

RELATÓRIO DE ATIVIDADES DISCENTES PÓS-GRADUAÇÃO

ANDRÉ VIEIRA DA SILVA

andsilva@ifi.unicamp.br

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE FÍSICA *Gleb Wataghin*
DEPARTAMENTO DE RAIOS CÓSMICOS E CRONOLOGIA

11 de Janeiro de 2018

Resumo

Descrição das atividades realizadas durante os 12 meses de doutorado, as disciplinas cursadas e os tópicos estudados. Na busca por uma compreensão dos eventos de raios cósmicos em altas energias, nessa etapa estamos interessados em usar o ferramental computacional fornecido pelos geradores PYTHIA e o EPOS LHC, com o objetivo de simular processos elementares que podem ocorrer em colisões em altas energias na atmosfera.

Conteúdo

1	Atividades Acadêmicas	3
2	Descrição das Etapas Previstas do Trabalho/Cronograma de Sua Execução/Forma de Análise dos Resultados	3
2.1	Segundo Semestre de 2016/Primeiro Semestre de 2017	3
2.2	Segundo Semestre de 2017	4
2.3	Durante o Ano de 2018	7
2.3.1	Comparação entre as energia no referencial do LAB e Centro de Massa (CM) de acelerador e experimentos de raios cósmicos	9
A	Apêndice RIVET ATLAS 2011 S9128077	12
B	Análise dos Dados de Raios Cósmicos da CBJ	14
B.1	Evento C-jato 156725	15
B.1.1	FastJet: Anti- k_t	15
B.2	Evento C-jato 1584	17
B.2.1	FastJet: Anti- k_t	17
B.3	Evento C-jato 15105	17
B.3.1	FastJet: Anti- k_t	17
B.4	Evento C-jato 1790	18
B.4.1	FastJet: Anti- k_t	18

Nome do aluno: André Vieira da Silva.

RA: 083252

Curso: () 04 – Doutorado em Física (X) 54 – Doutorado em Física

Mês e ano de ingresso no curso: 08/2016

Bolsa (agência de fomento): CAPES

Orientador: José Augusto Chinellato.

Nome e código da linha de pesquisa: Física das Partículas Elementares e Campos-1.05.03.00-5

Título provisório da tese: "Busca de assimetrias na emissão de partículas em colisões de raios cósmicos na atmosfera terrestre e em detectores de chuveiros extensos".

Palavras-chave (máximo 03): Cosmic Rays, Hadronic Interaction, Monte Carlo Generators.

Data provável de conclusão: 08/2020

Período a que se refere o relatório: 08/2016 até 08/2017.

1 Atividades Acadêmicas

Resumo das atividades acadêmicas no segundo semestre de 2016:

- FI-141 – Turma "A" – Física de Partículas e Campos I
Prof. Responsável: Prof. Dr. Orlando Luis Goulart Peres
Créditos: 4
Conceito: **B**

Para o primeiro semestre de 2017 a disciplina cursada foi:

- FI002 – Turma "A" – Física de Partículas e Campos II
Prof. Responsável: Profa. Dra. Carola Dobrigkeit Chinellato
Créditos: 4
Conceito: **A**

2 Descrição das Etapas Previstas do Trabalho/Cronograma de Sua Execução/Forma de Análise dos Resultados

2.1 Segundo Semestre de 2016/Primeiro Semestre de 2017

O objetivo geral deste plano de pesquisa é estudar interações hadrônicas produzidas por partículas da radiação cósmica, como os eventos observados pela Colaboração Brasil-Japão de Raios Cósmicos CBJ [1], com energias de até 10^{17} eV e pela observatório Pierre Auger [2], com energias de até 10^{20} eV, no referencial do laboratório, e compará-los com os resultados obtidos pelos experimentos em aceleradores e com geradores de Monte Carlo (PYTHIA [3] e o EPOS LHC [4]).

Esse projeto é uma outra abordagem de análise do tema estudado na dissertação de mestrado (do aluno André Vieira da Silva, [Estudo de Processos Difrativos em Interações Hadrônicas](#), orientada pelo Prof. Dr. Edmilson José Tonelli Manganote, com a coorientação do Prof. Dr. José Augusto Chinellato, no IFGW), onde estudamos e fizemos uma análise preliminar de alguns eventos de raios cósmicos observados pela CBJ, através da comparação com dados de saída da simulação do PYTHIA (somente processos SoftQCD através de interações próton-próton (pp)).

Nessa pesquisa estamos interessados em fazer estudos mais sistemáticos de processos de interação forte (HardQCD), devido a interações pp, com a formação de jatos de partículas, como descrito pelo PYTHIA, e outra possibilidade seria utilizar o gerador de eventos EPOS LHC para gerar processos

de interação entre próton-Ion (por exemplo, próton-Chumbo (pPb), próton-Carbono (pC), ou entre Ions pesados). Para estudar os processos em eventos de raios cósmicos, o EPOS LHC descreve um cenário mais completo dos processos físicos em colisões de altas energias.

Os geradores PYTHIA e o EPOS LHC têm como objetivo principal aplicar as teorias de QCD através de códigos computacionais para gerar eventos, sem incluir os efeitos de resposta do detector, para uma descrição mais fidedigna são utilizados simuladores de detectores, por exemplo, o GEANT4 [5].

Nos geradores, as técnicas de Monte Carlo¹ são utilizadas para calcular em Mecânica Quântica as distribuições de probabilidade para diferentes resultados de uma medida das partículas nos estados finais [6].

Why Monte Carlo Generators? Not Possible without Monte Carlo!

Monte Carlo generators allow to include theoretical models, phase space integration in multiple dimensions, inclusion of detector effects, and efficiency and acceptance determination for new physics processes [Lecture 6: Monte Carlo Generators Simulating high energy pp-collisions ...]^a.

