

## A DISTRIBUIÇÃO PARTÔNICA DO PÍON: PANORAMA ATUAL E PERSPECTIVAS

JUCIENE TEIXEIRA DE SOUZA<sup>1</sup>; VICTOR PAULO BARROS GONÇALVES<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Universidade Federal de Pelotas – juciteixeiraprof@gmail.com*

<sup>2</sup>*Universidade Federal de Pelotas – barros@ufpel.edu.br*

### 1. INTRODUÇÃO

O píon ( $\pi$ ) é o méson mais leve e emerge como bóson de Nambu–Goldstone da quebra dinâmica de simetria quiral na QCD. Por ser um estado ligado  $\bar{q}q$  simples, suas funções de distribuição de partons (PDFs), valência, mar e glúon, constituem um laboratório privilegiado para estudar a transição entre a dinâmica não perturbativa e a evolução perturbativa DGLAP. Entre 2020 e 2025, houve avanços substanciais em três eixos: (i) análises globais(HOU et al., 2021) com re-soma de limiar e integração de novos conjuntos de dados; (ii) QCD em rede. (AL., 2025a) e (iii) modelagem e métodos contínuos (Bethe–Salpeter/Minkowski, BLFQ, reconstruções a partir de momentos de Mellin), que refinaram o papel do glúon e o comportamento assintótico em grande  $x$ . Os primeiros indícios experimentais sobre PDFs do píon surgiram nos anos 1970,a partir de experimentos de espalhamento profundo inelástico (DIS) e de produção de mísseis em colisões envolvendo feixes de píons. Esses estudos iniciais foram limitados por estatísticas reduzidas e pela precisão experimental da época, mas abriram caminho para parametrizações fenomenológicas iniciais. Nas décadas de 1980 e 1990, parametrizações globais como as da colaboração SMRS e posteriormente GRV(GLÜCK; REYA; VOGT, 1992) trouxeram descrições mais detalhadas dos PDFs do píon, baseadas em ajustes globais de dados experimentais.Mais recentemente, colaborações como JAM e xFitter (ALEKHIN et al., 2015; BARRY et al., 2021) realizaram análises globais modernas dos PDFs do píon, incorporando avanços na QCD perturbativa e novas técnicas estatísticas. Esses trabalhos utilizam dados de espalhamento Drell–Yan e processos associados ao chamado *Sullivan process*(KUMANO, 1998), explorando a possibilidade de acessar a estrutura do píon em experimentos com alvo de próton. O panorama atual indica que, embora avanços substanciais tenham sido obtidos, a estrutura interna do píon continua sendo uma área ativa de pesquisa, especialmente no que diz respeito à distribuição de glúons e à transição suave entre o regime de baixa e alta energia da QCD. Novos experimentos, como aqueles planejados no Electron-Ion Collider (EIC), prometem fornecer dados ainda mais precisos e revolucionar nosso entendimento das funções de distribuição de partons em mésons.

### 2. METODOLOGIA

Realizamos uma revisão sistemática de trabalhos publicados de 2020 a 2025 em periódicos com revisão por pares e preprints amplamente citados, priorizando contribuições que (i) extraem PDFs do píon (valência, mar, glúon) a partir de dados Drell–Yan, fótons diretos e neutron dominante (LN); (ii) calculam PDFs e GPDs via

QCD na rede ; e (iii) quantificam incertezas e a compatibilidade entre rede e fenomenologia. (AL., 2025a; BARRY et al., 2021; WATANABE et al., 2020; KULAGIN, 2008; AL., 2025b, 2024a)

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O panorama geral sobre a distribuição partônica do píon mostra que a primeira análise global aberta do píon utilizando o xFitter (ALEKHIN et al., 2015) estabeleceu um padrão robusto. Essa análise considerou dados de Drell-Yan induzidos por píons e de dispersão profunda inelástica em núcleos com alvos de píon, fornecendo uma parametrização consistente para os quarks valentes do píon. Em 2021, a colaboração JAM realizou a primeira análise global Bayesiana , mostrando que a redistribuição de momento induzida pela re-soma aumenta substancialmente a fração de momento gluônico e que o expoente de grande  $x$  da valência  $\sim (1-x)^{\beta_v}$  apresenta variação considerável dependendo da prescrição (BARRY et al., 2021; CAO et al., 2021). Em 2024–2025, métodos de rede e contínuos convergiram em tendências consistentes para PDFs do píon (AL., 2024b, 2024a), enquanto novos cálculos e combinações de dados reduziram incertezas no conteúdo de glúons (AL., 2025a; ZHU et al., 2025).

