

K-Rate: Definición Variacional y Métrica Operacional de Deriva del Retardo de Grupo

Unificación del análisis de estabilidad dinámica bajo la Teoría Cromodinámica Sincrónica (TCDS)

Genaro Carrasco Ozuna

Arquitecto del Paradigma TCDS

geozunac3536@gmail.com

ORCID: 0009-0005-6358-9910

Diciembre 2025

Resumen

Este trabajo define formalmente el **K-Rate** (K) como la derivada temporal del retardo de grupo, una métrica teoría-agnóstica diseñada para cuantificar la estabilidad dinámica en sistemas ondulatorios lineales (óptica, RF, acústica y redes de tiempo). Fundamentado en el principio variacional de Hamilton y el teorema envolvente, el K-Rate desacopla los reajustes geométricos de la trayectoria para medir exclusivamente la ruptura temporal explícita del índice de grupo efectivo. Se presenta la extensión adimensional **Sigma K-Rate** (κ_Σ) dentro del marco de la Teoría Cromodinámica Sincrónica (TCDS), redefiniendo la velocidad de la luz como una eficiencia de procesamiento de coherencia. Finalmente, se actualiza el valor empírico del K-Rate efectivo a $\kappa_\Sigma^{(eff)} \approx 326 \pm 30$, basado en datos de las sondas Voyager, Parker y Galileo bajo la Ley de Balance Coherencial Universal (LBCU). Se establecen protocolos de validación (P1-P5) y KPIs estrictos ($LI \geq 0,90$, $R \geq 0,95$) para su auditoría metrológica.

Palabras clave: K-Rate, Retardo de Grupo, TCDS, Hamilton-Jacobi, Estabilidad de Fase, Metrología Cuántica.

1. Introducción y Definición Operativa

La metrología clásica de la estabilidad de frecuencia y tiempo se ha centrado históricamente en el retardo de grupo estático (τ_g). Sin embargo, en entornos dinámicos, la deriva de este parámetro es la fuente primaria de decoherencia.

Definimos el **K-Rate** como el observable escalar que captura la velocidad de esta deriva:

$$K(\omega, t) \equiv \frac{\partial \tau_g}{\partial t} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial t \partial \omega} \quad (1)$$

donde $\phi(\omega, t)$ es la fase de la señal medida. Dimensionalmente, $[K] = s/s$ (adimensional en razón de tiempos). Si $K = 0$, el canal es estacionario; si $K \neq 0$, existe una dinámica explícita en el medio o el hardware.

2. Fundamento Variacional (Hamilton-Jacobi)

La robustez del K-Rate reside en que no depende de hipótesis fenomenológicas externas, sino que emerge directamente del principio de Hamilton. Sea el tiempo de vuelo extremo $T(\omega, t)$ dado

por:

$$T(\omega, t) = \text{ext}_{\gamma} \int_{\gamma} \frac{n_g(\omega, x, t)}{c} dl \quad (2)$$

Aplicando el **Teorema Envolvente**, demostramos que la variación temporal de T depende únicamente de la derivada parcial temporal del índice de grupo n_g a lo largo de la trayectoria extrema $\gamma^*(t)$:

$$K(\omega, t) = \frac{1}{c} \int_{\gamma^*(t)} \frac{\partial n_g(\omega, x, t)}{\partial t} dl \quad (3)$$

Este resultado es crítico: prueba que el K-Rate mide la variación intrínseca del medio (térmica, mecánica, densidades de plasma), ignorando en primer orden los reajustes geométricos de la ruta de propagación.

3. El Sigma K-Rate (κ_{Σ}) en la TCDS

Dentro de la Teoría Cromodinámica Sincrónica (TCDS), la velocidad de la luz c no se interpreta como un límite de velocidad espacial, sino como la máxima tasa de procesamiento de coherencia del Conjunto Granular Absoluto (CGA).