^a<https://www.scribd.com/document/212643325/Lecture-6>

2.2 Segundo Semestre de 2017

1. PYTHIA²

- É um programa para a geração de eventos de física de alta energia, ou seja, para a descrição de colisões em altas energias entre partículas elementares, como pósitron-elétron (e^+e^-), próton-próton (pp), próton-antipróton ($p\bar{p}$) e entre outras combinações.
- Contém Teorias e Modelos para vários aspectos da física, como interações da QCD³ que incluem **SoftQCD** e **HardQCD** processos [7]. A lista completa e uma descrição dos processos pode ser encontrada na página **PYTHIA 8 online manual - Theoretical Physics - Lund University**
- **HardQCD**: Este grupo de procedimentos dentro do PYTHIA8 contém os processos de **produção de jatos da QCD** [8] acima de um limite mínimo de p_T (momento transversal). O corte p_{Tmin} não pode ser colocado muito baixo, ou então serão obtidas seções de choque de jatos razoavelmente grandes. Isso ocorre porque a seção de choque da QCD perturbativa é divergente para valores de p_T no intervalo de 0.1 a 1 GeV [7, 9], sem modificações de regularização. As condições de Trigger do detector [10] (cortes experimentais) também estabelecem valores de p_T mínimo.

¹<http://home.thep.lu.se/~torbjorn/talks/cern12a.pdf>

²A versão do PYTHIA usada está disponível no site: <http://home.thep.lu.se/~torbjorn/pythia8/pythia8226.tgz>

³Quantum Chromodynamics: Descreve a interação forte entre quarks e glúons.

Proton-Proton Scattering @ LHC

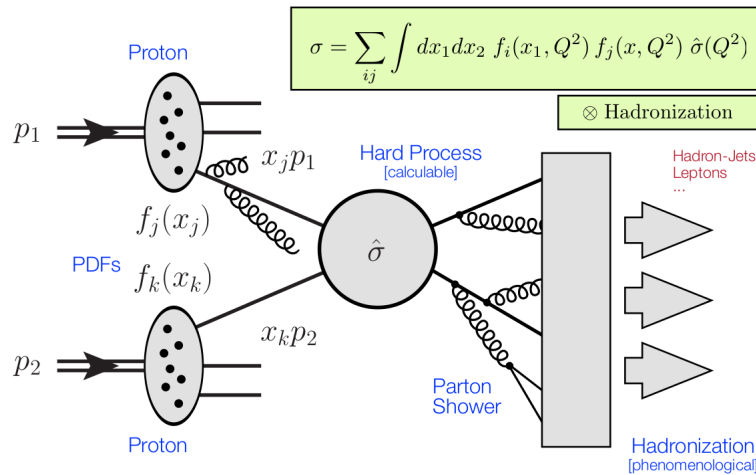


Figura 1: Descrição pictórica do espalhamento pp no LHC. Parton Distribution Functions (PDFs) $f_j(x_j, Q^2)$, $f_k(x_k, Q^2)$ para os hádrons é a uma função densidade de probabilidade de encontrar um parton com fração de momento x , com o quadrado do momento transferido Q^2 . Os Hádrons são compostos de quarks e gluons, a seção de choque total (σ) hadrônica pode ser obtida através das seções de choque dos subprocessos pela PDFs quando a teoria perturbativa da QCD é aplicável. No nível do Partons Shower ocorre a formação de hádrons, cujo processo é chamado de hadronização. Fonte: [G.Herten] <https://www.scribd.com/document/212643325/Lecture-6>

Os subprocessos da HardQCD: $gg \rightarrow gg$, $gg \rightarrow q\bar{q}$, $qg \rightarrow qg$, $qq' \rightarrow qq'$, $q\bar{q}' \rightarrow q\bar{q}'$, $\bar{q}q' \rightarrow \bar{q}q'$, $q\bar{q} \rightarrow gg$ e $q\bar{q} \rightarrow q'q'$. No artigo [11] é realizado um estudo desses subprocessos através do PYTHIA8 para estimar a contribuição de cada subprocesso para a formação de jatos.

Jet Definition [12]:

Jets are the collimated sprays of hadrons that result from the fragmentation of a high-energy quark or gluon.

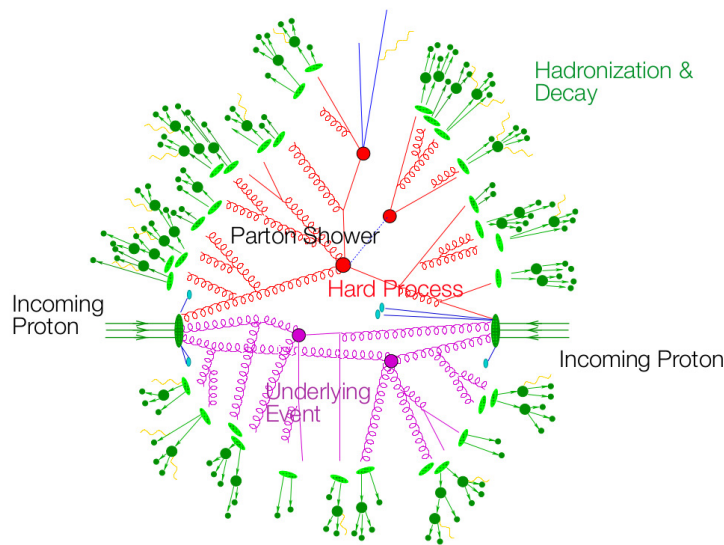
• Parâmetros Iniciais do PYTHIA:

(**PRIMEIRO ESTUDO DESCRITO NESSE RELATÓRIO**)

- Energia no centro de massa (centro de momento) : $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$.
- 10^5 colisões pp.
- HardQCD.
- $p_{T\text{mín}} = 80 \text{ GeV}$.
- Arquivo de saída: **pythia.hepmc** (.hepmc (High Energy Physics Monte Carlo)[13] é um formato padrão para armazenagem de eventos)

A Figura 2 mostra um visão pictórica sobre os processos de interações entre pp, a partir dos quarks e gluons até a formação de jatos de partículas. Em seguida na Figura 3 mostrar os níveis (quarks e gluons, hádrons e detector) para descrever de uma maneira geral a evolução do sistema.

