

Especificación de Interfaz de Entrada/Salida (I/O) - Sistema de Predictores Universales

Arquitectura de Sistemas

February 18, 2026

Contents

1	Resumen Ejecutivo	2
2	Vector de Configuración (Hyper-Inputs)	2
3	Flujo de Entrada (Data Injection)	2
3.1	1. Fase de Calibración (Bootstrapping)	2
3.2	2. Fase Operativa (Online Stream)	2
4	Salidas del Sistema (System Outputs)	3
4.1	1. Señal de Control (Prediction Signal)	3
4.2	2. Indicadores de Estado (State Telemetry)	3
5	Diagrama de I/O Abstracto	4
5.1	Ciclo de Proceso Interno	4
6	Persistencia (Snapshotting)	4
6.1	Protocolo de Snapshotting Atómico y Verificado	5

1 Resumen Ejecutivo

Este documento define la interfaz abstracta de Entrada/Salida (I/O) para el Sistema de Predictores Universales, independiente de su implementación específica (Python/JAX, C++, Rust, FPGA). Describe los vectores de configuración necesarios para instanciar el sistema, el flujo de datos en tiempo de ejecución y la estructura de las señales de salida y telemetría.

2 Vector de Configuración (Hyper-Inputs)

El sistema se inicializa mediante un vector de configuración Λ que define la topología y sensibilidad de los módulos. Estos parámetros suelen ser estáticos durante la sesión de operación o calibrados por un meta-optimizador externo.

Parámetro	Símbolo	Descripción Funcional
Regularización Entrópica	ϵ	Suavizado del transporte de masa en el Orquestador JKO (Sinkhorn).
Tasa de Aprendizaje	τ	Velocidad de adaptación de los pesos ρ ante gradientes de energía.
Profundidad de Firma	L	Grado de trunqueo de la Log-Signature (Kernel D - Topológico).
Memoria WTMM	N_{buf}	Tamaño de la ventana deslizante para estimar singularidades.
Cono de Besov	C_{besov}	Radio de influencia para el seguimiento de máximos en ondelettes.
Umbral de Hölder	H_{min}	Valor crítico de regularidad que activa el <i>Circuit Breaker</i> .
Umbral CUSUM	h	Nivel de desviación acumulada que dispara el reinicio de pesos.
Slack CUSUM	k	Tolerancia a la deriva ("ruido blanco") permitida sin acumular error.
Memoria de Volatilidad	α	Tasa de decaimiento (EMA) para estimar la varianza del error.

Table 1: Vector de Hiperparámetros Λ

3 Flujo de Entrada (Data Injection)

3.1 1. Fase de Calibración (Bootstrapping)

Estado inicial requerido antes de la operación secuencial.

Entrada: Historia $\mathcal{H} = \{y_{-T}, \dots, y_0\}$

- **Estructura:** Serie temporal de vectores $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^d$ o escalares $y \in \mathbb{R}$.
- **Propósito:**
 - Inicialización de núcleos dependientes de historia (ej. parámetros de Lévy).
 - Estabilización de los pesos iniciales ρ_0 del orquestador.
 - Llenado del búfer de singularidad para el módulo WTMM.

3.2 2. Fase Operativa (Online Stream)

Ciclo de actualización paso a paso en tiempo t .

Entrada del Paso t : Tupla $(y_t, y_{target}, \tau_{epoch})$

- **Marca de Tiempo (τ_{epoch}):** Timestamp absoluto (Unix Nanoseconds). Obligatorio para sincronización y cálculo de latencia en la política de abandono.
- **Observación Actual (y_t):**
 - El nuevo dato disponible en t .
 - Se utiliza para alimentar los núcleos (K_A, K_B, K_C, K_D) y generar las predicciones para $t + 1$.
 - **Gestión de Errores de Dominio:** Si $|y_t| > 20\sigma$ (respecto a la normalización histórica), el dato se clasifica como *Outlier Catastrófico*. El sistema debe descartar la entrada, mantener el estado inercial y emitir una alerta crítica de validación, protegiendo los núcleos de divergencia numérica.

- **Malla de Inferencia (Anti-Aliasing Input):**

- **Frecuencia de Muestreo vs Escalas (N_{buf}):** Para garantizar la estabilidad del análisis WTMM (Singularidades del Kernel D), la frecuencia de inyección de datos debe mantener una densidad suficiente respecto a las escalas wavelet más finas.
- *Restricción:* Se impone una **Frecuencia Mínima de Inyección** (Nyquist soft-limit) dependiente de C_{besov} . Si la densidad de eventos cae por debajo de este umbral, el espectro multifractal colapsará, y el sistema debe congelar la actualización de la rama topológica.

- **Objetivo de Validación (y_{target}):**

- El valor "real" correspondiente a la predicción generada en el paso anterior ($t - 1$).
- Generalmente $y_{target} \equiv y_t$ (en predicción one-step-ahead causal).
- Se utiliza para calcular el error $e_t = y_{target} - \hat{y}_{t|t-1}$ y calcular el gradiente de energía ∇E para el transporte JKO.

- **Métrica de Abandono (Staleness Policy):**

- **Tiempo de Vida (TTL):** Parámetro Δ_{max} .
- **Comportamiento ante Violación:** Si el retraso de y_{target} excede Δ_{max} , la actualización JKO se cancela.
- **Señal de Integridad:** El sistema debe emitir una bandera persistente de *Inferencia Degradada* ("Stale Weights"). Esto alerta al ejecutor de que, aunque la predicción \hat{y} sigue generándose, los pesos ρ tienen inercia obsoleta y el riesgo ya no está siendo optimizado geoméricamente.

