

5

A Seleção das Amostras Dhhh

Neste capítulo iremos descrever o tratamento dos dados, desde o trigger, seleção unificada (Stripping), até a seleção final e armazenamento em ntuplas, de acordo com o requerido para cada modo de decaimento. Nossos alvos de estudo são os canais $D^+ \rightarrow K^- K^+ \pi^+$ e $D^+ \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^+$. Por outro lado, foram selecionados decaimentos denominados *canais de controle* que, conforme explicado no capítulo 3, não apresentam expectativa de violação de CP segundo o Modelo Padrão, o que torna estes canais um bom referencial na busca por assimetrias presentes nos dados, oriundas de outras fontes que não violação de CP.

Ao todo os canais do decaimento $D \rightarrow hhh$ estudados sob diferentes aspectos foram:

- $D^+ \rightarrow K^- K^+ \pi^+$
- $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+ \rightarrow$ (canal de controle)
- $D^+ \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^+$
- $D_s^+ \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^+$
- $D_s^+ \rightarrow K^- K^+ \pi^+ \rightarrow$ (canal de controle)

Devido à enorme quantidade de informação recolhida, múltiplas etapas de seleção foram realizadas para conseguir ter uma amostra razoável e fazer uma análise física em cada um dos canais acima. Deste modo, realizaram-se estudos com as principais variáveis envolvidas para conseguir a melhor relação sinal/ruído.

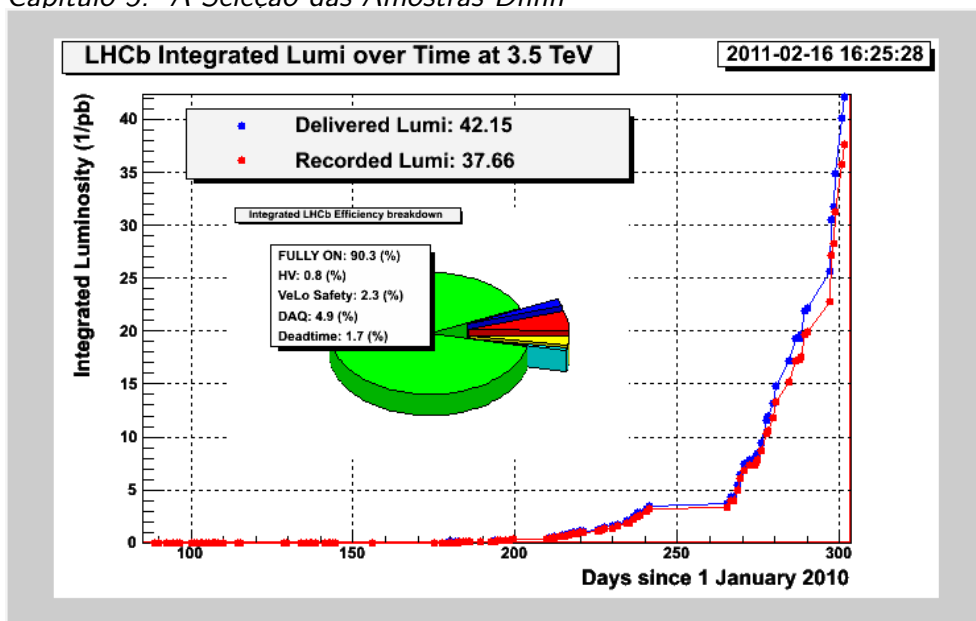


Figura 5.1: Luminosidade integrada ao longo do tempo durante a tomada de dados em 2010.

5.1 Condições de Tomada de Dados em 2010

O LHC, como explicado no Capítulo 4, faz colidir dois feixes de prótons com energia de 7 TeV no centro de massa. A luminosidade total integrada ($\mathcal{L} = \int L dt$) armazenada para o experimento LHCb durante o ano 2010 foi de $\mathcal{L} = 37.66 \text{ pb}^{-1}$. A figura 5.1 mostra o gráfico da luminosidade integrada no tempo para a tomada de dados de 2010. Pode-se ver que durante os primeiros meses o valor desta luminosidade é bem mais baixo do que nos meses seguintes, motivando que as especificações de trigger, tanto de hardware como de software, fossem re-otimizadas para cada período de tomada de dados, a fim de conseguir o máximo aproveitamento possível da informação.

5.2 Trigger

O trigger do LHCb, como especificado no capítulo 4, tem como objetivo principal rejeitar, o mais rapidamente possível, eventos que não são de interesse, e consiste de dois níveis principais: *Nível-0 (L0)*, baseado nos componentes físicos (hardware), seleciona estados finais hadrônicos e leptônicos que possuem grande momento transversal, para reduzir a taxa de dados de $\sim 40\text{MHz}$ para 1MHz , e o *trigger de segundo nível ou HLT*, que por sua vez é

subdividido em duas etapas de software que acessam as informações do detetor todo: a primeira etapa -o HLT1- toma a informação fornecida pelas estações de traços e o VELO, e reconstrói parcialmente o evento reduzindo a taxa para permitir o HLT2 -a segunda etapa- reconstruir totalmente os canais individuais e finalmente escrever os dados em fitas. Esta etapa consiste numa série de seleções inclusivas, que permitem selecionar vários canais com assinaturas comuns, e exclusivas, que selecionam canais de decaimento particulares. Durante este período as configurações do LHC mudaram drasticamente, principalmente no que diz respeito à luminosidade instantânea ilustrada no gráfico 5.1, o que por sua vez motivou mudanças nas configurações de trigger para ir em conjunto com as modificações das características dos dados fornecidos e os incrementos da luminosidade, causando no total 10 configurações de L0 e 19 de HLT.

