



Relatório de Atividades

Thiago R. F. P. Tomei

— NCC/UNESP —

Período: Março/2017 a Março/2018

Índice

1	Introdução	2
2	Atividades de Pesquisa	3
2.1	Busca por Novas Ressonâncias no Canal de Dibósons	3
2.2	Busca por Matéria Escura	6
2.3	Estudos em Aprendizado de Máquina	8
2.4	Outras Atividades	9
2.5	Bases de Dados	10
3	Atividades Docentes	11
4	Atividades de Extensão	11

1. Introdução

O Modelo Padrão das interações fundamentais é a teoria que, até o momento, melhor descreve as partículas subatômicas e de suas interações. Historicamente, o desenvolvimento do Modelo Padrão envolveu um intercâmbio constante entre novos resultados experimentais e avanços teóricos, constituindo-se em um excelente exemplo de como o conhecimento científico progride. Nos dias atuais, o Modelo Padrão é uma teoria consolidada; uma revisão do panorama experimental atual [1] revela a excelente concordância entre as previsões teóricas e os dados observados.

Apesar do enorme sucesso experimental, o Modelo Padrão apresenta incompletudes que sugerem a existência de uma estrutura ainda mais profunda na matéria, que seria descrita pelo que chamamos de uma “Física Além do Modelo Padrão” [2]. Embora existam diversas teorias que buscam estender o Modelo Padrão, ainda não existem indícios significativos que favoreçam nenhuma delas. Por outro lado, uma das características do panorama atual da Física de Altas Energias é o contraste entre os resultados obtidos em experimentos com aceleradores de partículas, que seguidamente confirmam as previsões do Modelo Padrão, e os experimentos de astronomia e astrofísica. A natureza da matéria escura, a origem da oscilação dos neutrinos, a assimetria bariônica do universo e a relação da gravitação com as outras interações fundamentais são algumas das questões em aberto no atual paradigma. Esse contraste é o principal problema tratado neste projeto, e a abordagem escolhida será a realização de buscas por Física Além do Modelo Padrão em um experimento de altas energias.

Os objetivos do meu projeto de pesquisa dividem-se naqueles de curto e longo prazo. A continuação de minha participação no experimento *Compact Muon Solenoid* (CMS) [3], um dos experimentos servidos pelo acelerador *Large Hadron Collider* (LHC) [4], é o objetivo mais imediato. O grupo de Física do Núcleo de Computação Científica da UNESP (NCC-UNESP) é integrante do *São Paulo Research and Analysis Center* (SPRACE) e já se encontra envolvido em buscas por Física Além do Modelo Padrão no CMS, o que me proporciona um rápido engajamento nas atividades propostas. O grupo de Física de Partículas do Instituto de Física Teórica da UNESP (IFT-UNESP), por sua vez, apresenta uma grande tradição na área de Fenomenologia de Partículas, e a interação e colaboração com seus integrantes seguramente enriquecerá o meu trabalho experimental. A médio prazo, tendo em vista o calendário de *upgrades* previsto para o LHC [5, 6], existe uma oportunidade única de alavancar o nível científico do grupo através da participação no projeto e construção da próxima fase do experimento CMS [7]. Minha proposta é de contribuir tanto para o cresci-

mento do grupo, através do meu trabalho de pesquisa e da orientação de estudantes de iniciação científica, mestrado e doutorado, como de sua diversificação, atraindo pesquisadores de áreas afins, como engenharia eletrônica e ciência da computação.

O principal resultado esperado da análise dos dados de 13 TeV do CMS é uma visão mais profunda da estrutura fundamental da matéria. Em termos práticos, cada busca realizada gera pelo menos um resultado preliminar, onde os dados são analisados com técnicas otimizadas para alguns modelos de referência, que é publicado como um *Physics Analysis Summary* (PAS). Diversos resultados preliminares são em geral combinados posteriormente para a publicação de um artigo de referência, para o qual os dados são reconstruídos e reanalisados com as versões mais desenvolvidas do software e das técnicas experimentais. No caso em que as observações apontem para indícios significativos de Física Nova, isso em geral leva a uma terceira rodada de otimização e análise dos dados, a fim de viabilizar uma possível descoberta. Resultados negativos são também valiosos, apontando os modelos que deixaram de ser viáveis em vista das observações, *i.e.*, modelos excluídos. Cabe lembrar que todos resultados serão sempre documentados em PAS e artigos, bem como disseminados para a comunidade científica em apresentações nas conferências da área.

