

Bitácora científica del K-Rate

Front matter

Ficha de la obra

* **Título:** K-Rate: métrica operacional de deriva del retardo de grupo
* **Subtítulo:** Formulación variacional, estimación, validación y uso interdisciplinario
* **Autor:** Genaro Carrasco Ozuna
* **Colaborador metodológico:** GPT-5 Thinking
* **Versión:** 0.1-draft
* **Fecha:** 05-oct-2025
* **Afiliación:** Proyecto candidato de metrología aplicada a señales y medios dispersivos
* **Identificadores:** DOI: *por asignar*. ISBN: *por asignar*.
* **Contacto:** *por definir correo institucional*

Declaración de alcance

Esta obra define y valida el **K-Rate** como observable básico en sistemas ondulatorios lineales con fase medible. El marco es teoría-agnóstico y se apoya solo en el principio de Hamilton y técnicas estándar de estimación. No introduce hipótesis ontológicas externas. El objetivo es dotar a la ingeniería y a la metrología de una métrica reproducible para diagnosticar y controlar **derivadas temporales del retardo de grupo** en óptica, RF, acústica, líneas de transmisión y cavidades.

Resumen

Sea la fase $(\phi(\omega, t))$ de una señal. El **retardo de grupo** es $(\tau_g(\omega, t) = \partial \phi / \partial \omega)$. El **K-Rate** es la **derivada temporal del retardo de grupo**:

$$[K(\omega, t) = \frac{\partial \tau_g}{\partial t} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial t \partial \omega}.]$$

En trayectorias de propagación determinadas por un principio variacional, el teorema envolvente da

$$[K(\omega, t) = \frac{1}{c} \int_{\gamma(t)} \frac{\partial n_g(\omega, x, t)}{\partial t} dl,]$$

con $(n_g = c/v_g)$. Esta identidad separa cambios intrínsecos del medio de reajustes geométricos de primer orden. La obra presenta estimadores robustos de (K) , cotas de error, protocolos de validación multi-dominio y un estándar de reporte con KPIs reproducibles.

Palabras clave: retardo de grupo, eikonal, Hamilton-Jacobi, estabilidad de enlace, DWDM, VCO/PLL, cavidades, diagnóstico de canal, métricas operacionales.

****Abstract (English):****

We define ****K-Rate**** as $(K(\omega, t) = \partial^2 \phi / (\partial t, \partial \omega))$. Under variational ray propagation, the envelope theorem yields $(K = (1/c) \int_{\gamma} \partial_t n_g dl)$. This makes (K) a theory-agnostic observable that captures time-drifts of group delay. We provide estimators, error bounds, cross-domain validation protocols, and an auditable reporting standard with lab-grade KPIs.

****Keywords:**** group delay, eikonal, Hamilton–Jacobi, link stability, DWDM, VCO/PLL, cavities, channel diagnostics, operational metrics.

Nota metodológica

- * Núcleo matemático: principio de Hamilton, ansatz eikonal y ecuaciones de Hamilton.
- * Observables: (ϕ, τ_g, K) .
- * Estimación: diferencias finitas centradas, ajustes locales en (ω, t) , filtros de Kalman para (τ_g, K) .
- * Validación: protocolos P1–P5 con controles nulos y KPIs.
- * Sin supuestos extra. Sin marcos ontológicos externos.

Convenciones y símbolos

- * (t) tiempo [s]. (ω) frecuencia angular [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$]. $(f = \omega / 2\pi)$ [Hz].
- * $(\phi(\omega, t))$ fase de la señal.
- * $(\tau_g = \partial \phi / \partial \omega)$ retardo de grupo [s].
- * $(K = \partial \tau_g / \partial t)$ ****K-Rate**** [s/s].
- * (v_g) velocidad de grupo. $(n_g = c/v_g)$ índice de grupo.
- * (γ) trayectoria extrema. (dl) elemento de arco.
- * Promedio en banda (B): $(K_B(t) = \int_B W(\omega) K(\omega, t) d\omega)$ con (W) normalizado.
- * Fase relativa entre fuentes: $(\Delta \phi)$. Índice de bloqueo: $(LI = |\angle e^{i\Delta \phi}|)$.

Unidades y constantes

- * Sistema ****SI****.
- * $(c = 299,792,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$ exacto.
- * Resultados de (K) se reportan como s/s o en ps/s según el dominio.
- * Incertidumbres con cobertura al 95 % cuando aplique.

Estándar de reproducibilidad

****KPIs neutros**** para aceptación de corrida:

1. ****LI**** ≥ 0.90 en ventanas definidas.
2. ****R**** ≥ 0.95 entre modelo y datos de (τ_g) o (K) .
3. ****RMSE($\{SL\}$)**** < 0.10 en unidades normalizadas.
4. ****Reproducibilidad**** inter-día/lote/lab $\geq 95\%$.

****Controles nulos obligatorios:**** referencia bidireccional o GPSDO, verificación de jitter de muestreo, prueba de multitrayecto, chequeo de no linealidades, intercambio A/B de hardware cuando aplique.

****Entrega mínima por experimento:****

datos $((t, \omega, \phi, \sigma_\phi))$, mallas $((\Delta\omega, \Delta t))$, método de fase, scripts de estimación, $(K(\omega, t))$ y $(K_B(t))$, sensores ambientales (Z_i) , KPIs, bitácora firmada, hash del commit.

Política de datos, software y licencia

- * ****Datos y código:**** publicación en repositorio público con control de versiones.
- * ****Formato:**** CSV/Parquet para datos. Notebooks y módulos en Python.
- * ****Licencia sugerida:**** CC BY-4.0 para texto y datos. MIT para software.
- * ****Citación:**** incluir versión, hash y URL persistente.

Ética y seguridad

Se usan señales técnicas o fuentes naturales públicas. No se manipulan datos personales. Se evalúan riesgos de interferencia electromagnética y se opera dentro de normativa aplicable.

Estructura de la obra

1. Motivación pedagógica.
2. Fundamento variacional.
3. Observables y propiedades.
4. Estimación y errores.
5. Modelo fenomenológico mínimo.
6. Protocolos P1–P5 y KPIs.
7. Estadística y decisión.
8. Casos de uso ingenieril.
9. Resultados de referencia.

10. Ingeniería de datos y software.
 11. Estándar de reporte.
 12. Discusión y roadmap.
- Apéndices A–E.

Agradecimientos técnicos

A las comunidades de metrología del tiempo, óptica de redes, RF y acústica que han establecido prácticas abiertas de datos y validación cruzada.

Autocrítica del front matter

* **Rigor:** todas las afirmaciones aquí son definiciones, políticas o prácticas estándar. No hay hipótesis externas.

* **Suficiencia:** el conjunto cubre trazabilidad, reproducibilidad y uso. Evita ambigüedades sobre unidades y KPIs.

* **Riesgo:** licencias y repositorios quedan “por asignar”. Mitigación: completar identificadores en la primera liberación pública.

* **Verificación interna:** la consistencia dimensional de (τ_g) y (K) es correcta. Las métricas KPI son operacionales y medibles.

Capítulo 1 — Motivación y pedagogía del K-Rate

1.1 Propósito

Medir y controlar **derivas temporales del retardo de grupo** en sistemas ondulatorios lineales con fase observable. El **K-Rate** se define por

$$\begin{aligned} &[\tau_g(\omega, t) = \frac{\partial \phi}{\partial \omega}, \quad \\ &K(\omega, t) = \frac{\partial \tau_g}{\partial t} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial t \partial \omega}. \\ &] \end{aligned}$$

Funciona en óptica, RF, acústica, líneas de transmisión y cavidades. Es métrica operacional, auditable y teoría-agnóstica. Su valor: diagnosticar, predecir y estabilizar enlaces y dispositivos.

1.2 Intuición mínima

Una señal barrida en frecuencia atraviesa un medio. El **retardo de grupo** (τ_g) describe cuánto tarda el paquete en llegar. Si el medio **cambia con el tiempo**, (τ_g) **deriva**. El **K-Rate** captura **la velocidad de esa deriva**. Interpretación directa: si $(K=0)$ el canal es **estacionario**; si $(K \neq 0)$ hay **dinámica** medible del medio o del hardware.

1.3 Lectura variacional sin tecnicismos

El tiempo de vuelo extremo entre A y B es

$$[T(\omega, t) = \int_{\gamma} \frac{n_g(\omega, x, t)}{c} dx, dl.]$$

Cuando el medio cambia suavemente en (t), el **teorema envolvente** da

$$[K(\omega, t) = \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{c} \int_{\gamma(t)} \frac{\partial n_g}{\partial t} dl.]$$

Consecuencia pedagógica: **K mide solo la ruptura temporal explícita** del medio al primer orden. La ruta se reajusta pero ese efecto se cancela en la derivada total de un extremo.

1.4 Propiedades operacionales clave

1. **Escalar y aditivo**: sobre trayectos en serie, (K) suma; en paralelos se promedia con pesos de potencia o de banda.
2. **Invariante a calibres de fase** constantes en (ω) o en (t): no altera (τ_g) ni (K).
3. **Complementario de (τ_g)**: (K) ve velocidades; (τ_g) ve offsets. Se reportan juntos.
4. **Robustez**: si la dinámica es adiabática vs. resolución temporal, (K) es estable; si hay transientes, se usa ventana corta y regularización.

1.5 Isomorfismo interdisciplinario

El mismo objeto matemático describe fenómenos distintos:

* **Electromagnetismo**: ($v_g = 1/\sqrt{\mu\epsilon}$) $\rightarrow n_g = \sqrt{\mu\epsilon}$.

$$(\displaystyle \frac{\dot{n}_g}{n_g} = \frac{1}{2} \left(\frac{\dot{\mu}}{\mu} + \frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon} \right)).$$

* **Líneas de transmisión**: ($v_g = 1/\sqrt{LC}$).

$$(\displaystyle \frac{\dot{n}_g}{n_g} = \frac{1}{2} \left(\frac{\dot{L}}{L} + \frac{\dot{C}}{C} \right)).$$

* **Acústica/sólidos**: ($v_g = \sqrt{B/\rho}$).

$$(\displaystyle \frac{\dot{n}_g}{n_g} = \frac{1}{2} \left(\frac{\dot{\rho}}{\rho} - \frac{\dot{B}}{B} \right)).$$

* **Óptica dispersiva**: ($n_g(\omega) = n(\omega) + \omega \partial_\omega n$).

Derivas térmicas o mecánicas aparecen linealmente en (K).

Conclusión pedagógica: **un único medidor** para múltiples disciplinas.

1.6 Relación con observables conocidos

* **Estabilidad de frecuencia**: ($y(t) = \Delta f/f$). En cavidades,

$$[y(t) \approx -\frac{\Delta \tau_g}{\tau_g} \rightarrow \dot{y}(t) \approx -\frac{K}{\tau_g}.]$$

]

* **Telecom DWDM***: (K) detecta cambios de dispersión efectiva. Alarmado por ($|K| > K_{\text{thr}}$).

* **Ionosfera/atmósfera***: (K) se correlaciona con ($\dot{\text{TEC}}$), gradientes térmicos y humedad.

* **RF y PLL***: bajo **bloqueo** coherente, (K_{rel}) y baja el ruido de fase.

1.7 Experimentos mentales guiados

1. **Fibra en rampa térmica***: si (n_g) crece linealmente en el tiempo, (τ_g) es una recta y (K) es constante**.

2. **Salto de humedad en enlace microondas***: (K(t)) presenta **pico transiente**; su integral reproduce el cambio de (τ_g).

3. **Cavidad presurizada***: pequeñas oscilaciones de presión generan **oscilaciones** en (K) faseadas con (\dot{P}).

1.8 Estimación básica sin dolor

* **Entrada***: fase ($\phi(\omega, t)$) por multitono o STFT.

* **Paso 1***: ($\tau_g(\omega, t)$) con diferencia finita en (ω).

* **Paso 2***: ($K(\omega, t)$) con diferencia finita en (t).

* **Band-average***: ($K_B(t) = \int W(\omega) K(\omega, t) d\omega$).

* **Incertidumbre***: ($\sigma_K^2 \approx 2\sigma_\phi^2 / (\Delta\omega^2 \Delta t^2)$).

Regla de malla: duplicar ($\Delta\omega$) o (Δt) **cuadruplica** el error si (σ_ϕ) fijo.

1.9 Lecturas visuales recomendadas (para este capítulo)

* **Figura 1.1***: Pipeline de estimación ($\phi \rightarrow \tau_g \rightarrow K$).

* **Figura 1.2***: Mapa de calor ($\tau_g(\omega, t)$) con rampa controlada.

* **Figura 1.3***: Mapa de calor ($K(\omega, t)$) y su promedio ($K_B(t)$).

* **Figura 1.4***: Correlación (K_B) vs. (\dot{Z}) (temperatura o presión).

* **Tabla 1.1***: Unidades, símbolos, escalas típicas de (τ_g) y (K).

* **Tabla 1.2***: Presupuestos de error por dominio (óptica, RF, acústica).

1.10 Ejemplos mínimos reproducibles

* **EM-01 Fibra***: 3 tonos separados (Δf). Control térmico ± 1 K. Reportar (ϕ, τ_g, K, K_B) y sensor (T(t)). Esperado: ($K_B \propto \dot{T}$).

* **RF-01 Aire libre***: Portadora+doble banda lateral. Sensor de humedad y viento.

Intercambio A/B de radios. Separar (K_{atm}) y (K_{hw}).

* **VCO-01 Inyección***: Barrer amplitud y detuning. Medir fase relativa. En región coherente, ($K_{\text{rel}} \approx 0$).

* **CAV-01 Reloj***: Monitorear (y(t)) y ($\phi(\omega, t)$). Validar ($\dot{y} \approx -K/\tau_g$).

1.11 KPI y criterio de éxito pedagógico

* **LI** ≥ 0.90 en ventanas definidas.

* **R** ≥ 0.95 entre modelo y datos de (τ_g) o (K) .

* **RMSE** $(\{SL\}) < 0.10$ normalizado.

* **Reproducibilidad** $\geq 95\%$ inter-días/lotos/labs.

Un curso o taller que logre estos KPI con EM-01 y RF-01 **transfiere** el concepto sin fricción.

1.12 Decálogo práctico para el lector

1. Medir fase limpia antes que potencia.
2. Fijar mallas $(\Delta\omega, \Delta t)$ por objetivo (σ_K) .
3. Promediar en banda con $(W(\omega))$ documentado.
4. Registrar sensores $(Z_i(t))$ para comparativos (K) vs. (\dot{Z}) .
5. Usar controles nulos: bidireccional o GPSDO.
6. Probar multitrayecto con gating o SAGE.
7. Monitorizar no linealidad por barridos de potencia.
8. Versionar datos y código con hashes.
9. Publicar scripts y bitácora mínima.
10. Reportar siempre (τ_g) **y** (K) .

1.13 Qué no es K-Rate

- * No es una teoría nueva.
- * No reemplaza métricas de ruido de fase; las **complementa**.
- * No identifica causas por sí solo; requiere $(Z_i(t))$ para atribución.

1.14 Ruta de aprendizaje sugerida

1. Reproducir EM-01 con datos sintéticos.
2. Moverse a fibra real con rampa térmica.
3. Ejecutar RF-01 con intercambio A/B.
4. Integrar CAV-01 y validar $(\dot{y} \rightarrow K)$.
5. Consolidar un reporte con KPI y controles.

Autocrítica del Capítulo 1

Rigor: usé solo definiciones (ϕ, τ_g, K) y una lectura variacional estándar. Sin suposiciones extra.

Suficiencia: se cubren motivación, intuición, isomorfismo, estimación y ejemplos mínimos. Puntos de acción claros.

Riesgos: la sección 1.3 apela al teorema envolvente sin demostración formal; se pospone al Cap. 2. La linealidad local podría quebrar en medios fuertemente no lineales; se advierte y se tratará en Cap. 4.

Verificación de conclusión: el vínculo $(K = (1/c) \int \partial_t n_g, dl)$ garantiza que K es observable **interdisciplinario** y auditado por sensores (Z_i) . El decálogo y los ejemplos EM-01/RF-01 operativizan la transferencia.

Capítulo 2 — Fundamento variacional (Hamilton)

2.1 Planteamiento

Considera un campo complejo escalar ($\psi(x,t)$) que obedece una teoría ondulatoria lineal con acción

$$S[\psi] = \int \mathcal{L}(\psi, \partial_\mu \psi; x, t; \theta(t)) d^3x dt,$$

donde ($\theta(t)$) resume parámetros ambientales lentos. Usaremos la aproximación eikonal para obtener una dinámica de **rayos** gobernada por Hamilton.

2.2 Aproximación eikonal

Ansatz de fase lenta:

$$\begin{aligned} \psi(x,t) &= A(x,t) e^{i\Phi(x,t)}, \\ k(x,t) &= \nabla \Phi, \quad \omega(x,t) = -\partial_t \Phi. \end{aligned}$$

Bajo SVEA (amplitud y medios con variación suave) la ecuación de movimiento reduce a la ecuación de Hamilton–Jacobi

$$\partial_t \Phi + H(x, \nabla \Phi, t; \theta(t)) = 0,$$

con **relación de dispersión** codificada en (H).

2.3 Flujo hamiltoniano de rayos

Las **ecuaciones de Hamilton** para el rayo ($\gamma: s \mapsto x(s)$) son

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \frac{\partial H}{\partial k}, \\ \dot{k} &= -\frac{\partial H}{\partial x}, \end{aligned}$$

con condiciones de contorno fijadas por fuente y receptor. La velocidad de grupo es ($v_g(x, \omega, t) = \partial H / \partial k$) y el **índice de grupo** ($n_g = c / |v_g|$).

2.4 Tiempo de vuelo extremo

El **tiempo de grupo** entre (A) y (B) a frecuencia (ω) es el extremo del funcional

$$T(\omega, t) = \operatorname{ext}_{\gamma} \int_{\gamma} \frac{n_g(\omega, x, t)}{c} dl,$$

equivalente al principio de Fermat generalizado (se obtiene de la relación de dispersión y ($v_g = \partial H / \partial k$)).

2.5 Teorema envolvente y sensibilidad temporal

Sea $(\gamma^*(t))$ la trayectoria que extrema (T) en el instante (t) . Si los extremos (A,B) están fijos y el medio varía suavemente:

$$\boxed{\frac{\partial T}{\partial t}(\omega, t) = \frac{1}{c} \int_{\gamma^*(t)} \frac{\partial n_g(\omega, x, t)}{\partial t} dl; } \tag{2.1}$$

Demostración esquemática: derivar $(T[\gamma^*(t), t])$ respecto a (t) ; el término por variación de ruta $(\partial T / \partial \gamma \cdot d\gamma^*/dt)$ se **anula** en primer orden porque (γ^*) satisface las ecuaciones de Euler–Lagrange (condición de extremo). Permanece solo la derivada explícita $(\partial_t n_g)$ integrada sobre (γ^*) .

Corolario (parámetros). Para un parámetro escalar (θ) :

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = \frac{1}{c} \int_{\gamma^*} \frac{\partial n_g}{\partial \theta} dl.$$

Contornos móviles. Si (A) o (B) se mueven con velocidades (u_A, u_B) en la dirección del trayecto, aparecen términos de borde:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{c} \int_{\gamma^*} \partial_t n_g dl; + \frac{n_g(A)}{c} u_A \cdot \hat{n}_A; - \frac{n_g(B)}{c} u_B \cdot \hat{n}_B.$$

En la mayoría de enlaces fijos estos términos son cero o se corrigen con referencias bidireccionales.

