

Simulación y Evaluación de Redes de Interconexión Nanofotónicas sobre Silicio para Chips Multiprocesadores

Tatiana López Guevara, Jose Alfredo Jaramillo
 tatiana@sirius.utp.edu.co, jj@sirius.utp.edu.co
 Universidad Tecnológica de Pereira
 Grupo de Investigación Sirius

Resumen—Las redes de interconexión electrónicas, tienen un impacto directo en la limitación de potencia, ancho de banda y latencia de los chips multiprocesadores (CMPs) actuales. Estas limitaciones sumadas a la inhabilidad de escalar eficientemente a cientos de núcleos, la presenta como una solución poco viable a largo plazo. El empleo de la tecnología de punta que usa la nanofotónica sobre silicio, se presenta como una solución prometedora a este problema, ya que no solo permite el flujo de grandes cantidades de datos en una misma línea de transmisión, sino que tiene una facilidad de integración con la microelectrónica actual manteniendo al mismo tiempo los bajos costes de fabricación, gracias a que se pueden reutilizar las técnicas de manufactura de semiconductores tradicionales. En este proyecto se simularon y evaluaron las redes de interconexión con topología C-Mesh nanofotónicas híbridas sobre silicio para chips multiprocesadores con el fin de conocer si realmente son más eficiente en términos de consumo de potencia y latencia que sus equivalentes electrónicos. Se utilizó de una metodología estructural, en la cual se identificaron 2 grandes etapas: Primero se evaluó el comportamiento de los elementos básicos que conforman los dispositivos fotónicos, lo que permitió tener un mayor control sobre los parámetros con los que se simula su comportamiento a nivel de un sistema completo en una capa de abstracción superior, es decir, sobre la siguiente etapa del proyecto. La última etapa estuvo encaminada a la simulación del sistema completo para obtener los análisis comparativos en términos de ancho de banda, potencia y latencia de la red C-Mesh sobre diferentes conjuntos de pruebas. La aplicación de este conocimiento científico orientado al área de arquitectura de computadores y a la nanotecnología, permitirá la creación de nuevos diseños que aporten a la solución de los problemas de rendimiento vs potencia, apuntando a mejorar la competitividad nacional mediante la generación de producción intelectual en dicho aspecto.

Index Terms—Arquitectura de computadores, Silicon Photonics, Chips Multiprocesadores, Topologías de Interconexión, Simulación.

I. INTRODUCCIÓN

LAS tendencias actuales de los procesadores muestran que en un periodo corto de tiempo, alcanzaremos los cientos de núcleos en un solo chip. A medida que la cantidad de estos núcleos aumenta, los requerimientos de ancho de banda de las redes de interconexión que permiten la comunicación interna entre estos y hacia la memoria, se incrementa. A medida que se incrementa el ancho de banda en sistemas de interconexión electrónicos, la latencia y la disipación de

poder, se ven impactadas considerablemente, por lo que dicha solución se vuelve no viable.

La fusión del campo de la fotónica con la nanotecnología denominado nanofotónica, ha permitido el desarrollo de dispositivos basados en silicio de altas prestaciones y bajo consumo, ya que pueden ser producidos usando las técnicas ya existentes de manufacturación de semiconductores, y gracias a que el silicio actualmente es utilizado como el componente base en la mayoría de circuitos, es posible crear dispositivos híbridos en los cuales se integran componentes tanto electrónicos como ópticos en un solo microchip. Tomando en cuenta estos últimos avances, las redes de interconexión ópticas en un chip o NoCs nano ópticas sobre silicio, ya ha sido conceptualizada, permitiendo superar las actuales limitaciones de su equivalente electrónico en los chips de multiprocesamiento o CMP.

En este proyecto se empleó una metodología estructural encaminada a resolver la siguiente hipótesis: ¿Es la red de interconexión nanofotónica híbrida para la topologías C-Mesh más eficiente en términos de consumo de potencia y latencia que su equivalente electrónico? de la cual surgió el objetivo de simular y evaluar ambos tipos de redes y compararlas en términos de las 2 variables descritas para diferentes escenarios.

A continuación se describe la metodología propuesta para el desarrollo del proyecto y los resultados se presentarán en las 2 secciones siguientes, correspondientes a los resultados obtenidos en cada una de las etapas planteadas en la metodología.