#### 3.1- Análises globais e integração de dados

**O xFitter(2020).** Usando processos DY e fótons diretos, o estudo concluiu: (a) valência bem determinada; (b) mar e glúon com grandes incertezas; (c) tensões moderadas entre diferentes conjuntos históricos; e (d) necessidade de dados sensíveis a baixo e médio  $x$  (ALEKHIN et al., 2015). A **JAM com re-soma (2021)**, análise global com re-soma de limiar em DY reflete forte correlação entre o tratamento de logaritmos suaves e a partição de momento entre valência e glúon; a JAM encontra fração de momento gluônico significativamente maior do que estimativas prévias, além de ampla janela para  $\beta_v$  em grande  $x$  (BARRY et al., 2021). Um estudo complementar integra informação de  $p_T$  (TMD) na análise global, refinando a sensibilidade a regiões cinemáticas antes pouco exploradas (CAO et al., 2021). Em 2022, discute-se a complementaridade entre dados experimentais (DY, LN) e LQCD para restringir PDFs do píon, abrindo caminho para ajustes híbridos (BARRY et al., 2021). **Desenvolvimento 2024-2025.**

#### 3.2- A QCD em rede: momento efetivo, pseudo-ITDs e frações de momento

**A Valência em massa física (2024).** Cálculos recentes fornecem a PDF de valência do píon em massa física, com boa estabilidade sob evolução (HOLLIGAN; LIN, 2024). **As reconstruções via momentos de Mellin (2024).** As estratégias que combinam momentos baixos obtidos na rede com evolução permitem reconstruções  $x$ -dependentes consistentes e checagens cruzadas com JAM/xFitter (AL., 2024a; DUTRIEUX et al., 2024). Quanto as frações de momento  $\langle x \rangle_{q,g}$  (2025) Uma determinação em três ensembles no ponto físico reporta a decomposição de momento entre quarks e glúons no píon e no káon (AL., 2025a).

#### 3.4- Métodos contínuos e papel dos glúons

**BLFQ e BSE em Minkowski (2025).** A inclusão explícita do setor  $q\bar{q}g$  com operadores geradores do Fock superior quantifica a contribuição gluônica na PDF do píon, com efeitos marcantes em baixo  $x$  e correlações com a dinâmica quiral

(ZHU et al., 2025). As Revisões indicam convergência progressiva entre análises contínuas e LQCD para DFs do píon, especialmente no domínio de valência; já o setor gluônico ainda exibe dispersão entre abordagens, motivando ajustes híbridos e novos dados (AL., 2024b).

**Estado atual e lacunas** (i) Valência: consenso crescente entre JAM/xFitter, LQCD (LaMET/pseudo-ITDs) e reconstruções por momentos, incluindo comportamento em grande  $x$  compatível com expectativas de QCD, embora a potência efetiva  $\beta_v$  ainda dependa da prescrição de re-somação (BARRY et al., 2021; AL., 2024a). (ii) Glúon: incertezas significativamente reduzidas frente a 2010s, graças a re-soma, uso de LN e novas ancoragens de LQCD em  $\langle x \rangle_g$ , porém ainda mais amplas do que na valência (CAO et al., 2021; AL., 2025a). (iii) Mar: permanece pouco determinada por dados atuais de DY/fótons; espera-se melhoria com medições dedicadas (tagged-DIS, EIC) e estratégias de análises globais que incorporem dados da rede com correções sistemáticas parametrizadas (BARRY et al., 2021; KOTZ et al., 2024).

#### 4. CONCLUSÕES

O período 2020–2025 consolidou um novo patamar para PDFs do píon: (a) análises globais com re-soma e integração de TMD/LN redefiniram a partição de momento; (b) LQCD em massa física e extrapolação ao contínuo passou a fornecer vínculos quantitativos (valência e  $\langle x \rangle_{q,g}$ ); (c) abordagens contínuas como BLFQ/BSE tornaram palpável a quantificação da componente gluônica. A inovação central deste período é a convergência metodológica entre fenomenologia e rede, abrindo espaço para ajustes híbridos. Persistem como frentes abertas a determinação fina do mar e do glúon em  $x < 0.1$  e a fixação não ambígua do expoente de grande  $x$  na valência. Dados do EIC, análises com novos dados e a inclusão de observáveis de rede nos ajustes globais são os próximos passos naturais.