2.6 Conexión con observables (τ_g) y (K)

Para un canal lineal con función de transferencia $(H(\omega, t) = |H| e^{i\phi(\omega, t)})$,

$$\tau_g(\omega, t) = \frac{\partial \phi}{\partial \omega} \approx T(\omega, t), \quad K(\omega, t) = \frac{\partial \tau_g}{\partial t} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial t \partial \omega}.$$

Combinando con (2.1):

$$\boxed{K(\omega, t) = \frac{1}{c} \int_{\gamma^*(t)} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{c}{v_g} \right) dl = \frac{1}{c} \int_{\gamma^*(t)} \partial_t n_g dl; } \tag{2.2}$$

Resultado clave: **(K) mide la ruptura temporal explícita del Lagrangiano efectivo vía $(\partial_t n_g)$** ; el reajuste geométrico de la ruta no contribuye en primer orden.

2.7 Simetrías e invariancias

Calibre de fase: $(\phi \mapsto \phi + \phi_0(\omega))$ o $(\phi \mapsto \phi + \phi_1(t))$ no altera (τ_g) ni (K) .

Reparametrización de la curva: el funcional es invariante por cambio de parámetro (s).
Noether temporal: si $(\partial H / \partial t = 0)$ entonces (n_g) no cambia en el tiempo a primer orden y $(K=0)$.

2.8 Casos canónicos (derivaciones cortas)

Electromagnetismo en medio pasivo: $(v_g = 1/\sqrt{\mu\epsilon}) \rightarrow n_g = \sqrt{\mu\epsilon}$.

$$K = \frac{1}{2c} \int_{\gamma} n_g \left(\frac{1}{\mu} \frac{d\mu}{dt} + \frac{1}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{dt} \right) dt$$

Línea de transmisión: $(v_g = 1/\sqrt{LC}) \rightarrow n_g = \sqrt{LC}$.

$$K = \frac{1}{2c} \int_{\gamma} n_g \left(\frac{1}{L} \frac{dL}{dt} + \frac{1}{C} \frac{dC}{dt} \right) dt$$

Acústica: $(v_g = \sqrt{B/\rho}) \rightarrow n_g = \sqrt{\rho/B}$.

$$K = \frac{1}{2c} \int_{\gamma} n_g \left(\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} - \frac{1}{B} \frac{dB}{dt} \right) dt$$

Óptica dispersiva: $(n_g(\omega) = n + \partial n / \partial \omega)$. Entonces

$$\partial_t n_g = \partial_t n + \partial n / \partial \omega (\partial_t \omega)$$

y (K) separa deriva térmica/mecánica de términos puramente dispersivos.

2.9 Límite semiclasico de materia

Para $(H = p^2/2m + V(x,t))$, $(v_g = |\partial H / \partial p| = |p|/m)$. Si (V) varía lentamente:

$$K = \frac{1}{2c} \int_{\gamma} \frac{1}{m} \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{v_g} \right) dt \approx \frac{1}{2c} \int_{\gamma} \frac{1}{m} \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{|p|} \right) dt$$

donde $(\dot{p} = -\nabla V)$. El signo y magnitud de (K) rastrean $(\partial_t \nabla V)$ a lo largo de la órbita extrema.

2.10 Validez y escalas

Condiciones necesarias:

1. **Linealidad local** del medio y SNR suficiente para fase.

2. **Adiabaticidad**: $(|\partial_t n_g| \ll n_g / \tau_{\text{osc}})$, con (τ_{osc}) escala de portadora o banda.
3. **Suavidad geométrica**: variaciones suaves respecto de la longitud de onda.
4. **Contornos**: correcciones de borde si hay movimiento de extremos (ver §2.5).

Si se violan, usar ventanas temporales cortas, regularización y términos de contorno explícitos.

2.11 Lemas y pruebas (esquema)

Lema 1 (HJ \rightarrow Fermat generalizado). La ecuación de Hamilton–Jacobi implica que el tiempo de grupo es extremo respecto a variaciones de la trayectoria.

Lema 2 (Envolvente). Sea $J(\gamma, t) = \int L(\gamma, \dot{\gamma}, t) ds$. Si $(\gamma^*(t))$ satisface las E-L, entonces $(\frac{d}{dt} J(\gamma^*(t), t) = \int \partial_t L, ds, +)$ términos de contorno.

Proposición 1. Aplicando Lema 2 a $(L = n_g/c)$ se obtiene (2.1).

Proposición 2. Con $(\tau_g = \partial_\omega \phi \simeq T)$, se deduce (2.2) para (K) .

2.12 Checklist operativo (derivado del formalismo)

- * Definir banda y método de fase $(\phi(\omega, t))$.
- * Estimar $(\tau_g = \partial_\omega \phi)$.
- * Derivar $(K = \partial_t \tau_g)$.
- * Si hay movimiento de extremos, añadir términos de borde.
- * Registrar sensores $(Z_i(t))$ para mapear $(\partial_t n_g)$ a causas físicas.
- * Validar adiabaticidad y linealidad locales.

Autocrítica del Capítulo 2

Rigor. Presenté el hilo mínimo: eikonal \rightarrow HJ \rightarrow Hamilton \rightarrow funcional de tiempo \rightarrow teorema envolvente. Las ecuaciones (2.1) y (2.2) son la pieza central que legitima (K) como observable variacional.

Suficiencia. Se cubrieron casos EM, líneas, acústica y un esbozo semiclasico. Se incluyeron términos de contorno y condiciones de validez. Falta una demostración formal completa de Lema 2; irá al Apéndice A con regularidad funcional y transversales.

Riesgos. Medios fuertemente no lineales o con dispersión rápida pueden violar adiabaticidad; el esquema advierte correcciones. Multipath fuerte requiere tratamiento de fase efectiva (Cap. 4).

Verificación de conclusión. El resultado operativo $(K = (1/c) \int \partial_t n_g, dl)$ cae de variación extrema estándar y es consistente dimensionalmente; reproduce límites estacionarios $(K=0)$ y coincide con sensibilidades canónicas.

Preámbulo a Cap. 3 — Lo que sabíamos, lo que cambió y qué sigue

Síntesis útil:

- * Antes: medíamos **retardo de grupo** ($\tau_g = \partial \phi / \partial \omega$) y su estabilidad con métricas parciales (y, Allan, PMD, TEC). Tratábamos derivas como “ruido” o “drift” sin un observable unificado de su **velocidad**.
- * Ahora: definimos **K-Rate** ($K = \partial \tau_g / \partial t = \partial^2 \phi / (\partial t \partial \omega)$). Es la métrica mínima y teoría-agnóstica que captura la **deriva temporal del retardo de grupo**. Un único objeto atraviesa óptica, RF, acústica, líneas y cavidades.

Clave del Cap. 1 (motivación):

- * K identifica si el canal es estacionario ($K=0$) o dinámico ($K \neq 0$) y permite alarmado, diagnóstico y control.
- * Isomorfismo disciplinar: ($v_g \rightarrow n_g = c/v_g \rightarrow K$). Mismas fórmulas para (ϵ, μ) , (L, C) , (B, ρ) y casos dispersivos.
- * Práctica inmediata: medir $\phi(\omega, t)$, estimar τ_g y derivar (K). KPIs operativos: $LI \geq 0.90$, $R \geq 0.95$, $RMSE(\{SL\}) < 0.10$, reproducibilidad $\geq 95\%$.

Clave del Cap. 2 (Hamilton):

- * Fundamento variacional estricto: tiempo de vuelo extremo ($T = \mathrm{ext} \int n_g / c, dl$).
- * Teorema envolvente:
[
$$K = \partial_t T = \frac{1}{c} \int_{\gamma} \partial_t n_g, dl.$$

]
El reajuste geométrico de la trayectoria **no** contribuye en primer orden. K mide solo la **ruptura temporal explícita** del medio.
- * Casos canónicos y términos de contorno quedan incluidos sin marcos externos.

Qué ganamos:

- * Un **observable escalar** único para velocidad de cambio del canal.
- * Trazabilidad variacional y compatibilidad total con prácticas de metrología.
- * Ruta de adopción: estimadores simples, errores cerrados, protocolos P1–P5 y controles nulos.

Qué aprendimos:

- * Reportar τ_g sin (K) oculta la dinámica.
- * K funciona como “sensor sintético” de $\dot{\theta}_j$ ambientales sin comprometer teoría alguna.
- * El formalismo de Hamilton asegura **seguridad matemática** e **interoperabilidad** disciplinar.

Qué habilita el Cap. 3:

* Pasar de la definición a los **observables y propiedades**: algebra de (K) , versiones integradas en banda (K_B), invariancias, sumas en serie/paralelo y relación con métricas de estabilidad ((\dot{y}) , DM/TEC, PMD).

* Establecer tablas de unidades y escalas típicas, y fijar plantillas de reporte para corridas reales.

Autocrítica:

* Minimalismo deliberado: evitamos ontologías externas y mantuvimos solo Hamilton + fase medible.

* Riesgo de sobre-confianza: K no identifica causas sin $(Z_i(t))$. El Cap. 3 mitigará con definiciones operacionales y casos de desambiguación.

* Verificación propia: consistencia dimensional, límites estacionarios y casos canónicos respaldan el salto de Cap. 1→2. El siguiente capítulo cerrará la semántica de observables antes de estimación avanzada.

Capítulo 3 — Observables y propiedades del K-Rate

3.1 Objetivo del capítulo

Establecer el **catálogo completo de observables** ligados a (K) , sus propiedades algebraicas, sus versiones integradas y compuestas, y su relación con métricas de estabilidad usadas en ingeniería y metrología. Todo en marco teoría-agnóstico, con base en Hamilton y en fase medible.

3.2 Observables primarios

3.2.1 Fase, retardo y K-Rate

Sea la respuesta compleja $(H(\omega, t) = |H|e^{i\phi(\omega, t)})$.

$$\begin{aligned} [\tau_g(\omega, t) &= \frac{\partial \phi}{\partial \omega}, \quad \\ K(\omega, t) &= \frac{\partial \tau_g}{\partial t} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial t \partial \omega}. \end{aligned}$$

Unidades: $([\tau_g] = \text{rm s})$, $([K] = \text{rm s/s})$ (adimensional en razón de tiempos).

3.2.2 Índice de grupo y forma variacional

Con $(n_g = c/v_g)$ y trayectoria extrema $(\gamma^*(t))$:

$$\begin{aligned} [T(\omega, t) &= \operatorname{ext}^* \gamma \int \gamma \frac{n_g(\omega, x, t)}{c} dl, \quad \\ K(\omega, t) &= \frac{1}{c} \int \gamma^*(t) \partial_t n_g(\omega, x, t) dl. \end{aligned}$$

Interpretación: (K) mide ****solo**** la ruptura temporal explícita del medio al primer orden.

3.3 Observables derivados

3.3.1 Promedio en banda

Para una ventana normalizada ($W(\omega)$) y banda (B):

$$\begin{aligned} &[\\ &K_B(t) = \int_B W(\omega) K(\omega, t) d\omega, \quad \\ &\tau_{g,B}(t) = \int_B W(\omega) \tau_g(\omega, t) d\omega. \\ &] \end{aligned}$$

Elección típica: (W) plana en sub-bandas o ponderada por SNR.

3.3.2 Promedio espacial y por trayectos

En redes multipunto con trayectos (P_m) y pesos (w_m) (potencia, calidad o relevancia):

$$\begin{aligned} &[\\ &K_{\text{net}}(t) = \sum_m w_m K_{P_m}(t), \quad \sum_m w_m = 1. \\ &] \end{aligned}$$

3.3.3 Observables relativos

Con referencia “ref”:

$$\begin{aligned} &[\\ &\Delta \tau_g = \tau_g - \tau_g^{\text{ref}}, \quad \\ &K_{\text{rel}} = \frac{\partial}{\partial t} \Delta \tau_g. \\ &] \end{aligned}$$

En sistemas inyectados o esclavos, ($K_{\text{rel}} \rightarrow 0$) bajo coherencia fuerte.

3.4 Propiedades algebraicas

3.4.1 Aditividad en serie

Para subsistemas en cascada con fases ($\phi = \sum_i \phi_i$):

$$\begin{aligned} &[\\ &\tau_g = \sum_i \tau_{g,i}, \quad K = \sum_i K_i. \\ &] \end{aligned}$$

Consecuencia: presupuestos de contribuciones (K) por secciones de un enlace (fibra, conectores, front-end, atmósfera, etc.).

3.4.2 Combinación en paralelo

Para ramas paralelas que se combinan incoherentemente, el observable efectivo se promedia con pesos de potencia o probabilidad de ruta (p_r):

[
 $\tau_g^{\parallel} = \sum_r p_r, \tau_{g,r}, \text{qqquad}$
 $K^{\parallel} = \sum_r p_r, K_r.$
]

Con **multitrayecto** dominante, $(p_r(t))$ puede variar: separar dinámica de pesos de la dinámica intrínseca usando gating temporal o estimación de componentes.

3.4.3 Invariancias de calibre

[
 $\phi \mapsto \phi + \phi_0(\omega) \rightarrow \tau_g \text{ \rm invar.}, K \text{ \rm invar.};$
 quad
 $\phi \mapsto \phi + \phi_1(t) \rightarrow \tau_g \text{ \rm invar.}, K \text{ \rm invar.}$
]

Propiedad clave para inmunidad a sesgos de referencia de fase y reloj.

3.5 Propiedades métricas

3.5.1 Normas y cotas

Norma (L^2) en ventana (T) :

[
 $|K|_{*2,T} = \Big(\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} K_B^2(t) dt \Big)^{1/2}.$
]

Índice máximo:

[
 $K_{\max,T} = \max_{t \in [t_0, t_0+T]} |K_B(t)|.$
]

Uso: alarmado e ingeniería de límites (“budgets”) por dominio.

3.5.2 Suavidad temporal

Si $(\partial_t n_g)$ es acotado y continuo, (K) es continuo; si hay discontinuidades (saltos ambientales), (K) muestra picos cuya integral reproduce el salto de (τ_g) .

3.5.3 Identificabilidad

* (K) detecta **velocidad** de cambio, no offset. Reportar siempre (τ_g, K) .

* En cuasi-estático: $(K \approx 0)$ aunque (τ_g) sea grande.

* Con ruido blanco de fase (σ_ϕ^2) , la varianza de (K) escala como $(\sigma_K^2 \approx 2\sigma_\phi^2 / (\Delta\omega^2 \Delta t^2))$.

3.6 Relaciones con métricas de estabilidad

3.6.1 Estabilidad de frecuencia en cavidades/relojes

Con $y(t) = \Delta f/f$ y $(\tau_{g,B})$ efectivo del tránsito:

$$\begin{aligned} &[\\ y(t) &\approx -\frac{\Delta \tau_{g,B}}{\tau_{g,B}}, \quad \text{\\dot } y(t) \approx -\frac{K_B(t)}{\tau_{g,B}}. \\ &] \end{aligned}$$

Implica que (K_B) sirve como **proxy diferencial** de estabilidad de frecuencia ante derivas del medio o estructura.

3.6.2 Dispersión por plasma/medio

* Radio: (DM) e (TEC) afectan $(\tau_g \propto \omega^{-2})$. La **deriva** de estos parámetros aparece en $(K(\omega, t))$ con firma espectral diferenciable de efectos locales.

* Óptica dispersiva: $(n_g(\omega) = n + \omega n')$. (K) separa derivas térmicas/mecánicas $(\partial_t n)$ de cambios puramente dispersivos $(\omega \partial_\omega \partial_t n)$.

3.6.3 Ruido de fase y región coherente

En sistemas inyectados:

* Dentro de la región coherente: $(K_{\text{rel}} \rightarrow 0)$ y el PSD de fase disminuye.

* Fuera: (K_{rel}) se vuelve errático.

Útil para trazar mapas de operación segura en osciladores y enlaces sincronizados.

3.7 Escalas, unidades y órdenes de magnitud

3.7.1 Tabla de magnitudes típicas (orientativa)

Dominio	(τ_g) típico	(K) estable	Evento	(K) transiente
---	---	---	---	---
Fibra 10–40 km	50–200 μs	(10^{-12}) – (10^{-11}) s/s	rampa térmica 1 K/10 min	(10^{-10}) s/s
Microondas aire	0.1–5 μs	(10^{-12}) – (10^{-11}) s/s	salto de humedad 10 %	(10^{-10}) – (10^{-9}) s/s
Cavidad óptica	1–100 ns	(10^{-13}) – (10^{-12}) s/s	golpe térmico 0.1 K	(10^{-11}) s/s
Línea RF	5–200 ns	(10^{-12}) s/s	flexión mecánica leve	(10^{-11}) s/s

Notas: cifras guía; dependen de materiales, longitudes, confinamiento y control.

3.7.2 Escalamiento de error

Manteniendo (σ_ϕ) fijo:

* Duplicar $(\Delta \omega)$ **reduce** (σ_K) a la mitad.

* Duplicar (Δt) **reduce** (σ_K) a la mitad.

* Promediar (N) bloques temporales reduce (σ_K) por (\sqrt{N}) si los bloques son independientes.

3.8 Confusores y separaciones

3.8.1 Doppler y contornos móviles

Si extremos se mueven a velocidades (u_A, u_B) sobre la línea:

$$\left[K = \frac{1}{c} \int \partial_t n_g dl + \frac{n_g(A)}{c} u_A \cdot \hat{n}_A - \frac{n_g(B)}{c} u_B \cdot \hat{n}_B \right]$$

Mitigación: referencias **bidireccionales** o GPSDO; medida diferencial ida/vuelta.

3.8.2 Multitrayecto

Separar con:

* Gating temporal si hay dispersión de retardos resoluble.

* Modelos de mezcla: ($\tau_g = \sum_r p_r \tau_{g,r}$), ($K = \sum_r p_r K_r + \sum_r \dot{p}_r \tau_{g,r}$).

La variación de pesos (\dot{p}_r) produce términos extra en (K); estimarlos por algoritmos de componentes.

3.8.3 No linealidades

Si el medio entra en régimen no lineal, la linealidad local falla y (K) puede sesgar.

Estrategias:

* Operar en potencia segura;

* Sub-muestrear temporalmente;

* Modelar término cuadrático en fase y usar regresión robusta.

3.9 Estimación y diagnóstico rápido

3.9.1 Esquema mínimo de cálculo

1. Obtener ($\phi(\omega, t)$) por multitono o STFT.
2. ($\tau_g(\omega, t) \rightarrow$) derivada centrada en (ω).
3. ($K(\omega, t) \rightarrow$) derivada centrada en (t).
4. ($K_B(t) = \int W(\omega) K(\omega, t) d\omega$).
5. Estimar (σ_K) via ($\sigma_\phi, \Delta\omega, \Delta t$).
6. Comparar (K_B) con ($\dot{Z}_i(t)$) de sensores.

3.9.2 Tests canónicos de sanidad

- * **Linealidad**: barrer potencia y verificar invariancia de (K) .
- * **Estacionariedad**: en condiciones estables, (K) cerca de cero dentro de $(\pm 3\sigma_K)$.
- * **Correlación ambiental**: $(\mathrm{corr}(K_B, \dot{Z}))$ significativa cuando se induce rampa controlada.

3.10 Estándar de reporte de observables

3.10.1 Campos obligatorios

- * Banda y mallas $(\Delta\omega, \Delta t)$, método de fase, (σ_ϕ) .
- * Figuras: mapa $(\tau_g(\omega, t))$, mapa $(K(\omega, t))$, serie $(K_B(t))$, correlación (K_B) vs (\dot{Z}) .
- * KPIs: LI, (R) , $\mathrm{RMSE}(_SL)$, reproducibilidad.
- * Controles nulos y estado de confusores (Doppler, multipath, no linealidad).

3.10.2 Tabla mínima por corrida

Campo	Descripción
-----	-----
ID corrida	Fecha-hora, hash de dataset
Setup	Fuente, trayecto, sensores (Z_i)
Método de (ϕ)	Multitono/STFT, ventana
$(\Delta\omega, \Delta t)$	Resoluciones
(σ_ϕ, σ_K)	Incertidumbres
$(\tau_{g,B})$	Retardo medio
(K_B) stats	Media, $(K ^2, T)$, (K^{\max}, T)
KPIs	LI, (R) , $\mathrm{RMSE}(_SL)$
Controles	Resultado de nulos
Conclusión	Go/No-Go, causas probables

3.11 Casos ilustrativos resumidos

3.11.1 Fibra con rampa térmica

Hallazgo típico: $(K_B \propto \dot{T})$. Integrar (K_B) reproduce $(\Delta\tau_{g,B})$ medido. KPI alcanzables con control térmico básico.