II. METODOLOGÍA

Este proyecto se planteó como una investigación aplicada donde se buscaba encontrar soluciones del estado del arte en el área de arquitectura de computadores para la problemática del consumo de recursos de las redes de interconexión electrónicas actuales en los chips multiprocesadores.

Resultó entonces conveniente la utilización de una metodología estructural, en la cual se identificaron 2 grandes etapas:

La primera correspondió a la visualización del problema desde el punto de vista del comportamiento físico de los dispositivos que componen la red de interconexión nanofotónica.

En ésta se simuló una de las estructuras más importantes en Silicon Photonics: el anillo resonador. Se obtuvieron los

resultados de las longitudes de onda resonantes y de la separación entre los modos para las configuraciones de filtro Notch y filtro AddDrop y adicionalmente se ejecutaron las pruebas sobre 2 software FDTD diferentes.

La segunda tuvo un enfoque con un nivel de abstracción superior, extrayendo sólo algunos parámetros de la primera etapa como base para un análisis holístico de rendimiento, latencia y potencia del sistema.

En esta etapa se simularon 2 redes de interconexión con topología C-Mesh para 5 aplicaciones sintéticas diferentes y con tamaños de mensajes pequeños y grandes. Con los tamaños grandes se comprobó la hipótesis, es decir, la red nanofotónica híbrida se comportó mejor en términos de potencia y latencia que la electrónica. Sin embargo, para tamaños de paquetes pequeños el sobre costo en el que incurre la red híbrida debido al subplano de control, hace que el beneficio en consumo de potencia se vea opacado por una latencia mayor que la electrónica.

III. CARACTERIZACIÓN DE ANILLOS RESONADORES

El anillo resonador es el componente principal de los dispositivos activos usados en Silicon Photonics. Por esta razón se analizó la teoría detrás de su funcionamiento y se simuló su comportamiento en dos situaciones particulares:

- Filtro Notch el cuál actúa como un inhibidor o atenuador de frecuencias puntuales con un factor de calidad alto. Este elemento es la base de los filtros y parte de los dispositivos de modulación y de detección.
- Filtro AddDrop el cual permite cambiar de una guía a otra un conjunto de frecuencias específicas. Los switches y routers -elementos esenciales dentro de una red de interconexión de Silicon Photonics- están formados por la unión de varios filtros AddDrop tuneables.

III-A. Modelo Teórico de Anillo Resonador

En la figura 1 se muestra el esquema del caso genérico de un anillo resonador con 2 regiones de acoplamiento representadas por las líneas punteadas. Por simplicidad, el modelo asume que no hay pérdidas por acoplamiento y se ignoran los efectos de reflexión dentro de la guía (sólo se asumen ondas en el sentido de la propagación). El modelamiento teórico es muy similar al resonador Fabry-Perot descrito en [11].

Cada región del anillo tiene asociados unos parámetros principales que definen su comportamiento. Estos son:

- Coeficientes de acoplamiento $(\kappa_1, \kappa'_1, \kappa_2, \kappa'_2)$,
- Coeficientes de transmisión (t_1, t'_1, t_2, t'_2) .
- Constante de propagación β del modo circulante.

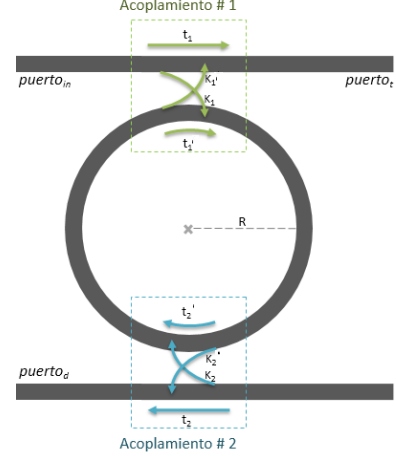
$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff} \quad (1)$$

Valor complejo donde $\Re\{\beta\}$ es la constante de fase y $\Im\{\beta\}$ representa las pérdidas por propagación dentro del anillo.

- Radio r y perímetro $(L = 2\pi r)$ del anillo.

Para que el dispositivo entre en resonancia, el desfase de la onda después de un viaje completo al rededor del anillo debe ser un múltiplo entero de 2π

Figura 1: Modelo de un Anillo Resonador. Fuente: Autor.



$$\beta L = 2\pi M \quad (2)$$

Donde M es llamado el número de modo.