From Partons to Jets



[T. Gleisberg et al., JHEP02 (2004) 056]

Figura 2: Descrição pictórica dos processos (Underlying Event, Parton Shower, Hard Process, Hadronization & Decay) de interação pp através do Monte Carlo evento gerador. Fonte: http://www.emg.uni-mainz.de/Dateien/MC_lec1.pdf

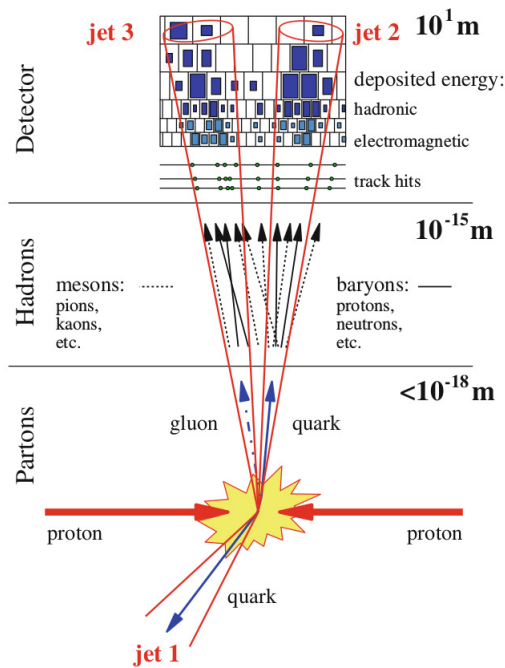


Figura 3: Ilustração de jatos formados a partir do feixes de Partons e Hadrons, nos detectores (hadrônico e eletromagnético) são medidos aglomerados de energia. Fonte: [8]

2. Análise dos Dados Gerados pelo PYTHIA através do RIVET[14]:

- O RIVET (Robust Independent Validation of Experiment and Theory) é um sistema de

validação de geradores de eventos Monte Carlo. Ele fornece um conjunto grande (e cada vez maior) de análises dos experimentos de aceleradores úteis para o desenvolvimento, validação e sintonização dos geradores de MC, bem como uma infra-estrutura conveniente para adicionar suas próprias análises.

- A descrição das análises realizadas até o presente momento pelos experimentos ATLAS [15], ALICE [16], CMS [17] e LHCb [18] no LHC/CERN⁴ [19] estão incluídas no banco de dados do programa RIVET: [Standard Rivet Analyses](#)
- Nosso primeiro objetivo é estudar a formação de jatos em interações hadrônicas, através da utilização do PYTHIA, para buscar uma compreensão dos processos elementares que podem ocorrer em eventos de raios cósmicos. Usando os dados gerados no PYTHIA podemos comparar com dados experimentais (High Energy Physics Data Repository [HEPData](#)) publicados pelas colaborações dos experimentos do LHC através do RIVET, para analisar a formação de jatos no centro de massa ([ATLAS 2011 S9128077](#)).
- **Rivet analyses reference:** [ATLAS 2011 S9128077](#) [20]:

A Figura 4 é resultado da análise do RIVET [ATLAS 2011 S9128077](#) (Apêndice A), com um gráfico da seção de choque (σ) total inclusive de jatos em função da multiplicidade de jatos (N_{jet}), produzidos nas colisões pp observados no detector ATLAS. A seção de choque inclusiva de jatos incluem todos os processos inelásticos e elásticos que resultam em jatos. Nesta análise é utilizado o algoritmo anti- k_t [21] para a reconstrução de jatos, com o parâmetro de resolução fixado a $R = 0.4$ é usado para definir um jato.

Seção de Choque Total Inclusiva de Jatos, na forma diferencial [8]:

$$\frac{d^2\sigma}{dp_T dy} = \frac{1}{\mathcal{E}\mathcal{L}_{\text{int}}} \frac{N_{\text{jet}}}{\Delta p_T \Delta y}. \quad (1)$$

Sendo \mathcal{E} é a eficiência experimental, e Δp_T e Δy são as larguras dos bins do momento transversal e da rapidez, respectivamente.

- As seções de choque de jatos servem como um dos principais observáveis em física de partículas de alta energia, fornecendo informações sobre a estrutura do próton. Elas são uma importante ferramenta para entender a interação forte (QCD) e buscar uma física além do modelo padrão [22].
- No regime da HardQCD, A seção de choque para a produção de dois jatos, de acordo com o gráfico da Figura 4: $\sigma_{jets} \sim 10^{-4}$ mb (milibarn). Comparando a seção de choque de produção de jatos com os processos da SoftQCD(difrativos e não-difrativos) que possuem uma seção de choque em torno de 100 mb, em energias de $\sqrt{s} = 14$ TeV [8], temos que a produção de jatos são eventos mais raros que eventos da SoftQCD.

A Figura 5 mostra um evento observado pelo detector ATLAS, devido a colisões pp, com a identificação de 6 jatos.

2.3 Durante o Ano de 2018

O pacote **FastJet** [12] será utilizado para identificação de jatos através de diversos algoritmos, os mais usados são anti- k_t [21], k_t [23, 24, 25] e Cambridge-Aachen (C/A) [26, 27]. Os algoritmos

⁴Large Hadron Collider ([LHC](#)), European Organization for Nuclear Research ([CERN](#))