Neste relatório, dou uma visão geral dos meus resultados obtidos no período de março/2017 a março/2018. Para uma visão mais detalhada, as bases de dados listadas na Seção 2.5 apresentam mais informações.

2. Atividades de Pesquisa

Durante o período deste relatório, continuei trabalhando no âmbito da Colaboração CMS do CERN, participando de análises em duas frentes de trabalho: a *Busca por Novas Ressonâncias no Canal de Dibósons* e a *Busca Por Matéria Escura*. Também dediquei algum tempo a estudos iniciais de *Aprendizado de Máquina*, tendo em vista a imensa revolução que essa área promete trazer a todas as áreas da ciência, inclusive a física de altas energias. Detalho a seguir minhas atividades em cada uma dessas frentes.

2.1 Busca por Novas Ressonâncias no Canal de Dibósons

A busca por novas ressonâncias no canal de dibósons no LHC tem sido tema do meu trabalho por cerca de uma década. A chegada do acelerador a sua luminosidade instantânea nominal, de $10^{34}/\text{cm}^2/\text{s}$, marca uma nova etapa na exploração da fronteira do TeV – o “tempo de duplicação”, *i.e.*, o tempo necessário para dobrar a quantidade de dados disponíveis, está começando a ser medido em termos de anos. Desse

modo, o refino das técnicas experimentais torna-se cada vez mais importante, e o conjunto de dados do Run 2 é o substrato ideal pra o desenvolvimento das mesmas.

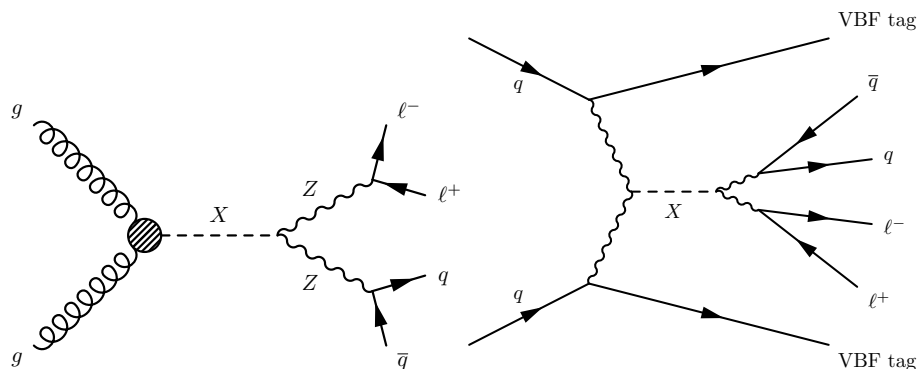


Figura 1: Canais de produção de uma nova ressonância no LHC: produção por fusão de glúons (esquerda) e por fusão de bósons vetoriais (direita).

Durante o ano de 2017, continuei a trabalhar na análise dos dados tomados em 2016 – 35.9 fb^{-1} de dados certificados de colisões próton-próton a energia de centro de massa de 13 TeV – e colaborei com o grupo de $H \rightarrow ZZ$ do experimento CMS para refazer a busca no canal $\ell\ell$ +jatos, desta vez com um enfoque maior em ressonâncias de spin-0, que poderiam ser identificadas como bósons de Higgs adicionais. Para esta análise, realizada em conjunto com a Dra. Sudha Ahuja, pós-doutoranda do SPRACE, foram utilizadas todas as ferramentas provindas do grupo de física do bóson de Higgs do experimento como *b-tagging* [8], *VBF-tagging* e *Matrix Element Likelihood Analysis* (MELA) [9, 10]. Neste ano, trabalhamos na extensão do trabalho para ressonâncias de grande largura (até $\Sigma = 1 \text{ TeV}$) e mais estados finais do canal ZZ : $2\ell 2q$, $2\ell 2\nu$ e 4ℓ . Os resultados estão próximos de ser publicados, com a versão *preprint* já disponível [11].