5.2.1

L0

O trigger de nível zero (L0), faz uma seleção dos candidatos a hádron, elétron, fóton ou múon aceitando ou rejeitando-os de acordo com as informações coletadas em diversos subdetetores. A decisão favorável é definida se a energia transversa (E_T) do correspondente objeto L0 excede um determinado limite, com valores típicos para hádrons em 2010 de $E_T^{\text{hádron}} > 2.6 - 3.5 \text{ GeV}$.

Os nomes dos distintos tipos de trigger seguem uma regra¹ que descreve a decisão tomada:

L0xxxDecision onde “xxx” é o nome do canal de trigger L0, que pode ser Múon, DiMúon, Hádron, Elétron, Fóton, π^0 Local, π^0 Global. Alguns destes serão explicados a seguir.

L0Electron : Especificamente requer que o trigger seja ativado no calorímetro eletromagnético escolhendo o elétron com maior P_T no ECAL.

L0Muon : Os candidatos a múon do L0 são confirmados primeiro nas estações M1-M3. As câmeras de múons permitem a reconstrução de segmentos de múons e o P_T pode ser medido com uma resolução de 20%. Logo selecionam-se os dois candidatos com maior P_T em cada quadrante; a decisão é feita requerendo o P_T de um (L0Singlemuon) ou a soma de dois (L0Dimuon), acima de determinado corte.

¹Definida como “Tipo de trigger + xxx + decisão”.

L0Photon : A característica específica do decaimento radiativo do méson D é a presença de um fóton de alta E_T . Um objeto será identificado como fóton se nenhum segmento de traço foi encontrado nas estações T que seja compatível com esse cluster (devido ao fato do *L0Photon* ser ativado no calorímetro eletromagnético por um fóton verdadeiro ou por uma conversão de fótons em matéria antes de atingir o calorímetro electromagnético).

5.2.2

Hlt1

O Hlt1 é a primeira etapa do trigger de alto nível que reconstrói os eventos aceitos pelo L0. As linhas de trigger descrevem-se tipicamente como:

Hlt1xxxDecision onde “xxx” é o nome de um *alley* e seu algoritmo correspondente, que confirma o candidato do L0 e dependendo do tipo de candidato, usa as informações das unidades de traços e o VELO para realizar uma reconstrução de alto nível.

Hlt1SingleHadron Requer que o calorímetro hadrônico seja ativado com um candidato produzido no vértice secundário (SV), definido mais a frente. Destina-se a selecionar decaimentos interpretados como mésons D ou B em hádrons no primeiro nível do software de trigger no LHCb (L0). Requer a “confirmação de L0”, onde um traço é reconstruído a partir do *cluster* de L0 que disparou a linha de hádron.

Hlt1DiHadron Se um candidato a hádron é confirmado, realiza-se no VELO uma busca por traços que formam um bom vértice com o hádron. Se encontrado, então é confirmado em T1-T3.

Estas duas linhas acima foram usadas na primeira parte da tomada de dados (antes de Outubro de 2010).

HLT1TrackMuon Quando um candidato a múon no L0 é confirmado, no VELO é efetuada uma busca por traços que formam um bom vértice nele. Se encontrado, então é confirmado nas estações T1–T3.

Hlt1TrackAllL0 Esta linha de trigger, que entrou em funcionamento em Outubro de 2010, está baseada na estratégia básica de que devido ao fato dos mésons B e D serem partículas pesadas, no decaimento destes em filhas carregadas, sempre se encontrará pelo menos dois traços que carregam alto momento; Isto, em conjunto com a rápida reconstrução

fornecida pelo VELO, permite um completo reconhecimento dos padrões 3D e a identificação dos vértices primários para todos os eventos que ingressam no HLT. Desta maneira, são aplicados cortes nos parâmetros de impacto, no momento transverso e nos ajustes χ^2 do traço e do parâmetro de impacto. Torna-se necessário, também, remover eventos com muita ocupação no VELO e nas estações IT e OT. Em vista disso, aplicam-se cortes na diferença entre o número de hits no VELO associados ao traço e o número de hits esperados dados a direção e o primeiro ponto medido deste traço no IT e OT. Esta linha de trigger tem caráter inclusivo, uma vez que todos os traços são reconstruídos (sem pedir confirmação do L0 que associa o traço à energia depositada no HCAL). O sumário dos cortes aplicados nesta etapa está mostrado na Tabela 5.1

Corte	Valor
Número de OT hits	< 10K
Número de VELO hits	< 3K
IP dos traços VELO-3D	> $125\mu\text{m}$
P dos traços do VELO associados às estações de traços	> 8 GeV
P_T dos traços do VELO associados às estações de traços	> 0.8 GeV
Partícula de maior momento	> 12.5 GeV
P_T na partícula de maior momento	> 1.25 GeV
χ^2 do traço	< 3
χ^2 do parâmetro de impacto	> 50

Tabela 5.1: Resumo com os valores dos cortes utilizados na decisão de trigger HLT1TrackAllL0.