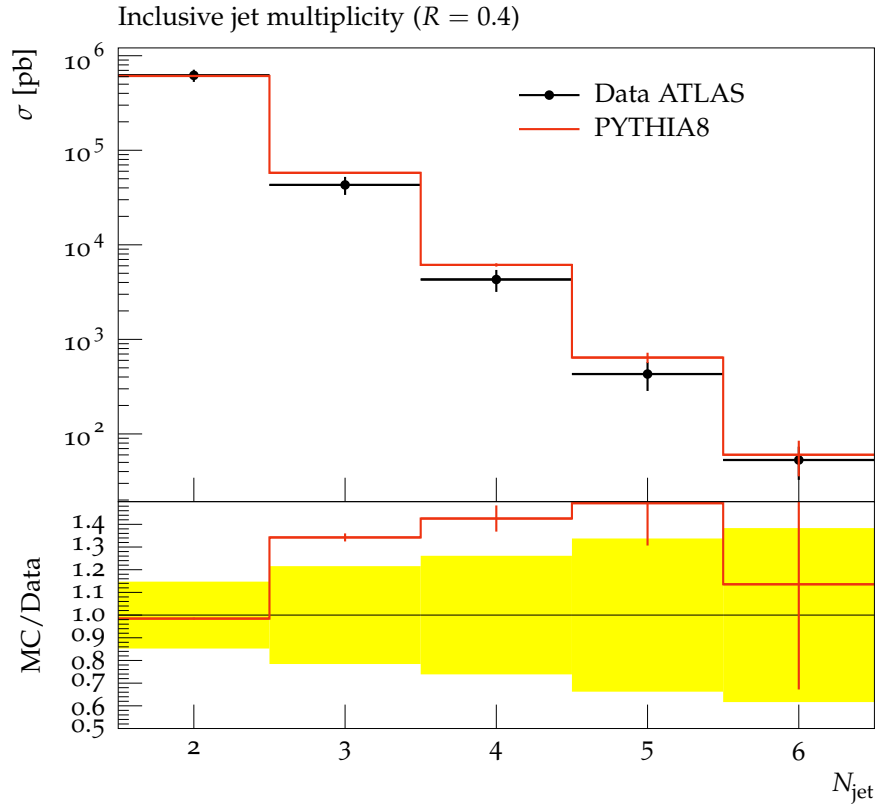


Figura 4: No gráfico, a seção de choque (σ) total inclusiva de jatos em função da multiplicidade de jatos, produzidos em colisões pp. Os dados experimentais medidos pelo detector ATLAS formam comparados com os dados gerados da simulação do PYTHIA8 para as condições iniciais descritas no tópico **Parâmetros Iniciais do PYTHIA**. Na parte inferior do gráfico a razão (MC/DATA) faz estimativa numérica entre dados do PYTHIA8 (MC) com dados experimentais (DATA). A (MC/DATA) mostra uma significativa concordância entre teoria e dados experimentais para a formação de dois jatos.

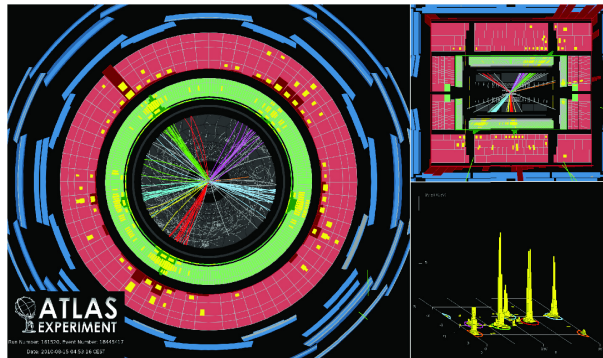


Figura 5: A exibição de um evento com 6 jatos satisfazendo os requerimentos da análise (algoritmo anti- k_t), observados no detector ATLAS. As torres na parte inferior do lado direito da figura representa a energia transversal depositada no calorímetro no espaço de fase (Pseudo-rapidez-Ângulo azimutal) ($\eta - \phi$). Os jatos com momento transversal no intervalo de 84 a 203 GeV são medidos nesse evento. Fonte: [20]

serão usados nos eventos produzidos pelos geradores PYTHIA8 e EPOS LHC com o objetivos de buscar por jatos em dados da CBJ e em chuviros de partículas com energias de até 10^{20} eV (no referencial do LAB, do Observatório Pierre Auger), o que corresponde a energia no centro de massa $\sqrt{s} \sim 433$ TeV (Colisão pp, veja a a seção 2.3.1), ou seja, energia muito acima da atual energia de operação do LHC, que é de $\sqrt{s} = 13$ TeV.

2.3.1 Comparação entre as energia no referencial do LAB e Centro de Massa (CM) de acelerador e experimentos de raios cósmicos

- CM : $\sqrt{s} = E_{\text{beam1}} + E_{\text{beam2}} = 7 \text{ TeV} + 7 \text{ TeV} = 14 \text{ TeV}$ (LHC).
- Alvo fixo colisão pp: $\sqrt{s} = \sqrt{m_p^2 + m_p^2 + 2E_p m_p}$, $E_p \gg m_p \Rightarrow \sqrt{s} \simeq \sqrt{2E_p m_p}$
 - Exemplo **LHC**: proton com $E = 7 \text{ TeV}$ colide com um próton em repouso,
$$\sqrt{s} \simeq \sqrt{2E_p m_p} \simeq \sqrt{2.7000[\text{GeV}].0,9383[\text{GeV}]} \simeq 115 \text{ GeV}$$
 - Exemplo **CBJ** : proton com $E \sim 10^5 \text{ TeV} = 10^8 \text{ GeV}$ colide com um próton em repouso,
$$\sqrt{s} \simeq \sqrt{2E_p m_p} \simeq \sqrt{2.10^8[\text{GeV}].0,9383[\text{GeV}]} \simeq 13,7 \text{ TeV},$$
no momento (2017) a energia do LHC é 13 TeV.
 - **Pierre Auger**: proton com $E \sim 10^8 \text{ TeV} = 10^{11} \text{ GeV}$ colide com um próton em repouso,
$$\sqrt{s} \simeq \sqrt{2E_p m_p} \simeq \sqrt{2.10^{11}[\text{GeV}].0,9383[\text{GeV}]} \simeq 433 \text{ TeV},$$

A análise dos jatos em eventos simulados tem como objetivo procurar por assimetrias nas posições de chegada das partículas em chuviros atmosféricos, a partir de amostras produzidas por geradores como o CORSIKA [28] e o EPOS LHC. Para isso, uma referência inicial é a tese de doutorado de Colin Baus, "Measurements in the Forward Phase-Space with the CMS Experiment and their Impact on Physics of Extensive Air Showers" [29].

Referências

- [1] Cesar MG Lattes et al. "Chacaltaya emulsion chamber experiment". Em: *Progress of Theoretical Physics Supplement* 47 (1971), pp. 1–125. URL: <http://ptps.oxfordjournals.org/content/47.toc>.
- [2] Giorgio Matthiae. "The cosmic ray energy spectrum as measured using the Pierre Auger Observatory". Em: *New Journal of Physics* 12.7 (2010), p. 075009. URL: <http://stacks.iop.org/1367-2630/12/i=7/a=075009>.
- [3] Torbjörn Sjöstrand et al. "An Introduction to PYTHIA 8.2". Em: *Comput. Phys. Commun.* 191 (2015), pp. 159–177. DOI: [10.1016/j.cpc.2015.01.024](https://doi.org/10.1016/j.cpc.2015.01.024). arXiv: [1410.3012](https://arxiv.org/abs/1410.3012) [hep-ph].

