

## 5

### Estudo do Decaimento $B^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^- \pi^+$

Neste capítulo apresentamos a análise do canal  $B^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^- \pi^+$ , com dados simulados do experimento LHCb. Começamos descrevendo todo o processo de obtenção da amostra por meio do software do LHCb, para então descrever a análise dos dados em si: escolha das variáveis relevantes para otimização do sinal e rejeição do ruído. Em seguida explicaremos como foram feitos os cortes nas variáveis escolhidas bem como a estimativa obtida para o número de eventos por ano para sinal e ruído.

#### 5.1

##### Geração e Reconstrução de Eventos de Monte Carlo no LHCb

O processo de simulação de estudo no LHCb, e em particular, o decaimento  $B^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^- \pi^+$  segue alguns passos.

Primeiramente, as colisões entre prótons são simuladas com o pacote PYTHIA com a energia do centro de massa de  $14 \text{ TeV}$  e luminosidade nominal de  $2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  para a formação dos hádrons no LHCb. Os resultados dessas colisões são gerados segundo as seções de choque obtidas através de extrapolações, para tal energia.

Em seguida, faz-se a simulação do decaimento das partículas instáveis e da interação das partículas com os detectores. Nesse momento, os sinais deixados pelas partículas nos detectores são simulados e os resultados de cada um deles são obtidos de acordo com a eficiência e precisão obtidas em testes com protótipos em feixes no CERN. A resposta do *trigger* aos traços deixados pelas partículas também é simulado. Depois do *trigger*, toda a reconstrução completa do evento é feita e os dados dos eventos são guardados para serem analisados.

Em resumo, o software de simulação faz as seguintes tarefas:

1. *Geração dos eventos.*
2. *Interação das partículas com o detector.*
3. *Simulação da resposta do detector e digitalização das informações.*

4. *Reconstrução dos eventos.*

Veremos com mais detalhe a seguir.

## 5.1.1

**Software do LHCb**

O conjunto de softwares usados para fazer as simulações são :

**Gaudi (v21r2)** É um ambiente baseado na linguagem de programação C++, que oferece as ferramentas básicas para a construção de algoritmos e também oferece uma funcionalidade de configuração através de um arquivo de opções, onde a informação pode ser passada de um algoritmo para outro durante o processamento de um dado evento. Isso significa que o Gaudi é a estrutura padrão ou *framework* responsável da simulação de dados, algoritmos do *trigger*, programas de reconstrução, visualização e análises dos processos físicos, além de suportar aplicações interativas e não-interativas [37].

**Gauss (v37r2)** É o pacote que faz as simulações dos decaimentos no LHCb. Tem duas fases independentes [38]:

- O gerador de eventos físicos, que consiste na geração das colisões  $pp$  usando o pacote PHYTIA [38], e os subsequentes decaimentos das partículas produzidas com ajuda do pacote EVTGEN [38], que pode manipular complexas sequências dos decaimentos, considerar violação de CP, etc.
- O pacote GEANT4 simula as interações das partículas com os sub-detectores. Nesta fase, é necessário descrever a geometria e características físicas do detector LHCb.

**Boole (v17r2)** É o responsável pela digitalização dos dados de saída do GEANT4 de Gauss. Os sinais obtidos simulam os dados reais, assim como os defeitos, eficiências, ruído e os efeitos da eletrônica de leitura. Os dados produzidos no Boole são indistinguíveis dos reais, exceto pela chamada Tabela de Verdade de Monte Carlo. Este último torna possível comparar, após reconstruir, a resposta do detector ao evento tal como foi simulado [39].

**Brunel (v34r2)** A tarefa do Brunel é processar os dados que saem do Boole. Com base nas informações dos detectores, o Brunel transforma os sinais eletrônicos em quantidades físicas: trajetórias, momento, identificação de partículas, etc [40].

**DaVinci (v21r0)** Pacote de algoritmos para análises de eventos *off-line*.

Combina traços para formação de vértices primários e secundários, permitindo determinação do ponto de produção e decaimento ao méson  $B$  com toda sua cadeia de decaimento [41]. As amostras que utilizamos neste trabalho (descritas a na seção a seguir) já estavam geradas, reconstruídas e armazenadas em arquivos tipo *dst* (*data summary tape*), ou seja, resultados dos passos anteriores até o Brunel.

Nossa primeira etapa no processamento das amostras foi a construção de algoritmos baseados em DaVinci para a formação dos candidatos a vértices de  $B$  e pré-seleção (baseada em cortes relativamente fracos). Os eventos selecionados assim são guardados em *ntuples* para serem analisados na etapa de seleção, via pacote gráfico ROOT (v5.21)[42].

### 5.1.2

#### Tipos de Amostras de Eventos

Para o estudo do canal  $B^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^- \pi^+$ , devemos analisar amostras simuladas deste decaimento de “sinal” bem como fontes de ruído. Foram três os tipos de amostras utilizadas:

**Sinal** Trata-se da amostra em que em cada evento simulado impõe-se a produção do méson  $B^\pm$  decaindo no estado  $\pi^\pm \pi^+ \pi^-$ . Para o decaimento  $B^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^- \pi^+$  a amostra disponível após reconstrução é de 62131 eventos. Esta amostra já foi gerada impondo-se também que tanto  $B$  como seus produtos estejam dentro da aceitância geométrica do dectetor.

