

---

## **PROJETO DE PESQUISA**

### Programa de Iniciação Científica e Tecnológica – CBPF

Nome do Orientador e Coordenação (Pesquisador/Tecnologista/Pós-doc):

Rafael Silva Coutinho (Pesquisador) - COHEP

---

Nome do pesquisador ou tecnologista e Instituição de Pesquisa Externa: (Coorientador ou Colaborador externo, se houver):

N/A

---

Nome do Supervisor e Coordenação: (Pesquisador/Tecnologista):

Rafael Silva Coutinho (Pesquisador) - COHEP

---

Título do Projeto:

Anomalias em decaimentos raros de mésons B no LHCb e desenvolvimento de métodos estatísticos avançados com  $z\text{fit}$

---

Palavra-chave:

Física de Partículas, LHCb, Decaimentos Raros, Violação de CP,  $z\text{fit}$ , Inteligência Artificial

---

Área de conhecimento:

Física Experimental de Altas Energias, Física de Sabor e Violação de CP, Métodos Estatísticos em Física de Partículas, Inteligência Artificial Aplicada à Física

---

Pré-requisitos desejáveis (se houver):

Noções básicas de mecânica quântica e estatística

---

Pré-requisitos obrigatórios (se houver):

Conhecimento básico de programação (preferencialmente Python)

---

Possibilidade de orientação remota:

(  ) Sim      (  ) Não

## Projeto

O Modelo Padrão permanece, há mais de 50 anos, como a melhor descrição dos constituintes da matéria e de três das quatro interações fundamentais. No entanto, ele não é capaz de explicar diversos fenômenos observados, por exemplo o grande desequilíbrio entre matéria e antimateria atualmente presente no Universo. Nesse contexto, indícios recentes em decaimentos raros de hadrons contendo o quark  $b$  — as chamadas **anomalias de sabor** — têm despertado grande interesse, por poderem estar relacionados a novas fontes de Física além do Modelo Padrão.

O estudo de decaimentos raros de mésons B constitui, portanto, um campo central da física de sabor, no qual a colaboração LHCb tem desempenhado papel de destaque. Esses processos oferecem um laboratório privilegiado para testar o Modelo Padrão e investigar potenciais sinais de nova física. Ao mesmo tempo, o avanço das análises em Física de Altas Energias exige o desenvolvimento de métodos estatísticos avançados, capazes de lidar com grandes volumes de dados e com modelos teóricos cada vez mais complexos.

Nesse contexto, este projeto de Iniciação Científica oferece ao estudante a oportunidade de atuar em duas linhas principais, de acordo com seu perfil e interesse:

1. **[A] — Análise de dados do experimento LHCb:** o aluno se envolverá com o estudo de decaimentos raros de hadrons contendo quark  $b$ , com foco em assimetrias de CP e potenciais sinais de Nova Física.
2. **[B] — Desenvolvimento estatístico com *zfit*:** o aluno explorará o uso de *zfit*, um framework moderno em Python para ajustes estatísticos, aplicando técnicas de *maximum likelihood fits* e análise de amplitudes, além da investigação de soluções inovadoras baseadas em inteligência artificial aplicadas a este contexto.

O estudante poderá optar por se dedicar prioritariamente a uma dessas frentes, ou ainda explorar aspectos complementares das duas linhas.

## Metodologia e Atividades Propostas

### [A] — Análise de dados do LHCb

1. **Revisão bibliográfica;** estudo introdutório sobre o Modelo Padrão, violação de CP e anomalias de sabor, com base em artigos recentes e materiais de apoio.
2. **Ferramentas computacionais;** introdução ao uso de bibliotecas modernas de análise de dados em Python, necessárias para manipulação de dados do LHCb.

3. **Seleção e pré-processamento de eventos;** o estudante será treinado nos fundamentos da seleção de candidatos de interesse, com ênfase no uso de algoritmos de aprendizado de máquina para identificar decaimentos raros contendo múons, reduzir contaminações e aumentar a pureza da amostra.
4. **Eficiência e determinação do sinal;** o aprendizado incluirá métodos para estimar eficiências de seleção e reconstrução, e aplicar técnicas de extração do sinal.
5. **Busca de violação de CP;** o aluno será capacitado a explorar novas estratégias de análise, incluindo abordagens inovadoras com aprendizado de máquina, para aumentar a sensibilidade a efeitos de violação de CP.

## [B] — Desenvolvimento de métodos estatísticos para Física de Altas Energias com *zfit*

1. **Fundamentos estatísticos;** introdução a ajustes de máxima verossimilhança, estimativa de parâmetros e testes de hipóteses.
2. **Ambiente de trabalho;** apoio na instalação, configuração e execução do *zfit*, familiarizando-se com a infraestrutura e contribuindo para a documentação de uso. Auxílio na análise comparativa entre *zfit* e ferramentas tradicionais como RooFit, como também na conexão com outros pacotes no ecossistema Python.
3. **Desenvolvimento do backend;** suporte ao time no estudo e experimentação com JAX e frameworks relacionados, avaliando desempenho em arquiteturas modernas (CPU/GPU) e auxiliando na documentação dos resultados.
4. **Padronização com HS3;** contribuir no desenvolvimento do formato HS3 para padronização de modelos estatísticos, validando exemplos, testando interoperabilidade e auxiliando na produção de material de referência.
5. **Integração com LLMs;** estudo exploratório da possibilidade de criar um *zfit assistant*, um protótipo que utilize modelos de linguagem natural para auxiliar na geração de scripts de ajuste, documentação automática e interpretação de resultados.

## Resultados esperados

- Formação sólida do estudante em tópicos de fronteira em física de partículas e análise estatística.
- Produção de scripts e notebooks em Python aplicáveis a dados reais e simulados.
- Potencial participação em comunicações científicas (seminários internos, workshops, colaborações externas).

## Referências

1. G. Isidori, Y. Nir, and G. Perez, “*Flavor Physics Constraints for Physics Beyond the Standard Model*”, Ann. Rev. Null. Part. Sci. 60, 355 (2010)
2. W. Altmannshofer, et al, “*Symmetries and Asymmetries of  $B \rightarrow K^*\mu^+\mu^-$  Decays in the Standard Model and Beyond*”, JHEP 01, 019 (2009)
3. R. Aaij et al. (LHCb), “*Measurement of Form-Factor-Independent Observables in the Decay  $B0 \rightarrow K^*0\mu^+\mu^-$* ”, Phys. Rev. Lett. 111, 191801 (2013)
4. LHCb Collaboration, “*Amplitude analysis of the  $B0 \rightarrow K^*0\mu^+\mu^-$  decay*”, Phys. Rev. Lett. 132 (2024) 131801
5. J. Eschle, A. Puig, R. Silva Coutinho and N. Serra, “*zfit: scalable Pythonic fitting*”, SoftwareX 11 (2020) 100508
6. *Travis E. Oliphant*, “*Python for Scientific Computing*”, Comput Sci Eng 9.3 (May 2007), 10–20.