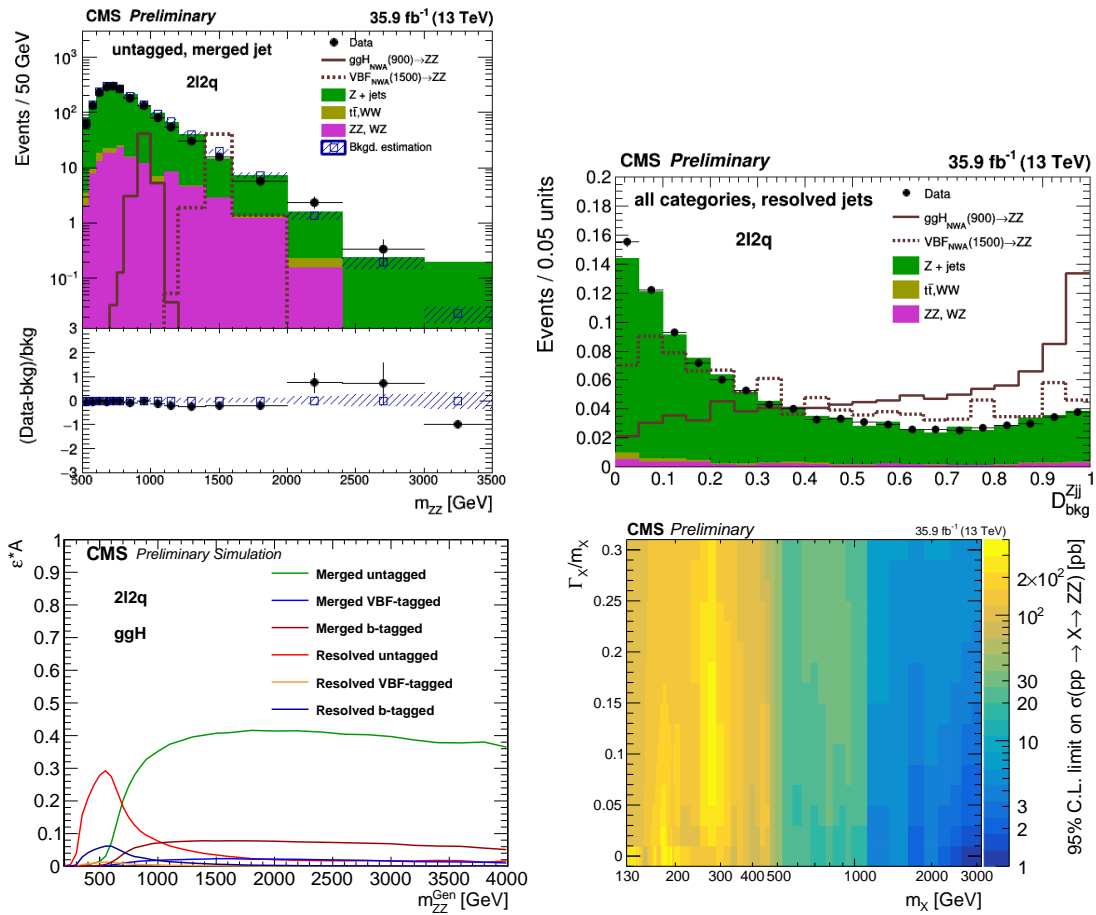


Figura 2: Resultados preliminares das análises de busca por ressonâncias no canal de dibósons para o conjunto completo de dados de 2016 [11]. Alto: exemplos de distribuição de variáveis de interesse, a massa invariante do sistema de dois bósons Z (esquerda) e o discriminante cinemático MELA (direita). Baixo: alguns resultados da análise de dados, eficiência da seleção de eventos para o processo $gg \rightarrow H$ nos diferentes canais (esquerda), limites superiores (com 95% de nível de confiança) para diferentes hipóteses de massa e largura da ressonância sob procura.