**bb Inclusivo** A amostra de  $bb$  inclusivo é composta por eventos que contenham pelo menos um par de quarks  $\bar{b}b$  nas colisões  $pp$  produzido dentro de uma cobertura geométrica  $400 \text{ mrad}$ . O par  $\bar{b}b$  pode se hadronizar em quaisquer tipos de hádrons, decaem de acordo a suas razões de ramificação. Esta amostra é usada como ruído, já que a probabilidade de se encontrar algum evento de  $B^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^- \pi^+$  nesta amostra é muito pequena. A amostra de  $\bar{b}b$  inclusivo usada tem 982503 eventos já pré-selecionados, com eficiência de 0.036431 (corresponde aproximadamente a 27 milhões de eventos gerados).

**Minimum Bias** Engloba todos os eventos gerados da colisões  $pp$ . A amostra utilizada aqui é a chamada *L0-stripped*, porque já passou pelo filtro do *trigger L0*. Esta amostra tem 5570264 eventos, e corresponde a 6,3 segundos de tomada de dados reais. Embora a quantidade desses eventos

seja maior que a da amostra de  $\bar{b}\bar{b}$  inclusive ela representa um tempo real de tomada de dados muito menor.

A partir destas três amostras, fizemos um estudo de maneira a reduzir fortemente o ruído (minimum bias e  $\bar{b}\bar{b}$  inclusivo) mantendo uma boa eficiência na sinal. Descrevemos na próxima seção este procedimento.

## 5.2

### Seleção de Amostras $B^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^- \pi^+$

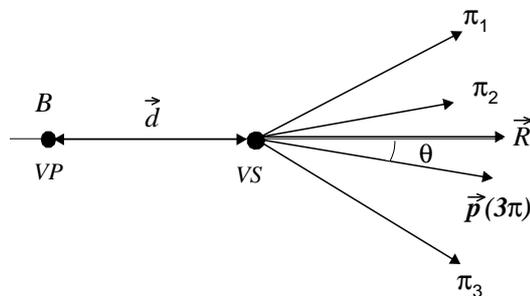
A seleção do decaimento  $B^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^- \pi^+$  foi realizada em algumas etapas. Criamos um programa que, utilizando o ambiente Gaudi e as ferramentas do DaVinci, processe cada evento reconstruído (de uma amostra particular) de maneira a tentar formar um vértice de  $B$  (vértice secundario, VS) e a partir daí usar variáveis físicas que possam discriminar entre um evento de sinal e ruído. Para isto, vamos descrever as variáveis de seleção relevantes para o nosso estudo.

#### 5.2.1

##### Variáveis de Seleção

As variáveis de seleção de interesse são aquelas que permitem fazer cortes que possam rejeitar significativamente as fontes de ruído, ao mesmo tempo que mantém uma boa eficiência para a amostra de sinal.

Descrevemos aqui as variáveis escolhidas no nosso estudo da pre-seleção de eventos (para formar as nossas *ntuples* de dados) e na seleção final de eventos. Mostramos na Figura 5.1 a topologia do decaimento  $B^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^- \pi^+$ .



**Figura 5.1:** Topologia do decaimento. No vértice primario (VP) ocorre a criação da partícula  $B$ , que decai no vértice secundario (VS).  $\theta$  é o ângulo entre a direção do  $B$  definida por  $\vec{d}$  e a soma de momentos dos três píons  $\vec{p}(3\pi)$ .

As seguintes variáveis foram usadas:

- $p_T(B)$ : momento transverso do méson  $B^+$  (medido em MeV/c).
- $\cos(\theta)$ : O cosseno do ângulo  $\theta$  entre a direção reconstruída do  $B(\vec{d})$  e a soma de momentos dos três píons  $\vec{p}$  (Figura 5.1). Estes vetores devem, para o sinal, ter a mesma direção, com isto o  $\cos(\theta)$  deve ser bem próximo de 1.
- $\chi^2(IP)$ : é o  $\chi^2$  do IP (parâmetro de impacto) do  $B^+$  com relação ao vértice primário (VP).
- $M$ : massa invariante do méson  $B^\pm$  (MeV/ $c^2$ ), calculada a partir dos momentos dos três píons no estado final.
- $\chi^2(FD)$ : o  $\chi^2$  da distância de vôo do méson  $B^+$  desde o vértice primário VP (Figura 5.1) ao ponto de decaimento VS.
- $\chi^2(\pi_i)/dof$ : o  $\chi^2$  de ajuste da trajetória do pion  $\pi_i$  por grau de liberdade ( $dof$ ).
- $PIDK(\pi_i)$ : esta variável é definida como a diferença em logaritmo das verossimilhanças da hipótese da filha de  $B$  (traço) ser um pión ou um káon. Valores positivos indicam uma grande probabilidade que a partícula seja um káon, enquanto que valores negativos apontam para um pión. Essa hipóteses são basicamente medidas pelo detector RICH.
- $p_T(\pi_i)$ : momento transverso (em MeV/c) de cada pión.
- $p(\pi_i)$ : momentum de cada pión em MeV/c.
- $\Sigma p_T(\pi_i)$ : é a soma dos momentos transversos dos três píons em MeV/c.
- $point$ : esta variável relaciona o momentum total do  $B^+$  ( $P(B)$ ), e a soma de momentos tranversos  $\Sigma p_T(\pi_i)$  dos píons com o ângulo  $\theta$ . É muito eficaz para separar sinal de ruído. O  $point$  é definido como:

$$point = \frac{P(B)\text{sen}(\theta)}{\Sigma p_T(\pi_i) + P(B)\text{sen}(\theta)} \quad (5.1)$$