La potencia de la onda que se ve en el $puerto_t$ está dada por la porción de la onda incidente que atraviesa la guía más las $N \rightarrow \infty$ contribuciones que se dan por la otra parte de la onda que se acopló en el anillo (ec. 3). Cada una de las contribuciones depende del número de viajes completos que realice la onda acoplada antes de volver a salir a la guía superior.

$$E_t = E_i \{ t_1 + \kappa_1 \kappa'_1 t'_2 \alpha e^{-j\beta L} [1 + (t'_1 t'_2 \alpha e^{-j\beta L})^1 + (t'_1 t'_2 \alpha e^{-j\beta L})^2 + \dots] \} \quad (3)$$

Resolviendo la serie infinita, normalizando la potencia de salida y multiplicando por la correspondiente conjugada compleja (recordar que $|\chi|^2 = \chi \chi^*$ [7]) se puede llegar a:

$$T_t = \left| \frac{E_t}{E_i} \right|^2 = \frac{\alpha^2 |t_2|^2 + |t_1|^2 - 2\alpha |t_1| |t_2| \cos(\theta + \phi_{t_1} + \phi_{t_2})}{1 + \alpha^2 |t_1|^2 |t_2|^2 - 2\alpha |t_1| |t_2| \cos(\theta + \phi_{t_1} + \phi_{t_2})} \quad (4)$$

$$T_d = \frac{\alpha^2 (1 - |t_1|)^2 (1 - |t_2|)^2}{1 + \alpha^2 |t_1|^2 |t_2|^2 - 2\alpha |t_1| |t_2| \cos(\theta + \phi_{t_1} + \phi_{t_2})} \quad (5)$$

Donde $\theta = \beta L$.

Se observa que ocurre una situación especial cuando la suma de los desfases que sufre la onda en su viaje completo al rededor del anillo es un múltiplo entero de 2π (6). Esta condición es llamada condición de resonancia.

$$\theta + \phi_t = 2\pi * M \quad (6)$$

Bajo esta condición, la ecuación de transmisión en el $puerto_t$ queda:

$$T_t = \frac{(\alpha - |t|)^2}{(1 - \alpha|t|)^2} \quad (7)$$

A partir de (7) se ve que cuando $\alpha = |t| = \sqrt{1 - |\kappa|^2}$ la transmitancia en el $puerto_t$ es cero. Es decir que cuando

las pérdidas en la región de acoplamiento son iguales a las pérdidas en el anillo, se llega a la condición llamada Acoplo Crítico, donde la potencia de salida se anula.

Visto desde el punto de vista de [1] el fenómeno se produce porque la longitud de onda que cumple la condición se acopla, sufre un desfase de $\frac{\pi}{2}$, es decir $\kappa = i|\kappa|$. Luego de completar una vuelta completa sufre un desfase de 2π y cuando se vuelve a acoplar a la guía recta es desfasada nuevamente $\frac{\pi}{2}$. Es decir, que cuando vuelve a la guía inicial, se suma en contrafase en el punto de acoplamiento de la guía, anulándola.

III-B. Simulaciones

Para la realización de esta etapa de la investigación, se planteó realizar la simulación de la onda electromagnética cuando interactúa con una estructura en anillo con el fin de conocer los parámetros que afectan directamente su comportamiento.

Para el caso de prueba el diseño propuesto se eligió el filtro Notch. Este componente es de extrema importancia ya que es uno de los ladrillos de construcción de estructuras más complejas que se emplean como filtros, switches banda ancha y detectores.

Las simulaciones se realizaron mediante la técnica de FDTD en 2 plataformas diferentes. La primera es una herramienta de software libre llamada MEEP en la cual se codifica un script que contiene la información de la estructura a simular. La segunda es una herramienta comercial llamada Lumerical-FDTD, que cuenta con una interfaz gráfica de usuario que sirve para controlar el diseño y la ejecución de la simulación, pero a su vez también cuenta con soporte para scripts con una sintaxis similar a la de matlab.