2.2 Busca por Matéria Escura

O indício mais forte de Física Além do Modelo Padrão é a chamada matéria escura (*dark matter* – DM). Uma das principais evidências a favor da existência da DM é a observação de que, para vários tipos de objetos observáveis – estrelas, nuvens de gás, galáxias –, suas velocidades são maiores do que aquelas esperadas apenas devido à atração gravitacional de outros objetos. Outra evidência para a existência da Matéria Escura é o ajuste global dos parâmetros do Modelo Padrão Cosmológico, que implica uma densidade de matéria não-bariônica $\Omega_c h^2 = 0.1196 \pm 0.0031$, *i.e.*, uma densidade física de Matéria Escura de cerca de 23% [12]. As características que definem um candidato a matéria Escura são a estabilidade em escalas de tempo cosmológicas, a interação extremamente fraca com a radiação eletromagnética e a densidade de relíquia correta. Nenhuma das partículas previstas pelo Modelo Padrão atende esses requisitos; várias extensões do Modelo Padrão, por sua vez, apresentam um ou mais candidatos a matéria escura. No LHC, o candidato a matéria escura χ poderia ser produzido em reações do tipo $pp \rightarrow \chi\chi + X$, onde a matéria escura deixa a região de interação sem deixar sinal no detector, aparecendo como energia transversa faltante (E_T^{miss}).

Em 2017, afastei-me temporariamente dos estudos experimentais sobre Matéria Escura para me dedicar com mais afinco à área de Novas Ressonâncias. Na parte fenomenológica, continuei trabalhando com os Profs. Alexander Belyaev e Stefano Moretti da Universidade de Southampton, utilizando os dados públicos da colaboração CMS para tentar compreender as possibilidades de extensão da busca por matéria escura. Estudamos o modelo *Inert Two-Higgs Doublet Model* (i2HDM) [13, 14], no qual uma segunda partícula de Higgs h_1 assume o papel de matéria escura, e suas possíveis assinaturas experimentais no detector CMS para maiores luminosidades integradas de até 3000 fb^{-1} . Tivemos que reorganizar o nosso artigo científico para levar em conta os últimos resultados dos cálculos teóricos para o processo $pp \rightarrow h_1 h_1 + \text{jatos}$, particularmente na resolução do *loop* do quark top, como mostrado na Fig. 4. Isso levou a grandes diferenças nos resultados esperados, alguns dos quais podem ser vistos na Fig. 3. O artigo está em fase de finalização e será submetido ao periódico em breve.

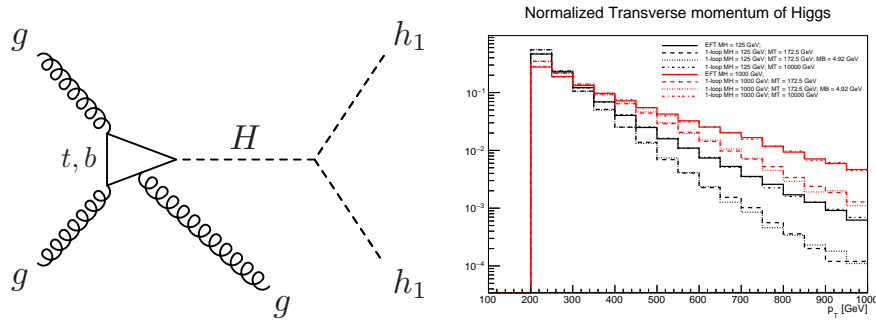


Figura 3: Esquerda: expansão do *loop* do quark top, relevante para o processo $pp \rightarrow h_1 h_1 + \text{jatos}$ do modelo i2HDM, onde h_1 é uma nova partícula de Higgs que assume o papel de matéria escura. Direita: modificação do espectro de momento transversal do bóson de Higgs com a inclusão das correções da expansão supracitada. O efeito das correções é tornar o espectro muito mais suave, o que diminui fortemente as chances de detecção do processo.