5.2.3 Hlt2

A taxa de eventos fornecida pelo Hlt1 varia entre 20 e 40 kHz. A função do Hlt2 -que consiste de uma série de linhas independentes de código- é a de realizar um conjunto de seleções que podem ser topológicas, inclusivas ou exclusivas, para reduzir essa taxa de eventos até uns poucos kHz. Descrevemos também o trigger topológico que foi usado como TIS (definido mais adiante).

Hlt2CharmOSTF3Body e Hlt2CharmOSTF3BodyWideMass

Trigger de charme faz requerimentos básicos de cortes de P_T e IP_CHI2 nas filhas, entre outros requerimentos no resto das variáveis. Para os dados tomados entre 22 de Setembro e 4 de Outubro, a linha Hlt2CharmOSTF3Body disparou o trigger apenas em candidatos na

janela estreita de sinal $1844 < m < 1894$ MeV e $1943 < m < 1993$ MeV. A linha Hlt2CharmOSTF3BodyWideMass dispara o trigger para candidatos com massas no intervalo $1700 < m < 2100$ MeV, mas pre-escalado por um fator 0.01. Depois de 4 de Outubro, o intervalo de massa de Hlt2CharmOSTF3Body foi mudado para $1800 < m < 2040$ MeV, além de que novos critérios de seleção foram implementados.

Hlt2TopoOSTF i Body ²O trigger topológico Hlt2TopOs está concebido para selecionar a maior quantidade possível de decaimentos do méson B. Assim, a sua filosofia está baseada na criação de linhas para 2, 3 e 4 corpos. Os candidatos são reconstruídos a partir de que duas partículas são combinadas para formar um objeto de dois corpos, e em seguida associa-se a este objeto outra partícula para criar a linha de 3 corpos. O procedimento estende-se igualmente para a reconstrução de decaimentos em 4 corpos. Excluimos estes eventos segundo o critério TIS (explicado a seguir).

Nesta seção, vimos numa maneira geral, a organização dos distintos níveis de trigger do LHCb, desde que os dados são detectados numa primeira etapa de trigger, até o armazenamento definitivo nas fitas para análises posteriores. O trigger L0 cumpre apenas a função inicial de “coador”, aceitando ou rejeitando eventos, baseado em componentes físicos ou de hardware; já o trigger de segundo nível Hlt1 realiza o papel de confirmar as informações do L0 para reconstruir parcialmente os decaimentos e passar estas informações à etapa final do trigger, o Hlt2. As seleções de trigger têm que ser otimizadas para atingir eficiência máxima e ótima rejeição de ruído nos eventos de sinal, mas deve-se ter cuidado para evitar *bias* nas medidas físicas devido aos cortes de trigger. Logo, as linhas de trigger HLT2 de charme em três corpos estão projetadas visando a selecionar eficientemente em qualquer decaimento de D com três filhas carregadas. Estas linhas são altamente eficientes em quase todos os decaimentos hadrônicos do méson D e fornecem um grande fator de rejeição de ruído.

No processo posterior de análise, ao selecionar um candidato, é importante saber se este candidato foi responsável por acionar o trigger. Assim, define-se

Triggered on Signal (TOS), que são eventos em que o sinal que está sendo analisado foi responsável por disparar o trigger.

²Onde i pode tomar os valores 2, 3 ou 4.

Triggered Independently of Signal (TIS), eventos em que o trigger foi disparado por uma outra partícula não contida no sinal em análise.

Nas seleções finais foram feitas restrições (TIS ou TOS) a determinadas linhas de trigger, como será explicado mais adiante.

Foi encontrado que as linhas de trigger topológico selecionam um número significativo de candidatos de sinal que não foram selecionados pelos triggers de sinal. Contudo, foram descobertos desvios significantes em eventos de sinal que são TOS nas linhas topológicas. Portanto, apenas foram aceitos candidatos que são TIS nas linhas topológicas.

Como as características dos dados serão explicadas mais à frente na seção 5.3.1, o resumo das linhas de trigger usadas na análise final será apresentado na tabela 5.5.

5.3 Principais Variáveis Para a Seleção de Dados

A seguir explicaremos, as características de algumas das variáveis usadas de acordo com a topologia do decaimento $D \rightarrow KK\pi$, mostrada na Figura 5.2, para depois entrarmos no estudo das características dos dados com os cortes específicos. Nos outros decaimentos $D \rightarrow hhh$, as variáveis têm mesmo nome.