- [4] T. Pierog et al. “EPOS LHC: Test of collective hadronization with data measured at the CERN Large Hadron Collider”. Em: *Phys. Rev. C* 92.3 (2015), p. 034906. DOI: [10.1103/PhysRevC.92.034906](https://doi.org/10.1103/PhysRevC.92.034906). arXiv: [1306.0121](https://arxiv.org/abs/1306.0121) [hep-ph].
- [5] S. Agostinelli et al. “GEANT4: A Simulation toolkit”. Em: *Nucl. Instrum. Meth. A* 506 (2003), pp. 250–303. DOI: [10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8).
- [6] Torbjörn Sjöstrand. “Monte Carlo Tools”. Em: *Proceedings, 65th Scottish Universities Summer School in Physics: LHC Physics (SUSSP65): St. Andrews, UK, August 16-29, 2009*. 2009, pp. 309–339. DOI: [10.1201/b11865-14](https://doi.org/10.1201/b11865-14). arXiv: [0911.5286](https://arxiv.org/abs/0911.5286) [hep-ph]. URL: <https://inspirehep.net/record/838269/files/arXiv:0911.5286.pdf>.
- [7] R. Keith Ellis e W. James Stirling. “QCD and collider physics”. Em: *The 1990 CERN School of Physics Mallorca, Spain, September 16-29, 1990*. [135(1990)]. 1990, pp. 135–236. URL: http://lss.fnal.gov/cgi-bin/find_paper.pl?conf-90-164.
- [8] Klaus Rabbertz. “Jet Physics at the LHC”. Em: *Springer Tracts Mod. Phys.* 268 (2017), pp.1–214. DOI: [10.1007/978-3-319-42115-5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-42115-5).
- [9] Sebastian Sapeta. “QCD and Jets at Hadron Colliders”. Em: *Prog. Part. Nucl. Phys.* 89 (2016), pp. 1–55. DOI: [10.1016/j.pnpnp.2016.02.002](https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2016.02.002). arXiv: [1511.09336](https://arxiv.org/abs/1511.09336) [hep-ph].
- [10] Vardan Khachatryan et al. “The CMS trigger system”. Em: *JINST* 12.01 (2017), P01020. DOI: [10.1088/1748-0221/12/01/P01020](https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/01/P01020). arXiv: [1609.02366](https://arxiv.org/abs/1609.02366) [physics.ins-det].
- [11] M. Kaur e Ruchi Gupta. “Parton level study of high ET jets in hard QCD processes at LHC”. Em: (2016). arXiv: [1603.09152](https://arxiv.org/abs/1603.09152) [hep-ph].
- [12] Matteo Cacciari, Gavin P. Salam e Gregory Soyez. “FastJet user manual”. Em: *The European Physical Journal C* 72.3 (mar. de 2012), p. 1896. ISSN: 1434-6052. DOI: [10.1140/epjc/s10052-012-1896-2](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-012-1896-2). URL: <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-012-1896-2>.
- [13] Matt Dobbs e Jørgen Beck Hansen. “The HepMC C++ Monte Carlo event record for High Energy Physics Available via the following web-address: <http://home.cern.ch/mdobbs/HepMC/>”. Em: *Computer Physics Communications* 134.1 (2001), pp. 41–46. ISSN: 0010-4655. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4655\(00\)00189-2](https://doi.org/10.1016/S0010-4655(00)00189-2). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010465500001892>.
- [14] Andy Buckley et al. “Rivet user manual”. Em: *Comput. Phys. Commun.* 184 (2013), pp. 2803–2819. DOI: [10.1016/j.cpc.2013.05.021](https://doi.org/10.1016/j.cpc.2013.05.021). arXiv: [1003.0694](https://arxiv.org/abs/1003.0694) [hep-ph].
- [15] G. Aad et al. “The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider”. Em: *JINST* 3 (2008), S08003. DOI: [10.1088/1748-0221/3/08/S08003](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08003).
- [16] K. Aamodt et al. “The ALICE experiment at the CERN LHC”. Em: *JINST* 3 (2008), S08002. DOI: [10.1088/1748-0221/3/08/S08002](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08002).
- [17] S. Chatrchyan et al. “The CMS experiment at the CERN LHC”. Em: *JINST* 3 (2008), S08004. DOI: [10.1088/1748-0221/3/08/S08004](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08004).
- [18] A. Augusto Alves Jr. et al. “The LHCb Detector at the LHC”. Em: *JINST* 3 (2008), S08005. DOI: [10.1088/1748-0221/3/08/S08005](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08005).
- [19] Lyndon Evans e Philip Bryant. “LHC Machine”. Em: *JINST* 3 (2008), S08001. DOI: [10.1088/1748-0221/3/08/S08001](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08001).

- [20] G. Aad et al. “Measurement of multi-jet cross sections in proton–proton collisions at a 7 TeV center-of-mass energy”. Em: *The European Physical Journal C* 71.11 (nov. de 2011), p. 1763. ISSN: 1434-6052. DOI: [10.1140/epjc/s10052-011-1763-6](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-011-1763-6). URL: <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-011-1763-6>.
- [21] Matteo Cacciari, Gavin P. Salam e Gregory Soyez. “The Anti-k(t) jet clustering algorithm”. Em: *JHEP* 04 (2008), p. 063. DOI: [10.1088/1126-6708/2008/04/063](https://doi.org/10.1088/1126-6708/2008/04/063). arXiv: [0802.1189 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/0802.1189).
- [22] Georges Aad et al. “Measurement of inclusive jet and dijet production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector”. Em: *Phys. Rev. D* 86 (2012), p. 014022. DOI: [10.1103/PhysRevD.86.014022](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.86.014022). arXiv: [1112.6297 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/1112.6297).
- [23] S. Catani et al. “New clustering algorithm for multijet cross sections in e+e annihilation”. Em: *Physics Letters B* 269.3 (1991), pp. 432–438. ISSN: 0370-2693. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0370-2693\(91\)90196-W](http://dx.doi.org/10.1016/0370-2693(91)90196-W). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037026939190196W>.
- [24] Stephen D. Ellis e Davison E. Soper. “Successive combination jet algorithm for hadron collisions”. Em: *Phys. Rev. D* 48 (7 out. de 1993), pp. 3160–3166. DOI: [10.1103/PhysRevD.48.3160](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.48.3160). URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.48.3160>.
- [25] S. Catani et al. “Longitudinally-invariant k-clustering algorithms for hadron-hadron collisions”. Em: *Nuclear Physics B* 406.1 (1993), pp. 187–224. ISSN: 0550-3213. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0550-3213\(93\)90166-M](http://dx.doi.org/10.1016/0550-3213(93)90166-M). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/055032139390166M>.
- [26] Yu.L. Dokshitzer et al. “Better jet clustering algorithms”. Em: *Journal of High Energy Physics* 1997.08 (1997), p. 001. URL: <http://stacks.iop.org/1126-6708/1997/i=08/a=001>.
- [27] M. Wobisch e T. Wengler. “Hadronization corrections to jet cross-sections in deep inelastic scattering”. Em: *Monte Carlo generators for HERA physics. Proceedings, Workshop, Hamburg, Germany, 1998-1999*. 1998, pp. 270–279. arXiv: [hep-ph/9907280 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/hep-ph/9907280). URL: https://inspirehep.net/record/484872/files/arXiv:hep-ph_9907280.pdf.
- [28] D. Heck et al. “CORSIKA: A Monte Carlo code to simulate extensive air showers”. Em: (1998).
- [29] Colin Baus. “Measurements in the Forward Phase-Space with the CMS Experiment and their Impact on Physics of Extensive Air Showers”. Tese de doutoramento. Karlsruhe, Germany: KIT, Karlsruhe, 2015-04-17. URL: https://inspirehep.net/record/1429471/files/fulltext_wiYP6r.pdf.