Para el diseño del anillo, se siguieron los lineamientos descritos en [5] aplicadas sobre el filtro Notch, el cual consiste en el modelo explicado en la sección anterior con la salvedad que la región de Acoplamiento 1 es idéntica a la región de Acoplamiento 2, por lo tanto $\kappa = \kappa_1 = \kappa_2$, $\kappa^* = \kappa_1^* = \kappa_2^*$, $t = t_1 = t_2$ y $t^* = t_1^* = t_2^*$. Adicionalmente, se asume que no hay pérdidas ($\alpha = 1$) y se seleccionan las características dadas en la tabla I.

Parámetro	Valor
Rango de frecuencias	1500nm a 1600nm
λ_0	1550nm
Espaciamiento de canales	200Ghz ó 1.6nm a 1550nm
FSR	3200GHz ó 25.6nm a 1550nm ó 16 canales
$\Delta\lambda_{FWHM}$	100GHz ó 0.8nm
Q	$\frac{1550nm}{0.8nm} \approx 2000$

Cuadro I: Configuración deseada para el filtro

Una vez ejecutadas las simulaciones, se obtuvieron las gráficas 4 y 4 en el software de Meep en 2 y 3 dimensiones respectivamente. La figura 5 muestra el resultado de la misma estructura 3D sobre el software de Lumerical-FDTD de potencia vs longitud de onda.

La gráfica 4 muestra

En la figura 3 se muestran diferentes vistas de la estructura 3D obtenida en MEEP.

Se pueden observar diferencias en cuanto al valor teórico esperado en las condiciones de resonancia para todas las sim-

Figura 2: Transmitancia Filtro Notch 2D en MEEP. Fuente: Autor.

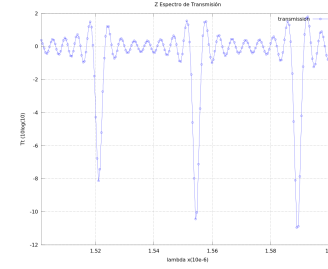


Figura 3: Filtro Notch 3d en MEEP: vista [X,Y], [Y,Z] y [X,Z] respectivamente. (a)(b)(c) Material Dieléctrico. (d)(e)(g) Campo eléctrico E_z . Fuente: Autor.

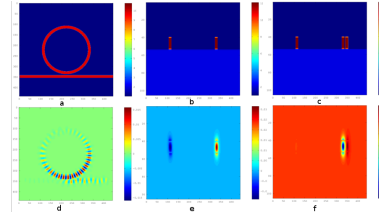


Figura 4: Transmitancia Filtro Notch 3D en MEEP. Fuente: Autor.

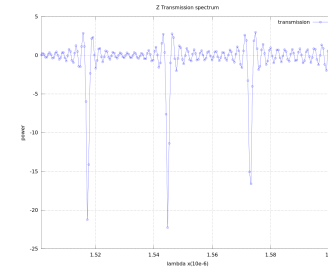


Figura 5: Transmitancia simulación 3D FDTD Filtro Notch en LumericalFDTD (valores teóricos, simulación MODE y FDTD). Fuente: Autor.

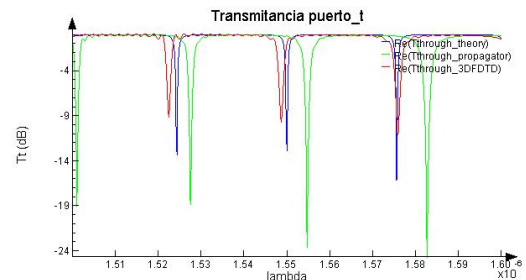
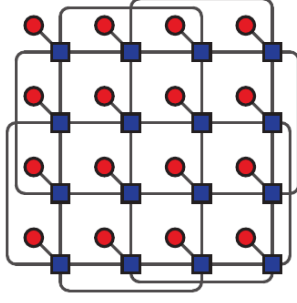


Figura 6: Topología C-Mesh. Fuente: [6]



ulaciones, debido a que se asumió que el anillo no presentaba pérdidas ($\alpha = 1$) en el cálculo teórico de la transmitancia.

Sin embargo, la que más difiere de todas inclusive en el FSR esperado es la simulación mostrada en la figura 4. Esto se puede deber a que esta simulación se realizó solamente en 2 dimensiones y por lo tanto deja de lado la interacción de la onda con el materia de Sílica SiO₂.