Definição das Variáveis Usadas:

D_MM *Massa Invariante do candidato D.*

É reconstruída a partir da informação contida nos 4-momentos dos traços reconstruídos das partículas filhas. Queremos que a massa do candidato esteja numa janela de massa $\Delta m = |D_MM - m_D|$; onde m_D é a massa nominal do D.

D_PT *Momento Transverso do candidato D.*

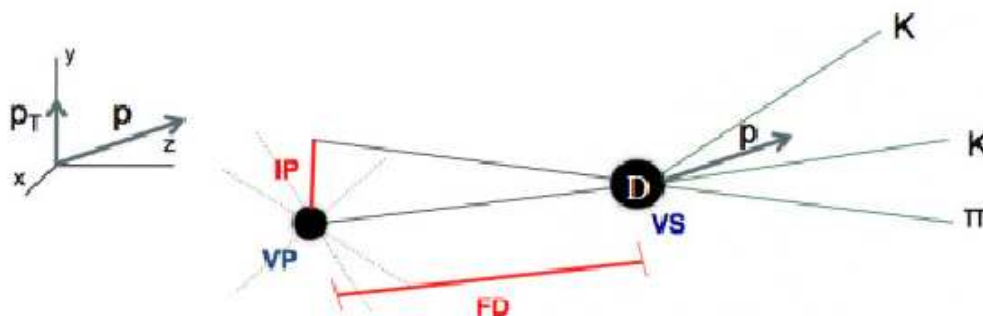


Figura 5.2: Topologia do processo de produção do méson D e seu decaimento $D \rightarrow K\pi\pi$.

Medida do momento do méson D na direção perpendicular a z -o eixo do feixe-, requerendo P_T acima de um valor dado, em razão do méson D ser uma partícula pesada.

PV Vértice Primário (VP)

Ponto onde a interação próton-próton ocorre e onde grande parcela dos D's é produzida.

SV Vértice Secundário (SV)

Ponto de decaimento do méson D em seus produtos, obtido pela interseção dos traços das três partículas filhas.

FD Distância de Vôo

É a distância entre o PV e o SV, ou seja, a distância entre o ponto de colisão (onde o D é criado) e o ponto de decaimento. A informação de seu valor é fornecida pelo VELO.

IP Parâmetro de Impacto

Menor distância entre um traço reconstruído e o vértice primário. Pode ser aplicado para o D ou para suas filhas. No caso destas, requer-se que estas não sejam originárias do vértice primário, ou seja, seus IP χ^2 devem ser maiores do que um dado valor³.

DIRA Cosseno do ângulo entre a direção de vôo e o momento reconstruído do méson D a partir das três filhas. Para decaimentos de D reais em três corpos, devem ter DIRA muito próximo de 1.

pi_PT ($i = 1, 2, 3$) Momento Transverso das Filhas

Como o méson D é uma partícula que em geral é produzida com grande momento transverso, este se torna num importante discriminante de ruído nas filhas. Porém, a região de baixo P_T se localiza nas bordas do Dalitz plot, o que poderia causar que, implementando um corte muito forte em alguma destas variáveis, introduzam-se efeitos indesejáveis no gráfico final.

DOCA_{ij} Distância de aproximação mínima entre os traços i e j . Dados dois traços, calcula-se a distância mínima entre eles.

³A distribuição χ^2 nos diz a medida em que os valores observados se desviam do valor esperado

Dll_{Kπ} Identificação de Partícula

Da qualidade na identificação das partículas filhas depende a confiança na seleção dos candidatos a méson D. Em nosso caso, precisamos identificar da melhor maneira possível os píons e káons. Inicialmente, no RICH, a cada traço é associada uma probabilidade de ser originado por uma das cinco partículas possíveis na interação, que podem ser pión, káon, próton, elétron ou múon; usa-se a hipótese de verossimilhança das partículas, e para melhor observar as mudanças nos valores, calculamos a diferença logarítmica dessas quantidades. Por exemplo a separação K/π obtém-se da expressão $\ln\mathcal{L}(K) - \ln\mathcal{L}(\pi) = DLL(K - \pi)$ e escolhemos o valor que mais se aproxima a nossas exigências.

χ^2/ndof Valor de χ^2 do ajuste da reconstrução do traço.

Apesar deste ajuste na qualidade ser aplicado para reconstrução a fim de garantir bons candidatos a filhas, a soma de χ^2/ndof também é utilizada na seleção de stripping para aprimorar a qualidade da amostra.

PTsum Soma do momento transverso das filhas

Como D é uma partícula de alto PT, as partículas produzidas terão também valores elevados de PT. PTsum é definido como a soma escalar do PT das três filhas e requer-se que esteja acima de certo valor. O momento transverso das filhas é, em geral, um excelente discriminante de ruído.

5.3.1**Stripping Dhhh**

Após os dados recolhidos pelos detetores passarem pelo trigger (L0, HLT1 e HLT2), obedecendo aos critérios exigidos para serem considerados bons candidatos a eventos, estes passam por um sistema de seleção offline conhecido por *Stripping*, que é um processo de seleção unificado para os dados serem armazenados permanentemente no LHCb e que serão posteriormente depurados com cortes específicos nas variáveis de interesse, visando a melhorar a relação Sinal/ruído a fim de realizar análises subseqüentes, como explicado nas seções seguintes. Os critérios básicos para seleção dos eventos são a qualidade dos traços, boa definição dos vértices e ótima identificação de partículas. Estes critérios dependem da habilidade para identificar a posição da interação primária (PV) e a posição onde ocorreu o decaimento (SV).

