



1. DATOS BÁSICOS DEL TFG:

Título: Mecanismos de autoorganización al borde de una transición de fase y sus implicaciones para la computación neuromórfica.

Descripción general (resumen y metodología):

Los puntos críticos asociados a transiciones de fase constituyen uno de los paradigmas fundamentales de la física estadística. En las proximidades de un punto crítico, los sistemas presentan propiedades singulares, tales como ausencia de escalas características, correlaciones de largo alcance, leyes de potencia y fenómenos de universalidad. Estas propiedades resultan especialmente interesantes en sistemas complejos, físicos y biológicos, en los que se ha propuesto que operar cerca del borde de una transición puede proporcionar ventajas funcionales, entre ellas una elevada sensibilidad, un amplio rango dinámico y una mayor capacidad de procesamiento de información.

El objetivo general de este Trabajo Fin de Grado es estudiar mecanismos dinámicos mediante los cuales un sistema puede autoorganizarse espontáneamente hacia la vecindad de una transición de fase. Se prestará especial atención a la teoría de la criticalidad autoorganizada (Self-Organized Criticality, SOC), entendida como un mecanismo de realimentación entre una dinámica de conducción lenta y una disipación asociada a la actividad, capaz de llevar al sistema hacia el punto crítico de una transición continua entre una fase activa y una fase absorbente.

Asimismo, se estudiará la extensión de estas ideas a sistemas con transiciones discontinuas y coexistencia de fases, mediante el concepto de bistabilidad autoorganizada (Self-Organized Bistability, SOB). En este caso, mecanismos de realimentación análogos pueden conducir al sistema al borde de una transición de primer orden, generando una fenomenología caracterizada por avalanchas aproximadamente libres de escala coexistiendo con eventos anómalamente grandes.

El trabajo combinará estudio teórico, análisis matemático y simulación computacional. En una primera fase, el estudiante se familiarizará con la teoría de transiciones de fase, tanto en equilibrio como fuera del equilibrio, con especial atención a fenómenos críticos, exponentes críticos, leyes de escala, transiciones a estados absorbentes y procesos estocásticos. Posteriormente, estudiará modelos sencillos de avalanchas y procesos de ramificación autoorganizados, así como modelos de SOC y SOB.

Desde el punto de vista analítico, se abordarán aproximaciones de campo medio, ecuaciones efectivas para la actividad y el parámetro de control, estabilidad de puntos fijos, diagramas de fases y, en función del desarrollo del trabajo, formulaciones estocásticas tipo Langevin. Desde el punto de vista computacional, se implementarán simulaciones numéricas de modelos representativos, se analizarán distribuciones de tamaños y duraciones de avalanchas y se estudiarán técnicas de scaling y finite-size scaling para caracterizar su comportamiento crítico.

Como posible extensión, si el progreso del estudiante lo permite, se explorará la aplicación de estas ideas a modelos sencillos de redes neuronales o redes excitables. En dichos sistemas, se ha propuesto que la operación cerca del borde de una transición dinámica puede mejorar determinadas capacidades funcionales relacionadas con la transmisión y el procesamiento de información.

Tipología: Estudio de casos, teóricos o prácticos, relacionados con la temática del Grado.

Objetivos planteados:

1. Adquirir una base sólida en teoría de transiciones de fase y fenómenos críticos, incluyendo conceptos de universalidad, leyes de escala, exponentes críticos y análisis de tamaño finito.
2. Familiarizarse con transiciones de fase fuera del equilibrio, en particular con transiciones entre estados activos y absorbentes y con su descripción mediante modelos estocásticos.
3. Estudiar los fundamentos de la criticalidad autoorganizada (SOC), comprendiendo su interpretación como un mecanismo de realimentación que conduce al sistema hacia el punto crítico de una transición de fase continua.
4. Analizar modelos básicos de SOC, tales como modelos de avalanchas, procesos de ramificación autoorganizados o modelos de tipo pila de arena, mediante técnicas analíticas sencillas y simulaciones computacionales.
5. Estudiar en detalle el concepto de bistabilidad autoorganizada (SOB), asociado a sistemas con transiciones de fase discontinuas, reproduciendo los principales cálculos y resultados numéricos del artículo de referencia.
6. Implementar y analizar numéricamente modelos representativos de SOC y SOB, caracterizando sus distribuciones de avalanchas, su dependencia con el tamaño del sistema y las diferencias entre criticalidad y bistabilidad autoorganizadas.
7. Explorar, en una fase más avanzada del trabajo, la posible relevancia de estos mecanismos en modelos de redes neuronales o sistemas excitables, así como sus implicaciones para la computación y el procesamiento de información cerca del borde de una transición.