IV. REDES DE INTERCONEXIÓN

En esta fase de la investigación, se planteó realizar la simulación de una red de interconexión electrónica y nanofotónica híbrida para realizar la comparación del desempeño en términos de latencia y consumo de energía en 5x2 diferentes escenarios.

Para cada escenario se obtuvo el tamaño de la muestra requerido para obtener un nivel de confianza del 95 %. Luego se procedió a definir la comparación para cada variable a medir, mediante la prueba de hipótesis para comparación de medias.

La red consta de 2 planos independientes: procesamiento y red de interconexión fotónica híbrida conmutada.

El plano de procesamiento está compuesto por 64 cores en un arreglo de 8x8.

Como se indica en [2], una red de interconexión está definida por 3 características principales: la topología empleada, el algoritmo de control de flujo y el algoritmo de ruteo. La red de interconexión simulada en este experimento consta de una topología Mesh con concentración de nodos ó C-Mesh (Figura 6), de un algoritmo de control de flujo llamado *Bubble Flow Control*[8][6] y de un algoritmo de enrutamiento basado en un esquema direccionamiento jerárquico basado en direcciones de la forma *NET.PROC* como se explica en [6].

Debido a la topología concentrada que se seleccionó, la red de interconexión está compuesta por 4x4 elementos, donde cada nodo terminal da servicio al número dado por el parámetro de concentración, que para esta simulación se estableció en 4.

Sobre cada red se ejecutaron las siguientes aplicaciones sintéticas (Figura 7):

- Random: Ejecuta un tráfico aleatorio sobre la red. Cada core selecciona un core destino aleatoriamente mediante una distribución uniforme. Una vez enviado, espera un tiempo dado por el parámetro *appParam1* para enviar un nuevo mensaje [6].
- Neighbor: Realiza el envío de mensajes de cada core a sus vecinos [3].

	Electrónica	íbrida Fotónica
Neighbor	0.06709065	0.007958905
Random	0.0671371	0.007956592
BitReverse	0.067138183	0.00795793
otSpot	0.067167386	0.007965599
Tornado	0.067086057	0.007954494

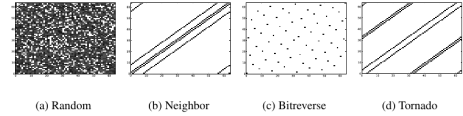
Cuadro II: Datos promedio Consumo de Energía (J), PkgSize: 512B

	Electrónica	íbrida Fotónica
Neighbor	0.069082133	0.079211817
Random	0.08788594	0.1318324
BitReverse	0.116597833	0.201336333
otSpot	0.092226286	0.139719571
Tornado	0.070975529	0.086788314

Cuadro III: Datos promedio Latencia (μs), PkgSize: 512B

- BitReverse: Patrón de envío de mensajes diseñado para realizar pruebas de estrés sobre topologías NoC 2D. Cada core envía un mensaje a una dirección que corresponde a su dirección inversa a nivel de bits. Este tipo de comunicación, los mensajes deben viajar trayectos largos que atraviesan la red [3].
- Tornado: Otro patrón de envío de mensajes que realiza pruebas de estrés sobre Mesh 2D al hacer que cada core se comunique con el vecino de su vecino. Es una versión competitiva del patrón Neighbor [3].

Figura 7: Patrones sintéticos. Fuente [3]



El promedio de tiempo de generación de mensajes se escogió de 1 milisegundo. Adicionalmente, para cada red y para cada aplicación, se decidió realizar la simulación con 2 tamaños de mensajes (pequeño: 512Bytes y grande: 65kBytes) entre núcleos, siguiendo la metodología empleada en [3].

IV-A. Paquetes Pequeños (512B)

En las tablas II y III se sintetizan las medias del consumo de energía y de latencia para los mensajes pequeños.

Se puede observar gráficamente que el consumo de energía de la red nanofotónica híbrida es mucho menor que el de la red netamente electrónica. Sin embargo, la variable de latencia muestra que para este tipo de mensajes la red fotónica híbrida se comporta peor que la red electrónica.