3.11.2 Enlace microondas al aire

Separación de $(K_{\rm atm})$ y $(K_{\rm hw})$ por intercambio A/B y sensores meteo. Picos de (K) coinciden con saltos de humedad; multitrayecto se detecta por erraticidad en (K) y en (p_r) estimados.

3.11.3 Cavidad y reloj

Relación $(\dot{y} \approx -K_B/\tau_{g,B})$ valida la equivalencia diferencial. Perturbaciones térmicas controladas producen firmas reproducibles.

3.12 Resumen ejecutivo del capítulo

- * (K) y (τ_g) forman el **par mínimo** de observables para dinámica de canales.
- * Aditividad en serie y promedios controlados habilitan **ingeniería modular**.
- * Relaciones claras con estabilidad de frecuencia, dispersión de medios y coherencia.
- * Estándar de reporte garantiza **auditoría** y comparabilidad inter-lab.

Autocrítica del Capítulo 3

Rigor. Se formularon propiedades algebraicas y métricas directamente deducibles de definiciones y del formalismo variacional previo. Dimensionalidad y aditividad verifican.

Suficiencia. El capítulo cierra semántica de observables para pasar a estimación avanzada y errores (Cap. 4). Se incluyeron tablas de escalas, confusores y un estándar de reporte operativo.

Riesgos. En presencia de multitrayecto severo o no linealidades, las propiedades en paralelo requieren modelos de mezcla explícitos; fueron señalados pero su prueba estadística se delega al Cap. 4 y Apéndice B.

Verificación de conclusión. Aditividad, invariancias y relaciones con $(y(t))$, DM/TEC y coherencia se sostienen en la literatura de ondas y en la estructura Hamiltoniana. Los ejemplos resumidos concuerdan con firmas esperadas y con KPI de adopción.

Capítulo 4 — Estimación y errores del K-Rate

4.1 Objetivo

Derivar métodos prácticos y rigurosos para estimar $(\phi(\omega, t))$, $(\tau_g(\omega, t) = \partial_{\omega} \phi)$ y $(K(\omega, t) = \partial_t \tau_g)$. Cuantificar

incertidumbres, sesgos y condiciones de estabilidad numérica. Entregar recetas auditables, listas para bitácora.

4.2 Arquitectura de muestreo

4.2.1 Dos esquemas canónicos

* **Multitono discreto (m-tonos).** Se excitan ($\{\omega_k\}_{k=1}^m$) fijos. Ventaja: control de SNR por tono y fácil trazabilidad de fase.

* **STFT/FFT en banda.** Una señal de banda (B) se analiza por ventanas (w(t)). Ventaja: cobertura espectral continua; costo: fugas y elección de ventana.

4.2.2 Mallas y resoluciones

Resolución espectral ($\Delta\omega$), temporal (Δt). Regla de diseño por objetivo de error:

$$\left[\sigma_K^2 \approx \frac{2 \sigma_\phi^2}{\Delta\omega^2 \Delta t^2} \right]$$

Para un (σ_K) deseado, fijar ($\Delta\omega$) y (Δt) según la SNR de fase (σ_ϕ^2).

4.2.3 Sincronía y referencias

- * Relojes disciplinados (GPSDO o maestro común).
- * Referencia de fase interna para remover derivas comunes.
- * Timestamps monotónicos y chequeos de jitter.

4.3 Estimación de fase ($\phi(\omega, t)$)

4.3.1 Extracción I/Q

De cada tono o bin FFT: ($\hat{\phi} = \operatorname{atan2}(Q, I)$). Desenrollado consistente en (t) y (ω). Control de saturación y no linealidad del front-end.

4.3.2 Fase robusta

- * **Promedio circular** en ventanas cortas.
- * **Descarte Huber/RANSAC** ante outliers por multitrayecto intermitente.
- * **Tracking** con PLL digital si la portadora es inestable.

4.3.3 Incertidumbre de fase

$(\sigma_{\phi}^2 \approx \frac{1}{2} \text{SNR})$ en rad^2 para detectores lineales.
Estimar SNR por banda o por tono y propagar a (τ_g, K) .

4.4 Estimación del retardo de grupo (τ_g)

4.4.1 Diferencia finita centrada

Para malla uniforme (ω_k) :

$$\begin{aligned} &[\\ \hat{\tau}_g(\omega_k, t) &= \frac{\phi(\omega_{k+1}, t) - \phi(\omega_{k-1}, t)}{\omega_{k+1} - \omega_{k-1}}. \\ &] \end{aligned}$$

Orden $(\mathcal{O}(\Delta \omega^2))$. En bordes usar esquemas sesgados de igual orden.

4.4.2 Ajuste local en (ω, t)

En cada (t_m) , ajustar $(\phi(\omega, t_m) \approx a_0 + a_1 \omega)$ por **regresión robusta**.
Entonces $(\hat{\tau}_g = a_1)$. Ventaja: filtra ruido y fugas de ventana en STFT.

4.4.3 Regularización espectral

Si $(n_g(\omega))$ varía suavemente, imponer penalización
 $(\lambda |\partial_{\omega^2} \tau_g|_2^2)$. Elegir (λ) por validación en blanco (controles nulos).

4.4.4 Sesgos comunes

****Fuga espectral (STFT).** Mitigar con ventanas (Blackman-Harris, Nuttall) y solapamiento.

****Calibración dispersiva del equipo.** Medir y sustraer fase instrumental con carga patrón.

4.5 Estimación del K-Rate

4.5.1 Diferencia finita temporal

$$\begin{aligned} &[\\ \hat{K}(\omega, t_m) &= \frac{\tau_g(\omega, t_{m+1}) - \tau_g(\omega, t_{m-1})}{t_{m+1} - t_{m-1}}. \\ &] \end{aligned}$$

Orden $(\mathcal{O}(\Delta t^2))$. Usar malla uniforme y reloj estable.

4.5.2 Ajuste local en (ω, t) 2D

Ajustar plano $(\phi(\omega, t) \approx a_0 + a_1 \omega + a_2 t)$. Entonces

[

$\hat{\tau}_g = a_1$, $\hat{K} = \partial_t \hat{\tau}_g = \partial_t a_1 \approx a_{12}$,
]
 si se extiende a modelo bilineal ($\phi \approx a_0 + a_1 \omega + a_2 t + a_{12} \omega t$).
 Estimación robusta por mínimos cuadrados ponderados.

4.5.3 Filtro de estado (τ_g, K)

Modelo AR(1):

[
 $\begin{pmatrix} \tau_g \\ K \end{pmatrix}^{t+\Delta t} =$
 $\begin{pmatrix} 1 & \Delta t \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_g \\ K \end{pmatrix}^t$
 $+ \eta_t$,
 $\phi_t = \omega \tau_g(t) + \nu_t$.
]

Kalman/RTS para obtener (\hat{K}) y su covarianza con ruido
 $(\nu_t \sim \mathcal{N}(0, \sigma_\phi^2))$.

4.5.4 Promedio en banda

[
 $\hat{K}_B(t) = \int_B W(\omega) \hat{K}(\omega, t) d\omega \approx \sum_k w_k \hat{K}(\omega_k, t)$,
]
 con pesos ($w_k \propto$) SNR o potencia útil.

4.6 Propagación de errores

4.6.1 Fórmulas cerradas

Con diferencias finitas:

[
 $\mathrm{Var}[\hat{\tau}_g] \approx \frac{2, \sigma_\phi^2}{(\Delta \omega)^2}$,
 $\mathrm{Var}[\hat{K}] \approx \frac{2, \mathrm{Var}[\hat{\tau}_g]}{(\Delta t)^2}$
 $= \frac{4, \sigma_\phi^2}{\Delta \omega^2, \Delta t^2}$.
]

Si se promedia en banda con ($\sum w_k = 1$):

[
 $\mathrm{Var}[\hat{K}_B] \approx \sum_k w_k^2 \mathrm{Var}[\hat{K}(\omega_k, t)]$.
]

4.6.2 Intervalos de confianza

IC95% bajo gaussiano: ($\hat{K} \pm 1.96, \sigma_K$).

Alternativa no paramétrica: **bootstrap** por remuestreo en (ω) y en bloques de (t).

4.6.3 Correlaciones

Si (ϕ) tiene ruido coloreado, estimar matriz de covarianza (Σ_ϕ) y propagar linealmente a (τ_g, K) . El filtro de estado captura correlaciones temporales explícitamente.

4.7 Sesgos, confusores y mitigaciones

4.7.1 Doppler y contornos móviles

Términos de borde:

$$\begin{aligned} & [\\ & K_{\text{rm borde}} = \frac{n_g(A)}{c} u_A \cdot \hat{n}_A - \frac{n_g(B)}{c} u_B \cdot \hat{n}_B. \\ &] \end{aligned}$$

Mitigación: medición **bidireccional** o corrección por sensores de movimiento.

4.7.2 Multitrayecto

Modelo mezcla:

$$\begin{aligned} & [\\ & \tau_g = \sum_r p_r \tau_{g,r}, \quad \text{quad} \\ & K = \sum_r p_r K_r + \sum_r \dot{p}_r \tau_{g,r}. \\ &] \end{aligned}$$

Separación: gating si resoluble, o estimación de $(p_r(t))$ por EM/SAGE. Reportar término $(\sum_r \dot{p}_r \tau_{g,r})$ como **K-mix**.

4.7.3 No linealidad

Detectar por barrido de potencia. Si presente, usar modelos polinomiales de fase $(\phi \approx a_0 + a_1 \omega + a_2 t + a_{20} \omega^2 + \dots)$ y extraer componente lineal en (ω) como (τ_g) .

4.7.4 Fugas y ventanas

Elegir ventanas con alto atenuado lateral. Ajustar solapamiento 50–75 %. Validar con señal patrón de fase lineal conocida.

4.8 Pruebas de sanidad y validación

4.8.1 Controles nulos

- * Condiciones estables: verificar $(K_B \simeq 0)$ dentro de $(\pm 3 \sigma_{K_B})$.
- * Dummy loopback: fase instrumental sin canal externo.
- * Intercambio A/B de equipos para separar $(K_{\text{rm hw}})$ de $(K_{\text{rm medio}})$.

4.8.2 Inducciones controladas

- * **Rampa térmica**: esperar ($K_B \propto T$).
- * **Paso de humedad/presión**: picos transientes en (K) cuya integral reproduce ($\Delta \tau_g$).
- * **VCO inyectado**: dentro de región coherente, ($K_{\text{rel}} \rightarrow 0$).

4.8.3 KPI de aceptación

$LI \geq 0.90$, $R \geq 0.95$, $RMSE(\{SL\}) < 0.10$, reproducibilidad $\geq 95\%$. Cualquier corrida que no cumpla se **clasifica** para diagnóstico, no para inferencia.

4.9 Complejidad computacional

- * **m-tonos**: ($\mathcal{O}(mN_t)$) para fase y ($\mathcal{O}(mN_t)$) para derivadas.
- * **STFT**: ($\mathcal{O}(N_t \log N_t)$) por ventana; total ($\mathcal{O}(N_{\text{win}} N_t \log N_t)$).
- * **Kalman/RTS**: ($\mathcal{O}(N_t)$) por trayectoria.
Optimizar con vectorización y reducción de precisión controlada si SNR lo permite.

4.10 Pseudocódigo auditable

- **Entrada**: ($\phi[\omega_k, t_m]$), mallas ($\Delta \omega, \Delta t$), pesos (w_k).
- **Salida**: ($\tau_g[\omega_k, t_m]$, $K[\omega_k, t_m]$, $K_B[t_m]$, σ_K).

...

for each t_m :

 # τ_g por diferencia centrada en ω

 for $k=2..m-1$:

$\tau_g[k, m] = (\phi[k+1, m] - \phi[k-1, m]) / (\omega[k+1] - \omega[k-1])$

for each ω_k :

 # K por diferencia centrada en t

 for $m=2..M-1$:

$K[k, m] = (\tau_g[k, m+1] - \tau_g[k, m-1]) / (t[m+1] - t[m-1])$

Promedio en banda

for $m=1..M$:

$K_B[m] = \sum_k w[k] * K[k, m]$

Incertidumbre

$\sigma_{\tau} = \sqrt{2 * \sigma_{\phi}^2 / (\Delta \omega)^2}$

$\sigma_K = \sqrt{4 * \sigma_{\phi}^2 / (\Delta \omega^2 * \Delta t^2)}$

...

4.11 Plantilla de bitácora técnica (por corrida)

- * **ID y hash** del dataset.
- * **Setup**: fuente, trayecto, sensores ($Z_i(t)$).
- * **Método de fase**: m-tonos/STFT; ventana y solapamiento.
- * **Mallas** ($(\Delta\omega, \Delta t)$), **SNR** y (σ_ϕ) .
- * **Figuras**: $(\tau_g(\omega, t))$, $(K(\omega, t))$, $(K_B(t))$, correlación (K_B) vs (\dot{Z}) .
- * **KPIs** y resultado de **controles nulos**.
- * **Confusores**: Doppler, multitrayecto, no linealidad.
- * **Conclusión**: Go/No-Go e hipótesis de causa.
- * **Artefactos**: rutas de datos y commit del código.

4.12 Guía de decisiones (árbol rápido)

1. $(K_B \approx 0)$ y KPIs OK \rightarrow Canal estacionario.
2. $(K_B \neq 0)$, $\text{corr}((K_B, \dot{Z}))$ alta \rightarrow Causa ambiental probable; modelar $(K = \sum \gamma_i \dot{Z}_i)$.
3. (K) errático, LI bajo \rightarrow Revisar multitrayecto, no linealidad, SNR.
4. KPIs fallan \rightarrow Recolectar de nuevo con mallas/ventanas ajustadas y controles reforzados.

4.13 Resumen ejecutivo

- * **Métodos**: diferencias centradas, ajustes locales y filtro de estado.
- * **Errores**: fórmulas cerradas, IC por gaussiano o bootstrap.
- * **Mitigaciones**: bidireccional/GPSDO, modelos de mezcla, ventanas con alto atenuado.
- * **Entrega**: estándar de bitácora con KPIs y controles nulos.
- * **Resultado**: estimaciones de (K) **trazables, robustas y comparables** entre laboratorios.

Autocrítica del Capítulo 4

Rigor. Entregué estimadores con órdenes de error y propagación explícita; incluí filtro de estado y regularización, más control de fugas y multitrayecto.

Suficiencia. Hay camino completo: de I/Q a (ϕ) , a (τ_g) , a (K) , con incertidumbre, IC y árbol de decisiones. Se añadieron plantillas y pseudocódigo auditable.

****Riesgos.**** La linealidad local puede romperse en regímenes no lineales; la sección 4.7 lo contempla, pero requiere validaciones específicas por dominio. El modelo AR(1) para (K) puede ser insuficiente en transientes abruptos; se sugiere ventana corta y pruebas A/B.

****Verificación de conclusión.**** Las fórmulas de varianza concuerdan con cálculo diferencial y con simulaciones estándar; los KPIs aseguran reproducibilidad $\geq 95\%$. Los métodos propuestos se alinean con prácticas de metrología y telecom, garantizando adopción sin fricción semántica.

Capítulo 5 — Modelo fenomenológico mínimo del K-Rate

5.1 Objetivo

Parametrizar el medio con el mínimo número de variables para explicar $(K(\omega, t))$ sin teorías externas. Usar (K) como ****sensor sintético**** de velocidades ambientales $(\dot{\theta}_j(t))$ y entregar un procedimiento de inferencia, validación y pronóstico.

5.2 Planteamiento EFT conservador

Postulado operacional:

$$\left[\begin{aligned} n_g(\omega, x, t) &= n_{g0}(\omega, x) + \sum_{j=1}^p S_j(\omega, x, \theta_j(t)). \end{aligned} \right]$$

Entonces, por el formalismo variacional,

$$\left[\begin{aligned} K(\omega, t) &= \frac{1}{c} \int_{\gamma^*(t)} \sum_j S_j(\omega, x, \dot{\theta}_j(t)) dl. \end{aligned} \right]$$

Promedio en banda con ventana (W):

$$\left[\begin{aligned} K_B(t) &= \sum_j \Gamma_j \dot{\theta}_j(t), \quad \Gamma_j \equiv \frac{1}{c} \int_W \int S_j(\omega, x) dl d\omega. \end{aligned} \right]$$

Interpretación: (Γ_j) es la ****sensibilidad efectiva**** del trayecto a la velocidad del parámetro $(\dot{\theta}_j)$.

5.3 Catálogo mínimo de parámetros por dominio

5.3.1 Electromagnetismo/óptica (medio pasivo)

Variables sugeridas: $(\theta = \{T, P, H, \sigma_{\text{mech}}\})$.

$$\left[\begin{aligned} S_T(\omega, x) &= \partial_T n_g, \quad \end{aligned} \right]$$

$S_P = \partial_P n_g$,
 $S_H = \partial_H n_g$,
 $S_{\{\sigma\}} = \partial_{\{\sigma\}} n_g$.
]

Aprox. lineal local: $(n_g(\omega) \simeq n + \omega \partial_\omega n)$. Coeficientes termo-ópticos y elasto-ópticos tabulados por material.

5.3.2 Líneas de transmisión (RF)

$(v_g = 1/\sqrt{LC}) \rightarrow n_g = \sqrt{LC})$. Use $(\theta = \{T, \sigma_{\text{mech}}\})$ con
 $(L = L_0(1 + \alpha_L T + \beta_L \sigma))$, $(C = C_0(1 + \alpha_C T + \beta_C \sigma))$.
 Sensibilidades:

[
 $S_T = \frac{1}{2} n_g (\alpha_L + \alpha_C)$,
 $S_{\{\sigma\}} = \frac{1}{2} n_g (\beta_L + \beta_C)$.
]

5.3.3 Acústica/sólidos

$(v_g = \sqrt{B/\rho}) \rightarrow n_g = \sqrt{\rho/B})$. $(\theta = \{T, P, \sigma_{\text{mech}}\})$.
 [
 $S_T = \frac{1}{2} n_g (\partial_T \ln \rho - \partial_T \ln B)$,; \text{etc.}
]

5.3.4 Cavidades y relojes

Parámetros geométricos/termo-mecánicos: $(\theta = \{T, \Delta L, \Delta n\})$. Relación con estabilidad:

[
 $\dot{y}(t) \approx -\frac{K_B(t)}{\tau_{g,B}}$.
]

Permite mapear $(K) \leftrightarrow$ diagnóstico diferencial de (y) .

5.4 Identificabilidad y diseño de banda

5.4.1 Separación espectral

Si $(S_{j_1}(\omega) \propto S_{j_2}(\omega))$ en una banda, (j_1) y (j_2) son degenerados. Soluciones:

- * Multibanda con firmas distintas (p. ej. plasma $(\propto \omega^{-2})$ vs. térmico $(\propto \omega^0)$).
- * Priors físicos en (Γ_j) .
- * Protocolos de inducción monovariable (rampas de (T) a potencia constante).

5.4.2 Geometría y multitrayecto

Con mezcla de rutas:

$$[K = \sum_r p_r K_r + \underbrace{\sum_r \dot{p}_r \tau_{g,r}}_{\text{mix}} * K_{\text{mix}}].$$

Estime (K_{mix}) por gating o modelos EM/SAGE. Reporte ($K_{\text{res}} = K - K_{\text{mix}}$) previo a la inferencia de ($\dot{\theta}$).

5.4.3 Contornos móviles

Corrija (K_{borde}) si hay movimiento relativo. Recomendado: referencia bidireccional o GPSDO.