A Apêndice RIVET [ATLAS 2011 S9128077](#)

Measurement of multi-jet cross sections

Status: VALIDATED

Inspire ID: 917599

Inspire URL: <http://inspire-hep.net/record/917599>

HepData URL: <http://hepdata.cedar.ac.uk/view/ins917599>

Year of publication: 2011

BibTeX key: Aad:2011tqa

Authors:

Frank Siegert <frank.siegert@cern.ch>

Description:

Inclusive multi-jet production is studied using an integrated luminosity of 2.4 pb⁻¹. Results on multi-jet cross sections are presented differential in p_T of the four leading jets, HT. Additionally three-to-two jet fractions are presented differential in different observables. Jets are anti- k_t with $R=0.4$ and $R=0.6$, $p_{\perp} > 80(60)$ GeV and $|\eta| < 2.8$.

Experiment: ATLAS(LHC)

Beams: p+ p+

Beam energies: (3500.0, 3500.0) GeV

Run details:

Pure QCD, inclusive enough for jet p_T down to 60 GeV.

References:

arXiv:1107.2092 - <http://arxiv.org/abs/1107.2092>

Usando os dados gerados pelo PYTHIA (pythia.hepmc) na análise [ATLAS 2011 S9128077](#)

No terminal do Linux:

```
rivet pythia.hepmc -a ATLAS_2011_S9128077
```

```
Rivet 2.5.4 running on machine andre-QBEX-H61H2-M17 (x86_64)
```

```
Reading events from 'pythia.hepmc'
```

```
#-----
#                               FastJet release 3.2.2
#                               M. Cacciari, G.P. Salam and G. Soyez
#   A software package for jet finding and analysis at colliders
#                               http://fastjet.fr
#
# Please cite EPJC72(2012)1896 [arXiv:1111.6097] if you use this
# package for scientific work and optionally PLB641(2006)57
```

```
# [hep-ph/0512210].
#
# FastJet is provided without warranty under the terms of the
# GNU GPLv2. It uses T. Chan's closest pair algorithm, S.
# Fortune's Voronoi code and 3rd party plugin jet algorithms.
# See COPYING file for details.
#-----
Event 100 (0:00:01 elapsed)
Event 200 (0:00:03 elapsed)
Event 300 (0:00:04 elapsed)
Event 400 (0:00:06 elapsed)
Event 500 (0:00:07 elapsed)
...
...
Event 99800 (0:26:28 elapsed)
Event 99900 (0:26:30 elapsed)
Event 100000 (0:26:31 elapsed)
Cross-section = 1.003279e+06 pb

Rivet.Analysis.Handler: INFO   Finalising analyses
Rivet.Analysis.Handler: INFO   Processed 100000 events

The MCnet usage guidelines apply to Rivet:
see http://www.montecarlonet.org/GUIDELINES
Please acknowledge plots made with Rivet analyses,
and cite arXiv:1003.0694 (http://arxiv.org/abs/1003.0694)

Histograms written to /home/andre/Desktop/RIVET/Rivet.yoda

rivet-mkhtml --mc-errs Rivet.yoda:"PYTHIA8"

make-plots --eps *.dat
```

B Análise dos Dados de Raios Cósmicos da CBJ

Os dados disponíveis para análise são referentes aos eventos observados nas câmaras inferiores (Tabela 1). A partir desses dados foram construídas as seguintes distribuições: de partículas em função da pseudorapidez (η), de energia em função da pseudorapidez (η), de partículas em função do ângulo azimutal (ϕ) e de momento transversal (p_T). As distribuições são fundamentais na busca por uma compreensão dos processos de interação hadrônica que ocorrem na câmara superior.

Tabela 1: Dados das Câmaras Inferiores

Nº	Evento	Nº Chuveiros	$\sum E_\gamma$ [TeV]	Nº	Evento	N Chuveiros	$\sum E_\gamma$ [TeV]
1	1517	9	20.97	34	17961	28	33.66
2	1528	16	30.34	35	17962	19	20.10
3	1543	18	24.74	36	171022	26	31.88
4	1547	9	92.55	37	171024	21	22.14
5	1567	25	21.76	38	17104	12	23.23
6	156725	19	24.68	39	17105	5	32.32
7	1576	15	19.67	40	17115	14	18.51
8	1577	14	27.94	41	17122	10	22.35
9	1584	17	18.70	42	17124	23	44.38
10	1597	24	62.53	43	17130	18	38.94
11	15102	22	34.06	44	17132	5	25.10
12	15105	22	35.02	45	171351	29	38.66
13	15115	29	76.62	46	171354	21	23.69
14	15150	8	19.38	47	17136	37	110.48
15	15156	4	24.85	48	171382	14	21.08
16	15159	9	22.97	49	171388	25	19.82
17	151614	6	16.91	50	17140	27	30.37
18	1680	25	36.86	51	17148	19	19.32
19	1685	4	20.85	52	17150	12	95.15
20	1686	9	118.75	53	17159	13	21.31
21	1691	24	31.49	54	17164	44	123.20
22	1696	15	24.02	55	1821	5	65.93
23	16101	16	52.75	56	1824	17	28.34
24	16105	26	26.23	57	1828	4	29.30
25	17192	23	95.27	58	1830	22	65.86
26	1769	7	32.25	59	1832	22	54.14
27	17791	4	31.10	60	1847	13	24.20
28	17792	7	34.44	61	1849	26	42.74
29	17841	8	23.54	62	1869	22	42.64
30	17842	11	22.45	63	187330	20	26.85
31	1786	28	40.83	64	187650	13	21.91
32	1789	7	25.81	65	1892	18	18.49
33	1790	27	41.91	66	1893	14	27.16