Los resultados de las pruebas de hipótesis se presentan a continuación:

En la tabla IV se encontró que en todos los casos se presentó una respuesta positiva. Esto se puede concluir debido a que el valor P para en todos los resultados fue mayor a 0.05 y por lo tanto se puede concluir que la red nanofotónica híbrida sí es mejor en términos de consumo de potencia que la red electrónica analizada para tamaños de mensajes pequeños.

En la tabla V se puede confirmar lo observado gráficamente para la variable de latencia. En los paquetes de mensajes

Figura 8: Comparación Consumo de Energía, PkgSize: 512B. Fuente: Autor.

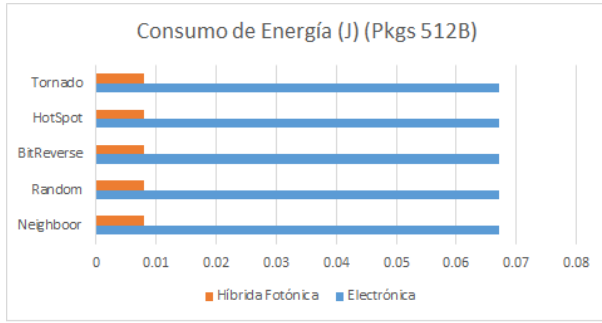
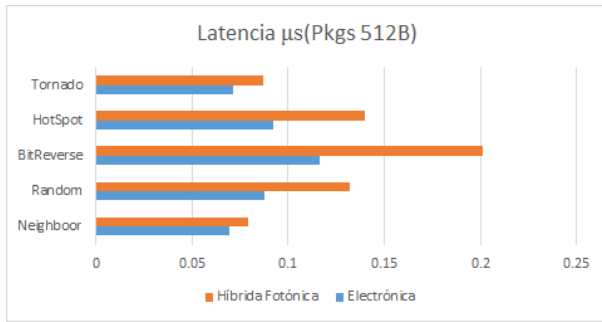


Figura 9: Comparación Latencia, PkgSize: 512B. Fuente: Autor.



pequeños, no hay evidencias suficientes para afirmar que la red fotónica es mejor que la electrónica. Es más, en todos los casos se comportó peor.

Este resultado se puede entender desde el punto de vista de la red híbrida, ya que al necesitar un subplano de control electrónico para hacer el *setup* del camino antes de enviar los datos por el subplano fotónico. Cuando los mensajes son pequeños, el sobre costo de realizar este trabajo sobrepasa en gran medida el beneficio de tener una red de transmisión fotónica [9] y por lo tanto no logra el rendimiento esperado.

	Valor P	Rechaza H_0 ?
Neighbor	7.29052E-32	TRUE
Random	2.21789E-23	TRUE
BitReverse	2.85143E-29	TRUE
otSpot	1.42176E-32	TRUE
Tornado	3.3077E-41	TRUE

Cuadro IV: Resultados Prueba Hipótesis para la variable Consumo de Energía, PkgSize: 512B

	Valor P	Rechaza H_0 ?
Neighbor	0.99999883	FALSE
Random	1	FALSE
BitReverse	1	FALSE
otSpot	0.999989	FALSE
Tornado	0.9999999	FALSE

Cuadro V: Resultados Prueba Hipótesis para la variable Latencia, PkgSize: 512B

	Electrónica	Híbrida Fotónica
Neighbor	0.0671522	0.007992393
Random	0.067220125	0.007997565
BitReverse	0.067238325	0.008002103
otSpot	0.067256343	0.008007099
Tornado	0.067128414	0.007989729

Cuadro VI: Datos promedio Consumo de Energía (J), PkgSize: 65kB

	Electrónica	Híbrida Fotónica
Neighbor	1.399546667	0.322496
Random	1.5103925	0.52517175
BitReverse	1.5527575	0.610555
otSpot	1.582484286	0.536560857
Tornado	1.436545714	0.388274

Cuadro VII: Datos promedio Latencia (μs), PkgSize: 65kB

IV-B. Tamaño de Paquetes Grande (65kB)

En las tablas VI y VII se sintetizan las medias del consumo de energía y de latencia para los mensajes grandes (65kB).

Nuevamente se puede observar gráficamente que el consumo de energía de la red nanofotónica híbrida es mucho menor que el de la red netamente electrónica. Sin embargo, en este caso, la variable de latencia SI muestra que para este tipo de mensajes la red fotónica híbrida se comporta mucho mejor que la red electrónica.