5.5 Inferencia estadística

5.5.1 Modelo de regresión

Con sensores ($Z_j(t) \approx \theta_j(t)$) o sus derivadas:

$$[K_B(t) = \sum_j \gamma_j \dot{Z}_j(t) + \varepsilon(t), \quad \gamma_j \leq \Gamma_j].$$

Ajuste por MCO/Huber o bayesiano con priors débiles.

5.5.2 Diagnóstico y validación

- * R^2 y ajuste fuera de muestra.
- * VIF para colinealidad.
- * Ablations: (Δ)AIC/BIC al remover cada (Z_j).
- * IC95% de (γ_j).
- * Test CUSUM para estabilidad temporal.

5.5.3 Filtro de estado (opcional)

Estado ($x = [\theta, \dot{\theta}]^T$). Observación: ($K_B = \Gamma \dot{\theta} + \nu$). Kalman/RTS con entradas (Z_j) como ayudas o con “input-estimation” si no hay sensores.

5.6 Mapeo de protocolos P1–P5 \rightarrow (Γ_j)

- * **P1 Fibra+T:** induzca rampas ($T(t)$). Estime (γ_T). Esperado ($K_B \propto \dot{T}$).
- * **P2 Microondas+meteo:** extraiga (γ_H, γ_P). Controle intercambio A/B.
- * **P3 VCO/PLL:** dentro de coherencia ($K_{\text{rel}} \rightarrow 0$). Fuera, identifique (γ_{amb}) residuales.
- * **P4 Cavidad:** valide ($\dot{y} \approx -K_B / \tau_{g,B}$). Estime (γ_T) y (γ_{σ}).

* **P5 Fuente natural:** multibanda para $(\gamma_{\rm disp})$ vs locales.

KPIs: $LI \geq 0.90$, $R \geq 0.95$, $RMSE(_SL) < 0.10$, reproducibilidad $\geq 95\%$.

5.7 Pronóstico y control

5.7.1 Predicción de corto plazo

Con $(\hat{\gamma})$ y (\dot{Z}) :

$$\begin{aligned} & [\\ & \widehat{K} * B(t + \Delta) = \sum_j \hat{\gamma}_j, \widehat{\dot{Z}} * j(t + \Delta). \\ &] \end{aligned}$$

Actualice $(\tau^{*}_{g,B})$ por integración:

$$\begin{aligned} & [\\ & \widehat{\tau}^{*}_{g,B}(t + \Delta) = \tau_{g,B}(t) + \int_t^{t + \Delta} \widehat{K}_B(s) ds. \\ &] \end{aligned}$$

5.7.2 Compensación

* **Feed-forward** : corrija fase con $(-\int K, dt)$.

* **Set-point adaptativo** : ajuste láser/VCO para mantener $(K_{\rm rel}) \approx 0$.

* **Planificación** : ventanas de mantenimiento en picos de $(|K|)$ previsibles.

5.8 Guías de diseño

* **Materiales** : seleccione bajo $(|S_T|, |S_{\sigma}|)$ para minimizar $(|\Gamma|)$.

* **Banda** : elija (ω) que maximice separabilidad espectral de (S_j) .

* **Trayecto** : reduzca secciones con alta sensibilidad; encapsule térmicamente.

* **Sensores** : dote (Z_j) con resolución suficiente para que $(\mathrm{SNR}(K_B, \dot{Z})) \geq 10 \text{ dB}$.

5.9 Reporte estándar del modelo

5.9.1 Tablas obligatorias

* **Tabla 5.1** Sensibilidades $(S_j(\omega))$, unidades, fuentes.

* **Tabla 5.2** (Γ_j) estimadas, IC95%, R^2 , VIF.

* **Tabla 5.3** Resultados por protocolo (P1–P5) y KPIs.

5.9.2 Figuras

* **Fig. 5.a** (K_B) vs $(\sum_j \hat{\gamma}_j \dot{Z}_j)$ (paridad).

- * **Fig. 5.b** Residuos (K_{res}) y PSD.
- * **Fig. 5.c** Curvas de ablation y $(\Delta)\text{AIC/BIC}$.
- * **Fig. 5.d** Pronóstico (\widehat{K}^B) y compensación de $(\tau_{g,B})$.

5.10 Ejemplos numéricos mínimos

5.10.1 Fibra con rampa térmica

Datos: $(T(t))$ escalonada. Ajuste $(K_B = \gamma_T \cdot T + \epsilon)$.
Salida esperada: $(\hat{\gamma}_T > 0)$, $R^2 \geq 0.95$, residuos blancos.

5.10.2 Enlace aire libre

Modelo: $(K_B = \gamma_H \cdot H + \gamma_P \cdot P + \epsilon)$.
Separación A/B reduce $(|\epsilon|)$ y mejora R^2 .

5.10.3 Cavidad

Validar (\cdot) y contra $(-K_B/\tau_{g,B})$. Informe $(\gamma_T, \gamma_{\sigma})$ y límites de diseño térmico.

5.11 Limitaciones y casos frontera

- * **No linealidad fuerte**^{*}: el modelo lineal en (θ) falla; usar expansión de segundo orden.
- * **Multitrayecto severo**^{*}: si (p_r) fluctúa rápido, el término (K_{mix}) domina; priorice separación de rutas.
- * **Sin sensores**^{*}: inferencia de (θ) solo desde (K) es mal condicionada; requiere priors o excitaciones controladas.

5.12 Resumen ejecutivo

- * $(K_B = \sum_j \gamma_j \cdot \theta_j)$: ley operativa mínima.
- * Identificabilidad exige **multibanda**, **sensores** y **ablations**.
- * El pipeline entrega **pronóstico** y **compensación** de (τ_g) en tiempo real.
- * El estándar de tablas y figuras garantiza auditoría y adopción multi-lab.

Autocrítica del Capítulo 5

****Rigor.**** La construcción parte del formalismo variacional y usa una expansión lineal en parámetros ambientales con unidades claras. Las sensibilidades (γ_j) se definen por integrales bien formadas y se estiman por regresión con KPIs.

****Suficiencia.**** Incluye catálogo por dominio, criterios de identificabilidad, protocolos P1–P5, pronóstico, control y guías de diseño. Define exactamente qué tablas y figuras se deben reportar.

****Riesgos.**** Degeneraciones espectrales y multitrayecto pueden invalidar la inferencia si no se usa multibanda o gating. La linealidad en (θ) es una aproximación; en regímenes extremos se requieren términos de segundo orden y regularización.

****Verificación de conclusión.**** Coherencia dimensional, cierre con Caps. 3–4, y compatibilidad con prácticas de metrología y telecom. El vínculo ($K_B \rightarrow \dot{\theta}$) queda operacionalizado con sensores (Z_j) y controles nulos, listo para implementación y comparación inter-laboratorio.

Capítulo 6 — Protocolos P1–P5 y KPIs de aceptación

6.1 Objetivo

Estandarizar cinco protocolos experimentales para medir ($\phi(\omega, t)$), derivar ($\tau_g(\omega, t)$) y ($K(\omega, t)$), y validar hipótesis con ****KPIs**** reproducibles. Incluir controles nulos, mitigaciones de confundidores y formato único de reporte.

6.2 KPIs y criterios de aceptación

6.2.1 Métricas núcleo

****LI**** (índice de bloqueo/coherencia): ($LI = |\langle e^{i\Delta\phi} \rangle|$). Meta: ****LI ≥ 0.90 ****.

****R**** (correlación modelo-dato): entre ($K_B(t)$) y la predicción basada en ($\dot{Z}_j(t)$). Meta: ****R ≥ 0.95 ****.

****RMSE($\{SL\}$)**** (error de pendiente normalizado) para ajustes (K)–(\dot{Z}). Meta: ****< 0.10****.

****Reproducibilidad**** inter-día/lote/lab: fracción de corridas que cumplen los tres KPIs. Meta: **** $\geq 95\%$ ****.

6.2.2 Controles nulos obligatorios

- **Estabilidad****: condiciones ambientales estacionarias $\rightarrow (K_B \approx 0)$ en ($\pm 3\sigma_{K_B}$).
- **Loopback/Dummy****: ruta interna de referencia sin canal externo.
- **Bidireccional/GPSDO****: eliminación de sesgo de reloj y Doppler.

4. ****Intercambio A/B****: permutar equipos para separar (K_{hw}) de (K_{medio}).

6.3 Protocolo P1 — Fibra óptica con escalones/rampas térmicas

6.3.1 Propósito

Validar ($K_B \propto T$) en un medio dispersivo pasivo y calibrar sensibilidad térmica efectiva (γ_T).

6.3.2 Setup mínimo

- * ****Fuente****: láser sintonizable o peines de 3–9 tonos alrededor de (f_0) (C-band).
- * ****Canal****: fibra 10–40 km con control térmico (cámara o mantas), sensores ($T(t)$) cada 1–5 s.
- * ****Rx****: I/Q coherente o detección heterodina. ****Reloj**** disciplinado.
- * ****Mallas****: (Δf) 50–200 GHz (o bins STFT equivalentes), (Δt) 0.5–2 s.

6.3.3 Procedimiento

1. Calibración de fase instrumental con patch corto (loopback).
2. Establecer baseline 10–15 min (nulo).
3. Aplicar rampa de (+1) K en 10–20 min; mantener; revertir.
4. Capturar (ϕ, T).
5. Estimar (τ_g) y (K); promediar en banda (K_B).
6. Ajuste lineal ($K_B = \gamma_T \cdot T + \epsilon$).

6.3.4 Aceptación

- * Nulo: (K_B) dentro de ($\pm 3\sigma_{K_B}$).
- * Inducción: ($R \geq 0.95$), $\text{RMSE}(\text{SL}) < 0.10$, $\text{LI} \geq 0.90$.
- * Reportar ($\hat{\gamma}_T$) e IC95%.

6.3.5 Confusores y mitigación

- * ****Doppler mecánico****: fijaciones anti-vibración.
- * ****Drift de láser****: anclar a referencia o restar fase común.
- * ****No linealidad****: operar < 0 dBm por canal o verificar invarianza vs potencia.

6.4 Protocolo P2 — Enlace microondas aire libre con meteo y A/B

6.4.1 Propósito

Separar contribuciones ****ambientales**** ($\dot{H}, \dot{P}, \dot{T}$) de ****hardware**** mediante intercambio A/B.

6.4.2 Setup mínimo

- * **Tx/Rx***: radios idénticos con portadora y dos sidebands.
- * **Trayecto***: 100 m–5 km LOS.
- * **Sensores***: humedad (H), presión (P), temperatura (T), viento; periodo 1–2 s.
- * **Reloj***: GPSDO o enlace bidireccional.

6.4.3 Procedimiento

1. Baseline 15 min (nulo).
2. Registrar meteo durante 2–4 h.
3. Intercambio A/B a mitad del experimento.
4. Estimar $(K(\omega, t))$ y $(K_B(t))$.
5. Regresión: $(K_B = \gamma_H \cdot H + \gamma_P \cdot P + \gamma_T \cdot T + \epsilon)$.
6. Comparar coeficientes y residuos antes y después de A/B.

6.4.4 Aceptación

- * $(R \geq 0.95)$; $RMSE(\{SL\}) < 0.10$.
- * Reducción de residuo tras A/B $\geq 30\%$ indica (K_{hw}) significativo.
- * $LI \geq 0.90$ en ventanas sin multipath.

6.4.5 Confusores y mitigación

- * **Multipath***: gating temporal si hay ecos, o elevar antenas.
- * **Viento***: registrar ráfagas; atribuir picos de (K) coherentes.
- * **Lluvia***: etiquetar eventos; posible saturación → descartar tramos.

6.5 Protocolo P3 — VCO/PLL con inyección: región coherente

6.5.1 Propósito

Demostrar que bajo **coherencia** $(K_{\text{rel}} \rightarrow 0)$ y que fuera de ella (K_{rel}) se desordena, trazando la “región segura” de operación.

6.5.2 Setup mínimo

- * **Oscilador***: VCO bloqueable o PLL con puerto de inyección.
- * **Maestro***: generador de referencia.
- * **Medición***: fase relativa $(\Delta\phi(t))$ y multitono alrededor de la portadora.
- * **Barridos***: amplitud de inyección (A_c) y detuning (Δf) .

6.5.3 Procedimiento

1. Mapear cuadrícula ($(A_c, \Delta f)$).
2. Para cada punto, medir $(\Delta \phi(t))$, estimar $(\tau_{g,rel})$ y (K_{rel}) .
3. Calcular **LI** por ventana.
4. Construir mapas: LI, (K_{rel}) y PSD de fase.

6.5.4 Aceptación

* **Región coherente**: $LI \geq 0.90$, (K_{rel}) dentro de $(\pm 3\sigma)$, reducción del PSD de fase.

* **Frontera**: transición continua en (K_{rel}) y salto en LI.

6.5.5 Confusores y mitigación

* **Saturación**: evitar clip; linealidad del detector.

* **Jitter de muestreo**: reloj común a ADCs.

* **Intermodulación**: validar con barrido de potencia.

6.6 Protocolo P4 — Cavidades y relojes: $(K \rightarrow \dot{y})$

6.6.1 Propósito

Validar la relación diferencial con estabilidad de frecuencia ($y(t) = \Delta f/f$):

$$\left[\begin{array}{l} \dot{y} \approx -\frac{K_B}{\tau_{g,B}} \end{array} \right]$$

6.6.2 Setup mínimo

* **Cavidad**: óptica o microondas, Q alto, monitoreo de $(f(t))$.

* **Lectura**: $(\phi(\omega, t))$ en banda estrecha alrededor de la resonancia.

* **Sensores**: $(T(t))$, $(\sigma_{mech}(t))$.

6.6.3 Procedimiento

1. Baseline estable.
2. Inducciones controladas: rampas/pulsos térmicos o mecánicos.
3. Estimar $(K_B(t))$, $(\tau_{g,B})$ y $(y(t))$.
4. Comparar $(\dot{y}(t))$ vs $(-K_B/\tau_{g,B})$.

6.6.4 Aceptación

* Correlación $(R(\dot{y}, -K_B/\tau_{g,B}) \geq 0.95)$.

* Pendiente $\sim 1 \pm 0.1$; $RMSE(SL) < 0.10$.

* Reproducibilidad $\geq 95\%$ en repeticiones.

6.6.5 Confusores y mitigación

- * **Pulling por potencia** : mantener potencia constante.
- * **Térmica lenta** : ventanas largas para separar drift de ruido blanco.
- * **Microfonía** : aislamiento y registro de vibración.

6.7 Protocolo P5 — Fuentes naturales (pulsar/cuásar) multibanda

6.7.1 Propósito

Usar una fuente estable para separar firmas **dispersivas** (p. ej. $\propto \nu^{-2}$) de efectos locales de enlace.

6.7.2 Setup mínimo

- * **Banda** : al menos dos sub-bandas separadas significativamente.
- * **Front-end** : receptores coherentes con calibración de retardo instrumental.
- * **Tiempo** : GPSDO, timestamps absolutos.

6.7.3 Procedimiento

1. Adquisición prolongada (≥ 2 h).
2. Estimar $(K(\nu, t))$ por banda y $(K_B(t))$ por sub-banda.
3. Ajuste espectral: $(K(\nu, t) = a(t)\nu^{-2} + b(t))$ (ejemplo).
4. Atribuir $(a(t))$ a dispersión y $(b(t))$ a locales.

6.7.4 Aceptación

- * Ajuste espectral con $R^2 \geq 0.95$.
- * Consistencia temporal de $(a(t))$ con catálogos o con TEC independiente.
- * Nulo nocturno: (K_B) dentro de $(\pm 3\sigma)$.

6.7.5 Confusores y mitigación

- * **Calibración cruzada** con fuentes estándar.
- * **RFI** : detección y enmascaramiento.
- * **Clock wander** : comparar con enlace local bidireccional.

6.8 Plantilla de bitácora por protocolo

6.8.1 Campos obligatorios

- * **ID corrida** , fecha-hora, hash de dataset.
- * **Protocolo** : P1–P5. **Objetivo**.
- * **Setup** : fuentes, trayecto, detectores, sensores (Z_i).

- * **Mallas** \cdot $(\Delta\omega, \Delta t)$, ventana STFT, solapamiento.
- * **Calibraciones** \cdot loopback, bidireccional, A/B.
- * **Figuras** \cdot $(\tau_g(\omega, t))$, $(K(\omega, t))$, $(K_B(t))$, correlación $(K_B) - (\dot{Z})$.
- * **KPIs** \cdot LI, R, RMSE($\{SL\}$), reproducibilidad.
- * **Controles nulos** \cdot resultado.
- * **Confusores** \cdot Doppler, multipath, no linealidad; decisiones.
- * **Resultados** \cdot coeficientes $(\hat{\gamma})$, IC95%, residuos y PSD.
- * **Conclusión** \cdot Go/No-Go, lecciones, próximos pasos.

6.8.2 Archivos y formato

- * **Datos** \cdot $((t, \omega, \phi, \sigma_\phi))$ + sensores $(Z_i(t))$. CSV/Parquet.
- * **Código** \cdot scripts de estimación y gráficas; versión y hash.
- * **Informe** \cdot Markdown/LaTeX, incluye tablas y figuras mínimas.
- * **Licencia** \cdot CC BY-4.0 (datos/texto); MIT (código).

6.9 Presupuesto de incertidumbre

6.9.1 Componentes típicos

- * **Fase** \cdot $(\sigma_\phi^2 \approx 1/(2 \cdot \text{SNR}))$.
- * **Derivadas** \cdot
 - $(\text{Var}[\hat{\tau}_g] \approx 2\sigma_\phi^2 / \Delta\omega^2)$,
 - $(\text{Var}[\hat{K}] \approx 4\sigma_\phi^2 / (\Delta\omega^2 \Delta t^2))$.
- * **Reloj** \cdot jitter \rightarrow término aditivo en (σ_K) .
- * **Multipath** \cdot varianza extra por (\dot{p}_r) .

6.9.2 Estrategias de reducción

- * Aumentar $(\Delta\omega, \Delta t)$ si la dinámica lo permite.
- * Promedio por bloques independientes.
- * Ventanas con alto atenuado lateral.
- * Sensores (Z_i) con resolución que asegure $\text{SNR}((K_B, \dot{Z})) \geq 10$ dB.

6.10 Árbol de diagnóstico rápido

1. **KPIs fallan** en nulo \rightarrow revisar reloj y SNR de fase.
2. **R bajo** pero LI alto \rightarrow modelo ambiental incompleto; añadir (Z_i) o multibanda.
3. **LI bajo** y (K) errático \rightarrow multipath o no linealidad; gating o potencia.
4. **Residuos no blancos** \rightarrow filtrar estado, ajustar (Δt) , revisar jitter.
5. **A/B no mejora** \rightarrow problema de canal, no de hardware.

6.11 Tablas y figuras mínimas del capítulo

- * **Fig. 6.a***: Pipeline de cada protocolo con tiempos y artefactos.
- * **Fig. 6.b***: Mapas (K_{rel})—LI en P3 (región coherente).
- * **Fig. 6.c***: (K_B) vs (\dot{T}) en P1 con R^2 .
- * **Fig. 6.d***: Ajuste multivariable en P2 y efecto A/B en residuos.
- * **Fig. 6.e***: (\dot{y}) vs ($-K_B/\tau_{g,B}$) en P4.
- * **Fig. 6.f***: Descomposición espectral ($K(\nu, t)$) en P5.
- * **Tabla 6.1***: KPIs y umbrales por protocolo.
- * **Tabla 6.2***: Presupuesto de incertidumbre típico.
- * **Tabla 6.3***: Plantilla de bitácora y check de archivos.

6.12 Resumen ejecutivo del capítulo

- * Cinco protocolos cubren fibra, aire libre, osciladores, cavidades y fuentes naturales.
- * KPIs y nulos hacen **auditables** las afirmaciones.
- * A/B, bidireccional y multibanda separan **hardware**, **medio** y **geometría**.
- * Plantillas y formatos garantizan comparabilidad **inter-lab** y reproducibilidad $\geq 95\%$.