A primeira etapa de análise foi o que chamamos pré-seleção para a obtenção das *ntuples* de dados, depois da qual foi feita a seleção final.

### 5.2.2

#### Pré-seleção da Amostra

Na pré-seleção se aplicou o algoritmo feito com o DaVinci no sistema computacional do LHCb. Esse algoritmo inclui a simulação da cinemática do decaimento  $B^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^- \pi^+$ , desde a criação das partículas  $B^\pm$  até a medida dos traços e momentos dos píons. O mesmo algoritmo foi aplicado para o sinal,  $b\bar{b}$  inclusivo e o minimum bias.

Além das variáveis de seleção se aplicou o nível de *trigger* L0 que reduz a frequência dos dados a serem armazenados, este filtro deixa passar 1 MHz de dados ao filtro L1. O L0 usa informações dos calorímetros e das câmaras de múons na busca de partículas com alto  $pT$ . Além disso o VELO é utilizado para identificar eventos contendo múltiplas interações.

Para esta pré-seleção, escolhemos cortes relativamente suaves em algumas das variáveis descritas anteriormente, para fazer uma filtragem prévia nas grandes amostras de  $b\bar{b}$  inclusivo e minimum bias e construir arquivos de eventos na forma de *ntuples*, que podem ser analisadas com a interface gráfica ROOT [42].

Variavel	Corte
$M(MeV/c^2)$	$5279 \pm 300$
$\cos(\theta)$	$>0,9999$
$pT(B)(MeV/c)$	$>300$
$\Sigma pT(\pi_i)(MeV/c)$	$>100$
$\chi^2(IP)$	$<100$
$\chi^2(FD)$	$>5$
$\chi^2(\pi_i)/dof$	$<15$

**Tabela 5.1:** Variáveis e cortes da pré-seleção de eventos.

Os cortes aplicados na pré-seleção mostrados na Tabela 5.1 já são bastante efetivos na eliminação do ruído.

Após esta etapa, dos 62131 eventos de sinal sobreviveram 12385, dos 5570264 eventos de minimum bias sobreviveram 220830, e dos 982503 de  $b\bar{b}$  inclusivo ficaram 183003 eventos.

### 5.2.3

#### Seleção Final da Amostra

De posse das *ntuples* de dados o próximo passo foi encontrar um conjunto final de cortes que tivesse boa eficiência para sinal com alta rejeição de ruído.

A distinção de cada variável foi analisada de maneira a encontrar valores de corte que pudessem minimizar ao máximo, primeiramente amostras de minimum bias.

O processo da escolha do critério de seleção final foi iterativo. Inicialmente, buscou-se identificar quais as variáveis que tinham maior impacto na rejeição de ruído, com alta eficiência para sinal. Por exemplo, a variável *point* foi uma das que melhor discriminou sinal de ruído, sendo capaz de eliminar até 95% do ruído retendo 70% do sinal. Vários valores de cortes eram testados, observando sua relação sinal/ruído. Uma a uma, nossas variáveis eram sendo incluídas e sequencialmente o estudo era feito.

Na Tabela 5.2 mostramos o nosso conjunto final de cortes onde as eficiências são mostradas independentemente. Mostra-se explicitamente o efeito do *trigger* L0 para sinal e  $\bar{b}b$  inclusivo (nossa mostra minimum bias já tinha o *trigger* L0 aplicado). O *trigger* HLT não foi implementado neste estudo por não estar ainda totalmente definido. Nas figuras 5.2 a 5.9 mostramos as distribuições normalizadas para as variáveis, de sinal (cor vermelho),  $\bar{b}b$  inclusivo (cor verde) e minimum bias (cor azul), onde o valor do corte final é explicitado.

Na Tabela 5.3 é mostrado a eficiência/rejeição dos cortes de maneira sequencial. Na Tabela 5.4 mostramos um resumo das diferentes fases de seleção.