O estudo de cortes consiste basicamente em encontrar valores ótimos para as variáveis utilizadas na análise, que façam com que a maior parte de ruído

seja rejeitada, mantendo níveis aceitáveis de sinal. A amostra de dados usada nesta análise foi a Reco-08-Stripping12, que consiste de aproximadamente 35 pb⁻¹ de dados tomados entre 25 de Junho e 30 de Outubro de 2010.

A etapa de seleção “Stripping” tem como objetivo reduzir a amostra coletada pelo trigger e ao mesmo tempo já selecionar de acordo às diferentes análises físicas. Uma das linhas de Stripping é a StrippingD2hhh que seleciona os candidatos $D \rightarrow hhh$ em sub-linhas onde hhh pode ser KPP($K^- \pi^+ \pi^+$), KKP($K^- K^+ \pi^+$) e PPP($\pi^- \pi^+ \pi^+$), entre outras.

Existe uma série de critérios que os dados devem satisfazer para serem considerados candidatos a eventos pelas linhas da stripping; no caso de StrippingD2hhh, os critérios requeridos estão resumidos nas tabelas 5.2, 5.3, e 5.4, que representam cortes globais, cortes nas partículas filhas, cortes nas combinações de traços e cortes na partícula mãe (D).

Nome	Variável	corte
Ajuste do traço	χ^2/NDF	<5
Momento transverso do traço	(P_T)	> 250 MeV/c
Momento do traço	P	> 2000 MeV/c
Parâmetro de impacto mínimo em relação a qualquer vértice primário.	IP χ^2 PV	> 4
Identificação de Káons	DLL $_{K\pi}$	> 3
Identificação de Píons	DLL $_{K\pi}$	< 10

Tabela 5.2: Cortes Nas Partículas Filhas.

Nome	Variável	corte
Distância máxima de aproximação	DOCA χ^2	<50
Pelo menos dois traços com parâmetro de impacto para qualquer VP	pi_IPCHI χ^2	>10
Soma de Momento Transverso das filhas	PTsum	> 1800 MeV/c

Tabela 5.3: Cortes Nas Combinações dos Traços antes do ajuste (pre-fit).

Os cortes no candidato a D estão especificados na tabela 5.4. No caso do decaimento $D^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$, devido ao elevado conteúdo de ruído, foi feito um tratamento distinto, como explicado mais à frente, para conseguir uma amostra razoável. Os espectros de massa das amostras após a saída da Stripping para $D^\pm \rightarrow K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$, $D^\pm(D_s^\pm) \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ e $D^\pm(D_s^\pm) \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$ são apresentados nas figuras 5.3, 5.4 e 5.5, respectivamente.

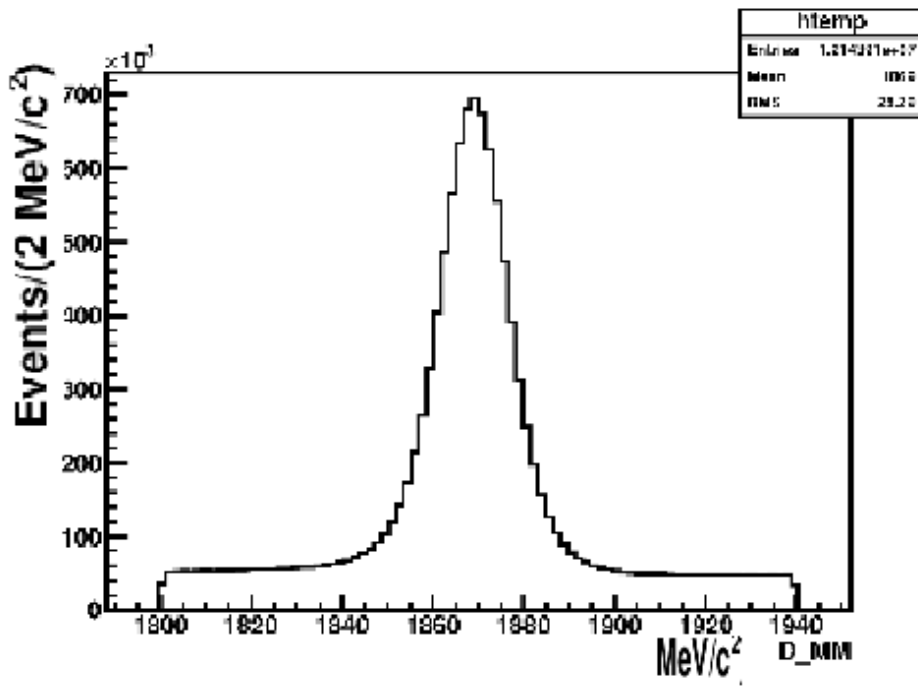


Figura 5.3: Espectro de massa do canal de controle $D^\pm \rightarrow K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ na saída da Stripping.