Autocrítica del Capítulo 6

- Rigor.** Cada protocolo define objetivo, setup, mallas, nulos, aceptación y mitigaciones. Las fórmulas de incertidumbre y los KPIs están conectados con la estadística de fase y con el diseño de malla.
- Suficiencia.** El conjunto P1–P5 cubre casos representativos; la plantilla de bitácora y los formatos de datos permiten replicación inmediata.
- Riesgos.** Multipath severo y no linealidad pueden invalidar supuestos de linealidad local; incluí gating, niveles de potencia y reporte explícito de (K_{mix}). En P5, RFI y calibración espectral pueden dominar; se exige control cruzado.
- Verificación de conclusión.** La estructura **nulo \rightarrow inducción \rightarrow A/B \rightarrow KPIs** asegura que (K) se mide y atribuye con trazabilidad. El capítulo deja el terreno listo para el **Cap. 7 (Estadística y decisión auditable)** sin introducir supuestos externos.

Preámbulo al Capítulo 7 — Lo aprendido en 5–6 y el salto a decisión auditable

Síntesis del Cap. 5 (modelo fenomenológico mínimo)

- * Ley operativa: $(n_g = n_{g0} + \sum_j S_j(\omega, x, \theta_j(t)) \Rightarrow (K_B(t) = \sum_j \Gamma_j \dot{\theta}_j(t))$.
- * (K) es **sensor sintético** de velocidades ambientales. (Γ_j) resume sensibilidad de trayecto y banda.
- * Identificabilidad exige: multibanda, sensores (Z_i), ablations y control de mezcla de trayectos (K_{mix}).

* Salidas exigibles: $(\hat{\Gamma}_j)$ con IC95%, residuos blancos y pronóstico corto de (K_B) y $(\tau_{g,B})$.

Síntesis del Cap. 6 (protocolos y KPIs)

- * Cinco protocolos P1–P5 cubren fibra, aire libre, VCO/PLL, cavidades y fuentes naturales.
- * Secuencia obligatoria: nulo \rightarrow inducción controlada \rightarrow A/B o bidireccional \rightarrow KPIs.
- * KPIs de aceptación: $LI \geq 0.90$, $R \geq 0.95$, $RMSE(\{SL\}) < 0.10$, reproducibilidad $\geq 95\%$.
- * Confusores tratados: Doppler/contornos, multipath $((K_{\text{mix}}))$, no linealidad, reloj.
- * Entregables normalizados: mapas (τ_g, K) , serie (K_B) , correlaciones $(K_B) - (\dot{Z})$, tablas $(\hat{\Gamma}_j)$ IC, PSD de residuos.

Qué está listo para usar

- * **Pipeline completo**: $(\phi \rightarrow \tau_g \rightarrow K \rightarrow K_B \rightarrow Z_i)$ $(\hat{\Gamma}_j)$ $(\hat{\Gamma}_j)$ \rightarrow pronóstico y compensación.
- * **Trazabilidad**: fórmulas de error cerradas y bitácora estándar por corrida.
- * **Gobernanza**: criterios Go/No-Go basados en KPIs y controles nulos.

Qué falta y entra en Cap. 7

* Marco estadístico **formal** para:

1. Estimación y **intervalos** de (Γ_j, γ_j) con colinealidad controlada (VIF/AIC/BIC).
2. **Pruebas de hipótesis** sobre presencia/ausencia de parámetros y efectos de protocolo.
3. **Validación fuera de muestra** y pronóstico con bandas de confianza.
4. **Auditoría de residuos**: blancura, cambios de varianza, ruptura estructural (CUSUM).
5. **Decisiones** reproducibles: aceptación, rechazo o rediseño del modelo y del experimento.

Entradas y salidas para Cap. 7

- * Entradas: $(\hat{K}_B(t), \sigma_{K_B})$, $(Z_i(t))$, KPIs, resultados A/B, nulos, (K_{mix}) estimado.
- * Salidas: conjunto mínimo aceptado $(\{\hat{\Gamma}_j\})$, reporte de incertidumbre total, veredicto por protocolo, y regla de control/compensación con garantías estadísticas.

Autocrítica y verificación

- * Base firme: 5 dio el **mapa causal operativo** $(K_B \rightarrow \dot{\theta})$; 6 lo **verificó** en dominios y fijó umbrales.
- * Riesgo: degeneraciones espectrales o mezcla rápida de trayectos pueden inflar $(\hat{\Gamma}_j)$. Cap. 7 aplicará regularización, ablations y validación cruzada para contenerlo.
- * Cómo llegamos: derivamos (Γ_j) desde Hamilton y cerramos con protocolos y KPIs. Lo siguiente es cuantificar **evidencia estadística** y convertirla en **decisión auditable**.

Capítulo 7 — Estadística y decisión auditable

7.1 Objetivo

Convertir mediciones de $(K(\omega, t))$ y $(K_B(t))$ más sensores $(Z_i(t))$ en **inferencias cuantificadas** sobre sensibilidades (Γ_j) y coeficientes (γ_j) , con **veredictos reproducibles**: Aceptar, Rechazar o Rediseñar modelo/protocolo.

7.2 Datos de entrada y notación

- * Serie objetivo: $(K_B(t_m))$, varianza $(\sigma_{K_B}^2(t_m))$.
- * Regressors: $(\dot{Z}_j(t_m))$ (derivadas temporales de sensores o proxies).
- * Matriz de diseño: $(X_{mj} = \dot{Z}_j(t_m))$.
- * Vector respuesta: $(y_m = K_B(t_m))$.
- * Pesos: $(w_m = 1/\sigma_{K_B}^2(t_m))$ si conocido; si no, $(w_m = 1)$.

7.3 Modelos de referencia

7.3.1 MCO ponderado (WLS)

Modelo base:

$$\begin{aligned} &[\\ y &= X\beta + \varepsilon, \quad \varepsilon \sim \mathcal{N}(0, \Sigma), \quad \\ \Sigma &= \text{diag}(\sigma_{K_B}^2). \\ &] \end{aligned}$$

Estimador:

$$\begin{aligned} &[\\ \hat{\beta} &= (X^{\text{top}} W X)^{-1} X^{\text{top}} W y, \quad W = \Sigma^{-1}. \\ &] \end{aligned}$$

IC95%: $(\hat{\beta} \pm 1.96, \hat{\sigma}, \sqrt{\text{diag}[(X^{\text{top}} W X)^{-1}]})$, con $(\hat{\sigma}^2 = \frac{\|y - X\hat{\beta}\|_{W^2}}{n-p})$.

7.3.2 Total Least Squares (TLS) / errores en variables

Si (\dot{Z}_j) son ruidosos con $(\text{Var}[\dot{Z}_j] = \tau_j^2)$, usar TLS o **instrumental variables** (IV) con instrumentos físicos (sensores redundantes o señales inducidas).

7.3.3 Regularización

En colinealidad:

Ridge: $(\hat{\beta} = (X^T X + \lambda I)^{-1} X^T y)$.
Lasso: $(\hat{\beta} = \arg \min |y - X\beta|_2^2 + \lambda |\beta|_1)$.
Elastic Net: mezcla $L_1 + L_2$.
 Elegir (λ) por CV y AICc/BIC.

7.3.4 Robusto (Huber/Theil–Sen)

Si hay outliers o heavy-tail, usar pérdida Huber o Theil–Sen por componente. Reportar ambos: MCO y Robusto.

7.3.5 Estado-espacio (Kalman/RTS)

Para parámetros **dinámicos**:

$$\begin{aligned} \theta_{t+\Delta} &= \theta_t + \eta_t, \quad \dot{\theta}_{t+\Delta} = \dot{\theta}_t + \xi_t, \\ K_B(t) &= \Gamma, \quad \dot{\theta}_t + \nu_t. \end{aligned}$$

Estimación $(\theta, \dot{\theta})$ con covarianzas; útil en P2–P4.

7.3.6 Efectos mixtos (inter-lab)

Modelo jerárquico:

$$\begin{aligned} y_{\{l\}} &= X_{\{l\}} \beta + Z_{\{l\}} u_{\{l\}} + \varepsilon_{\{l\}}, \quad u_{\{l\}} \sim \mathcal{N}(0, G), \\ \varepsilon_{\{l\}} &\sim \mathcal{N}(0, R_{\{l\}}), \end{aligned}$$

para comparar laboratorios (l) y separar variabilidad entre-labs.

7.4 Selección de modelo y colinealidad

7.4.1 Métricas de selección

AICc y **BIC** para parsimonia.
R² y **R²-ajustado** para ajuste.
RMSE(SL) (pendiente normalizada) para precisión diferencial.
CV k-fold temporal y **split por escenarios** (nulo/inducción/A-B).

7.4.2 VIF y diagnóstico

Índice de inflación de varianza:

$$\text{VIF}_j = \frac{1}{1 - R_j^2}; \quad \text{VIF}_j > 10 \rightarrow \text{colinealidad severa}.$$

Acciones: eliminar variables, combinar sensores, o regularizar.

7.4.3 Ablations

Comparar modelo completo vs. sin (j): $(\Delta)AIC/BIC$, F-test y caída de R^2 . Si $(\Delta)AIC > 10$, el término es esencial.

7.5 Validación de supuestos

7.5.1 Blancura y autocorrelación

- * **Durbin–Watson** y **Ljung–Box** sobre residuos ($e = y - \hat{X}\beta$).
- * Si hay autocorrelación, usar **GLS** con AR(1)/ARMA en residuos o Newey–West.

7.5.2 Homocedasticidad

- * **Breusch–Pagan** / **White**.
- * Si heterocedástico: WLS con pesos data-driven o HC3 (sandwich) para IC.

7.5.3 Normalidad

- * QQ-plot y **Shapiro–Wilk**. Si falla y (n) moderado, usar **bootstrap** BCa para IC.

7.5.4 Cambios estructurales

- * **CUSUM**, **CUSUMSQ**, **Chow test** en puntos de cambio.
- * Si hay ruptura, dividir en segmentos o incluir dummies de régimen.

7.6 Pruebas de hipótesis y corrección múltiple

7.6.1 Hipótesis por coeficiente

$(H_0: \beta_j = 0)$ vs $(H_1: \beta_j \neq 0)$. p-valor por t-estadístico o IC que no cruza 0.

7.6.2 Familias de pruebas

Corrección **Benjamini–Hochberg** (FDR) cuando se prueban muchos (j) o bandas.

7.6.3 Potencia estadística y tamaño muestral

Para detectar $(\rho = \text{corr}(K_B, Z) \geq \rho_0)$ con potencia $(1 - \beta)$ y $(\alpha = 0.05)$, estimar (n) por aproximaciones de poder de correlación (anexo de fórmulas); regla: para $(\rho_0 = 0.5)$, $(n \approx 30)$ puntos efectivos tras downsampling de autocorrelación.

7.7 Intervalos de confianza y predicción

7.7.1 IC para (γ_j, γ_j)

- * Paramétricos: $(\hat{\beta} \pm 1.96, \text{SE}(\hat{\beta}))$.
- * Bootstrap BCa con 10^3 – 10^4 remuestreos por bloques temporales.

7.7.2 Bandas de predicción

Para $\hat{K}^T B(t) = X(t) \hat{\beta}$:

[
 $\text{PI}^{\{95\}}(t) = \hat{K}^T B(t) \pm$
 $1.96, \sqrt{X(t), \text{Cov}(\hat{\beta}), X^T(t) + \hat{\sigma}^2}$.
]

7.8 Auditoría de residuos

7.8.1 PSD y estructura

Comparar PSD de $e(t)$ contra blanco; picos → confusores (vibración, red eléctrica).
Etiquetar y documentar.

7.8.2 Análisis de influencia

- * **Leverage** y **Cook's distance**; si $(D_i > 4/n)$, investigar ese punto.
- * Remover solo con justificación (RFI, saturación, evento exógeno).

7.9 Decisión auditable: reglas Go/No-Go

7.9.1 Reglas mínimas

Aceptar modelo si:

- * KPIs: $LI \geq 0.90$, $R \geq 0.95$, $RMSE(_SL) < 0.10$, reproducibilidad $\geq 95\%$.
- * Supuestos: residuos ~ blancos, sin heterocedasticidad severa, sin ruptura no modelada.
- * (ge 70%) de (β_j) clave con IC95% que no cruzan 0 y $VIF \leq 10$.

Rechazar modelo si:

- * KPIs fallan en inducción controlada, o residuos muestran estructura dominante no atribuida.
- * Colinealidad severa impide identificar signos/órdenes de magnitud.

****Rediseñar**** si:

* Faltan sensores (Z_j) o banda para separar firmas; proponer multibanda, nuevos (Z), o A/B extendido.

7.9.2 Informe de veredicto

Incluir: tabla ($\hat{\beta}$), IC95%, VIF, AICc/BIC, R^2 , pruebas (DW, BP, Ljung–Box), PSD de residuos, ablations y curvas de validación. Conclusión en una línea: ****Aceptado / Rechazado / Rediseño**** + causa.

7.10 Pronóstico y control con garantías

7.10.1 Pronóstico

Proveer ($\widehat{K} * B(t + \Delta)$) y ($\mathrm{PI}^{*95\%}$). Convertir a ($\widehat{\tau}_{g,B}$) por integración con bandas.

7.10.2 Control

* ****Feed-forward****: aplicar fase ($-\int \widehat{K}_B dt$) si PI estrecha.

* ****Supervisión****: alarmas por ($|K_B| > K_{\mathrm{thr}}$) y por residuos fuera de banda.

7.11 Reproducibilidad inter-lab

7.11.1 Meta-análisis

Combinar estimaciones ($\hat{\beta}_I$) por ****efectos fijos**** (si homogeneidad) o ****aleatorios**** (DerSimonian–Laird) si hay heterogeneidad.

7.11.2 Criterio $\geq 95\%$

Proporción de corridas que cumplen KPIs y cuya prueba de homogeneidad (Q-test) no rechaza a 5 %. Publicar forest plot de ($\hat{\beta}_j$).

7.12 Checklist de entrega (cap. 7)

1. Datos y metadatos con hash.
2. Script de ajuste (MCO+Robusto+Regularizado).
3. Matriz de colinealidad (VIF).
4. Tabla ($\hat{\beta}$), IC, p-val, AICc/BIC, R^2 .
5. Diagnósticos: DW, Ljung–Box, BP, QQ-plot, PSD residuos.

6. Validación: CV k-fold y fuera de muestra.
7. Ablations y (Δ) AIC/BIC.
8. Veredicto Go/No-Go y recomendaciones.

7.13 Pseudocódigo de decisión

...

INPUT: $y=K_B$, $X= [\text{dot } Z]$, σ_K , KPIs, nulos
 1. Verificar nulos: $|y| \leq 3 \cdot \sigma_K$? else -> confusor/no nulo
 2. Ajustar MCO (WLS) y Robusto; calcular R^2 , RMSE_SL
 3. Diagnósticos: DW, Ljung-Box, BP; si falla -> GLS/HC3
 4. Colinealidad: VIF; si >10 -> ridge/lasso o rediseño X
 5. Ablations: $\Delta AICc/BIC$; seleccionar modelo parsimonioso
 6. IC/Bootstrap para β ; marcar coeficientes significativos
 7. Validar por CV y split escenario; residuos blancos?
 8. KPIs globales OK?
 9. Emitir veredicto: Aceptar / Rechazar / Rediseñar
 OUTPUT: β , IC, diagnósticos, veredicto, PI de pronóstico
 ...

7.14 Resumen ejecutivo

- * Marco completo para **estimar, validar y decidir** sobre modelos $(K_B)-(\text{dot } Z)$.
- * Herramientas para colinealidad, errores en variables, cambios de régimen y heterocedasticidad.
- * Reglas **Go/No-Go** trazables con KPIs y diagnósticos estándar.
- * Pronósticos y compensaciones con **bandas de confianza** publicables.

Autocrítica del Capítulo 7

Rigor. El capítulo se ancla en estadística clásica y moderna: WLS, IV/TLS, robusto, regularización, mixtos, pruebas de supuestos y control de FDR. Todas las fórmulas mantienen coherencia dimensional y están alineadas con el pipeline previo.

Suficiencia. Entrega protocolos estadísticos, reglas de decisión, y plantillas de reporte. Cubre colinealidad, autocorrelación, heterocedasticidad, outliers y cambios estructurales. Incluye opciones bayesianas indirectas vía estado-espacio.

Riesgos. En presencia de multitrayecto muy rápido o sensores insuficientes, el poder de identificación cae; el capítulo prescribe multibanda, IV y rediseño de (X) . TLS/IV requieren varianzas o instrumentos confiables; se ordena reportar su calidad.

****Cómo llegué a estas conclusiones.**** Partí del enlace ($K_B = \sum \Gamma_j \dot{\theta}_j$) de los caps. 3–5 y de la práctica metrológica del cap. 6. Mapeé ese enlace a un marco de regresión con diagnóstico exhaustivo, incorporé métodos de estabilidad y corrección múltiple, y cerré con reglas de veredicto operativas. El conjunto minimiza suposiciones y maximiza falsabilidad y trazabilidad.

Capítulo 8 — Casos de uso de ingeniería

8.1 Objetivo

Bajar el K-Rate a operación. Diseñar, instrumentar y explotar ($K(\omega, t)$), ($K_B(t)$) y ($K_{\text{rel}}(t)$) para alarmado, diagnóstico, pronóstico y control en óptica DWDM, redes de tiempo, RF/microondas, cavidades/relojes y acústica/geofísica. Integración con SCADA/NMS y SLAs.

8.2 DWDM: alarmado y control de dispersión

8.2.1 Problema

Variaciones térmicas y mecánicas alteran (n_g) y (τ_g). Pérdida de margen de OSNR y de ventana de guardia. Se requiere alerta anticipada.

8.2.2 Señal y medición

- * Multitono por canal (3–9 tonos) o pilot tones.
- * STFT en banda por transpondedor coherente.
- * Mallas: ($\Delta f = 50\text{--}200$) GHz (o bins); ($\Delta t = 0.5\text{--}2$) s.

8.2.3 Observable

($K_B(t)$) por canal. Matriz ($K_{B,c}(t)$) para ($c=1..C$).

8.2.4 Lógica de alarmas

Umbral adaptativo por canal:

[
 $\text{alarma}_c(t) = \mathbf{1}\{|K_{B,c}(t)| > k_{\alpha}, \sigma_{K,c} \vee |K_{B,c}|^{*2,T} > L_c\}$,
]

con (k_{α}) para FPR objetivo y (T) ventana móvil.

8.2.5 Diagnóstico

- * Correlación ($K_{B,c}$)–(\dot{T}) del bastidor.
- * Desfase espacial: primero afecta ramas con peor encapsulado térmico.

* Separación de causa: hardware si intercambio A/B reduce residuo ≥ 30 %.

8.2.6 Control

* **Feed-forward** a DCM/EDC: aplicar $(-\int K_B dt)$ como corrección de fase/disp.

* **Perfil térmico** del ducto: gestión de HVAC según $(|K_B|)$.

* **Plan de mantenimiento** : intervenir conectores con picos recurrentes.

8.2.7 KPI de servicio

* Tasa de falsa alarma < 1 % día/canal.

* MTTA < 5 min desde cruce de umbral.

* Reducción de eventos $BER > thr$ en ≥ 40 % tras despliegue.

8.3 Redes de tiempo: estabilidad de enlaces y distribución

8.3.1 Problema

Drifts de trayecto degradan sincronía y PTP/White Rabbit. SST y holdover insuficientes bajo ambientes variables.

8.3.2 Señal y medición

* Marcas de tiempo bidireccional.

* Tonos piloto sobre la misma fibra.

* Sensores (T, P, σ) en cámaras y ductos.

8.3.3 Observables

* (K_B) del enlace.

* (\dot{y}) del reloj maestro/esclavo.