Variavel	Corte	sinal	min. bias	$\bar{b}b$ incl.
M	$5279 \pm 300$	1	1	1
$\cos(\theta)$	$>0,9999$	0,9998	0,9413	0,8960
$\chi^2(FD)$	$>200$	0,9147	0,1346	0,3361
$\chi^2(\pi_i)/dof$	$<3$	0,9278	0,6609	0,4815
PIDK( $\pi_i$ )	$<0$	0,7439	0,2084	0,1929
$p_T(\pi_i)$	$>400$	0,9463	0,6699	0,6622
$\Sigma p_T(\pi_i)$	$>5500$	0,7696	0,4776	0,3855
$p(\pi_i)$	$>4$	0,9399	0,7120	0,7544
point	$<0,05$	0,7092	0,0437	0,0594
L0	$>0$	0,4683	–	0,5191
eventos		2333	8	46

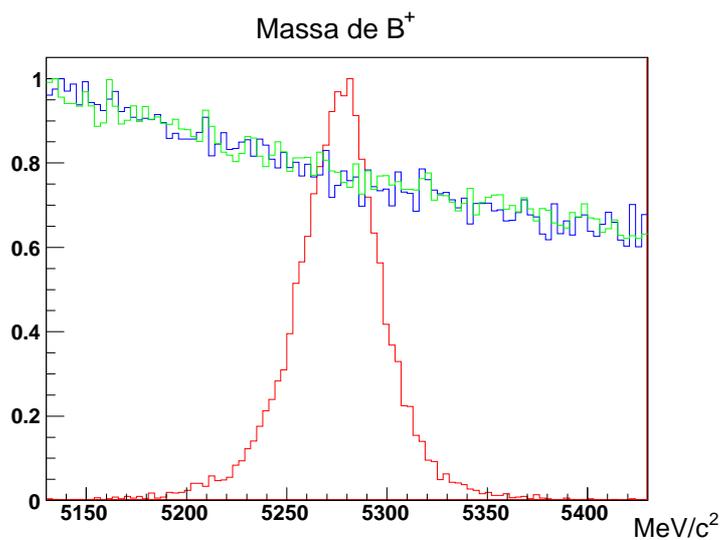
**Tabela 5.2:** Eficiências dos cortes individualmente.

Variável	Corte	sinal	min. bias	$bb$ incl.
M	$5279 \pm 300$	1	1	1
$\cos(\theta)$	$>0,9999$	0,9998	0,9413	0,8960
$\chi^2(FD)$	$>200$	0,9147	0,1339	0,3330
$\chi^2(\pi_i)/dof$	$<3$	0,8471	3,93E-02	0,1007
PIDK( $\pi_i$ )	$<0$	0,6345	8,01E-03	2,18E-02
$p_T(\pi_i)$	$>400$	0,6066	6,07E-03	1,57E-02
$\Sigma p_T(\pi_i)$	$>5500$	0,4656	5,11E-04	1,26E-03
$p(\pi_i)$	$>4$	0,3746	5,82E-05	4,10E-04
point	$<0,05$	0,3611	3,58E-05	3,88E-04
Trigger L0	$>0$	0,1884	3,58E-05	2,48E-04
eventos		2333	8	46

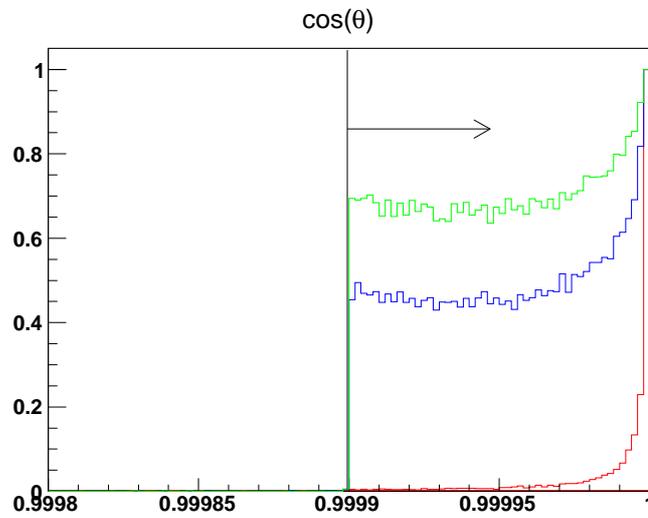
**Tabela 5.3:** Eficiências dos cortes consecutivamente.

Sequencia	Sinal	Minimun bias	$bb$ inclusivo
Reconstrução	62131	5570264	982503
Pré-seleção	12385	220830	183003
Seleção	4472	8	72
Trigger L0	2333	8	46
Eficiência(%)	3,75	$1,436 \times 10^{-4}$	$4,682 \times 10^{-3}$

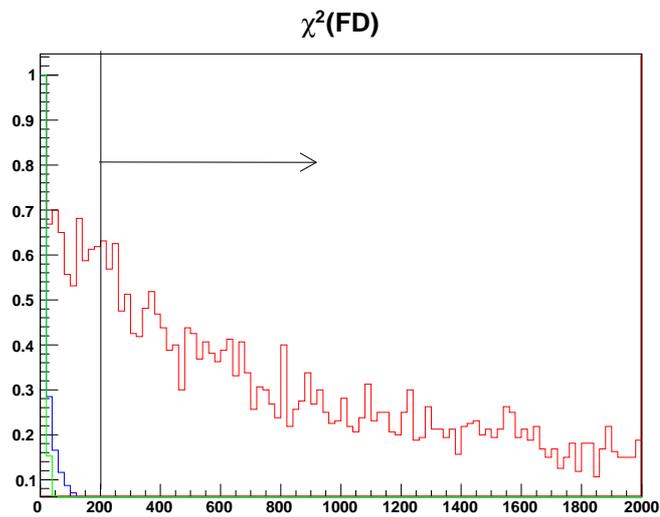
**Tabela 5.4:** Sequencia da simulação do número de eventos após cada etapa. Na última linha temos a eficiência (%) dos eventos selecionados.