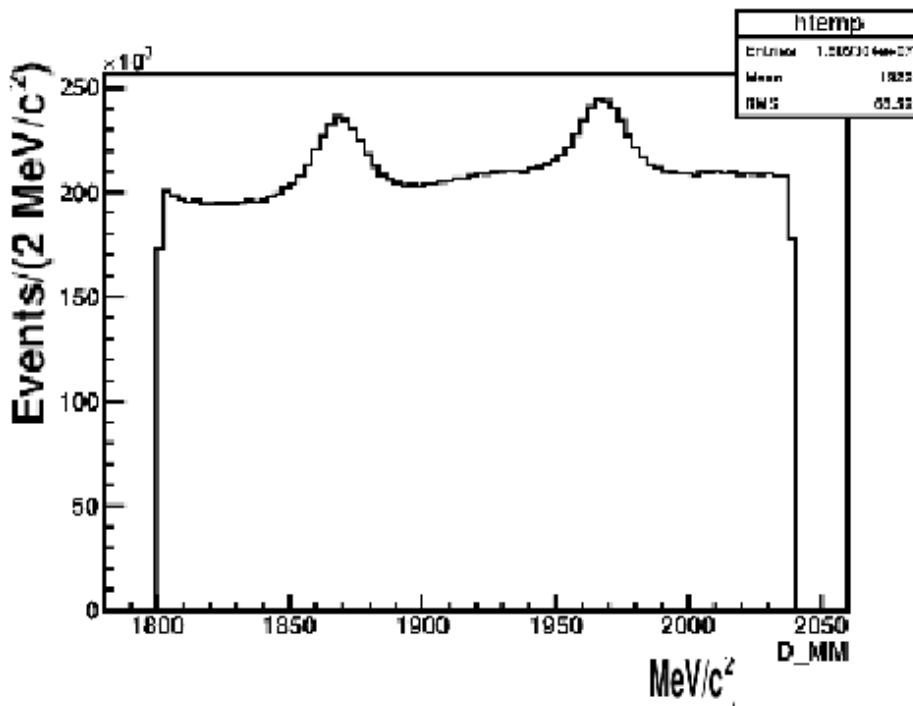


Figura 5.4: Espectro de massa dos decaimentos $D^\pm(D_s^\pm) \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ na saída da Stripping.

Definição	Variável	corde
Ajuste do vértice	χ^2/ndof	< 10
P_T do candidato D	D_{PT}	> 1000 MeV/c
Ajuste da distância de vôo a qualquer PV	FDCHI2PV	> 100
Ajuste do parâmetro de impacto com respeito ao próprio PV	IPCHI2_OWNPV	< 15
Cosseno do ângulo ⁴ entre o momento e o vector do PV	DIRA	> 0

Tabela 5.4: Cortes no candidato a D.

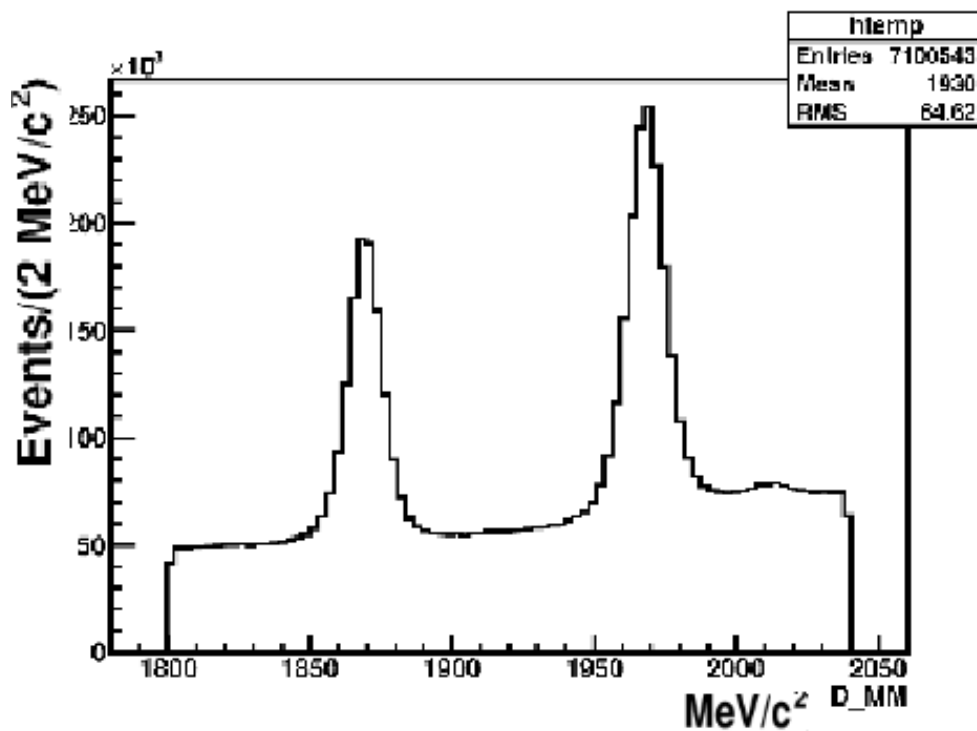


Figura 5.5: Espectro de massa dos decaimentos $D^\pm(D_s^\pm) \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$ na saída da Stripping.