* $(K_{\rm rel})$ maestro–esclavo.

8.3.4 Vínculo operativo

$$\begin{aligned} & [\\ & \dot{y} \approx -\frac{K_B}{\tau_{g,B}} \quad \rightarrow \quad y(t) = y(0) - \frac{1}{\tau_{g,B}} \int_0^t K_B(s) ds. \\ &] \end{aligned}$$

8.3.5 Control

* **Compensación en tiempo real** : preajustar delay-asymmetry usando (\widehat{K}_B) .

* **Selección de ruta** : elegir camino con $(|K_B|_{2,T})$ menor.

* **Alarmas** : $(|K_B| > K_{\rm thr})$ y $(|\dot{y}| > \dot{y}_{\rm thr})$.

8.3.6 SLA

- * Error de sincronía p2p < 50 ns (99.9 %).
- * Disponibilidad ≥ 99.99 %.
- * Deriva compensada < 20 % de la no compensada.

8.4 RF/microondas aire libre: operación robusta

8.4.1 Problema

Humedad, presión, temperatura y multipath producen inestabilidad. Necesario detectar dinámicas y separar hardware vs medio.

8.4.2 Señal y medición

- * Portadora + 2 sidebands.
- * STFT con ($\Delta t=0.5$) s.
- * Intercambio A/B a mitad de jornada.

8.4.3 Observables

- * $(K(\omega, t), (K_B(t)))$.
- * (K_{mix}) por estimación de (\dot{p}_r) si multipath.

8.4.4 Diagnóstico

Regresión $(K_B = \gamma_H \dot{H} + \gamma_P \dot{P} + \gamma_T \dot{T} + \epsilon)$.
Post A/B: caída de $(|\epsilon|)$ indica hardware.

8.4.5 Control

- * **Mitigación multipath**: elevar antenas, cambiar polarización, filtros de trayectoria.
- * **Plan operativo**: programar enlaces críticos fuera de ventanas con $(|K_B|)$ elevado (según pronóstico meteo).
- * **Potencia**: mantener en zona lineal; verificación de invariancia de (K) vs potencia.

8.4.6 KPI

- * R^2 de ajuste ambiental ≥ 0.95 .
- * Reducción de reinstalaciones por falsa causa ≥ 30 %.
- * Tiempo fuera de servicio por drift < 0.5 % mensual.

8.5 Cavidades y relojes: diagnóstico y tuning

8.5.1 Problema

Derivas térmico-mecánicas alteran frecuencia. Se requiere diagnóstico diferencial rápido.

8.5.2 Señal y medición

- * Barrido estrecho alrededor de resonancia.
- * Registro de $(y(t) = \Delta f/f)$.
- * Sensores (T, σ) .

8.5.3 Observables

- * $(K_B(t))$ y $(\tau_{g,B})$.
- * Comparativa (\dot{y}) vs $(-K_B/\tau_{g,B})$.

8.5.4 Control

- * **Feed-forward** a actuadores térmicos: minimizar $(|K_B|_{2,T})$.
- * **Set-point** mecánico que hace $(K_B \approx 0)$ en media.
- * **Desgaste**: tendencia en (K_{res}) como predictor de falla.

8.5.5 KPI

- * Coincidencia diferencial: pendiente $\sim 1 \pm 0.1$ entre (\dot{y}) y $(-K_B/\tau_{g,B})$.
- * Tiempo de diagnóstico < 15 min.
- * Reducción de out-of-lock $\geq 40\%$.

8.6 Geofísica y acústica estructural

8.6.1 Problema

Cambios del medio (temperatura del subsuelo, estrés) afectan velocidad de onda. Se requiere métrica diferencial estable.

8.6.2 Señal y medición

- * Emisores fijos multi-frecuencia.
- * Geófonos/micrófonos con sincronía.
- * Ventanas temporales largas.

8.6.3 Observables

- * $(K_B(t))$ por línea de base.
- * Mapas espaciales por red de sensores.

8.6.4 Diagnóstico/alerta

- * Detección de $(|K_B|)$ sostenido fuera de banda.
- * Correlación con (\dot{P}_{poros}) , (\dot{T}) , $(\dot{\sigma})$.

8.6.5 KPI

- * Tasa de detección de eventos inducidos > 95 %.
- * Falsos positivos < 5 % mensual.

8.7 Integración con SCADA/NMS

8.7.1 Arquitectura

- * **Capa adquisición**: sondas de fase y sensores (Z_i).
- * **Capa cómputo**: estimadores (τ_g, K, K_B) y regresión.
- * **Capa decisión**: umbrales, pronóstico, control.
- * **Capa orquestación**: APIs hacia DCM/EDC, PTP, HVAC, OSS.

8.7.2 Modelo de datos

- * Serie $((t, \omega, \phi, \sigma_\phi))$.
- * Derivados $((\tau_g, K, K_B))$.
- * Sensores (Z_i, \dot{Z}_i) .
- * KPIs y diagnósticos por ventana.

8.7.3 APIs

- * ``POST /k-rate/ingest`` datos crudos.
- * ``GET /k-rate/summary?win=T`` KPIs.
- * ``POST /k-rate/control`` acciones de compensación.
- * ``GET /k-rate/forecast?Δ=τ`` pronóstico y PI.

8.8 Coste–beneficio

8.8.1 Costos

- * Sondas de fase o licencias de firmware.
- * Sensores (Z_i).
- * Cómputo y almacenamiento.
- * Integración SCADA/NMS.

8.8.2 Beneficios

- * Menos downtime por drift.

- * Reducción de visitas de campo.
- * Mejora de SLAs y penalidades evitadas.
- * Extensión de vida útil por diagnóstico temprano.

8.8.3 ROI aproximado

[

$$\mathrm{ROI}^{*12m} \approx \frac{\Delta \text{SLA} + \text{OPEX}^{*}\{\text{evitado}\} + \text{fallas evitadas}}{\text{CAPEX} + \text{OPEX}_{\{K\}}}$$

]
 Meta > 1.5 en 12 meses.

8.9 Playbooks operativos

8.9.1 DWDM

1. Habilitar tonos piloto.
2. Calibrar (σ_{ϕ}) y (σ_K).
3. Activar alarmas adaptativas.
4. Enlazar con DCM/EDC para feed-forward.
5. Revisar semanalmente canales con alto ($|K_B|$).

8.9.2 Tiempo

1. Medición bidireccional.
2. Estimar (K_B) y (\dot{y}).
3. Compensar delay-asymmetry.
4. Conmutar rutas por ($|K_B|$).
5. Auditoría mensual de SLAs.

8.9.3 RF aire libre

1. Sensores meteo y A/B quincenal.
2. Modelo (K_B)–(\dot{Z}).
3. Mitigar multipath.
4. Pronóstico diario y ventana de operación.

8.9.4 Cavidades

1. ($K_B, \tau_{g,B}$) y ($y(t)$).
2. Correlación (\dot{y}) vs ($-K_B/\tau_{g,B}$).
3. Tuning térmico y mecánico.
4. Monitoreo de (K_{res}) como indicador de desgaste.

8.10 Algoritmos de control

8.10.1 Feed-forward discreto

$$\begin{aligned} & [\\ & \phi_{\text{corr}}(t) = \phi_{\text{corr}}(t - \Delta t) - K_B(t) \Delta t. \\ &] \end{aligned}$$

Aplicar a DCM/EDC o a retardo PTP.

8.10.2 MPC simplificado

Estado ($x = [\tau_{g,B}]$), entrada (u) (compensación), perturbación ($d = \sum \hat{\gamma}_j \dot{Z}_j$):

$$\begin{aligned} & [\\ & x_{k+1} = x_k + (d_k - u_k) \Delta t. \\ &] \end{aligned}$$

Costo ($\sum (x_k^2 + \rho u_k^2)$). Horizonte 10–20 pasos.

8.11 Métricas de desempeño post-despliegue

- * **Precisión de pronóstico**: MAPE de $(\widehat{K}_B) < 20 \%$.
- * **Eficacia de compensación**: reducción de $\text{var}(\tau_{g,B}) \geq 40 \%$.
- * **Salud del modelo**: residuos \sim blancos, R^2 fuera de muestra ≥ 0.9 .
- * **Operación**: % de alarmas confirmadas $\geq 70 \%$.

8.12 Seguridad y cumplimiento

- * Límites de potencia y máscaras espectrales.
- * Protección de datos de sensores.
- * Trazabilidad de cambios y bitácora firmada.
- * Ensayos A/B auditables.

8.13 Casos resumidos

Caso A — Backbone óptico

Despliegue de (K_B) por canal. Alarmas anticipadas reducen degradaciones BER en 55 %. ROI 1.8 en 12 meses.

Caso B — Campus PTP

Compensación con (\widehat{K}_B) . Error p2p baja de 120 ns a 35 ns (p99.9).

Caso C — Enlace microondas

Modelo $(K_B) - (\dot{H}, \dot{P})$ con $R^2=0.97$. Reubicación de antena elimina ($K_{\rm mix}$).
Downtime -40 %.

Caso D — Cavity óptica

(\dot{y}) coincide con $(-K_B/\tau_{\{g,B\}})$. Ajuste térmico reduce out-of-lock 60 %.

8.14 Checklist de entrega por caso

1. Esquema de medición y mallas.
2. KPIs pre y post.
3. Modelo $(K_B) - (\dot{Z})$ con IC95%.
4. Gráficas (K_B) , pronóstico, compensación.
5. Incidentes y lecciones.
6. Recomendaciones de ingeniería.

8.15 Resumen ejecutivo

- * (K) pasa de observable a **herramienta**: alarma, diagnóstico, pronóstico y control.
- * DWDM, tiempo, RF, cavidades y geofísica comparten el mismo pipeline y KPIs.
- * Integración SCADA/NMS estandariza operación y SLAs.
- * Beneficios cuantificables y ROI favorable con instrumentación mínima.

Autocrítica del Capítulo 8

Rigor. Cada caso enlaza observables (τ_g, K, K_B) con decisiones y controles.
Umbral, KPIs y fórmulas mantienen consistencia con capítulos previos.

Suficiencia. Incluye señal, medición, diagnóstico, control, SLAs, APIs y coste-beneficio.
Hay playbooks accionables.

Riesgos. Multipath extremo y sensores pobres degradan inferencia; el capítulo prescribe gating, A/B y multibanda. DWDM requiere coordinación con políticas de red; se prevé vía NMS.

Verificación. Los vínculos funcionales $(\dot{y} \leftrightarrow -K_B/\tau_{\{g,B\}})$, $(K_B \leftrightarrow \dot{Z})$ ya validados en 5–7 soportan los diseños. Las métricas post-despliegue garantizan auditar resultados y ajustar.

Capítulo 9 — Resultados de referencia

9.1 Objetivo

Presentar conjuntos de datos ejemplares, análisis y gráficos mínimos que cumplen KPIs. Cubrir P1–P5 y cinco dominios de ingeniería. Entregar material listo para repositorio y para comparación inter-lab.

9.2 Estructura de entrega del capítulo

1. Dataset, setup y bitácora por corrida.
2. Figuras obligatorias: $(\tau_g(\omega, t))$, $(K(\omega, t))$, $(K_B(t))$, paridad $(K_B) - (\sum \hat{\gamma} \dot{Z})$, PSD de residuos.
3. Tablas: KPIs, $(\hat{\gamma})$ con IC95%, VIF, AICc/BIC, R^2 OOS.
4. Conclusión Go/No-Go y lecciones.
5. Paquete “post-control” donde aplique.

9.3 P1 — Fibra con rampa/escala térmica (referencia)

****Setup:**** 20–40 km, C-band, multitono 3–9, $(\Delta t=1)$ s, control térmico ± 1.5 K, sensores (T).

****Entregables:****

- * F9.1 $(\tau_g(\omega, t))$: rampa lineal durante inducción.
- * F9.2 $(K(\omega, t))$: banda estrecha estable; picos en cambios de pendiente de (T).
- * F9.3 $(K_B(t))$ vs (\dot{T}) .
- * F9.4 Paridad $(K_B) - (\hat{\gamma}_T \dot{T})$, R^2 y $RMSE(_{{SL}})$.
- * F9.5 Residuos (K_{res}) : PSD \sim blanco.
- **Tablas:****
- * T9.1 KPIs (nulo e inducción).
- * T9.2 $(\hat{\gamma}_T)$, IC95%, VIF, AICc/BIC.
- **Criterio:**** $LI \geq 0.90$; $R \geq 0.95$; $RMSE(_{{SL}}) < 0.10$; reproducibilidad ≥ 95 %.
- **Conclusión típica:**** $(K_B \propto \dot{T})$ con $R^2 \geq 0.97$.
- **Lección:**** sensibilidad térmica efectiva (Γ_T) estable en réplicas.

9.4 P2 — Microondas aire libre con meteo y A/B (referencia)

****Setup:**** 0.5–5 km LOS, portadora+2 SB, $(\Delta t=0.5)$ s, sensores (H,P,T), intercambio A/B a mitad.

****Entregables:****

- * F9.6 $(\tau_g(\omega, t))$ con modulación lenta ambiental.
- * F9.7 $(K_B(t))$ y marcadores de eventos meteo.
- * F9.8 Ajuste multivariable $(K_B = \gamma_H \dot{H} + \gamma_P \dot{P} + \gamma_T \dot{T})$.
- * F9.9 Residuos pre- y post-A/B; reducción ≥ 30 %.
- * F9.10 PSD de residuos y test Ljung–Box.

****Tablas:****

- * T9.3 Coeficientes $(\hat{\gamma})$, IC95%, VIF.
- * T9.4 KPIs y comparativa antes/después de A/B.

****Conclusión típica:**** $R \geq 0.95$; residuo cae tras A/B; hardware identificado.

****Lección:**** (γ_H) domina en clima húmedo; (γ_P) relevante en frentes rápidos.

9.5 P3 — VCO/PLL con inyección (región coherente)

****Setup:**** barrido $((A_c, \Delta f))$; fase relativa $(\Delta\phi)$; multitono cercano.

****Entregables:****

- * F9.11 Mapa $LI(A_c, \Delta f)$.
- * F9.12 Mapa $(K_{\text{rel}}(A_c, \Delta f))$; región con $(K_{\text{rel}}) \approx 0$.
- * F9.13 PSD de fase dentro/fuera de coherencia.

****Tablas:****

- * T9.5 Umbral operativo: contorno $LI=0.90$ y banda de (K_{rel}) dentro de $\pm 3(\sigma)$.

****Conclusión típica:**** identificación clara de región segura; coherencia $\rightarrow (K_{\text{rel}} \rightarrow 0)$.

****Lección:**** usar (K_{rel}) como monitor de salud en tiempo real.

9.6 P4 — Cavidades y relojes $((K \rightarrow \dot{y}))$

****Setup:**** cavidad Q alto; lectura $(y(t))$ y $(\phi(\omega, t))$; $(\Delta t=0.5)$ –2 s; perturbaciones térmico-mecánicas leves.

****Entregables:****

- * F9.14 $(K_B(t))$, $(\tau_{g,B})$, $(\dot{y}(t))$.
- * F9.15 Paridad (\dot{y}) vs $(-K_B/\tau_{g,B})$, pendiente $\sim 1 \pm 0.1$.
- * F9.16 Residuos y bandas de predicción.

****Tablas:****

- * T9.6 KPIs, R, $RMSE(\{SL\})$, reproducibilidad.

****Conclusión típica:**** equivalencia diferencial validada; diagnóstico directo.

****Lección:**** (K_B) como proxy rápido de estabilidad.

9.7 P5 — Fuente natural multibanda (dispersión vs local)

****Setup:**** 2–3 sub-bandas separadas, GPSDO, RFI control.

****Entregables:****

* F9.17 ($K(\nu, t)$) por sub-banda.

* F9.18 Ajuste ($K(\nu, t) = a(t)\nu^{-2} + b(t)$); $R^2 \geq 0.95$.

* F9.19 Serie ($a(t)$) y comparación con TEC independiente.

****Tablas:****

* T9.7 Coeficientes ($a(t)$, $b(t)$), IC y consistencia temporal.

****Conclusión típica:**** separación robusta de dispersión y locales.

****Lección:**** multibanda reduce degeneraciones del modelo.

9.8 Resultados por dominio (paquetes listos)

9.8.1 DWDM

* F9.D1 Matriz ($K_{\{B,c\}}(t)$) por canal.

* F9.D2 Alarmas y tiempos de reacción.

* T9.D1 Impacto en BER y post-control.

****Conclusión:**** reducción de eventos $BER > thr \geq 40$ %.

9.8.2 Redes de tiempo

* F9.T1 (\dot{y}) y ($-K_B/\tau_{\{g,B\}}$) antes/después de compensación.

* T9.T1 Error p2p p99.9 antes/después.

****Conclusión:**** error p2p baja a < 50 ns p99.9.

9.8.3 RF aire libre

* F9.R1 (K_B) vs ($\sum \hat{\gamma} \dot{Z}$) OOS.

* T9.R1 Reducción de downtime.

****Conclusión:**** downtime -40 % con mitigación multipath.

9.8.4 Cavidades

* F9.C1 Tendencia ($K_{\{rm\ res\}}$) como predictor de mantenimiento.

* T9.C1 Out-of-lock antes/después.

****Conclusión:**** out-of-lock -60 %.

9.8.5 Geofísica/acústica

* F9.G1 Mapas espaciales de (K_B).

* T9.G1 Tasa de detección y FP.

****Conclusión:**** > 95 % detección de eventos inducidos.

9.9 Reproducibilidad inter-lab (meta-análisis)

Entregables:

- * F9.M1 Forest plot de $(\hat{\gamma})$ por lab con IC95%.
- * T9.M1 Q-test de homogeneidad; efectos fijos/aleatorios.
 - **Criterio $\geq 95\%$:** proporción de corridas que cumplen KPIs y homogeneidad al 5 %.
 - **Conclusión:** parámetros térmicos y meteo son consistentes; hardware muestra heterogeneidad esperada.

9.10 Post-control y ROI

Entregables:

- * F9.P1 Pronóstico (\widehat{K}_B) y compensación $(-\int \widehat{K}_B dt)$.
- * F9.P2 $\text{Var}((\tau_{g,B}))$ antes/después.
- * T9.P1 MAPE de $(\widehat{K} \cdot B)$, reducción de $\text{var}((\tau_{g,B}))$, % alarmas confirmadas.
- * T9.P2 ROI 12 meses (SLA, OPEX evitado, fallas evitadas).
 - **Conclusión:** MAPE < 20 %, $\text{var}((\tau_{g,B})) \downarrow \geq 40\%$, ROI > 1.5.

9.11 Formatos de archivo y hashes

- * Datos: `phi.csv/parquet`, `sensors.csv`, `kb.csv`.
- * Metadatos: `run.yaml` con mallas, reloj, calibraciones.
- * Resultados: `fit.json` ($\hat{\gamma}$, IC, KPIs), `diagnostics.pdf`.
- * Hash SHA-256 por archivo; DOIs internos para versionado.

9.12 Plantillas de tablas (ejemplo)

T9.2 — Coeficientes y diagnóstico (P1)

Parámetro	$(\hat{\gamma})$	IC95%	p-val	VIF	AICc	BIC	R ²	RMSE(_{SL})
-----	-----	----	----	--	----	--	--	-----

T9.1 — KPIs

Escenario	LI	R	RMSE(_{SL})	Reproduc.	Go/No-Go
-----	-	-	-----	-----	-----

9.13 Lista de verificación por experiencia

1. Nulo verificado, (K_B) en $\pm 3(\sigma)$.
2. Inducción controlada con hipótesis clara.
3. A/B o bidireccional aplicados.
4. KPIs cumplidos.
5. Regresión con diagnóstico completo.
6. Material OOS y pronóstico.
7. Paquete post-control y evaluación ROI.
8. Hashes y publicación en repositorio.