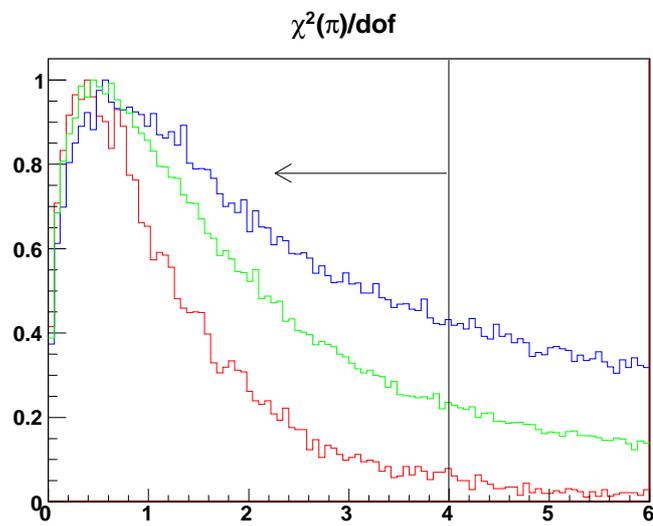
**Figura 5.2:** Massa da partícula  $B^+$  na janela de massa  $5279 \pm 300 MeV$ , para sinal (vermelho), min.bias (verde) e  $bb$ -inclu (azul).



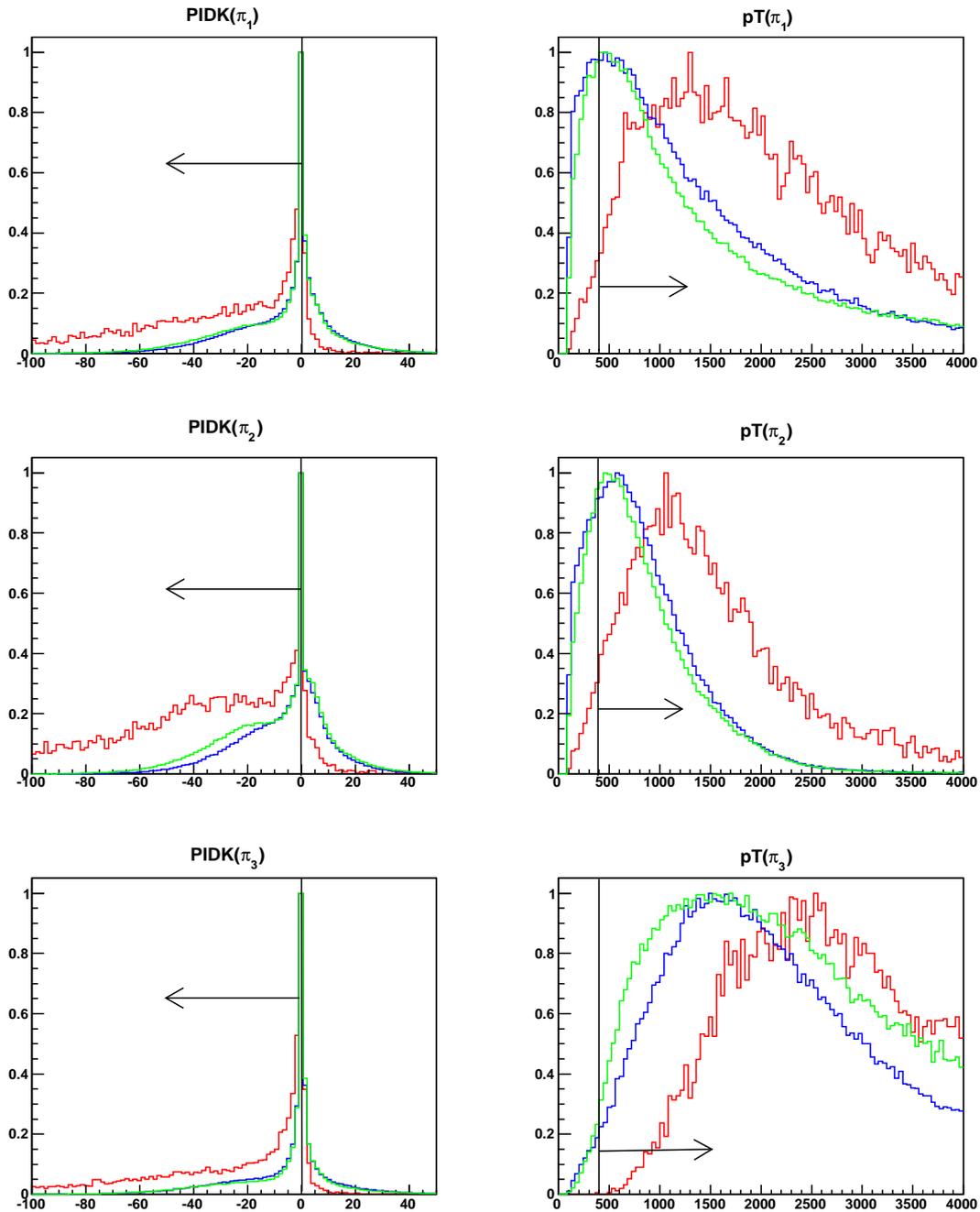
**Figura 5.3:** Dira ou coseno do ângulo  $\theta$  tem um corte  $>0,9999$ , para sinal (vermelho), min.bias (verde) e  $bb$ -inclu (azul).