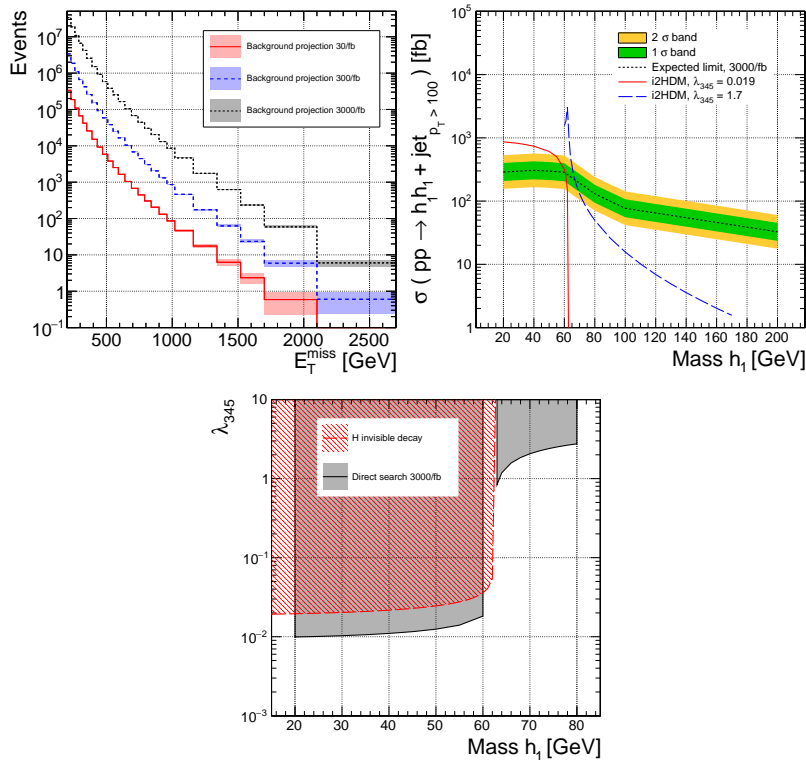


Figura 4: Alto, esquerda: projeção do fundo de Modelo Padrão para a busca por matéria escura no contexto do modelo i2HDM, para os cenários de 30, 300 e 3000 fb^{-1} tomados com o detector CMS. Alto, direita: limite esperado para a mesma situação – as linhas vermelha cheia e azul pontilhada representas a seção de choque de diferentes possíveis configurações do modelo i2HDM. Baixo: reinterpretação dos limites no espaço de parâmetros do modelo i2DhM, $m_{h_1} \times \lambda_{345}$.

2.3 Estudos em Aprendizado de Máquina

Em 2017, comecei a me dedicar a estudos em aprendizado de máquina (*machine learning*), haja vista a aceleração do uso dessas técnicas em praticamente todas as áreas da ciência, e particularmente em física de altas energias. Juntamente com o Dr. Vargas, membro integrante do *Center of Excellence in Machine Learning* da UNESP (CoE-ML) [15], trabalhei na identificação de jatos *boosted*, provenientes de decaimentos de bósons vetoriais ($V \rightarrow qq$, onde $V = W, Z$), com redes neurais convolucionais – uma das ferramentas padrão da análise de imagens com *machine learning*. Fizemos a comparação com as técnicas tradicionais de físicas altas energias, com as quais eu trabalhei na frente de Novas Ressonâncias, e os resultados se mostraram bastante promissores, conforme pode ser visto na Fig. 5. Os resultados foram apresentados pelo Dr. Vargas em um poster no ENFPC2017: XXXVIII Encontro Nacional de Física de Partículas e Campos, Passa Quatro, MG, Brasil (2017).[16].