Bibliografía básica:

- Dickman, R., Muñoz, M. A., Vespignani, A. y Zapperi, S. (2000). Paths to self-organized criticality. *Brazilian Journal of Physics*, 30, 27-41. DOI: 10.1590/S0103-97332000000100004.
- Buendía, V., di Santo, S., Bonachela, J. A. y Muñoz, M. A. (2020). Feedback mechanisms for self-organization to the edge of a phase transition. *Frontiers in Physics*, 8, 333. DOI: 10.3389/fphy.2020.00333.
- di Santo, S., Burioni, R., Vezzani, A. y Muñoz, M. A. (2016). Self-organized bistability associated with first-order phase transitions. *Physical Review Letters*, 116, 240601. DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.240601.
- Zapperi, S., Lauritsen, K. B. y Stanley, H. E. (1995). Self-organized branching processes: Mean-field theory for avalanches. *Physical Review Letters*, 75, 4071-4074. DOI: 10.1103/PhysRevLett.75.4071.
- Pruessner, G. (2012). *Self-Organised Criticality: Theory, Models and Characterisation*. Cambridge University Press.
- Bertschinger, N. y Natschläger, T. (2004). Real-time computation at the edge of chaos in recurrent neural networks. *Neural Computation*, 16, 1413-1436. DOI: 10.1162/089976604323057443.
- Kinouchi, O. y Copelli, M. (2006). Optimal dynamical range of excitable networks at criticality. *Nature Physics*, 2, 348-351. DOI: 10.1038/nphys289.

Recomendaciones y orientaciones para el estudiante:

El trabajo está especialmente indicado para estudiantes del Doble Grado en Física y Matemáticas interesados en física estadística, sistemas complejos, procesos estocásticos y modelización matemática. Se recomienda haber cursado, o estar familiarizado con, asignaturas de mecánica estadística, métodos matemáticos, probabilidad y programación científica.

Será conveniente tener buena disposición para combinar razonamiento analítico y trabajo computacional. La realización del TFG requerirá lectura crítica de bibliografía científica, manejo de modelos matemáticos, implementación de simulaciones numéricas y análisis e interpretación de resultados.

No es imprescindible disponer de conocimientos previos específicos sobre criticalidad autoorganizada o redes neuronales, pero sí se valorará una actitud activa, curiosidad científica y motivación para abordar problemas interdisciplinarios en la frontera entre física, matemáticas y computación.

Plazas: 1

2. DATOS DEL TUTOR/A:

Nombre y apellidos: MIGUEL ÁNGEL MUÑOZ MARTÍNEZ

Ámbito de conocimiento/Departamento: FÍSICA DE LA MATERIA CONDENSADA

Correo electrónico: mamunoz@ugr.es

3. COTUTOR/A DE LA UGR (en su caso):

Nombre y apellidos: SERENA DI SANTO

Ámbito de conocimiento/Departamento: FÍSICA DE LA MATERIA CONDENSADA

Correo electrónico: serenadisanto@ugr.es

4. COTUTOR/A EXTERNO/A (en su caso):

Nombre y apellidos:

Correo electrónico:

Nombre de la empresa o institución:

Dirección postal:

Puesto del tutor en la empresa o institución:

Centro de convenio Externo:

5. DATOS DEL ESTUDIANTE:

Nombre y apellidos: ADRIAN DELGADO MARTIN

Correo electrónico: adriandelgado@correo.ugr.es