# Estimación estructurada de deriva térmica en bancos WDM de microanillos

*Cuánta estabilidad de resonancia se pierde por la cadencia del monitor, y cuánta se recupera sin tocar el hardware. Simulación reproducible con parámetros exclusivamente públicos.*

## 1 · OBJETO Y ALCANCE

Esta nota cuantifica una pérdida de margen concreta y evitable en bancos WDM de microanillos: la que se produce **entre sondeos del monitor**. Todos los parámetros proceden de constantes de material y de literatura pública, y se listan con su origen en la Tabla 1. **No se ha utilizado ningún dato propietario de ninguna fundición.** El estimador evaluado es su forma genérica —un filtro lineal con estructura de estado explícita—; el motor de producción no se reproduce aquí. El propósito es metodológico: mostrar que el problema es tratable por software antes de discutir datos reales.

## 2 · EL PROBLEMA

Un banco WDM de microanillos comparte sustrato. El monitor de resonancia **no puede sondear todos los canales a la vez**: el *dither* necesario para estimar la desintonía degrada el canal en servicio, así que el monitor opera en *round-robin*, un canal por periodo de permanencia. Con **16 canales y 60 s de permanencia, cada anillo recibe una medida propia solo cada 16 minutos**. Entre medidas propias, el control convencional congela su última corrección y corre a ciegas.

Ese intervalo ciego es donde se acumula la deriva. Y la tendencia industrial lo agrava: al subir de 800G a 1,6T y más allá, el número de canales por monitor crece, de modo que el intervalo de revisita por canal se alarga precisamente cuando la tolerancia de desintonía se estrecha.

La observación que explota esta nota es que la deriva **no es independiente entre canales**. Se descompone en un modo común de sustrato/paquete, compartido por todos los anillos, y un modo local por anillo. El modo común es observable desde *cualquier* canal: un estimador que conozca esa estructura lo refresca en cada periodo de permanencia, no cada 16.

## 3 · PARÁMETROS DEL MODELO (TODOS PÚBLICOS)

| Parámetro | Valor | Origen |
|---|---|---|
| Coef. termo-óptico efectivo, $\mathrm{d}n_{\mathrm{eff}}/\mathrm{d}T$ | $1{,}8\cdot10^{-4}$ K$^{-1}$ | Constante de material (Si, guía strip 220 nm con cladding $SiO_2$) |
| Índice de grupo, $n_g$ | 4,00 | Guía strip Si 220 nm, valor estándar |
| Sensibilidad de resonancia, $\mathrm{d}\lambda/\mathrm{d}T$ | 69,8 pm/K | Derivado: $\lambda\,(\mathrm{d}n_{\mathrm{eff}}/\mathrm{d}T)/n_g$ — no es un parámetro libre |
| Factor de calidad cargado, $Q$ | 10000 | Microanillo modulador/filtro típico |
| Anchura de resonancia, FWHM | 155 pm | Derivado: $\lambda/Q$ |
| Canales del banco WDM | 16 | Configuración representativa de enlace 800G/1,6T |
| Modo común (sustrato/paquete) | $\sigma = 0{,}25$ K, $\tau = 20$ min | Constante térmica de paquete; residual del gradiente inter-canal publicado (5–8 K) |
| Modo local (por anillo) | $\sigma = 0{,}10$ K, $\tau = 5$ min | Residual tras el lazo del calentador local (∼1,5 % del gradiente) |
| Deriva de ambiente/montaje | 0,15 K/$\sqrt{\mathrm{h}}$ | Random walk lento |
| Creep (relajación/envejecimiento) | 0,05 K/h | Deriva lineal: 27,9 pm en 8 h |
| Ruido del monitor de resonancia | 3,0 pm | 2 % del FWHM — hipótesis conservadora (favorece a la línea base) |

*Tabla 1: Horizonte 8 h · paso de actuación 5 s · 60 realizaciones Monte Carlo × 16 anillos · semilla 42.*

## 4 · ESCENARIOS COMPARADOS

Los cinco escenarios reciben exactamente el mismo presupuesto de medidas y el mismo ruido de monitor. Difieren únicamente en qué hacen *entre* medidas. C2 aísla el efecto de predecir; C3 añade el de conocer la estructura del banco. C4 repite C3 con un modelo deliberadamente mal especificado (constantes térmicas erradas en factor 2, amplitudes mal escaladas, creep no modelado) como prueba de robustez.

| Escenario de control | RMS [pm] | Penaliz. [dB] | vs C1 |
|---|---|---|---|
| C0 Calibración estática (nunca actualizada) | 35,1 | 0,809 | 0,47× |
| C1 Sample-and-hold por anillo ← estándar | 16,4 | 0,191 | — |
| C2 Predicción por anillo (SISO) | 15,5 | 0,170 | 1,06× |
| C4 Estructurada, modelo desemparejado | 10,8 | 0,084 | 1,52× |
| **C3 Estimación estructurada del banco** | **9,1** | **0,059** | **1,80×** |

*Tabla 2: Punto nominal (permanencia 60 s, revisita 16 min). La penalización es la del puerto* drop *de un filtro lorentziano,* $10\log_{10}(1+(2\delta/\mathrm{FWHM})^2)$*; a media anchura vale 3,01 dB.*

## 5 · RESULTADOS

Predecir por sí solo apenas ayuda: el filtro por anillo (C2) mejora al sample-and-hold en un **6 %** escaso, porque en un anillo aislado el error residual lo domina la innovación térmica impredecible. La ganancia aparece al explotar la estructura: la estimación conjunta del banco (C3)

reduce el RMS de desintonía de **16,4 pm a 9,1 pm**, un factor 1,80×, del cual 1,70× es atribuible exclusivamente a la información cruzada entre canales. Con el modelo desemparejado (C4) se conserva 1,52×: el resultado no depende de acertar los parámetros con precisión.