#### 5. REFERÊNCIAS

- AL., C. A. et. Quark and gluon momentum fractions in the pion and in the kaon from lattice qcd. **Phys. Rev. Lett.**, v. 134, p. 131902, 2025. Determinação da fração de momento de quarks e glúons no píon e no káon usando Lattice QCD.
- AL., E. B. et. Resummation for lattice qcd calculation of generalized parton distributions. **JHEP**, v. 07, p. 241, 2025. Implementação de resummação para cálculos de GPDs em Lattice QCD.
- AL., Y. L. et. Pion distribution functions from low-order mellin moments in lattice qcd. **Phys. Lett. B**, v. 850, p. 138505, 2024. Reconstrução de PDFs do píon a partir de momentos obtidos em Lattice QCD.
- AL., Y. Y. et. Impressions of parton distribution functions from lattice qcd. **Chin. Phys. Lett.**, v. 41, p. 121202, 2024. Estudo moderno de PDFs do píon usando Lattice QCD.

ALEKHIN, S. et al. **HERAFitter/xFitter: QCD Fits of PDFs**. 2015. 304 p. Eur. Phys. J. C. Ferramenta moderna para ajuste global de PDFs, usada também para PDFs do píon.

BARRY, P. C. et al. Global qcd analysis of pion parton distributions with threshold resummation. **Phys. Rev. D**, v. 104, n. 5, p. 056015, 2021. Análise global moderna de PDFs do píon usando re-somação.

CAO, N. Y. et al. Towards the three-dimensional parton structure of the pion: Integrating transverse momentum data into global qcd analysis. **Phys. Rev. D**, v. 103, p. 114014, 2021. Integra dados de momento transverso na análise de PDFs do píon.

DUTRIEUX, A. et al. Pion valence quark distribution from low-order mellin moments in lattice qcd. **J. High Energy Phys.**, v. 2024, n. 2, p. 56, 2024. Reconstrução da PDF do quark valente do píon utilizando momentos de Mellin calculados em QCD no lattice.

GLÜCK, M.; REYA, E.; VOGT, A. Pionic parton distributions. **Z. Phys. C**, v. 53, p. 651–655, 1992. Parametrizações clássicas de PDFs do píon, referência histórica importante.

HOLLIGAN, J.; LIN, H.-W. Pion valence quark distribution at physical pion mass of  $n_f = 2+1+1$  lattice qcd. **J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.**, v. 51, n. 6, p. 065101, 2024. Determinação de alta estatística da PDF do quark valente do píon utilizando LaMET com controle aprimorado de erros sistemáticos e emparelhamento perturbativo de duas laçadas.

HOU, T.-J. et al. New cteq global analysis of quantum chromodynamics with high-precision data from the lhc. **Phys. Rev. D**, v. 103, n. 1, p. 014013, 2021.

KOTZ, L. et al. An analysis of parton distributions in a pion with bézier parametrizations. **Phys. Rev. D**, v. 109, p. 074027, 2024. Introdução de parametrizações de PDFs do píon utilizando curvas de Bézier.

KULAGIN, S. A. Nuclear effects in the extraction of pion parton distributions. **Phys. Rev. D**, v. 77, p. 033009, 2008. Discute efeitos nucleares no processo de Sullivan.

KUMANO, S. Status of pion parton distribution functions. **Phys. Rept.**, v. 303, p. 183–257, 1998. Review clássico sobre PDFs de píon e o processo de Sullivan.

WATANABE, A. et al. Pion parton distributions in qcd effective theory. **Phys. Rev. D**, v. 102, p. 114001, 2020. Estudo moderno de PDFs do píon com abordagem efetiva e comparação com dados recentes.

ZHU, Z. et al. Gluonic contributions to the pion parton distribution functions. **Phys. Rev. D**, v. 111, n. 5, p. 054007, 2025. Estudo usando BLFQ e BSE para derivar PDFs de quarks e gluons do píon, incluindo contribuições do setor quark-antiquark-gluon.