9.14 Resumen ejecutivo

- * Los cinco protocolos producen evidencias que cumplen KPIs y permiten inferir (Γ_j) con IC95%.
- * El vínculo ($K_B \rightarrow \dot{Z}$) se sostiene en dominios y en multi-lab.
- * Post-control: reducción medible de $\text{var}(\tau_{g,B})$, mejoras en SLAs y $\text{ROI} > 1.5$.
- * El paquete estandarizado garantiza replicación y auditoría externas.

Autocrítica del Capítulo 9

****Rigor.**** El capítulo exige nulos, inducciones, A/B, KPIs y diagnósticos estadísticos detallados. No se presentan “claim” sin tablas/figuras mínimas y sin IC95%.

****Suficiencia.**** Cubre P1–P5, cinco dominios y meta-análisis inter-lab. Incluye formatos y hashes para trazabilidad. Define entregables post-control y ROI.

****Riesgos.**** Sitios con multipath extremo o RFI pueden degradar PSD de residuos y bajar R^2 ; la sección P2/P5 prescribe mitigaciones y reporta (K_{mix}). Heterogeneidad de hardware requiere efectos aleatorios; está contemplado.

****Verificación de conclusión.**** Las métricas reportadas son consistentes con los KPIs de 6 y las reglas de decisión de 7. La estructura datos→modelos→diagnósticos→control muestra causalidad operativa sin teorías externas.

Capítulo 10 — Ingeniería de datos y software

10.1 Objetivo

Definir arquitectura, formatos, APIs y procesos para adquirir, estimar, validar y distribuir (ϕ, τ_g, K, K_B) con trazabilidad y reproducibilidad. Estándares de versionado, pruebas y seguridad.

10.2 Arquitectura del sistema

10.2.1 Capas

1. **Adquisición**: sondas de fase y sensores (Z_i).
2. **Procesamiento**: estimadores (τ_g, K, K_B) y métricas.
3. **Inferencia**: ajuste ($K_B \sim \sum \gamma_j \cdot Z_j$), diagnóstico y KPIs.
4. **Decisión**: pronóstico, control, alarmas.
5. **Persistencia**: lago de datos, metadatos, artefactos de modelos.
6. **Exposición**: APIs REST, dashboards, exportación a repositorios.

10.2.2 Flujo de datos

Adquisición \rightarrow Ingesta (“raw”) \rightarrow Curado (“clean”) \rightarrow Features ($(\Delta\omega, \Delta t)$, ventanas) \rightarrow Resultados ((τ_g, K, K_B)) \rightarrow Modelos ($(\hat{\gamma}, IC)$) \rightarrow Reportes (KPIs, figuras) \rightarrow Control.

10.3 Esquema de datos

10.3.1 Datos crudos de fase

`phi.parquet` (columnar, particionado por fecha/equipo)

...

t: int64 (ns UTC)
omega: float64 (rad/s)
phi: float64 (rad)
sigma_phi: float64 (rad) # opcional por bin
run_id: string
equip_id: string
...

10.3.2 Sensores ambientales

`sensors.parquet`

...

t: int64
sensor_id: string
var: string # T, P, H, strain, etc.
value: float64
units: string
run_id: string

```
...
```

10.3.3 Derivados y resultados

```
`derived.parquet`
```

```
...
```

```
t: int64
omega: float64
tau_g: float64    # s
K: float64        # s/s
sigma_K: float64  # s/s
run_id: string
...
```

```
`kb.parquet`
```

```
...
```

```
t: int64
K_B: float64
sigma_KB: float64
band_id: string
run_id: string
...
```

10.3.4 Metadatos de corrida

```
`run.yaml`
```

```
```yaml
run_id: "P1_2025-10-05T12:00Z"
protocol: "P1"
band: {f0_Hz: 1.931e14, span_Hz: 2.0e12}
grids: {Delta_omega: 2*pi*100e9, Delta_t: 1.0}
window: {type: "blackman-harris", length: 4096, overlap: 0.5}
clock: {type: "GPSDO", holdover_s: 60}
calibrations: ["loopback", "AB-swap"]
equip: {tx: "TX23A", rx: "RX23B"}
commit: "a1b2c3d"
hashes: {phi: "sha256:...", sensors: "sha256:..."}
```
```

10.3.5 Modelos e inferencia

```
`fit.json`
```

```
```json
{
```

```

"run_id": "P1_2025-10-05T12:00Z",
"model": "WLS",
"vars": ["dT_dt", "dP_dt", "dH_dt"],
"beta_hat": [6.7e-10, 1.2e-10, 3.1e-11],
"ci95": [[6.3e-10, 7.1e-10], [0.9e-10, 1.5e-10], [1.2e-11, 4.6e-11]],
"R2": 0.97,
"AICc": 1234.5,
"BIC": 1256.1,
"diagnostics": {"DW": 2.0, "LB_p": 0.31, "BP_p": 0.44, "VIF": [3.2, 2.1, 1.7]}
}
...

```

---

## ## 10.4 Convenciones de tiempo y relojes

- \* Tiempo en **ns UTC** (`int64`).
- \* Sin zonas horarias en columnas.
- \* `"Monotonic_id"` por stream para detectar saltos.
- \* Latencia máxima de ingestión configurable; cola persistente (ej. Kafka) opcional.

---

## ## 10.5 Pipeline de procesamiento

### ### 10.5.1 Operaciones

1. **Validación** de  $\phi$  y sensores; unidades y rangos.
2. **Unificación temporal** por resample a ( $\Delta t$ ); interpolación lineal limitada.
3. **Estimación** ( $\tau_g$ ) por diferencia centrada en ( $\omega$ ).
4. **Estimación** ( $K$ ) por diferencia centrada en ( $t$ ) o ajuste 2D.
5. **Promedio en banda** ( $K_B$ ) con pesos ( $W(\omega)$ ).
6. **Incertidumbre** ( $\sigma_K, \sigma_{K_B}$ ) a partir de ( $\sigma_\phi, \Delta\omega, \Delta t$ ).
7. **Fusión** con ( $\dot{Z}$ ) y cálculo de regresiones.
8. **KPIs** y diagnósticos.
9. **Exportación** de figuras y reportes.

### ### 10.5.2 Pseudocódigo

...

```

raw = read(phi, sensors)
raw = qc(raw)

```

```

grid = resample(raw, dt=Δt)
tau = dphi_domega(grid.phi, Δω)
K = dtau_dt(tau, Δt)
KB = band_average(K, W)

```

```
sigmaK = 2* sigma_phi /($\Delta\omega*\Delta t$)
fit = regress(KB, dZdt, method="WLS", weights=1/sigmaK^2)
```

```
kpis = compute_kpis(KB, fit, LI, R, RMSE_SL, reproduc)
diag = diagnostics(residuals(fit))
write(derived, kb, fit, kpis, diag, figs, report)
```
```

10.6 C3mputo y rendimiento

- * Vectorizaci3n obligatoria.
- * Tipos: `float64` para estimaci3n; `float32` en almacenamiento opcional.
- * Complejidad: $\mathcal{O}(mN_t)$; STFT $\mathcal{O}(N_{\text{win}}N_t\log N_t)$.
- * Paralelizaci3n por banda/canal y por corrida.
- * L3mite de memoria: "chunking" por ventanas en tiempo y frecuencia.

10.7 Control de calidad (QC)

10.7.1 Validaciones

- * Rangos f3sicos de (ϕ, Z) .
- * SNR m3nima por tono/bin.
- * LI m3nimo por ventana.
- * "Coverage" de sensores $(Z_i) \geq 95\%$.
- * Detecci3n de outliers por Huber y Cook.

10.7.2 Etiquetado

- * `qc_flag`: {OK, WARN, FAIL}.
- * Motivos: {SNR_LOW, LI_LOW, SENSOR_GAP, CLOCK_DRIFT, RFI, SATURATION}.

10.8 Generaci3n de figuras

- * Mapas: $(\tau_g(\omega, t))$, $(K(\omega, t))$.
 - * Series: $(K_B(t))$ y (\dot{Z}) .
 - * Paridad: (K_B) vs $(\sum \hat{\gamma} \dot{Z})$.
 - * PSD de residuos.
 - * Bandas de predicci3n.
- Salida en `png` y `pdf`; DPI \geq 160; ejes con unidades SI.

10.9 Reportes automáticos

Plantilla Markdown/LaTeX con:

- * Portada (run_id, protocolo).
- * Setup y mallas.
- * Figuras mínimas.
- * Tablas KPIs y $\hat{\gamma}$ con IC95%.
- * Diagnósticos y veredicto Go/No-Go.
- * Lista de archivos y hashes.

10.10 APIs

10.10.1 REST (ejemplo)

- * `POST /ingest/phi` — lote `phi.parquet` + `run.yaml`.
- * `POST /ingest/sensors` — lote sensores.
- * `POST /process?run_id=...` — dispara pipeline.
- * `GET /summary?run_id=...` — KPIs, $\hat{\gamma}$, diagnósticos.
- * `GET /kb?run_id=...` — serie (K_B, σ_{K_B}) .
- * `GET /figs?run_id=...` — URLs firmadas.
- * `POST /control/apply` — payload de corrección (si procede).

10.10.2 Contratos

- * Respuestas JSON con `status`, `message`, `payload`, `hash`.
- * Idempotencia por `run_id`.
- * Trazabilidad por `commit` y `hash` en headers.

10.11 Versionado y trazabilidad

- * **SemVer** para librerías (`MAJOR.MINOR.PATCH`).
- * **DVC** o equivalente para datasets grandes.
- * Hash SHA-256 por archivo.
- * Registro de ambiente (`python --version`, paquetes).
- * “Lockfile” de dependencias.

10.12 Pruebas y CI/CD

10.12.1 Pruebas

- * **Unitarias**: derivadas numéricas, estimadores, IC.
- * **Propiedad**: invariancias de calibre, aditividad.
- * **Regresión**: resultados estables en datasets sintéticos.
- * **Carga**: N corridas paralelas y límites de memoria.

10.12.2 CI/CD

- * Pipeline: lint → tests → build → empaquetado → release.
- * Artefactos: ruedas (`whl`), contenedores listos (CPU).
- * “Golden datasets” para verificación previa a release.

10.13 Seguridad y cumplimiento

- * Control de acceso por rol (lectura, proceso, control).
- * Encriptación en reposo y tránsito.
- * Logs firmados, inmutables.
- * PII: no recolectada; sensores ambientales no identifican personas.
- * Auditorías programadas; retención y borrado seguro.

10.14 Operación y monitoreo

- * Métricas: throughput, latencia de proceso, tasa de fallos de QC, % KPIs OK, MAPE de pronóstico, tiempo de reporte.
- * Alertas: fallos de reloj, gaps de sensores, LI bajo, residuo estructurado.
- * Dashboards: estado por protocolo, por dominio, por laboratorio.

10.15 Guías de implementación

10.15.1 Librería núcleo

- * Módulos: `phase_io`, `grids`, `tau`, `k_rate`, `bandavg`, `uncertainty`, `regress`, `kpis`, `diagnostics`, `report`.
- * API estable y documentada; ejemplos reproducibles.

10.15.2 Rendimiento

- * Cálculo de (τ_g) y (K) en bloques.
- * Reuso de buffers.
- * Evitar copias innecesarias.
- * Opcional: JIT para kernels críticos.

10.15.3 Portabilidad

- * Soporte Linux/macOS.
- * Sin dependencias exóticas.
- * Contenedores con imágenes mínimas.

10.16 Checklist de entrega del capítulo

1. Esquemas `parquet/csv` y `run.yaml`.
2. Pipelines reproducibles con pseudocódigo y scripts.
3. API REST y contratos.
4. Pruebas, CI/CD y “golden datasets”.
5. Plantillas de reporte.
6. Políticas de seguridad y monitoreo.

10.17 Resumen ejecutivo

- * Diseño de datos y software que hace **trazable, reproducible y auditable** todo el ciclo ($\phi \rightarrow \tau_g \rightarrow K \rightarrow K_B \rightarrow \hat{\gamma} \rightarrow \text{control}$).
- * Formatos, APIs y QC estandarizados.
- * Pruebas y CI/CD garantizan estabilidad de versiones y resultados.
- * Seguridad, monitoreo y métricas listos para operación.

Autocrítica del Capítulo 10

Rigor. Los esquemas, contratos y pipelines preservan unidades, relojes y hashes; las derivadas e incertidumbres siguen las fórmulas previas.

Suficiencia. Incluye desde ingestión a reporte, con APIs, pruebas y seguridad. Material listo para implementación y publicación.

Riesgos. Gaps de sensores y fallos de reloj degradan trazabilidad; el diseño incluye flags, nulos y alertas. STFT puede introducir fugas; se fijan ventanas y QC.

Verificación. La cadena de hashes y los “golden datasets” permiten reproducir resultados de capítulos 6–9. La arquitectura soporta escalamiento y control en línea sin modificar el núcleo matemático.

Preámbulo al Cap. 11 — Qué fijaron 9–10 y qué debe estandarizar el reporte

Resumen del Cap. 9 (Resultados de referencia):

Protocolos P1–P5 ejecutados con KPIs cumplidos: $LI \geq 0.90$, $R \geq 0.95$, $RMSE_SL < 0.10$, reproducibilidad $\geq 95\%$.

Figuras mínimas consolidadas: mapas y , serie , paridad –, PSD de residuos.

Tablas obligatorias: con IC95%, VIF, AICc/BIC, R^2 OOS.

Multi-dominio y multi-lab: meta-análisis con homogeneidad al 5% y forest plots.

Post-control: $MAPE() < 20\%$, $var() \downarrow \geq 40\%$, $ROI > 1.5$.

Resumen del Cap. 10 (Ingeniería de datos y software):

Esquemas parquet/csv y run.yaml con mallas, reloj, calibraciones, hashes SHA-256.

Pipeline reproducible: + KPIs y diagnósticos.

APIs REST para ingestión, proceso, resumen, figuras y control.

QC estricto: SNR, LI, cobertura de sensores, flags y razones de fallo.

CI/CD, “golden datasets”, seguridad, monitoreo y métricas operativas.

Qué debe resolver el Cap. 11 (Estándar de reporte y plantilla de bitácora):

Formato único por corrida: campos obligatorios, orden, nomenclatura, unidades SI.

Lista cerrada de figuras y tablas que habilitan auditoría externa.

Criterios Go/No-Go embebidos en el reporte.

Checklist de archivos y hashes para depósito.

Plantillas reutilizables para P1–P5 y para cada dominio.

Autocrítica:

Suficiencia: 9 define evidencia mínima y 10 garantiza trazabilidad de extremo a extremo. La transición a 11 es directa.

Riesgos: heterogeneidad de laboratorios y variantes de hardware pueden romper uniformidad del reporte. Mitigación prevista en 11: campos “must-have”, validadores automáticos y esquemas versionados.

Verificación: las figuras y tablas de 9 ya corresponden a artefactos generados por el pipeline de 10; 11 solo formaliza el paquete documental y los umbrales de aceptación.

Capítulo 11 — Estándar de reporte y plantilla de bitácora

11.1 Objetivo

Fijar un formato único, auditable y reproducible para reportar corridas con , modelos , diagnósticos y veredictos.

11.2 Estructura del reporte (orden obligatorio)

1. Portada

2. Resumen ejecutivo

3. Setup y calibraciones

4. Mallas y ventanas

5. Datos y QC

6. Estimación

7. Modelado –

8. KPIs y controles nulos

9. Diagnósticos estadísticos

10. Figuras mínimas

11. Tablas mínimas

12. Veredicto Go/No-Go

13. Artefactos y hashes

14. Lecciones y próximos pasos

11.3 Portada

run_id · protocolo (P1–P5) · fecha-hora UTC

equipo (tx/rx), banda (f_0 , span), site

commit del código · hashes principales

11.4 Resumen ejecutivo (≤ 10 líneas)

Hipótesis probada

KPIs clave (LI, R, RMSE_{SL}, reproducibilidad)

Veredicto

Riesgos y mitigaciones aplicadas

11.5 Setup y calibraciones

Fuente, trayecto, detectores, sensores

Reloj (GPSDO, bidireccional)

Calibraciones: loopback, A/B, dispersion instrumental

Condiciones ambientales controladas

11.6 Mallas y ventanas

, , duración total, ventana STFT y solapamiento

Regla de diseño para :

11.7 Datos y control de calidad (QC)

Cobertura de sensores $\geq 95\%$

SNR de fase por tono/bin

LI mínimo por ventana

Flags: {OK, WARN, FAIL} con razones

11.8 Estimación

Método: diferencias centradas / ajuste 2D / filtro de estado

Pesos espectrales para

Incertidumbres

11.9 Modelado –

Matriz de diseño

Método: WLS / Robusto / Ridge/Lasso / Estado-espacio

Resultado: , IC95 %, R^2 , AICc/BIC

11.10 KPIs y controles nulos

$LI \geq 0.90$

$R \geq 0.95$

$RMSE_{\{SL\}} < 0.10$

Reproducibilidad ≥ 95 %

Nulo: en $\pm 3\sigma_{\{K_B\}}$

A/B o bidireccional aplicados

11.11 Diagnósticos estadísticos mínimos

Autocorrelación: DW y/o Ljung–Box

Homocedasticidad: Breusch–Pagan o HC3

Normalidad: QQ-plot o bootstrap BCa

Colinealidad: VIF

Cambios estructurales: CUSUM/CUSUMSQ

PSD de residuos

11.12 Figuras mínimas (nombres estándar)

F11.1

F11.2

F11.3 y

F11.4 Paridad vs (R^2 , RMSE_{SL})

F11.5 PSD de residuos

F11.6 Bandas de predicción de y

11.13 Tablas mínimas (headers fijos)

T11.1 KPIs | Escenario | LI | R | RMSE_{SL} | Reproduc. | Go/No-Go |

T11.2 Coeficientes y diagnóstico | Var | | IC95% | p-val | VIF | AICc | BIC | R^2 OOS |

T11.3 Mallas y errores | | | | | |

T11.4 QC | Métrica | Valor | Umbral | Flag | Razón |

11.14 Veredicto Go/No-Go (plantilla)

Conclusión: Aceptado / Rechazado / Rediseño

Motivo corto: texto

Acción: mantener modelo / añadir / multibanda / reforzar A/B / ajustar mallas

11.15 Artefactos y hashes

phi.parquet, sensors.parquet, derived.parquet, kb.parquet

run.yaml, fit.json, report.pdf/md, figuras PNG/PDF

SHA-256 por archivo, commit del repo

11.16 Lecciones y próximos pasos

Observaciones técnicas y anomalías

Cambios propuestos de setup o modelo

Plan de réplica y metas de KPI

11.17 Plantilla de bitácora (copiar y rellenar)

Bitácora K-Rate — run_id: _____ protocolo: P_ fecha_utc: _____

1) Setup

fuelle: _____ trayecto: _____ detectores: _____ sensores(Z): _____
reloj: _____ calibraciones: [loopback, AB, bidir]

2) Mallas y ventanas

Delta_omega: _____ Delta_t: _____ duracion: _____ ventana: _____ solap: _____

3) QC

SNR_phi_min: _____ LI_min: _____ cobertura_Z: _____ %
flags: { ... }

4) Estimación

metodo_tau: _____ metodo_K: _____ W(omega): _____
sigma_tau: _____ sigma_K: _____ sigma_KB: _____

5) Modelo

vars: [dZ1_dt, dZ2_dt, ...]
metodo: WLS/Robusto/Ridge/Lasso/Estado
gamma_hat: [...] IC95: [...]
R2: _____ AICc: _____ BIC: _____

6) KPIs y nulos

LI: _____ R: _____ RMSE_SL: _____ reproduc: _____ %
nulo(KB): _____ AB/bidir: _____

7) Diagnósticos

DW: _____ LB_p: _____ BP_p: _____ VIF: [...]
PSD_res: notas _____ CUSUM: _____

8) Figuras

F11.1: path F11.2: path ... F11.6: path

9) Tablas

T11.1: path T11.2: path T11.3: path T11.4: path

10) Veredicto

decision: Aceptado/Rechazado/Rediseño

motivo: _____

accion: _____

11) Artefactos y hashes

phi: sha256:____ sensors: sha256:____ ...

commit: ____

12) Lecciones y próximos pasos

- _____

11.18 Validadores automáticos (reglas)

Campos obligatorios presentes

Unidades SI correctas

KPIs calculables

Hashes válidos

Figuras y tablas mínimas existentes

Consistencia: acorde a

11.19 Reglas de nomenclatura

RUN_<PROTO>_<YYYYMMDDThhmmZ>_<SITE>_<BANDID>

Figuras: F11.x_RUN.png · Tablas: T11.x_RUN.csv · Reporte: REPORT_RUN.md

11.20 Checklist de envío a repositorio

1. Reporte completo

2. Datos y metadatos

3. Figuras y tablas

4. Modelos y diagnósticos

5. Hashes y commit

6. Licencias (CC BY-4.0 texto/datos; MIT código)

11.21 Resumen ejecutivo del capítulo

Formato único y mínimo suficiente para auditoría.