Nº	Evento	N Chuveiros	$\sum E_\gamma$ [TeV]
67	18110	27	37.20
68	18139	19	20.17
69	18145	8	37.93
70	18149	8	69.65
71	19100	7	25.90
72	19105	12	21.40
73	19107	8	21.29
74	19108	11	24.14
75	19115	12	57.45
76	191214	8	21.30
77	191215	8	20.19
78	19127	19	21.51
80	191361	15	52.46
81	191362	16	81.45
82	19138	9	29.00
	TOTAL	1334	

B.1 Evento C-jato 156725

B.1.1 FastJet: Anti- k_t

Clustering with Longitudinally invariant anti- k_t algorithm with $R = 0.4$ and E scheme recombination

```

      pt [GeV]      y      phi [rad]
jet 0: 0.826692   10.1359  -1.39656  //mass jet =    0.158755 GeV
jet 1: 0.632848    8.89237   1.75207  #mass jet =    0.0515245 GeV
jet 2: 0.246495   10.5054   1.45448  #mass jet = -4.02377e-05 GeV
jet 3: 0.188372   10.5786  -1.31734  #mass jet = -4.02494e-06 GeV
jet 4: 0.127956    8.5758   2.14514  #mass jet =    0.00879659 GeV
jet 5: 0.0938184  8.19534   1.84991  #mass jet =    1.16108e-06 GeV