5.4

A Seleção final dos canais Dhhh

Iremos tratar agora da seleção de eventos realizada durante nossa análise; tal seleção é feita sob os eventos que passaram pelos cortes da Strip descritos anteriormente. De acordo com o exposto acima, esta amostra foi dividida em três subamostras nomeadas Amostra 1, 2 e 3, que correspondem a configurações distintas de trigger⁵ para diferentes períodos de tomada de dados, visando a favorecer a estatística e diminuir os efeitos de assimetrias localizadas, produto do impacto das exigências de trigger. As linhas de trigger que são acionadas em um número significativo de decaimentos foram investigadas; a maior parte do sinal vem via trigger L0 hadrônico, que tem um limiar de energia transversa

⁵3, 5 e 28 pb^{-1} respectivamente.

(ET) que variou entre 2,6 e 3,5 GeV. Em relação ao HLT1, os candidatos vêm de maneira semelhante, principalmente das linhas hadrônicas que selecionam os eventos que têm pelo menos um traço com alto momento transversal (PT) e deslocadas a partir do vértice primário. As configurações com as exigências de trigger para as três subamostras estão resumidas na tabela 5.5.

Nesta seção iremos discutir os critérios levados em consideração para selecionar as diferentes amostras dos decaimentos do méson D em três corpos, em conjunto com os aspectos teóricos de Violação de CP esboçados no Capítulo 3 e as características de cada amostra especificada na seção anterior. A amostra final, após a passagem pelo trigger, armazenamento na stripping e os cortes post-stripping para realizar estudos subseqüentes tanto nos canais de controle como nos canais de interesse para busca de assimetrias de CP, foi selecionada usando os mesmos critérios de cortes para todos os canais, com o intuito de maximizar a significância estatística no sinal. Apenas para o canal $D^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$, como referido anteriormente, acrescentaram-se à seleção final cortes não lineares na intenção de diminuir os níveis de ruído e potencializar o sinal, como explicaremos na seção 5.4.3.

Após a seleção e os cortes nas amostras, foi feito um ajuste de duas Gaussianas na janela de sinal, mais uma função exponencial para o ajuste do ruído com o intuito de determinar o nível de ruído e a quantidade de eventos produzidos. Deve-se lembrar que, de acordo com a configuração da Stripping12, a amostra 2 não pode ser ajustada juntamente com as outras devido a um corte numa linha do Hlt2 que fornece um intervalo de massa muito estreito.

5.4.1

Seleção do canal de controle KPP

O decaimento favorecido por Cabibbo $D^\pm \rightarrow K^\pm \pi^\mp \pi^\pm$ foi escolhido como nosso canal de controle pelo fato de não ter fase de violação de CP, o que, juntamente com o alto nível de pureza da amostra, é uma ótima referência na busca de assimetrias no Dalitz Plot. Porém, alguns cortes de identificação de partículas foram feitos visando diminuir a contribuição do $D_s \rightarrow KK\pi$. Assim, foi requerido que o logaritmo da verossimilhança (*log-likelihood*) do candidato a pión fosse menor que 3 ($DLL_{K\pi} < 3$) e maior que 7 para o candidato a káon. Na figura 5.6, apresentamos o ajuste da amostra final para as amostras 1 e 3: são 2 975 000 eventos de sinal, com pureza⁶ de 98%. A amostra total (amostras 1, 2 e 3) que será usada para o *Mirandizing* (Cap. 6) tem 3.700 .993 eventos

⁶A *pureza* é definida como a fração de todos os eventos selecionados que são eventos de sinal ($\frac{S}{S+B}$).

Sub amostra	Requerimentos de trigger
Amostra 1	run < 79570 and L0Hadron AND (Hlt1DiHadron OR Hlt1SingleHadron) AND (Hlt2CharmTF3BodyWideMass OR Hlt2TopoOSTF3Body TIS OR Hlt2PassThrough OR Hlt2TopoOSTF4Body TIS OR Hlt2TopoOSTF2Body TIS)
Amostra 2	(run > 79570 and run < 80211 OR run = 80213) AND (L0Hadron OR L0Muon TIS OR L0Electron TIS OR L0Photon TIS) AND (Hlt1TrackAllL0 TOS OR HLT1TrackMuon TIS) AND (Hlt2CharmOSTF3Body OR Hlt2CharmOSTF3BodyWideMass Hlt2TopoOSTF3Body TIS OR Hlt2PassThrough OR Hlt2TopoOSTF4Body TIS OR Hlt2TopoOSTF2Body TIS)
Amostra 3	(run > 80213 OR run = 80212 OR run 80211) AND (L0Hadron OR L0Muon TIS OR L0Electron TIS OR L0PhotonTIS) AND (Hlt1TrackAllL0 TOS OR Hlt1TrackMuon TIS) AND (Hlt2CharmOSTF3Body OR Hlt2CharmOSTF3BodyWideMass OR Hlt2TopoOSTF3Body TIS OR Hlt2PassThrough OR Hlt2TopoOSTF4Body TIS OR Hlt2TopoOSTF2Body TIS)

Tabela 5.5: Sumário dos requerimentos de trigger para as três amostras de dados usadas em 2010.

entre 1853 e 1983 MeV/c² com pureza estimada de 98%.