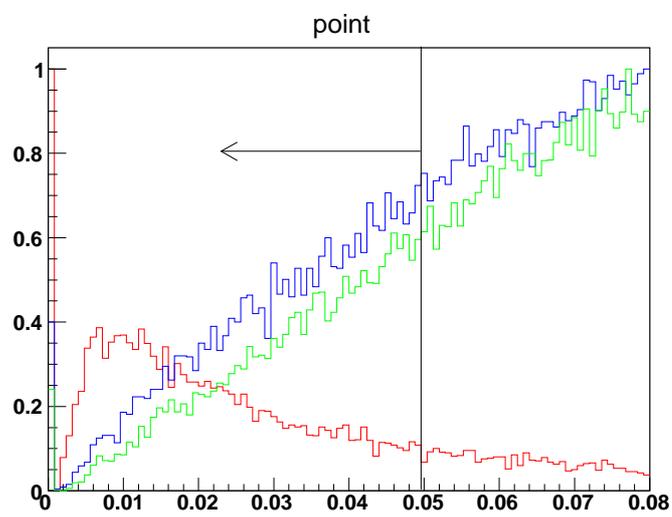
**Figura 5.4:** Distribuição para  $\chi^2(d)$ , destacando o corte em 200, para sinal (vermelho), min.bias (verde) e  $bb$ -inclu (azul).



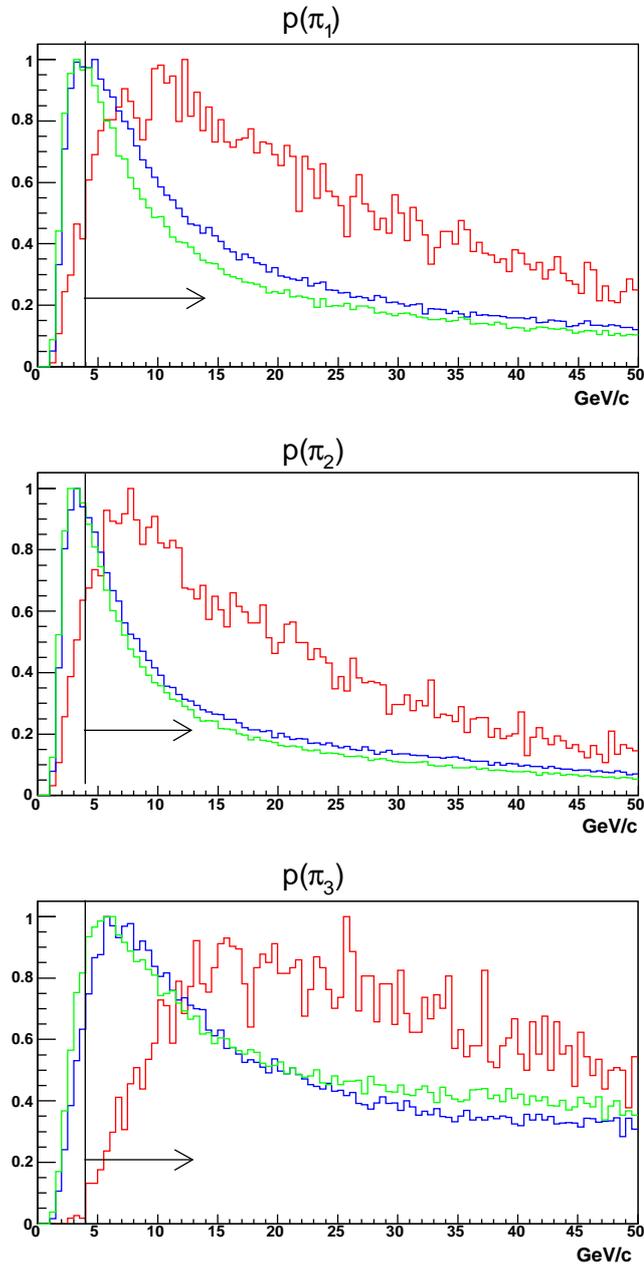
**Figura 5.5:** Distribuição para  $\chi^2(\pi)/gl$  tem um corte  $<4$ , para sinal (vermelho), min.bias (verde) e  $bb$ -inclu (azul).