En la tabla VIII se puede observar en todos los casos una respuesta positiva debido a que el valor P para todos los resultados fue mayor a 0.05. Por lo tanto, también se puede concluir que la red nanofotónica híbrida sí es mejor en términos de consumo de potencia que la red electrónica analizada para tamaños de mensajes grandes.

En la tabla IX también se encontró en todos los casos una respuesta positiva. Es decir que para tamaños de mensajes grandes, el sobre costo de la subred de control es insignificante en cuanto a las mejoras obtenidas en latencia por el subplano fotónico de transmisión de datos.

V. CONCLUSIONES

- Las frecuencias de resonancia del anillo pueden ser manipuladas mediante modificaciones en el diámetro del anillo, el gap o el índice de refracción. Este último es

Figura 10: Comparación Consumo de Energía, PkgSize: 65kB. Fuente: Autor.

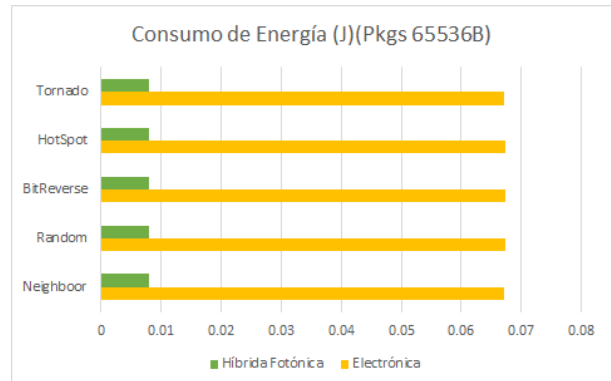
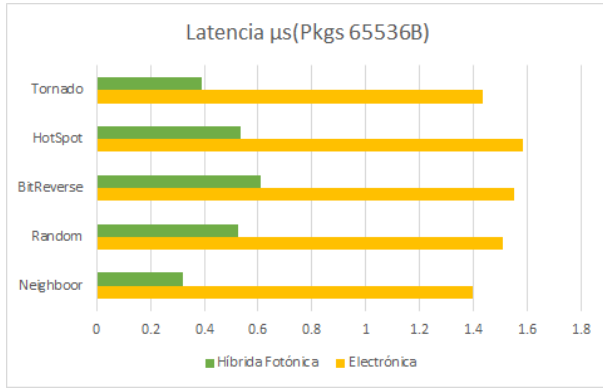


Figura 11: Comparación Latencia, PkgSize: 65kB. Fuente: Autor.



	Valor P	Rechaza H_0 ?
Neighbor	2.427440e-22	TRUE
Random	1.05729E-17	TRUE
BitReverse	2.41872E-20	TRUE
otSpot	1.57746E-32	TRUE
Tornado	5.3047E-39	TRUE

Cuadro VIII: Resultados Prueba Hipótesis para la variable Consumo de Energía, PkgSize: 65kB

de gran importancia por ser la base del funcionamiento algunos dispositivos moduladores en Silicon Photonics donde se aplica un campo magnético, generando un efecto plasmónico que altera el índice y por lo tanto los modos de resonancia.

- Debido a que se asumió que el anillo no presentaba pérdidas ($\alpha = 1$) en el cálculo teórico de la transmitancia tanto del filtro Notch como del filtro AddDrop, se pueden apreciar diferencias en las condiciones de resonancia de la teoría con respecto a lo obtenido en la práctica.
- Para tamaños de mensajes grandes, la red de interconexión nanofotónica híbrida C-Mesh se comporta mejor en términos de consumo de energía y latencia que la red electrónica C-Mesh.
- Para tamaños de mensajes grandes, la red de interconexión nanofotónica híbrida C-Mesh se comporta mejor únicamente en términos de consumo de energía que la red electrónica C-Mesh.
- En los paquetes de mensajes pequeños, no hay evidencias suficientes para afirmar que la red fotónica es mejor que la electrónica en la variable de latencia debido a que el sobre costo de la subred de control electrónica realizar sobrepasa en gran medida el beneficio de tener una red de transmisión fotónica y por lo tanto no logra

	Valor P	Rechaza H_0 ?
Neighbor	7.08709E-14	TRUE
Random	5.37024E-10	TRUE
BitReverse	3.01947E-11	TRUE
otSpot	2.99509E-16	TRUE
Tornado	8.35414E-21	TRUE

Cuadro IX: Resultados Prueba Hipótesis para la variable Latencia, PkgSize: 65kB

el rendimiento esperado.

