

Proposta para a contratação de um docente na área de **Física Estatística e Termodinâmica de Sistemas Complexos**

Introdução e justificativas

Entre os grandes desafios científicos de nosso tempo encontra-se o estudo de **sistemas complexos**. A percepção de que certa classe de problemas pode ser modelada e tratada usando métodos matemáticos, computacionais e experimentais da Física permitiu a própria expansão do que podemos entender por Física. Sistemas de interesse nesse contexto são caracterizados por grande número de unidades interagentes, sem simetria de translação e sob diferentes tipos de desordem. Como exemplos, temos fenômenos biológicos, desde aqueles em escala microscópica, como a dinâmica natural de uma célula, passando por sistemas neurais de processamento de informação, até os que envolvem organismos macroscópicos, exemplificados pela interação entre seres humanos e patógenos ou por fenômenos sociais como a emergência de comportamento colaborativo entre indivíduos de uma população. Outros exemplos são materiais magnéticos e vítreos, assim como sistemas de processamento de informação usados em aplicações de Inteligência Artificial. Mesmo quando são feitas propostas de simplificação para a construção de modelos físicos mínimos, esses sistemas complexos apresentam grandes desafios, devido a sua dinâmica complicada, geralmente caótica e desenrolando-se em um cenário de energia que exhibe mínimos com estrutura ultramétrica. Tais sistemas podem e têm sido estudados pelas ferramentas da **física estatística**, da **teoria de informação** e, mais recentemente, da **termodinâmica estocástica** [1, 2] e da **termodinâmica quântica** [3], esta última voltada a elucidar a forma como as leis da termodinâmica emergem da mecânica quântica.

Impacto da contratação no âmbito do Instituto de Física

No Instituto de Física, a pesquisa nas áreas propostas é desenvolvida por alguns grupos, entre os quais o grupo de Física Estatística, cujo número de docentes vem sofrendo uma significativa redução nos últimos anos, principalmente em função de

aposentadorias. Embora os docentes remanescentes continuem a desenvolver pesquisas em área multidisciplinares como a modelagem de sistemas complexos, as transições de fase de sistemas em equilíbrio e fora de equilíbrio e, mais recentemente, na área de termodinâmica estocástica clássica e quântica, há diversos desenvolvimentos recentes nas áreas propostas, detalhados adiante, que poderiam ser investigados por novos contratados, e que, ao que sabemos, têm recebido pouca ou nenhuma atenção por parte de docentes do IFUSP.

Quanto às atividades de ensino, destaca-se que o oferecimento de disciplinas de graduação como Termodinâmica, Mecânica Estatística, Probabilidade, Física do Calor e Termoestatística, tanto para os cursos do IFUSP como de outras unidades da USP, tem sido impactado pela redução do número de docentes do grupo de Física Estatística. Para efeito de comparação, o grupo contava com 10 docentes do quadro ativo em 2012, número que se reduziu a 3 neste início de 2024, com a perspectiva de que em breve ocorra mais uma aposentadoria, do professor Nestor Caticha. Cabe aqui registrar que, apesar da iminente abertura de um edital para contratação de um docente na área de física estatística, possibilitada pela inesperada decisão da Reitoria da USP de devolver às Unidades as vagas abertas por aposentadorias em 2022, o impacto sobre o oferecimento de disciplinas somente será suavizado por contratações adicionais.

Na vertente de cultura e extensão, em um horizonte mais longo, sinalizado pelo final da primeira década de contratação, espera-se que a pessoa contratada tenha contribuído para atividades já existentes no IFUSP, como o Laboratório de Demonstrações e a participação do IFUSP na feira USP e as Profissões, entre outros, ou tenha se engajado em iniciativas próprias, tais como palestras ou produção bibliográfica em divulgação científica.

Panorama da área

Embora tenha recebido maior visibilidade com o anúncio do Prêmio Nobel de 2021, a área de sistemas complexos tem estado na fronteira da pesquisa em física por várias décadas.

Elencamos a seguir algumas questões científicas atuais e promissoras na área ampla de sistemas complexos.

- A chamada “matéria ativa” é constituída de partículas que consomem energia, estando portanto fora do equilíbrio, e a convertem em movimento mecânico. Os princípios fundamentais que governam a matéria ativa ainda não estão estabelecidos. Entre os principais desafios atuais nesse campo tem destaque a descrição de sistemas auto-replicantes [4], essenciais para uma melhor compreensão dos sistemas biológicos.