4 Salidas del Sistema (System Outputs)

4.1 1. Señal de Control (Prediction Signal)

La salida primaria para la toma de decisiones.

Salida: \hat{y}_{t+1}

- **Descripción:** Estimación del valor esperado del proceso para el siguiente instante.
- **Malla de Inferencia (Output Quantization):**
 - La salida \hat{y}_{t+1} se entrega en el espacio normalizado (Z-Score) consistente con la entrada y_t .
 - El Actor/Ejecutor es responsable de aplicar la transformación inversa (des-normalización) utilizando las estadísticas de ventana rodante si se requiere un precio absoluto.
- **Composición:** Combinación convexa de los núcleos base: $\hat{y}_{t+1} = \sum_{i \in \{A,B,C,D\}} \rho_i^{(t)} \cdot K_i(y_t)$.

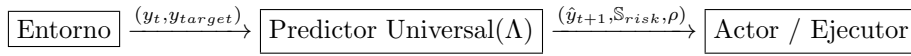
4.2 2. Indicadores de Estado (State Telemetry)

Variables latentes que describen la "salud" y el régimen del mercado.

- **Estado de Riesgo (\mathbb{S}_{risk}):**
 - **Exponente de Hölder local (H_t):** Medida de regularidad puntual. $H_t < 0.5$ indica antipersistencia/ruido; $H_t < H_{min}$ indica crash/shock inminente.
 - **Estadístico CUSUM (G^+):** Nivel de desajuste estructural acumulado.
 - **Distancia al Colapso ($h - G^+$):** Margen de seguridad restante antes de un reinicio forzado del modelo.
 - **Energía Libre Residual (\mathcal{F}):** Valor instantáneo del funcional de JKO. Monitoriza si el modelo está "atrapado" en un mínimo local estable o si la regularización entrópica ϵ es demasiado alta, diluyendo excesivamente la capacidad predictiva del transporte de masa.
- **Estado del Orquestador (ρ):**
 - **Vector de Pesos:** $[\rho_A, \rho_B, \rho_C, \rho_D]$ tal que $\sum \rho = 1$.

- Indica qué "física" domina actualmente el mercado (Saltos vs Difusión vs Memoria vs Topología).
- **Health-Check Estocástico:**
 - **Convergencia Sinkhorn (Bool):** Indica si el algoritmo de transporte de masa convergió dentro del número máximo de iteraciones.
 - *True:* Distancia Wasserstein exacta. *False:* Aproximación sub-óptima (alerta de precisión numérica).
- **Modo de Operación:**
 - *Standard (MSE):* Operación normal bajo supuestos Gaussianos locales.
 - *Robust (Huber):* Operación defensiva activada por singularidades ($H_t < H_{min}$) o alta volatilidad.

5 Diagrama de I/O Abstracto



5.1 Ciclo de Proceso Interno

1. **Ingesta:** Recibir y_t . Actualizar historial local.
2. **Análisis de Singularidad:** Calcular H_t usando WTMM sobre ventana reciente.
3. **Control de Calidad (CUSUM):**
 - Calcular error e_t usando y_{target} y la predicción almacenada $\hat{y}_{t|t-1}$.
 - Actualizar acumulador de deriva G^+ .
 - Si $G^+ > h$ o $H_t < H_{min} \rightarrow$ Emitir señal de reinicio/alerta.
4. **Transporte (JKO):**
 - Calcular gradiente de energía ∇E basado en e_t .
 - Transportar masa de probabilidad $\rho_{t-1} \rightarrow \rho_t$ (Sinkhorn).
5. **Proyección:**
 - Ejecutar núcleos $K_i(y_t)$ para obtener componentes.
 - Agregar componentes usando nuevos pesos ρ_t para obtener \hat{y}_{t+1} .

6 Persistencia (Snapshotting)

Para garantizar la continuidad operativa, el sistema debe ser capaz de serializar su estado interno completo Σ_t en cualquier instante t .

$$\Sigma_t = \{\rho_t, G_t^+, \sigma_{ema}^2, \text{Búfer}_{WTMM}, \text{KernelsState}\}$$

La estructura **KernelsState** se debe segmentar en sub-bloques independientes (K-Blocks) para permitir actualizaciones modulares o parciales:

$$\text{KernelsState} = \{S_A(\text{Lévy}), S_B(\text{PDE}), S_C(\text{Memoria}), S_D(\text{Topología})\}$$

La operación de restauración $Load(\Sigma_t)$ debe permitir reanudar el flujo en $t + 1$ sin necesidad de re-calibración sobre la historia \mathcal{H} .

6.1 Protocolo de Snapshotting Atómico y Verificado

Se exige el uso de formatos de serialización binaria (ej. Protocol Buffers, MessagePack) en lugar de texto (JSON/XML) para el almacenamiento de Σ_t . Esto minimiza la latencia de I/O en operaciones de "Hot-Start" críticas.

- **Integridad Obligatoria (Mandatory Checksum):** Dado que se utilizan formatos binarios densos, un error de un solo bit en el estado de las matrices de los núcleos o el búfer WTMM podría provocar un colapso del sistema o comportamiento indefinido. Por tanto, la estructura Σ_t debe incluir un hash de validación robusto (ej. SHA-256 o CRC32c) al final del bloque.
- **Validación Pre-Inyección:** La rutina de restauración $Load(\Sigma_t)$ debe recalcular y validar este hash *antes* de inyectar el estado en la memoria operativa. Si la validación falla, el snapshot debe descartarse y el sistema debe reiniciarse en modo "Cold-Start" (recarga de historia).