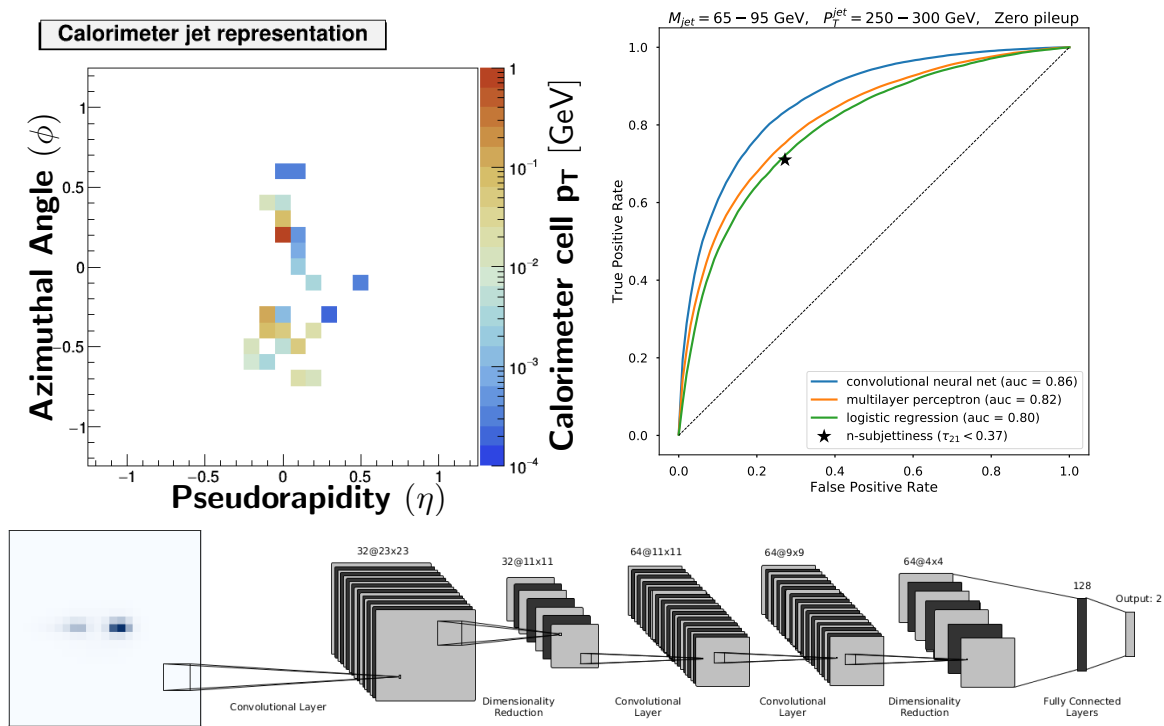


Figura 5: Alto, esquerda: exemplo simplificado de imagem de calorímetro de um process $W \rightarrow qq$ *boosted*. Alto, esquerda: comparação o uso de uma rede neural convolucionar, um *perceptron* de múltiplas camadas e uma regressão logística para a identificação do sinal. Baixo: arquitetura da rede neural utilizada.

2.4 Outras Atividades

2.4.1 Analysis Review Committees

Particpei de um comitê de avaliação interna de análise: a análise **CMS PAS B2G-17-019**, *Search for resonant and non resonant production of HH to 4 b in boosted topologies*, se dedica à busca de nova física no canal $pp \rightarrow X \rightarrow HH \rightarrow 4b$, tanto através de fenômenos ressonantes como não-ressonantes com o conjunto completo de dados de 2016 – 35.9 fb^{-1} de colisões pp a 13 TeV de centro de massa.

2.4.2 CMS Collaboration Service Work

Como membro da colaboração CMS, é parte do meu trabalho científico contribuir para o bom andamento do experimento. Em 2017 participei das seguintes atividades de serviço para a colaboração:

- **Contato do grupo de Alinhamento e Calibração para o Trigger:** para que todos os subsistemas do experimento estejam corretamente alinhados e calibrados, faz-se necessária a tomada de determinados conjuntos de dados especiais durante a operação do detector. Meu trabalho em 2017 foi agir como ponto de contato entre os grupos de Alinhamento e Calibração e o grupo de *Trigger* para garantir o desenvolvimento, implantação e monitoramento dos algoritmos de *trigger* necessários para a tomada desses dados.
- **High-Level Trigger Detector On-Call (HLTDOC):** a tomada de dados no experimento CMS acontece, em geral, de modo contínuo (24/7). A equipe de plantão (*shift crew*), localizada no sítio experimental, conta com uma rede de suporte de experts para garantir a boa operação do experimento. Meu trabalho como HLTDOC era monitorar todos os algoritmos de *trigger* utilizados para a tomada de dados, agindo prontamente para identificar e solucionar qualquer problema nos mesmos, bem como me reportar aos outros integrantes da rede de suporte em reuniões diárias. Em 2017, fiz 2 plantões de uma semana de disponibilidade 24/7, bem como 2 plantões de *backup*.

2.4.3 Participação em Conferências

- **Thiago R. F. Tomei**, *Evolution of online algorithms in ATLAS and CMS in Run2*, Apresentação Paralela na LHCP2017: The Fifth Annual Large Hadron Collider Physics Conference, Shanghai, China, (2017) [17, 18].

- **Thiago R. F. P. Tomei**, *Searches for a Diboson Resonance with the CMS Experiment*, Comunicação oral no ENFPC2017: XXXVIII Encontro Nacional de Física de Partículas e Campos, Passa Quatro, MG, Brasil (2017) [19].

2.4.4 Fontes de Financiamento

Sigo sendo outorgado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) com um Auxílio à Pesquisa – Projeto Regular, intitulado *Busca por Nova Física no Experimento CMS do Large Hadron Collider*, sob número de processo 2016/15897-4, com vigência de 01/11/2016 a 31/10/2018, no valor de R\$ 50.465,50.