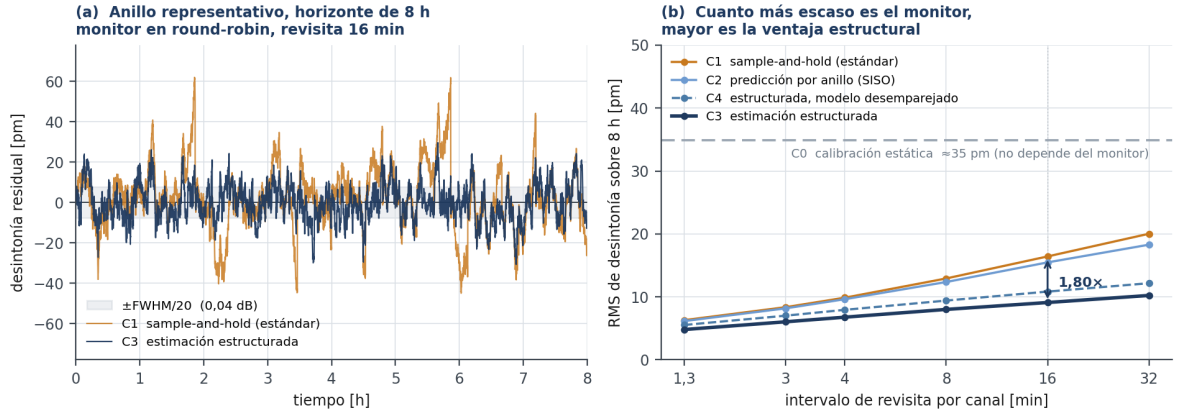



*Figura 1: (a) Desintonía residual de un anillo representativo sobre 8 h. (b) RMS frente al intervalo de revisita por canal.*

El panel (b) contiene el resultado con más consecuencias industriales: **la ventaja crece al escasear el monitor**, de 1,31× con revisita de 1,3 min a 1,96× con revisita de 32 min. Leído como equivalencia en hardware, el sample-and-hold necesitaría bajar la permanencia a 10 s —**6× más ancho de banda de monitorización**— para igualar lo que la estimación estructurada consigue con la instrumentación ya instalada.

## 6 · QUÉ DEMUESTRA ESTA NOTA Y QUÉ NO

- **Demuestra** que, bajo un modelo de deriva físicamente razonable, existe margen recuperable por software puro en la capa de control, sin chip nuevo, sin calentadores adicionales y sin más refrigeración.
- **Demuestra** que ese margen procede de la estructura espacial del problema, no de la sofisticación del filtro: es el acoplamiento térmico entre canales lo que se está desaprovechando.
- **No demuestra** ningún resultado medido sobre silicio. Es simulación; no sustituye a una campaña de caracterización.
- **No predice** la mejora que obtendría una plataforma concreta. El factor real depende de tres cantidades que solo pueden salir de datos de caracterización reales: el reparto entre modo común y modo local, las constantes térmicas efectivas, y la cadencia real del monitor. Los valores usados aquí son plausibles, no medidos.
- **Simplifica** la física: la descomposición común/local sustituye a la matriz completa de acoplamiento térmico del banco. Una matriz real, caracterizada, admite más ganancia que la mostrada, no menos.

## 7 · SIGUIENTE PASO

La pregunta que esta nota deja abierta —*dónde está su plataforma en la curva de la Figura 1(b)*— se responde con datos de caracterización reales bajo NDA. Ese es el objeto del **Diagnóstico de Estabilidad Fotónica**: ajustar este modelo a las constantes térmicas y al reparto común/local medidos de su plataforma, y entregar la mejora cuantificada junto con un prototipo del módulo de compensación.

Si prefieren verificarlo antes de contratar nada: aporten un registro de deriva ya existente y anonimizado, y devuelvo una **predicción sellada** —comprometida mediante su hash SHA-256 antes de ver la segunda mitad del registro— sin coste ni compromiso. El diagnóstico se da por cerrado cuando se alcanza el criterio de aceptación pactado de antemano; si no se alcanza, no se factura.

Una advertencia útil por si prefieren ensayarlo por su cuenta. La versión directa del método —un filtro por anillo, cada uno con sus propias medidas— rinde un **6 %** y da la impresión de que la vía no funciona. La ganancia solo aparece al tratar el banco como un único sistema estimado conjuntamente, y es ahí donde está el trabajo de ingeniería.

El código que reproduce cada cifra y cada figura de esta nota, junto con la herramienta de predicción sellada, está disponible como paquete abierto bajo licencia MIT.

**Kerym Makraini** · Investigador independiente, fotónica cuántica · Málaga, España
[correo@dominio.com] · [LinkedIn / web]