red neuronal nano fotónica reconfigurable la cual logró una precisión del 72.76% en CIFAR-10 superando a AlexNet que conto con una precisión del 72.64% y según los autores "haciendo avanzar las redes neuronales ópticas hacia la era del aprendizaje profundo" [3].

Un aspecto relevante para los autores es la creciente demanda de la inteligencia artificial de alto rendimiento que genera presión sobre las arquitecturas informáticas existentes. En concreto, exponen una posible limitación de los procesadores electrónicos teniendo en cuenta la ley de Moore y exponen que "el número de transistores se duplica cada dos años, mientras que las redes neuronales profundas (DNN), posiblemente los algoritmos más influyentes en inteligencia artificial, se han duplicado en tamaño cada 6 meses. Sin embargo, el fin del escalado de voltaje ha hecho que el consumo de energía, y no el número de transistores, sea ahora el principal factor que limita nuevas mejoras en el rendimiento computacional" [3].

Los autores tuvieron en cuenta el aprovechamiento de la fotónica para lograr un alto rendimiento, baja latencia y bajo consumo de energía, mencionando a su vez que ya existen procesadores ópticos/fotónicos diseñados específicamente para IA como computadoras ópticas de procesamiento de señales empleados en diferenciación espacio-temporal, integración y convolución, además aseguran que "las redes neuronales ópticas (ONN) pueden realizar tareas de inferencia de IA, como reconocimiento de imágenes, cuando se implementan como computadoras

optoelectrónicas totalmente ópticas o híbridas" [3].

Para sintetizar, los autores investigaron una red neuronal nano fotónica equiparable con la primera red neuronal digital moderna AlexNet, proponiendo "una CNN LKSV, aprendida mediante técnicas de reparametrización de baja dimensión, y que se materializa físicamente mediante un sistema meta óptico", en este punto lograron un traslado del 99,64% de los cálculos al dominio óptico, obteniendo excelente resultados y también reduciendo la brecha entre la IA, fotónica y electrónica permitiendo a la computación óptica multicanal de alta resolución cubrir la futura brecha en IA fotónica gracias al aporte de los autores [3].

3.4.3 Procesador fotónico para cálculos de IA ultrarrápidos (2024)

En el artículo [5] el MIT informa acerca de un procesador óptico que emplea la luz para realizar operaciones de una red neuronal en un chip explicando que las redes neuronales profundas impulsadas por las aplicaciones de aprendizaje automático más exigentes son grandes y complejas a tal punto de superar los límites del hardware informático electrónico tradicional.

Según explica el MIT fue desarrollado un chip fotónico totalmente integrado que puede realizar cálculos clave de una red neuronal profunda ópticamente, y "fue capaz de completar los cálculos clave para una tarea de clasificación de aprendizaje automático en menos de medio nanosegundo y logró una precisión de más del 92 por ciento: un rendimiento comparable al del hardware tradicional [...]. El chip, compuesto por módulos interconectados que forman una red neuronal óptica, se fabrica mediante procesos de fundición comerciales, lo que podría permitir el escalado de la tecnología y su integración en la electrónica" [5].

Cabe resaltar que los autores de la investigación mencionados por el MIT en el artículo diseñaron unidades de función óptica no lineal (NOFU) combinando la electrónica y óptica para implementar operaciones no lineales en el chip y "construyeron una red neuronal profunda óptica en un chip fotónico utilizando tres capas de dispositivos que realizan operaciones lineales y no lineales" [5]. Los investigadores lograron una latencia ultra baja permitiendo entrenar de forma eficiente una red neuronal profunda en el chip empleando el entrenamiento in situ que consume gran cantidad de energía en hardware digital, y esto puede ser útil para el procesamiento interno de señales ópticas (para navegación o telecomunicaciones) y especialmente para sistemas de aprendizaje en tiempo real.

Por último, "El sistema fotónico alcanzó una precisión superior al 96 % durante las pruebas de entrenamiento y superior al 92 % durante la inferencia, comparable al hardware tradicional. Además, el chip realiza cálculos clave en menos de medio nanosegundo", esto es fundamental para aplicaciones donde la rapidez para generar

la solución es el punto crucial, abriendo la posibilidad de aplicar la computación óptica en sistemas de estas características [5].

4. Conclusiones

Como se ha reflejado en el presente artículo, fue adoptado un enfoque analítico para sustentar una revisión de la literatura sobre computación óptica. Este campo en principio tiene la capacidad de procesar grandes volúmenes de información en tiempo real, además, posee aplicación en redes neuronales ópticas para rotación de imágenes, redes neuronales nano fotónicas que varían espacialmente y para procesadores fotónicos que puedan desarrollar cálculos de inteligencia artificial de forma ultrarrápida. En ese orden de ideas, la computación óptica ofrece una posible solución a diversos límites tecnológicos asociados a la computación electrónica en función de la inteligencia artificial como la ley de Moore, el consumo de energía y la rapidez para generar una solución empleando redes neuronales ópticas que ofrecen velocidad y precisión contrastando con la computación electrónica o tradicional, por este motivo, es importante continuar con las investigaciones pertinentes que aborden la aplicación de computación óptica y sus derivados (nano fotónica, fotónica de silicio, redes neuronales ópticas, redes neuronales ópticas profundas). Si bien, la computación óptica no logró una masificación comparable a la computación electrónica, aún presenta dos áreas clave para su desarrollo.

En primer lugar, la fabricación de sus componentes ha logrado avances en sus procesos de fundición comerciales, abriendo la posibilidad de tener un escalado y accesibilidad mucho mayor

En segundo lugar, la computación óptica ofrece grandes soluciones especializadas ante las limitaciones anteriormente mencionadas que comprenden la computación tradicional. Finalmente, teniendo en cuenta estas dos ideas expuestas, la computación óptica podría experimentar un auge no solo en inteligencia artificial, sino también posteriormente en otros campos de estudio, pudiéndose aplicar de forma precisa según lo ameriten las exigencias del desarrollo tecnológico actual y emergente.

5. Referencias

[1] P. Ambs, «Optical Computing: A 60-Year Adventure», *Advances in Optical Technologies*, vol. 2010, n.º 1, p. 372652, 2010, doi:

10.1155/2010/372652.

[2] J. Touch, A.-H. Badawy, y V. J. Sorger, «Optical computing», *Nanophotonics*, vol. 6, n.º 3, pp. 503-505, may 2017, doi: 10.1515/nanoph-2016-0185.

[3] K. Wei et al., «Spatially varying nanophotonic neural networks», *Science Advances*, vol. 10, n.º 45, p. eadp0391, nov. 2024, doi: 10.1126/sciadv.adp0391.

[4] R. Cerdán, «Redes neuronales ópticas para rotación de imágenes», *Revista de Teledetección*, n.º 1, pp. 1-6, feb. 1993. [En línea]. Disponible en: https://aet.org.es/revistas/revista1/Articulo-AET1_5.pdf

[5] A. Zewe, «Photonic processor could enable ultrafast AI computations with extreme energy efficiency», *MIT News | Massachusetts Institute of Technology*, 2 de diciembre de 2024. Accedido: 28 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://news.mit.edu/2024/photonic-processor-could-enable-ultrafast-ai-computations-1202>

[6] «(PDF) ¿Futuro de la electrónica: procesadores ópticos? | Future of electronics: optical processors?», *ResearchGate*. Accedido: 28 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/337089984_Futuro_de_la_electronica_procesadores_opticos_Future_of_electronics_optical_processors