Sigo sendo outorgado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) com uma bolsa de Produtividade em Pesquisa – PQ2, *Busca por Nova Física no Experimento CMS do Large Hadron Collider*, sob número de processo 308379/2016-0, com vigência de 01/03/2017 a 01/03/2020.

2.5 Bases de Dados

- **Currículo Lattes:**

<http://buscatextual.cnpq.br/buscatextual/visualizacv.do?id=K4713328U4>

- **ORCID:**

<https://orcid.org/0000-0002-1809-5226>

- **Researcher ID:**

<http://www.researcherid.com/rid/E-7091-2012>

- **Google Scholar:**

<https://scholar.google.com.br/citations?user=Ud.lv6EAAAAJ&hl=en>

Envio em anexo o Currículo Lattes **apenas com os dados relativos a 2017**. Adicionalmente, os artigos completos publicados em 2017 estão listados em um documento à parte – **devido à inadequação do sistema eletrônico do CNPq, a lista de artigos da colaboração CMS não pode ser publicada, pois é muito extensa.**

3. Atividades Docentes

No período deste relatório, ministrei com sucesso a disciplina de *Partículas Elementares II* no Instituto de Física Teórica (IFT-UNESP) no segundo semestre de 2017, com 100% dos alunos aprovados (2 com conceito B, 1 com conceito A). Para o segundo semestre de 2018, fui selecionado para ministrar a disciplina *Mecânica Quântica II*.

Durante o ano de 2017, segui trabalhando com o Sr. Gianni Liveraro, aluno do Instituto de Biociências do Câmpus de Botucatu (IBB-UNESP), em um projeto de Iniciação Científica: *Introdução à Física de Altas Energias* (sem bolsa). O Sr. Liveraro tem estudado a simulação de colisões de partículas em colisores hadrônicos a altas energias, e é um forte candidato a um posterior mestrado. Atualmente estamos aplicando para o Edital 01.2018 PROPe/COPE, *Programa UNESP de Bolsas de Iniciação Científica nas Ações Afirmativas*.

No começo de 2018, comecei a trabalhar com o Sr. Breno Orzari, aluno egresso do Instituto de Geociências e Ciências Exatas de Rio Claro (IGCE-UNESP), em um projeto de Mestrado: *Busca por Nova Física no Experimento CMS do Large Hadron Collider*. O Sr. Orzari foi agraciado com uma das bolsas institucionais do IFT-UNESP, e atualmente estamos pleiteando uma bolsa FAPESP (processo 2018/01398-1).

4. Atividades de Extensão

Este ano foi novamente organizado o Evento Internacional MasterClass de Física de Altas Energias, com participação de centenas de estudantes de ensino médio. Este ano o evento foi realizado simultaneamente na UNESP e na Universidade Federal do ABC, sendo dividido em três sessões: Primeira Edição (02 de março), MasterClass Feminino (07 e 08 de março) e Segunda Edição (22 e 23 de março). Participei primariamente da Segunda Edição, apresentando o seminário *A Estrutura Elementar da Matéria* e auxiliando os estudantes na atividade prática do evento – a caracterização de eventos reais tomados pelo detector CMS em termos de sua topologia e sua classificação como eventos advindos de bósons W , Z ou Higgs.

Gostaríamos de fazer aqui um aparte sobre o MasterClass Feminino. O dia 11 de fevereiro foi instituído como o Dia Internacional das Mulheres e Meninas na Ciência pela resolução A/RES/70/212, da Assembléia Geral das Nações Unidas [20]. O objetivo desse ato é chamar a atenção para a desigualdade de gênero e aumentar a participação feminina na área de ciências. De acordo com estudos patrocinados pela ONU, a probabilidade de uma estudante do sexo feminino obter um título de

Bacharel, Mestre ou Doutora na área de ciências é de 18%, 8% e 2% respectivamente; as probabilidades correspondentes para estudantes do sexo masculino são de 37%, 18% e 6%. Tendo em vista a situação supracitada, o grupo SPRACE tem tomado a iniciativa de realizar essa edição especial do evento destinada especialmente a alunas de ensino médio e primeiro ano de licenciatura.

