

Cómputo de reservorios neuromórfico estructurado para la detección de anomalías

Fredy Vides

Seminario de Investigación
Licenciatura en Matemática

Resumen

La detección de anomalías en señales temporales es un problema fundamental en sistemas físicos, biológicos y tecnológicos, donde se busca identificar desviaciones significativas respecto a un comportamiento normal. En años recientes, el cómputo de reservorios (Reservoir Computing, RC) ha surgido como una alternativa eficiente para el procesamiento de señales dinámicas, debido a su bajo costo de entrenamiento y su capacidad para capturar dependencias temporales complejas.

En particular, trabajos recientes introducen reservorios neuromórficos estructurados y con estados distribuidos, inspirados en mecanismos biológicos de memoria, los cuales enriquecen el espacio de estados y mejoran la separabilidad de patrones temporales [2]. Asimismo, modelos neuromórficos basados en neuronas de disparo han mostrado robustez y eficiencia en tareas de estimación y control en sistemas dinámicos [1]. En este proyecto se propone estudiar un modelo matemático de reservorio neuromórfico estructurado y evaluar su capacidad para la detección de anomalías en señales temporales sintéticas.

1. Introducción y planteamiento del problema

La detección de anomalías consiste en identificar comportamientos atípicos en series temporales, los cuales pueden corresponder a fallas, eventos críticos o cambios estructurales en un sistema. Los enfoques clásicos suelen basarse en modelos estadísticos o en métodos de aprendizaje supervisado, que requieren grandes volúmenes de datos etiquetados o presentan limitaciones frente a dinámicas no estacionarias.

El cómputo de reservorios propone una arquitectura alternativa en la cual un sistema dinámico no lineal proyecta la señal de entrada a un espacio de estados de alta dimensión, permitiendo resolver tareas complejas mediante métodos lineales en la capa de salida. Recientemente, se ha demostrado que la introducción de estructuras internas en el reservorio, tales como agrupamientos o estados distribuidos, puede mejorar significativamente el desempeño del sistema [2].

Desde una perspectiva neuromórfica, arquitecturas inspiradas en sistemas biológicos, como reflejos distribuidos en insectos, han mostrado ser especialmente adecuadas para el procesamiento eficiente de señales en entornos ruidosos o cambiantes [3]. Esto motiva el estudio matemático de reservorios estructurados y su aplicación a problemas como la detección de anomalías.

La pregunta central que guía este trabajo es la siguiente:

¿Cómo influye la estructura del reservorio neuromórfico en la capacidad de detectar anomalías en señales temporales?

2. Objetivos

Objetivo general

Estudiar un modelo de cómputo de reservorios neuromórfico estructurado y evaluar su desempeño en la detección de anomalías en señales temporales.

Objetivos específicos

- Describir matemáticamente un modelo simplificado de reservorio neuromórfico estructurado.
- Analizar la dinámica del reservorio y su capacidad de memoria a corto plazo.
- Implementar un esquema básico de detección de anomalías basado en el espacio de estados del reservorio.
- Comparar el desempeño del reservorio estructurado con un reservorio no estructurado.

3. Metodología y marco teórico básico

El reservorio se modelará como un sistema dinámico discreto de la forma

$$\mathbf{x}(t+1) = f(W\mathbf{x}(t) + U\mathbf{u}(t)),$$

donde $\mathbf{x}(t)$ representa el estado interno del reservorio, $\mathbf{u}(t)$ la señal de entrada, y W y U matrices de pesos. La estructura del reservorio se introducirá mediante restricciones en la matriz W , tales como particiones en subreservorios o conectividad distribuida, siguiendo ideas de reservorios agrupados y neuromórficos [2].

Para la detección de anomalías se empleará un criterio basado en el error de predicción de la señal. Cuando el sistema, entrenado únicamente con datos normales, produce errores significativamente mayores, dichos eventos serán interpretados como anomalías, una estrategia común en sistemas neuromórficos para análisis de señales dinámicas [1].

La implementación se realizará mediante simulaciones computacionales, sin requerir hardware neuromórfico físico.

4. Resultados esperados y cronograma

Se espera obtener una caracterización cualitativa del impacto de la estructura del reservorio en la dinámica del sistema, así como resultados numéricos que evidencien diferencias en la sensibilidad a anomalías entre distintos diseños de reservorios. El trabajo concluirá con una discusión sobre las ventajas y limitaciones del enfoque estudiado.

Cronograma tentativo

Actividad	Mes 1	Mes 2	Mes 3
Revisión bibliográfica	X		
Modelado y análisis teórico	X	X	
Implementación y simulaciones		X	X
Redacción final			X

Referencias

- [1] R. Ahmadvand et al. Neuromorphic robust framework for integrated estimation and control in dynamical systems using spiking neural networks. *Scientific Reports*, 2025.
- [2] C. Gao et al. Toward grouped-reservoir computing: organic neuromorphic vertical transistor with distributed reservoir states. *Nature Communications*, 2024.
- [3] P. Perlo et al. Edge ai in nature: Insect-inspired neuromorphic reflex islands for safety-critical edge systems. *Symmetry*, 2026.