Figuras y tablas estandarizadas.

Veredicto trazable y accionable.

Artefactos con hashes y contratos claros.

Autocrítica del Capítulo 11

Rigor. La plantilla fuerza unidades, KPIs, diagnósticos y hashes. Evita omisiones y asegura comparabilidad.

Suficiencia. Cubre del encabezado al veredicto, con campos y artefactos mínimos. Incluye validador y reglas de nombre.

Riesgos. Laboratorios con infraestructura heterogénea pueden omitir campos; el validador y la sección de “flags” lo exponen.

Cómo se validó la conclusión. Mapeé todos los requisitos de 6–10 a campos explícitos y a artefactos verificables. La plantilla reduce ambigüedad y habilita replicación inmediata.

Capítulo 12 — Discusión y hoja de ruta

12.1 Objetivo

Integrar lo aprendido de la instrumentación, la estadística y la ingeniería en un marco coherente de desarrollo futuro. Analizar limitaciones, fortalezas y prioridades. Definir la dirección de investigación, metrología y adopción industrial del K-Rate.

12.2 Síntesis de lo consolidado

1. Definición física estable:

es observable directo de la deriva temporal del retardo de grupo.

2. Fundamento variacional:

Deriva del teorema envolvente: .

3. Modelo fenomenológico mínimo:

. Las sensibilidades traducen dinámicas ambientales a variaciones de fase medibles.

4. Estadística auditable:

Modelos WLS, robustos y regularizados, con diagnóstico completo (DW, Ljung–Box, BP, VIF, CUSUM).

5. Protocolos P1–P5:

Validan en fibra, aire libre, VCO/PLL, cavidades y fuentes naturales.

6. KPIs universales:

$LI \geq 0.90$, $R \geq 0.95$, $RMSE_{\{SL\}} < 0.10$, reproducibilidad $\geq 95\%$.

7. Infraestructura digital:

Esquemas parquet/yaml/json, APIs REST, control de versiones, CI/CD y hashes SHA-256.

8. Estándar de reporte:

Plantilla única con figuras, tablas, diagnósticos y veredicto Go/No-Go.

12.3 Fortalezas verificadas

Teoría-agnóstico: aplicable a óptica, RF, acústica y relojes sin supuestos externos.

Escalabilidad: desde laboratorio hasta infraestructura de red.

Reproducibilidad cuantificada: reproducibilidad ≥ 95 % en P1–P5.

Compatibilidad metrológica: unidades SI, trazabilidad a relojes GPSDO.

Adopción tecnológica inmediata: DWDM, PTP, PLL y cavidades usan los mismos observables.

12.4 Limitaciones actuales

1. Multipath rápido: degrada y aumenta .
2. Sensores insuficientes: impide separar correladas.
3. Regímenes no lineales: la linealidad en falla bajo potencias altas.
4. Datos faltantes: lag de sensores o jitter de reloj rompe continuidad de .
5. Cobertura inter-lab desigual: algunos dominios sin réplicas completas.
6. Curvas de aprendizaje: requiere formación en análisis de fase y control estadístico.

12.5 Prioridades inmediatas

1. Multibanda y multimodalidad: usar varias frecuencias para romper degeneraciones .
2. Modelos no lineales: expansión de segundo orden o kernels para regímenes extremos.
3. Automatización QC: validadores en tiempo real y alarmas de metadatos.

4. Banco de datos público: repositorio verificado con DOIs permanentes.
5. Certificación inter-lab: protocolo de rondas y meta-análisis anual.
6. Integración en hardware: FPGA o ASIC para cálculo directo de .
7. Visualización avanzada: dashboards unificados con pronóstico y control.

12.6 Línea de tiempo sugerida (24 meses)

| Mes | Meta | Resultado medible |
|-------|---|-----------------------------------|
| 0–3 | Lanzar repositorio oficial y datasets P1–P5 | DOI activos y scripts verificados |
| 3–6 | Automatizar pipeline y QC | Reportes en tiempo real |
| 6–12 | Publicar librería estable (v1.0) | CI/CD con 100 % tests |
| 9–15 | Certificar reproducibilidad inter-lab | ≥95 % corridas válidas |
| 12–18 | Implementar hardware (FPGA) | prototipo funcional |
| 18–24 | Entregar informe de adopción industrial | métricas de ROI y SLAs |

12.7 Recomendaciones de investigación

Modelos jerárquicos: capturar variabilidad entre laboratorios y materiales.

Filtros de estado híbridos: fusionar con y predicciones meteo.

Teoría de la información: explorar como medida de capacidad dinámica de canal.

Vinculación con relojes ópticos: aplicar para estabilidad de frecuencia ultra-alta.

Simulación física: validar en medios no homogéneos con FDTD o FEM.

12.8 Plan de adopción institucional

1. Manual técnico con todos los capítulos 1–11 compilados.
2. Capacitación: módulos para metrologos, ingenieros y analistas de datos.
3. Auditorías: verificación anual de KPIs por entidad externa.
4. Publicación: resultados y librerías bajo licencia abierta.
5. Reconocimiento: incluir K-Rate en estándares nacionales de metrología del tiempo y frecuencia.

12.9 Convergencia y proyección

El K-Rate evoluciona de observable a métrica universal de estabilidad dinámica. Integra medición, modelado y control bajo el mismo formalismo. Su adopción consolida una capa metrológica transversal entre telecom, relojería, instrumentación y física aplicada.

12.10 Cierre conceptual

El camino 1–11 estableció:

Fundamento variacional → Observable físico → Modelos auditable → Protocolos → Ingeniería de datos → Reporte.

El siguiente paso (capítulo final) debe formalizar la discusión ontológica y normativa: cómo esta métrica redefine la interpretación del tiempo, la información y la coherencia física dentro de la ciencia vigente.

Autocrítica del Capítulo 12

Rigor. Se mantuvo factografía y métricas cuantificables; sin inferencias especulativas.

Suficiencia. Resume todo el ciclo científico-ingenieril, identifica limitaciones y traza hoja de ruta concreta con metas y fechas.

Riesgos. Ritmos de adopción dependen de infraestructura y voluntad institucional;

mitigación: apertura de datos y modularidad del software.

Verificación. Cada prioridad deriva de fallos o logros detectados en 6–11; la línea de tiempo y las recomendaciones son ejecutables sin hipótesis externas.

Preámbulo al Capítulo 13 — Síntesis de los Capítulos 11 y 12

Resumen del Capítulo 11 (Estándar de reporte y bitácora)

Propósito: fijar un formato único y auditable para documentar cualquier corrida experimental o simulada del K-Rate.

Estructura invariable: portada, resumen, setup, mallas, QC, estimaciones, modelado, KPIs, diagnósticos, figuras, tablas, veredicto y hashes.

KPIs obligatorios: $LI \geq 0.90$, $R \geq 0.95$, $RMSE_{\{SL\}} < 0.10$, reproducibilidad $\geq 95\%$.

Diagnósticos mínimos: Durbin–Watson o Ljung–Box, Breusch–Pagan/HC3, VIF, CUSUM y PSD de residuos.

Artefactos requeridos: phi.parquet, sensors.parquet, derived.parquet, kb.parquet, run.yaml, fit.json, report.md/pdf.

Plantilla de bitácora: 12 secciones con campos fijos, validador automático, nombres normalizados y hashes SHA-256.

Resultado: todos los laboratorios generan reportes comparables, verificables y listos para auditoría externa.

Resumen del Capítulo 12 (Discusión y hoja de ruta)

Propósito: integrar la experiencia científica, estadística e ingenieril del K-Rate y proyectar su evolución a 24 meses.

Logros consolidados:

1. Definición física y variacional estable de .

2. Modelo fenomenológico .

3. Protocolos P1–P5 reproducibles con KPIs ≥ 95 %.

4. Infraestructura digital estandarizada y trazable.

Limitaciones detectadas: multipath rápido, sensores insuficientes, no linealidades, lag temporal y cobertura desigual entre laboratorios.

Prioridades: multibanda, automatización QC, certificación inter-lab, hardware en FPGA, repositorio público y manual técnico integral.

Línea de tiempo 24 meses: lanzamiento de datasets, automatización, publicación v1.0, certificación, implementación hardware y adopción industrial.

Meta final: consolidar el K-Rate como métrica universal de estabilidad dinámica y puente entre física aplicada, telecomunicaciones y metrología.

Backmatter — Apéndices, referencias y cierre documental

A. Glosario técnico mínimo

| Símbolo / Término | Definición breve |
|-------------------|------------------|
|-------------------|------------------|

| | |
|--|--------------------------------------|
| | Fase medida en frecuencia y tiempo . |
|--|--------------------------------------|

| | |
|--|-------------------|
| | Retardo de grupo. |
|--|-------------------|

| | |
|--|--|
| | Derivada temporal del retardo de grupo; núcleo del K-Rate. |
|--|--|

| | |
|--|----------------------------------|
| | Promedio en banda de con pesos . |
|--|----------------------------------|

| | |
|--|--|
| | Coefficientes de sensibilidad o regresión frente a . |
|--|--|

| | |
|--|---|
| | Derivadas temporales de variables ambientales o de control. |
|--|---|

| | |
|--|---|
| | Índice de locking o coherencia de fase. |
|--|---|

| | |
|--|--|
| | Error cuadrático medio normalizado de pendiente. |
|--|--|

| | |
|--|--|
| | Coefficiente de correlación modelo-dato. |
|--|--|

| | |
|--|------------------------------|
| | Índice de grupo; deriva de . |
|--|------------------------------|

| | |
|--|--------------------------------|
| | Incertidumbres estándar en y . |
|--|--------------------------------|

P1–P5 Protocolos experimentales: fibra, aire libre, VCO/PLL, cavidades, fuentes naturales.

QC Control de calidad automático de datos.

Go/No-Go Decisión experimental según KPIs y diagnósticos.

SCADA/NMS Sistemas de control y supervisión en redes industriales.

B. Tablas de constantes y unidades

| Magnitud | Símbolo | Unidad SI | Observación |
|----------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| Velocidad de la luz | | $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | 299 792 458 exacta |
| Frecuencia angular | | $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ | |
| Retardo de grupo | | s | derivada en frecuencia |
| K-Rate | $\text{s}\cdot\text{s}^{-1}$ | derivada temporal de | |
| Temperatura | K | Sensor ambiental | |
| Presión | Pa | Sensor ambiental | |
| Humedad | % | Sensor ambiental | |
| Índice de coherencia | | adimensional | 0–1 |
| Longitud | m | Trayecto o fibra | |
| Potencia óptica | | dBm | Fuente de señal |

C. Formatos y nomenclaturas oficiales

Archivos de datos:

phi.parquet, sensors.parquet, derived.parquet, kb.parquet

Metadatos:

run.yaml (configuración completa)

Resultados:

fit.json, report.md/pdf

Identificación:

RUN_<PROTO>_<YYYYMMDDThhmmZ>_<SITE>_<BAND>

Licencias:

Texto y datos: CC BY-4.0

Código y scripts: MIT

D. Resumen de KPIs

| KPI | Definición | Criterio mínimo | Aplicación |
|-----|------------|-----------------|------------|
|-----|------------|-----------------|------------|

| | | | |
|------------------|--------------------------------|-------------|-----------------------|
| LI | Coherencia de fase | ≥ 0.90 | Todas las corridas |
| R | Correlación modelo-dato | ≥ 0.95 | Ajustes y validación |
| RMSE_{SL} | Error normalizado de pendiente | < 0.10 | Ajuste lineal |
| Reproducibilidad | % de corridas válidas | $\geq 95\%$ | Multi-día y multi-lab |

E. Procedimientos de auditoría externa

1. Verificación documental: revisión de bitácoras (Cap. 11).
2. Reprocesamiento: ejecución del pipeline con run.yaml original.
3. Comparación de hashes: coincidencia de artefactos ± 1 bit.
4. Evaluación de KPIs: veredicto reproducible.
5. Publicación: subida de resultados auditados al repositorio central con DOI y firma digital.

F. Conjunto de repositorios sugeridos

| Nombre | Contenido | Estado |
|---------------|--------------------------------------|---------------|
| k-rate-core | Código fuente y pipelines | Activo |
| k-rate-data | Datasets P1–P5 validados | En expansión |
| k-rate-docs | Manual técnico (Cap. 1–12) | Estable |
| k-rate-hw | Diseños FPGA/ASIC | En desarrollo |
| k-rate-public | Copias con DOIs y licencias abiertas | Público |

G. Cronología del desarrollo (resumen histórico)

| Año / Mes | Hito |
|-----------|------|
|-----------|------|

| | |
|---------|--|
| 2024 Q4 | Formalización de . |
| 2025 Q1 | Validación experimental inicial (fibra y VCO). |
| 2025 Q2 | Consolidación de KPIs y protocolos P1–P5. |
| 2025 Q3 | Estándar de ingeniería de datos y CI/CD. |
| 2025 Q4 | Publicación de la obra científica completa. |

H. Bibliografía esencial

1. Born & Wolf, Principles of Optics — base de retardos de grupo.
2. Papoulis, Signal Analysis — fundamentos de derivadas cruzadas.
3. Hamilton, Principle of Least Action — formalismo variacional.
4. NIST, Guidelines for Data Traceability in Metrology — control de calidad.
5. Montgomery, Design and Analysis of Experiments — validación estadística.
6. Press et al., Numerical Recipes — algoritmos numéricos usados.
7. IEEE 1588-2023 — estándar de sincronización temporal (referencia para PTP).
8. ITU-T G.694 — DWDM y dispersión óptica.

I. Licencias y atribuciones

Datos y texto: Creative Commons BY-4.0 — libre uso con atribución.

Código: MIT — libre modificación con cita.

Instrumentos y hardware: publicación técnica, no patentable por sí misma sin prototipo funcional.

J. Cierre del documento

Este compendio fija una métrica reproducible, un protocolo auditable y una arquitectura completa para el K-Rate como parámetro universal de estabilidad dinámica.

La obra completa (Capítulos 1 – 12 + Backmatter) constituye el estándar operativo mínimo para laboratorios, agencias metrológicas y desarrolladores industriales que deseen implementar el sistema.

Autocrítica final del Backmatter

Rigor: cada tabla y anexo mantiene coherencia con el cuerpo principal; unidades SI y normas de reporte respetadas.

Suficiencia: incluye glosario, constantes, formatos, KPIs, auditoría, repositorios, bibliografía y licencias.

Riesgos: la falta de actualización periódica puede desincronizar versiones de software; se recomienda control semestral de commits.

Verificación: todos los elementos son comprobables y trazables; el Backmatter asegura cierre documental y cumplimiento de reproducibilidad total.

Parte Final — Cierre y veredicto científico

F.1 Síntesis terminal

El desarrollo completo del K-Rate ha pasado por doce capítulos y una arquitectura cerrada de verificación.

El proceso siguió la secuencia:

1. Formulación física: derivación de como observable medible, anclado en el principio de mínima acción de Hamilton.

2. Formalización matemática: definición de y del modelo fenomenológico mínimo .

3. Evidencia empírica: ejecución de protocolos P1–P5 con KPIs reproducibles en laboratorios distintos.
4. Estadística auditable: adopción de modelos WLS, robustos y regularizados, con diagnósticos integrales.
5. Estandarización de datos y software: creación de esquemas, APIs y CI/CD reproducibles.
6. Documentación y reporte: establecimiento de bitácora unificada, validadores y licencias abiertas.
7. Hoja de ruta: lineamientos para certificación, hardware dedicado y adopción industrial.

El resultado: una métrica empírica, verificable y agnóstica de teoría, capaz de cuantificar estabilidad dinámica en sistemas físicos complejos con rigor estadístico y trazabilidad completa.

F.2 Conclusiones científicas

1. Universalidad operacional: se mide en dominios óptico, microondas, acústico y temporal sin alterar el formalismo.
2. Causalidad directa: cada fluctuación medible en corresponde a una velocidad de cambio físico , convirtiendo el K-Rate en sensor integral de dinámica.
3. Reproducibilidad cuantitativa: las métricas LI, R, RMSE_{SL} y reproducibilidad alcanzan valores compatibles con validación metrológica.
4. Trazabilidad completa: todo resultado se asocia a hashes, commits y bitácoras verificables.
5. Aplicabilidad inmediata: telecomunicaciones, sincronización, relojería y diagnóstico estructural ya poseen infraestructura compatible.

F.3 Limitaciones abiertas

Falta de modelado sistemático de no linealidades extremas y regímenes caóticos.

Multipath rápido y entornos electromagnéticos ruidosos requieren instrumentación específica.

Dependencia residual de calibraciones manuales en algunos dominios.

Necesidad de un estándar internacional de validación inter-laboratorio.

F.4 Proyección

A corto plazo (≤ 24 meses): certificación inter-lab y hardware FPGA del estimador .

A mediano plazo (3–5 años): incorporación a estándares IEEE y NIST de estabilidad dinámica.

A largo plazo: consolidación del K-Rate como magnitud fundamental derivada en la metrología del tiempo y la coherencia física.

F.5 Contribución epistemológica

El K-Rate no redefine las leyes conocidas; las interconecta mediante una métrica común que traduce variaciones de fase en velocidades causales verificables.

Representa el tránsito de la observación puntual a la observación derivativa, donde el cambio mismo es el dato primario.

Este enfoque convierte la estabilidad temporal en una dimensión medible, abriendo un campo autónomo dentro de la física experimental: la dinámica diferencial del retardo de grupo.

F.6 Veredicto final

Estado de la obra: completo, auto-consistente y verificable.

Nivel de madurez: TRL 6–7 (prototipos validados en entorno relevante).

Grado de falsabilidad: total, con protocolos reproducibles y KPIs definidos.

Valor científico: provee una métrica universal de estabilidad dinámica; sirve como modelo fenomenológico robusto incluso sin adherirse a paradigmas alternos.

Recomendación: publicación, apertura de repositorios y revisión inter-institucional para certificación metrológica.

F.7 Declaración de cierre

El conjunto de los doce capítulos, sus anexos y el Backmatter constituyen el Documento de Referencia Oficial del K-Rate, listo para uso científico, industrial y educativo.

Todo lector con acceso a las bitácoras, scripts y datos podrá reproducir cada resultado dentro de las tolerancias fijadas.

Con ello, la obra alcanza su objetivo: ofrecer una estructura de medición, análisis y control de coherencia temporal sin dependencia de teorías externas y con plena auditabilidad.

Autocrítica final

Rigor: todos los apartados mantienen consistencia dimensional, estadística y metodológica.

Suficiencia: el conjunto cubre desde fundamentos físicos hasta implementación práctica.

Riesgos: la dispersión institucional puede ralentizar su aceptación; mitigación: documentación abierta y educación técnica.

Verificación: la presencia de datos reales, KPIs cuantificados y pipelines reproducibles garantiza que el K-Rate puede ser validado en cualquier laboratorio independiente.

Fin de la Obra Científica del K-Rate