- A análise teórica de sistemas de matéria mole, que fogem dos paradigmas de uniformidade e regularidade tão caros à física da matéria condensada, é notavelmente complicada. Uma abordagem promissora para essa análise é o uso de técnicas desenvolvidas para meios elásticos desordenados, combinando os ferramentais de geometria diferencial e física estatística com o objetivo de lidar com a importância dos defeitos para a compreensão do comportamento reológico de sistemas como tecidos biológicos, suspensões coloidais e materiais granulares. Panoramas recentes da área podem ser encontrados nas referências [5] e [6].
- A recente e intensiva atenção dada à disseminação do vírus da covid-19 reforça a importância de ferramentas capazes não apenas de descrever o espalhamento de doenças, como também de formular mecanismos para impedir sua disseminação [7]. Cabe destacar que várias dessas abordagens são baseadas em métodos estocásticos desenvolvidos dentro da física estatística de não equilíbrio e utilizam conceitos também desenvolvidos dentro dessa disciplina, tais como a topologia de redes complexas, as transições de fase e os fenômenos críticos. É crescente também a importância de técnicas apropriadas para lidar com “big data”, entre as quais destacam-se os algoritmos de aprendizagem de máquina.
- Nos últimos anos, a maneira pela qual as notícias e informações propagam-se tem atraído bastante interesse, sobretudo pelos desafios na busca de mecanismos de propagação de notícias falsas (*fake news*) [8]. Diferentes dinâmicas e modelos relativos à formação de opinião têm sido propostos para investigar interações sociais, financeiras e profissionais em comunidades, a fim de capturar as principais características de estruturas coletivas complexas, bem como a ocorrência de transições de fase e fenômenos críticos [9].
- O impacto do uso de **redes neurais** (RN) em quase todas as áreas de atividade humana, desde científicas e educacionais a artísticas e industriais, é muito difícil de prever, mas certamente mudará a sociedade numa escala de tempo relativamente curta e já começa a ser chamada de uma nova revolução industrial. É fundamental que o país participe de forma ativa no usufruto deste potencial transformador. Apesar do sucesso atual e da enorme promessa que representam as aplicações de RN, está claro que o entendimento destes sistemas de processamento de informação é precário. A mecânica estatística permite o uso de ferramentas úteis para atacar problemas nesta área, que são interessantes porque, além de necessitar novas ideias físicas, contribuirão para o avanço rápido no desenvolvimento de aplicações tanto em áreas da física como em aplicações industriais.

- Um organismo vivo é um sistema aberto, mantido fora do equilíbrio por fluxos de diversos tipos. Para desempenhar as funções biológicas associadas a tais fluxos, é necessária a quebra do balanceamento detalhado, que resulta na irreversibilidade, com o consequente consumo de energia e produção de entropia. Tais ideias são especialmente acessíveis pelos métodos da termodinâmica estocástica [1, 2, 10–13], campo que possui fortes conexões com a física estatística e a mecânica quântica [14], sendo resultante do desenvolvimento da termodinâmica de sistemas fora de equilíbrio.
- Apesar de a primeira máquina térmica quântica ter sido proposta ainda no final da década de 1950, a termodinâmica quântica é uma área de pesquisa relativamente jovem e muito promissora. Entre seus principais objetivos estão o estudo e a descrição da conversão entre calor, trabalho e informação em sistemas quânticos, em analogia com a termodinâmica convencional e estocástica. Dada a ampla aplicabilidade da termodinâmica e da mecânica quântica, há diversos tópicos a serem considerados e questões ainda em aberto, dentre as quais citamos a termodinâmica de transições de fase quânticas, o controle quântico ótimo e as relações de incerteza termodinâmicas [15].

Prognóstico de potenciais candidatos

Listamos a seguir, em ordem alfabética, alguns potenciais candidatos que têm produzido trabalhos de alto nível nas linhas contempladas nesta proposta.

- André Cardoso Barato, atualmente na Universidade de Houston
- Danilo Barbosa Liarte, atualmente no ICTP-SAIFR
- Felipe Alves, atualmente na Aston University
- Maíke Antonio Faustino dos Santos, atualmente na PUC-Rio
- José Nahuel Freitas, atualmente na Universidade de Buenos Aires
- Pablo Souza de Castro Melo, atualmente no ICTP-SAIFR
- Pedro E. Harunari, atualmente na Universidade de Luxemburgo.
- Sarah A. M. Loos, atualmente na Universidade de Cambridge
- Rodrigo Veiga, atualmente na École Polytechnique Fédérale de Lausanne
- Wesley Cota, atualmente na Universidade Federal de Viçosa

Referências

- 1 Seifert, *Rep. Progr. Phys.* **75**, 126001 (2012).
- 2 Pigolotti e Pelitti, *Stochastic Thermodynamics: An Introduction*, Princeton University Press (2021).

- 3 Deffner e Campbell, *Quantum Thermodynamics: An Introduction to the Thermodynamics of Quantum Information*, Morgan & Claypool Publishers (2019).
- 4 Hallatschek *et al.*, *Nat. Rev. Phys.* **5**, 407–419 (2023).
- 5 Lubensky *et al.*, *Rep. Prog. Phys.* **78**, 073901 (2015).
- 6 Behringer e Chakraborty, *Rep. Prog. Phys.* **82**, 012601 (2019).
- 7 Silva *et al.*, *PNAS* **118**, e2104640118 (2021).
- 8 Lazer *et al.*, *Science* **359**, 1094 (2018).
- 9 Castellano, Fortunato e Loreto, *Rev. Mod. Phys.* **81**, 591 (2009).
- 10 Bechhoefer *et al.*, *J. Stat. Mech.* **2020** 064001.
- 11 Lynn *et al.*, *PNAS* **118**, e2109889118 (2021).
- 12 Tomé e de Oliveira, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 020601 (2012).
- 13 Noa, Harunari, de Oliveira e Fiore, *Phys. Rev. E* **100**, 012104 (2019).
- 14 Myers, Abah e Deffner, *AVS Quantum Sci.* **4**, 027101 (2022).
- 15 Barato and Seifert, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 158101 (2015).

Docentes ativos do IFUSP que apoiam a proposta

- Adriano Alencar
- André Vieira
- Carlos Fiore
- Nestor Caticha