Referências

- [1] Particle Data Group Collaboration, “Review of Particle Physics”, *Chin. Phys.* **C38** (2014) 090001, doi:10.1088/1674-1137/38/9/090001.
- [2] J. D. Lykken, “Beyond the Standard Model”, arXiv:1005.1676.
- [3] CMS Collaboration, “The CMS experiment at the CERN LHC”, *JINST* **3** (2008) S08004, doi:10.1088/1748-0221/3/08/S08004.
- [4] e. Evans, Lyndon and e. Bryant, Philip, “LHC Machine”, *JINST* **3** (2008) S08001, doi:10.1088/1748-0221/3/08/S08001.
- [5] M. Lamont, “Longer term LHC schedule”. <http://lhc-commissioning.web.cern.ch/lhc-commissioning/schedule/LHC-long-term.htm>.
- [6] L. Rossi et al., “2nd Periodic HILUMI LHC Report”. http://hilumilhc.web.cern.ch/sites/hilumilhc.web.cern.ch/files/HiLumi-P2-report_public_version.pdf, 2014.
- [7] J. Butler, D. Contardo, M. Klute, J. Mans, and L. Silvestris, “Technical Proposal for the Phase-II Upgrade of the CMS Detector”. <https://cds.cern.ch/record/2020886>, 2015.
- [8] CMS Collaboration, “Performance of b-Tagging Algorithms in Proton Collisions at 13 TeV using the 2016 Data”, technical report, (Jul, 2016). <https://cds.cern.ch/record/2202967>.
- [9] Y. Gao, A. V. Gritsan, Z. Guo et al., “Spin determination of single-produced resonances at hadron colliders”, *Phys. Rev.* **D81** (2010) 075022, doi:10.1103/PhysRevD.81.075022, arXiv:1001.3396.
- [10] S. Bolognesi, Y. Gao, A. V. Gritsan et al., “On the spin and parity of a single-produced resonance at the LHC”, *Phys. Rev.* **D86** (2012) 095031, doi:10.1103/PhysRevD.86.095031, arXiv:1208.4018.
- [11] CMS Collaboration, “Search for a new scalar resonance decaying to a pair of Z bosons in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV”. <https://cds.cern.ch/record/2296714>, 2017.
- [12] Planck Collaboration, “Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters”, *Astron. Astrophys.* **571** (2014) A16, doi:10.1051/0004-6361/201321591, arXiv:1303.5076.

- [13] N. G. Deshpande and E. Ma, "Pattern of Symmetry Breaking with Two Higgs Doublets", *Phys. Rev.* **D18** (1978) 2574, doi:[10.1103/PhysRevD.18.2574](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.18.2574).
- [14] L. Lopez Honorez, E. Nezri, J. F. Oliver et al., "The Inert Doublet Model: An Archetype for Dark Matter", *JCAP* **0702** (2007) 028, doi:[10.1088/1475-7516/2007/02/028](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2007/02/028), arXiv:[hep-ph/0612275](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0612275).
- [15] Center for Scientific Computing at UNESP, "Center of Excellence in Machine Learning". <https://coe-ml.ncc.unesp.br/>.
- [16] R. M. Cobe, S. F. Novaes, J. C. Ruiz Vargas, T. R. Tomei, "Boosted jet identification using Machine Learning techniques". <https://sec.sbfisica.org.br/eventos/enfpc/xxxviii/sys/resumos/R0181-1.pdf>, 2017. Poster presented at ENFPC 2017, Passa Quatro, MG, Brazil.
- [17] T. Tomei Fernandez, "Evolution of online algorithms in ATLAS and CMS in Run 2". <https://indico.cern.ch/event/517784/contributions/2496897/>, 2017. Talk presented at LHCP 2017, Shanghai, China.
- [18] ATLAS, CMS Collaboration, T. R. F. P. Tomei, "Evolution of online algorithms in ATLAS and CMS in Run 2", in *5th Large Hadron Collider Physics Conference (LHCP 2017) Shanghai, China, May 15-20, 2017*. 2017. arXiv:[1711.02946](https://arxiv.org/abs/1711.02946).
- [19] T. R. F. P. Tomei, "Searches for a Diboson Resonance with the CMS Experiment". <https://sec.sbfisica.org.br/eventos/enfpc/xxxviii/sys/resumos/R0128-1.pdf>, 2017. Talk presented at ENFPC 2017, Passa Quatro, MG, Brazil.
- [20] U. Nations, "International Day of Women and Girls in Science". <http://www.un.org/en/events/women-and-girls-in-science-day/>.