VI. TRABAJOS FUTUROS

- Como trabajo futuro se plantea realizar nuevas simulaciones para los dos filtros modificando el diámetro del anillo para visualizar la alteración en el FSR y su uso como filtro selectivo o filtro de banda ancha.
- Se propone también, para un diámetro fijo, realizar simulaciones alterando el índice de refracción del anillo para simular el efecto plasmónico que sucede dentro del modulador y que hace que se desplacen las frecuencias de resonancia de un estado On a Off.
- Se plantea como trabajos futuros, evaluar otras topologías en la red de interconexión, así como ampliar la prueba ejecutando también el subgrupo de aplicaciones científicas.
- Debido a los resultados obtenidos para mensajes pequeños en términos de latencia, sería ideal probar otros tipos de redes implementadas diferentes a las híbridas conmutadas, es decir, que no tengan un subplano de control electrónico. Por ejemplo la TDM arbitrada por longitud de onda descrito en [4] o [10].
- Fortalecer los benchmark con los que se analiza el rendimiento de las redes electrónicas y nanofotónicas en PhoenixSim, abarcando un espectro más amplio de aplicaciones que involucren áreas como Machine Learning, Software de Base de Datos, Computación Gráfica y Juegos.

VII. AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a Colciencias por su apoyo a este proyecto a través del programa Jóvenes Investigadores e Innovadores 2011 del cual fue beneficiaria la investigadora Tatiana López.

Igualmente la colaboración de los integrantes del grupo Sirius, tanto técnica como personal, fue indispensable para lograr los objetivos propuestos.

REFERENCIAS

- [1] Javier Blasco Solbes. Desarrollo de aplicaciones basadas en la guía nanofotónica de silicio tipo ranura. 2011.
- [2] William James Dally and Brian Patrick Towles. *Principles and practices of interconnection networks*. Morgan Kaufmann, 2004.
- [3] Gilbert Hendry, Shoaib Kamil, Aleksandr Biberman, Johnnie Chan, Benjamin G Lee, Marghoob Mohiyuddin, Ankit Jain, Keren Bergman, Luca P Carloni, John Kubitowicz, et al. Analysis of photonic networks for a chip multiprocessor using scientific applications. In *Networks-on-Chip, 2009. NoCS 2009. 3rd ACM/IEEE International Symposium on*, pages 104–113. IEEE, 2009.
- [4] Gilbert Hendry, Eric Robinson, Vitaliy Gleyzer, Johnnie Chan, Luca P Carloni, Nadya Bliss, and Keren Bergman. Time-division-multiplexed arbitration in silicon nanophotonic networks-on-chip for high-performance chip multiprocessors. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 71(5):641–650, 2011.

- [5] Lumerical. MODE Solutions, Getting Started. Technical report, 2009.
- [6] Phoenixsim User Manual, Gilbert Hendry, and Johnnie Chan. PhoenixSim 1.0 User Manual. pages 0–60.
- [7] George T Paloczi. *Polymer integrated optics: device architectures and fabrication methods*. 2005.
- [8] Valentin Puente, Ramn Beivide, JA Gregorio, JM Prellezo, Jose Duato, and Cruz Izu. Adaptive bubble router: a design to improve performance in torus networks. In *Parallel Processing, 1999. Proceedings. 1999 International Conference on*, pages 58–67. IEEE, 1999.
- [9] Assaf Shacham, Keren Bergman, and Luca P Carloni. Photonic networks-on-chip for future generations of chip multiprocessors. *Computers, IEEE Transactions on*, 57(9):1246–1260, 2008.
- [10] Dana Vantrease, Robert Schreiber, Matteo Monchiero, Moray McLaren, Norman P Jouppi, Marco Fiorentino, Al Davis, Nathan Binkert, Raymond G Beausoleil, and Jung Ho Ahn. Corona: System implications of emerging nanophotonic technology. *ACM SIGARCH Computer Architecture News*, 36(3):153–164, 2008.
- [11] Joseph Thomas Verdeyen. Laser electronics. 1989.