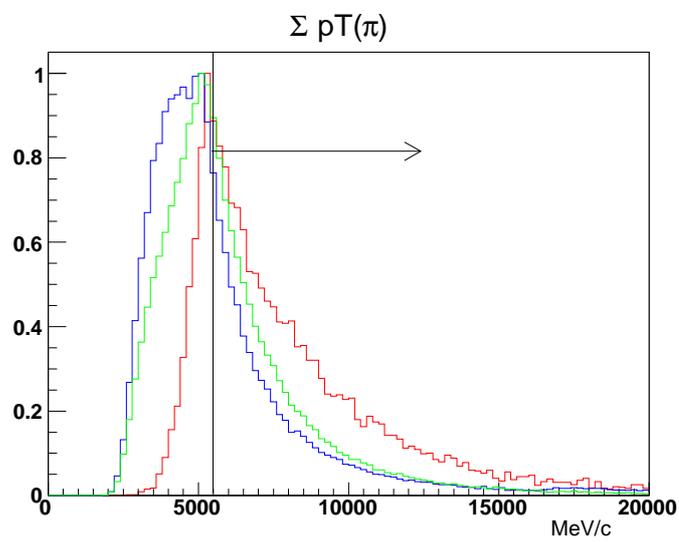
**Figura 5.6:** PIDK de cada pión na esquerda com o corte  $<0$  e o  $pT$  de cada pión na direita com o corte  $>400$  MeV, para sinal (vermelho), min.bias (verde) e  $bb$ -inclu (azul).



**Figura 5.7:** Distribuição do point com corte  $<0,05$ , para sinal (vermelho), min.bias (verde) e  $bb$ -inclu (azul).



**Figura 5.8:** O momento de cada pión com o corte  $>4$  GeV, para sinal (vermelho), min.bias (verde) e  $bb$ -inclu (azul).



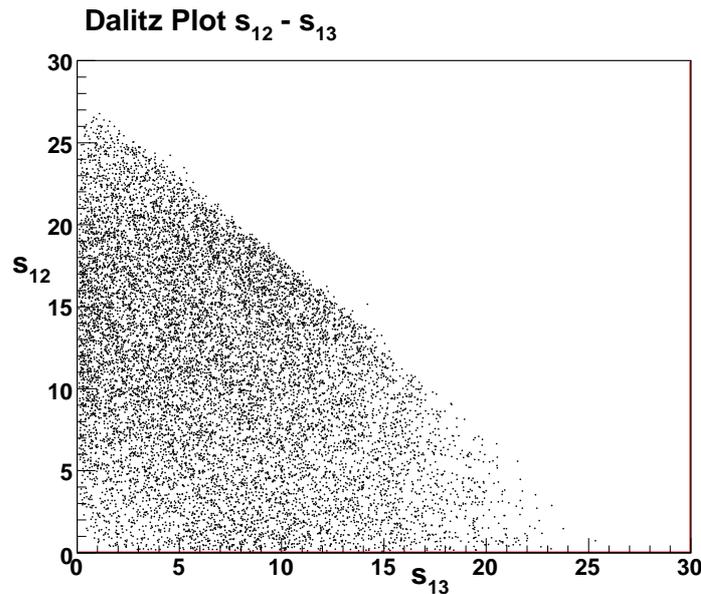
**Figura 5.9:** A soma dos momentos transversais  $\Sigma pT$  dos pions com o corte  $>5500$  MeV, para sinal (vermelho), min.bias (verde) e  $bb$ -inclu (azul).

### 5.2.4 Dalitz Plot

É importante, uma vez que os cortes tenham sido escolhidos, ver como os mesmos afetam a distribuição de eventos no espaço de fase do decaimento. Projetamos os eventos de sinal selecionados no Dalitz Plot da combinação de massa  $s_{\pi^+\pi_1^-} \times s_{\pi^+\pi_2^-}$ , bem como aquelas ainda na pré-seleção (antes dos cortes finais) como mostramos nas Figuras 5.10 e 5.11.

Os eventos de sinal simulados foram gerados uniformemente no DP. Vemos que já na pre-seleção existe uma pior eficiência nas bordas do DP. Analisando o DP após a pré-seleção e após a seleção final, observamos que a distribuição DP não parece ser muito afetada pelos cortes feitos na seleção final.

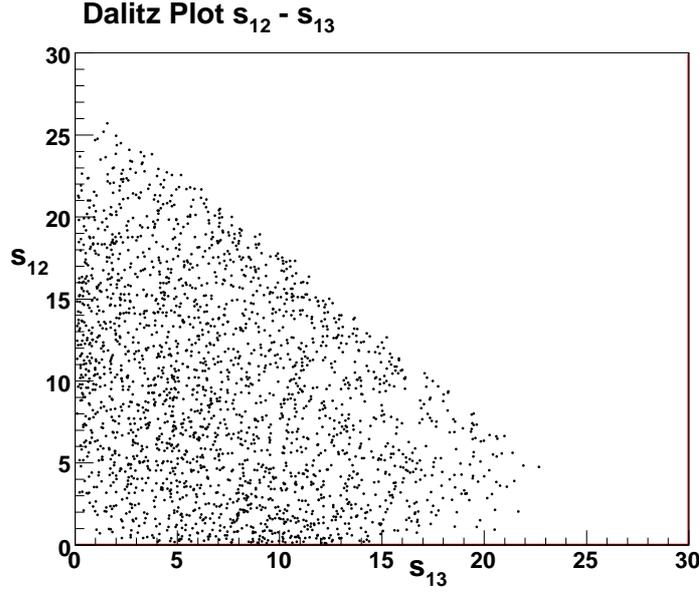
Para uma análise futura, com interesse em estudar a dinâmica do DP, será necessário um estudo de cortes desde a pre-seleção que vise não causar perdas de homogeneidade no DP.