```

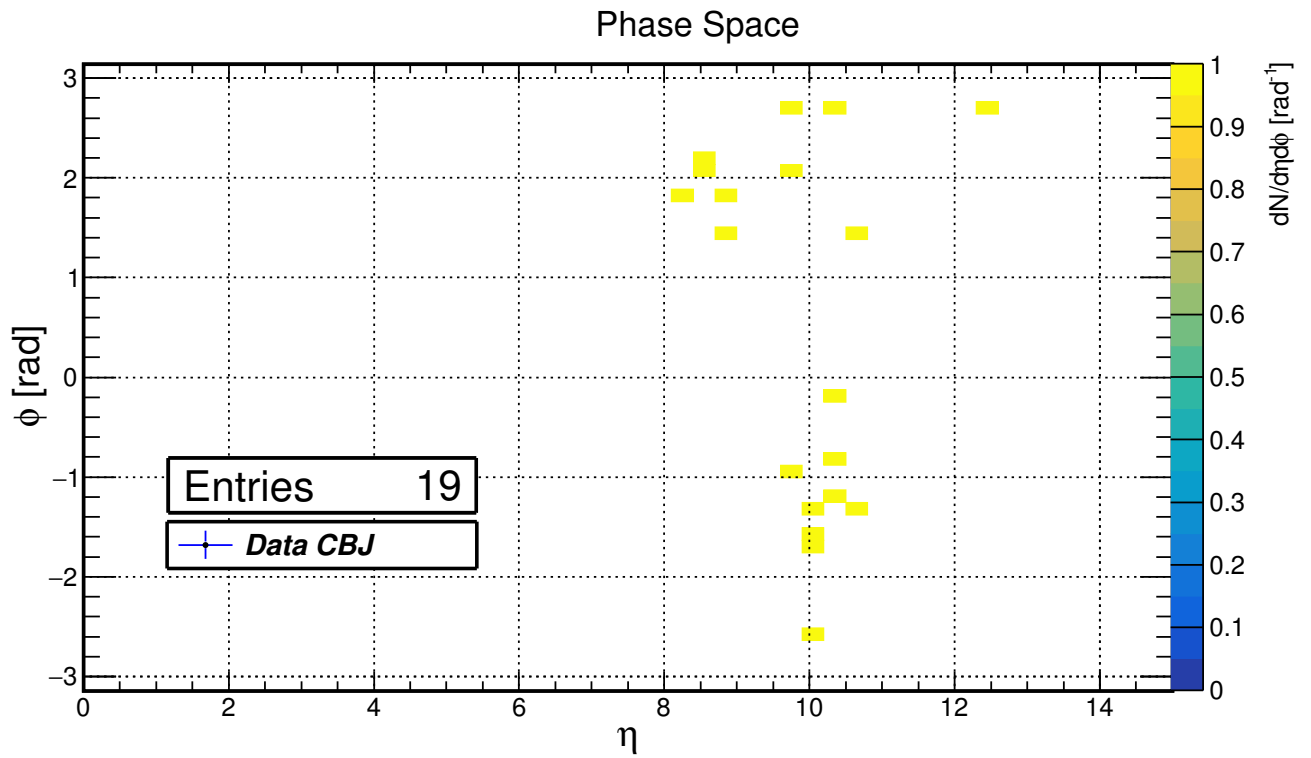


Figura 6: Evento 156725

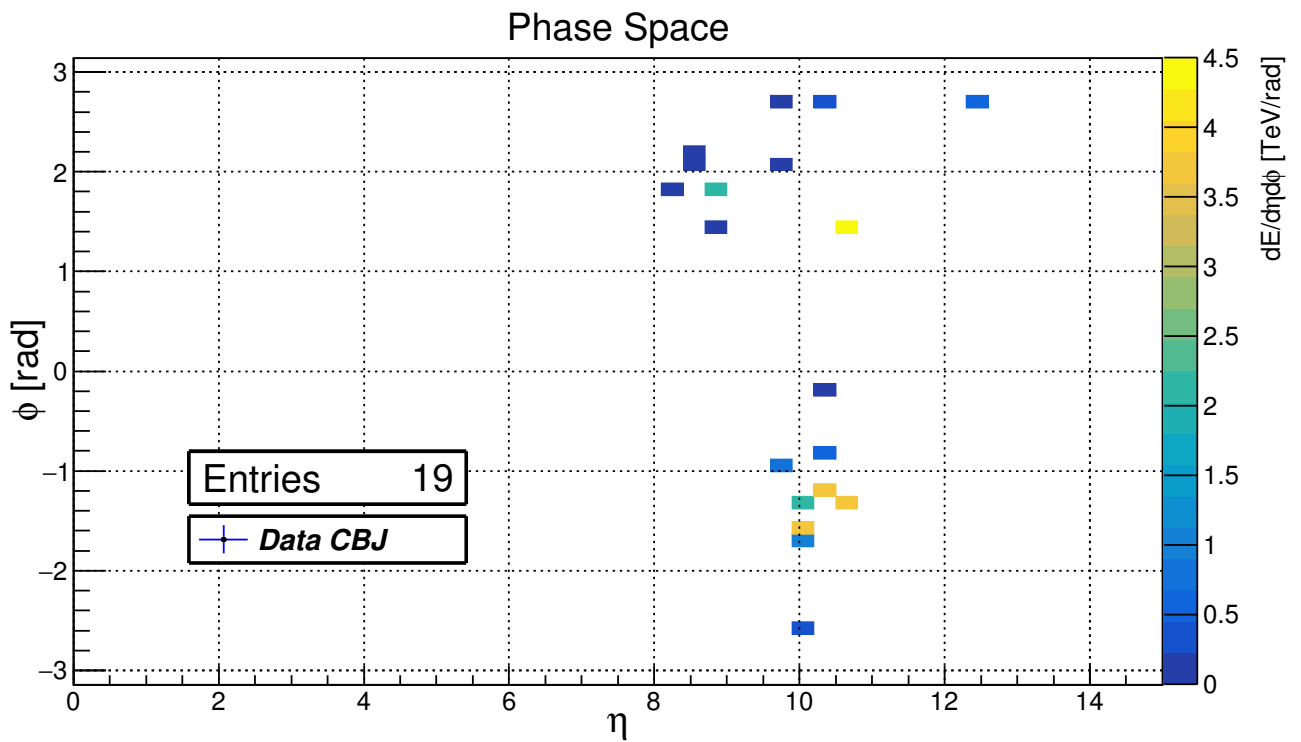


Figura 7: Evento 156725

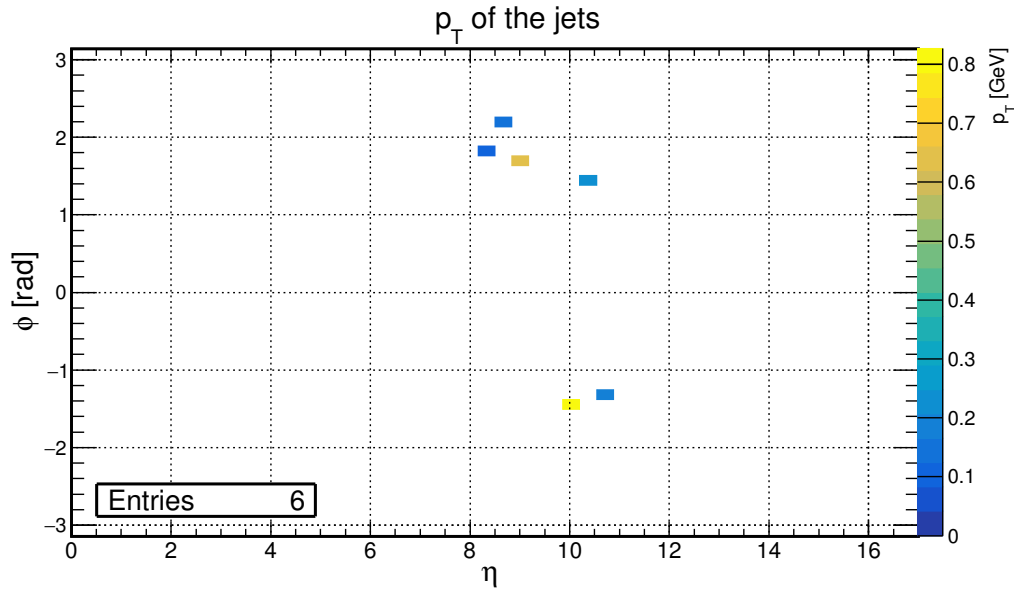


Figura 8: Evento 156725

B.2 Evento C-jato 1584

B.2.1 FastJet: Anti- k_t

Clustering with Longitudinally invariant anti-kt algorithm with $R = 0.4$ and E scheme recombination

	pt [GeV]	y	phi [rad]	
jet 0:	0.86085	9.9262	-2.37448	#mass jet = 0.138819 GeV ($\sim \pi^\pm$)
jet 1:	0.580977	8.88813	0.929833	//mass jet = 0.0701523 GeV
jet 2:	0.233399	9.9722	0.758493	//mass jet = 1.31904e-05 GeV
jet 3:	0.192098	8.51668	-2.30757	//mass jet = 4.16851e-06 GeV
jet 4:	0.161467	10.1075	0.169777	//mass jet = 2.40835e-05 GeV
jet 5:	0.142581	8.27578	0.584771	//mass jet = -2.48455e-06 GeV

B.3 Evento C-jato 15105

B.3.1 FastJet: Anti- k_t

Clustering with Longitudinally invariant anti-kt algorithm with $R = 0.4$ and E scheme recombination

	pt [GeV]	y	phi [rad]	
jet 0:	1.25123	9.00009	1.431	#mass jet = 0.13669 GeV ($\sim \pi^0$)
jet 1:	0.782653	7.83167	2.60093	//mass jet = 0.0722593 GeV
jet 2:	0.678522	9.98501	-1.7554	//mass jet = 0.0694423 GeV
jet 3:	0.461633	7.37963	-0.396123	//mass jet = -3.33476e-06 GeV
jet 4:	0.430055	9.2332	-1.83021	//mass jet = -3.45199e-05 GeV
jet 5:	0.3288	10.6003	-1.84698	//mass jet = 8.73341e-05 GeV

B.4 Evento C-jato 1790

B.4.1 FastJet: Anti- k_t

Clustering with Longitudinally invariant anti- k_t algorithm with
R = 0.4 and E scheme recombination

	pt [GeV]	y	phi [rad]	
jet 0:	0.872288	7.55077	1.49418	#mass jet = 0.138312 GeV ($\sim \pi^\pm$)
jet 1:	0.64538	9.74637	-3.07271	//mass jet = 0.0609699 GeV
jet 2:	0.598933	8.56111	0.6051	//mass jet = 0.0500145 GeV
jet 3:	0.477796	9.5334	-2.45884	//mass jet = -2.30383e-05 GeV
jet 4:	0.390782	10.2269	-2.2564	//mass jet = -4.04094e-05 GeV
jet 5:	0.327111	9.36021	-1.71672	//mass jet = -9.86059e-06 GeV