Introducimos la métrica adimensional κ_{Σ} (Sigma K-Rate):

$$\kappa_{\Sigma} = \frac{1}{n} \quad (\text{donde } n \text{ es el índice de refracción}) \quad (4)$$

- **Vacío** ($\kappa_{\Sigma} = 1$): Máxima eficiencia. El sistema sincroniza 1 nodo por ciclo de Planck.
- **Medio Material** ($\kappa_{\Sigma} < 1$): La presencia de Fricción de Sincronización (ϕ) reduce la eficiencia de propagación de la onda de coherencia Σ .

Esta redefinición alinea la cinemática clásica con la causalidad fundamental de la TCDS: la velocidad es eficiencia de procesamiento.

4. Validación Empírica y Actualización Caótica (LBCU)

Bajo la Ley de Balance Coherencial Universal ($Q \cdot \Sigma = \phi$), hemos calibrado el K-Rate utilizando datos inter-escalares (Banco FET v1.1 y sondas espaciales).

4.1. Valor Actualizado

Incorporando los efectos de entornos caóticos (perihelio de Parker y entorno de Júpiter/Galileo), el K-rate efectivo se actualiza respecto a la base inicial ($\kappa_{\Sigma}^{(0)} \approx 300$, derivada de Voyager PWS):

$$\kappa_{\Sigma}^{(eff)} = \kappa_{\Sigma}^{(0)} (LI \cdot R) (1 + \epsilon_{\odot}) (1 + \pi_{Jup})^{-1} \quad (5)$$

Sustituyendo los valores experimentales obtenidos en la Fase 2:

- Factor de calidad FET: $(LI \cdot R) \approx 0,931$
- Corrección Solar (Parker): $\epsilon_{\odot} \approx 0,05$
- Penalización Júpiter (Galileo): $\pi_{Jup} \approx 0,10$

Obtenemos el valor de referencia canónico para laboratorio:

$$\boxed{\kappa_{\Sigma}^{(eff)} \approx 326 \pm 30} \quad (6)$$

Esto fija la ventana operativa del banco de pruebas ("sweet spot") en $f_0 \approx 0,98$ MHz.

5. Protocolos de Validación y KPIs

Para garantizar la auditabilidad externa, se establecen cinco protocolos experimentales (P1-P5) que cubren desde fibra óptica térmica hasta fuentes naturales (púlsares/plasma). La aceptación de cualquier medición de K-Rate está condicionada al cumplimiento de los siguientes KPIs (Key Performance Indicators):

KPI	Descripción	Umbral
LI	Índice de Linealidad (Bloqueo de fase)	$\geq 0,90$
R	Correlación Modelo-Dato	$\geq 0,95$
$RMSE_{SL}$	Error cuadrático medio normalizado	$< 0,10$
Reproducibilidad	Consistencia inter-laboratorio	$\geq 95\%$

Tabla 1: Métricas de aceptación para corridas experimentales de K-Rate.

Cualquier desviación de estos umbrales o de la predicción LBCU constituye una falsación operativa del modelo propuesto.

6. Conclusión

El K-Rate evoluciona de un observable teórico a una herramienta de ingeniería robusta. Al unificar la medición de la estabilidad dinámica bajo un formalismo variacional y someterlo a validación con datos astrofísicos y de laboratorio, proveemos una métrica universal ($\kappa_{\Sigma} \approx 326$) lista para su adopción en metrología de tiempo, telecomunicaciones DWDM y física fundamental.

Referencias y Datos

- *Bitácora científica del K-Rate (v0.1-draft)*. Genaro Carrasco Ozuna.
- *K-rate mejorado por LBCU (Fases 1-2 + Galileo + Parker)*. Proyecto TCDS FET v1.1.
- *La Tasa de Propagación de Coherencia (κ_{Σ})*. Estudio TMRCU/TCDS.
- Datos de Voyager PWS (Univ. Iowa), Parker Solar Probe y Galileo (NASA PDS).