**Figura 5.10:** O Dalitz Plot de um pión de carga negativa e outro de carga positiva antes dos cortes, em  $(GeV/c^2)^2$

## 5.3 Sensibilidade para o decaimento $B^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^- \pi^+$

Queremos avaliar qual é a expectativa anual de eventos de sinal e ruído, supondo uma luminosidade nominal de  $2 \times 10^{32} cm^{-2}s^{-1}$  o que corresponde a uma luminosidade anual de  $2 fb^{-1}$ .



**Figura 5.11:** O Dalitz Plot de um pión de carga negativa e outro de carga positiva após dos cortes, em  $(GeV/c^2)^2$

A eficiência total para o sinal é a fração do número de eventos após a seleção final  $N_{sel}^{sin}$  e o número de eventos  $N_{ger}^{sin}$  gerados multiplicado pelo fator  $\epsilon_\theta^{sinal}$  que é aceitação geométrica de que um méson  $B$  e seus produtos de decaimento ter sido criado num ângulo  $\theta < 0,4$  rad.

$$\epsilon_{tot} = \frac{N_{sel}^{sin}}{N_{ger}} \cdot \epsilon_\theta^{sin} = \frac{2333}{62131} \cdot 0,1835 = 0,00689 \quad (5.2)$$

O número de eventos por ano é calculado através de:

$$N_{sin} = \mathcal{L}_{int} \cdot \sigma_{\bar{b}b} \cdot 2 \cdot f_B \cdot BR \cdot \epsilon_{tot} \quad (5.3)$$

onde  $\mathcal{L}_{int} = 2\text{fb}^{-1}$  é luminosidade integrada, a seção de choque estimada de criação de um par  $\bar{b}b$  é  $\sigma_{\bar{b}b} = 500\mu\text{b}$ ,  $f_B = 39,1\%$  é a probabilidade de pelo menos um quark  $\bar{b}$  se hadronizar, o fator 2 é devido a criação de um par de quarks, e  $BR = 1,62 \times 10^{-5}$  é a razão de ramificação de  $B^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^- \pi^+$ . Substituindo os valores, encontramos

$$N_{sin} = 87286 \text{ eventos} \quad (5.4)$$

Para o  $\bar{b}b$  inclusivo calculamos a eficiência de maneira análoga, porém a amostra original já passou pela pré-seleção *-strip-*. Logo a eficiência da *strip*

deve ser incluída:

$$\epsilon_{tot}^{bb} = \frac{N_{sel}^{bb}}{N_{strip}^{bb}} \cdot \epsilon_\theta \cdot \epsilon_{strip} \quad (5.5)$$

e substituindo obtemos:

$$\epsilon_{tot}^{bb} = \frac{46}{982503} \cdot 0,437 \cdot 0,036431 = 7,45 \cdot 10^{-7} \quad (5.6)$$

O número de eventos por ano para o  $\bar{b}b$  inclusivo é dado por

$$N_{\bar{b}b} = \mathcal{L}_{int} \cdot \sigma_{\bar{b}b} \cdot \epsilon_{tot}^{bb} \times \frac{1}{5} = 149076 \text{ eventos} \quad (5.7)$$

onde incluímos o fator  $\frac{1}{5}$  para obter a estimativa na janela de  $60 \text{ MeV}/c^2$  em vez de  $300/5 \text{ MeV}/c^2$

Assim, podemos estimar a relação sinal/ruído  $S/B$

$$\frac{S}{B} = \frac{N_{sin}}{N_{\bar{b}b}} = \frac{87286}{149076} = 0,5855 \quad (5.8)$$

Finalmente, calculamos a taxa de minimum bias onde foi aplicado somente o L0 com uma eficiência de 5.99%. Os *triggers* HLT1 e HLT2 terão como objetivo reduzir esta taxa ainda mais.

Assim, com L0 e a nossa seleção, calculamos a taxa de minimum bias:

$$\text{Taxa}(\text{minbias}) = \frac{N_{minbias}}{N_{L0strip}} \times \epsilon_{L0strip} \times \text{Taxa Tot. Minbias} \quad (5.9)$$

$$\text{Taxa}(\text{minbias}) = \frac{8}{5570264} \times 0,0599 \times 14763987 \text{ Hz} = 1,27 \text{ Hz} \quad (5.10)$$

## 5.4

### Comentários

Vemos que o número de eventos esperados para  $2 \text{ fb}^{-1}$ , da ordem de 90k, é bem superior aquele obtido pelo BaBar para este canal que foi ( $N_{B^+} + N_{B^-} \approx 1200$ , [21]).

Entretanto, o nível de *background* de  $\bar{b}b$  inclusivo é ainda relativamente alto. De fato, o LHCb, tomando colisões  $p - p$  a altíssimas energias, tem um nível de ruído esperado bem superior as fabricas do méson  $B$ .

Para análise de Dalitz Plot, será necessário um conjunto de cortes possivelmente mais restritivo, para diminuir o nível de ruído.