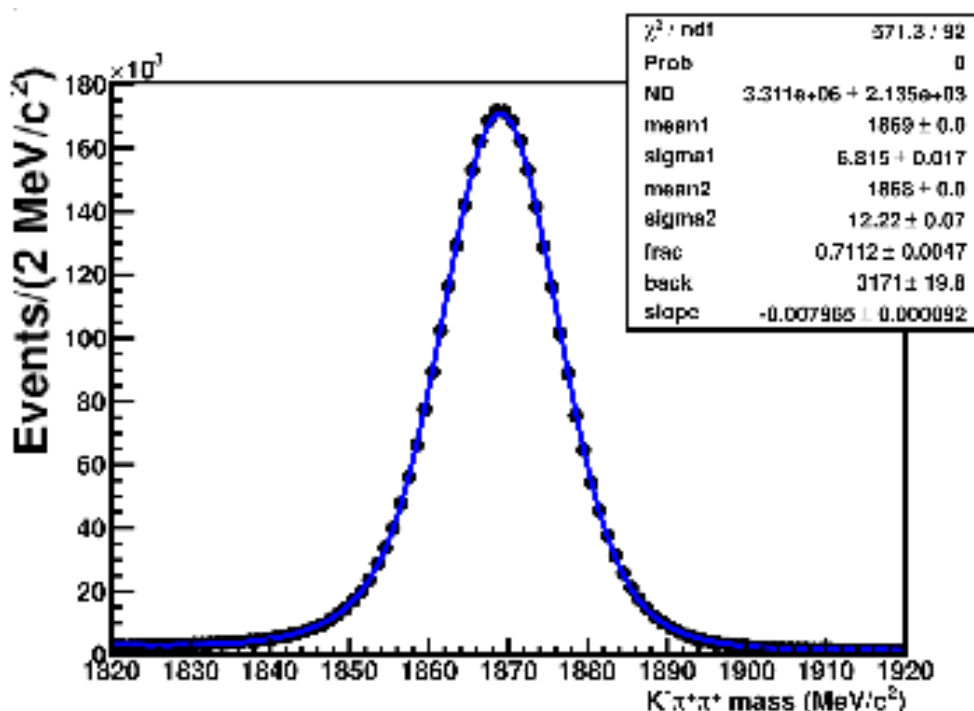


Figura 5.6: Ajuste da janela de massa para o decaimento $D \rightarrow K\pi\pi$, com a região de sinal definida entre 1853 e 1883 MeV/c².

5.4.2

Seleção dos canais DKKP e DsKKP

O decaimento favorecido por Cabibbo $D_s^+ \rightarrow K^- K^+ \pi^+$ também foi escolhido como canal de controle porque não apresenta fase de violação de CP e possui características topológicas similares com o canal de interesse, $D^+ \rightarrow K^- K^+ \pi^+$. Com a finalidade de diminuir o ruído vindo da contribuição do canal $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$, foi feito um corte na identificação de partícula ($DLL_{K\pi} > 7$) para ambos os káons. Na figura 5.7 pode-se ver a amostra final para as amostras 1 e 3 de D_s , apresentado na mesma figura, contém 448.000 eventos de sinal e pureza de 93.3%, e 541.830 eventos na amostra total, com pureza estimada de 90%.

Variável	Corte
PTsum	$> 2800 \text{ MeV}/c$
D_IPCHI2_OWNPV	< 12
p1_PIDK	> 7
Dll $_{K\pi}$	> 7 para káon
Dll $_{K\pi}$	< 3 para pión

Tabela 5.6: Tabela com cortes nas variáveis para o decaimento $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$.

O interesse principal desta dissertação é a busca por Violação de CP nos decaimentos simplesmente suprimidos por Cabibbo $D^\pm \rightarrow K^\pm K^\mp \pi^\pm$ e $D^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^\mp \pi^\pm$, usando os dados coletados durante 2010. Vimos que, no caso do méson D decaindo em $KK\pi$, o processo acontece principalmente pelos decaimentos ressonantes $D \rightarrow \phi\pi^+$ e $D \rightarrow \bar{K}^*K^+$, ambos com uma contribuição dominante da amplitude árvore que leva à transição $c \rightarrow u\bar{s}s$. Para o canal ressonante \bar{K}^*K^+ a mesma transição pode também ocorrer via diagrama pinguim, que pode contribuir com uma fase fraca. A fase relativa entre os dois tipos de amplitudes daria origem à Violação de CP.

Sabendo que de existir a possibilidade, ainda que pequena, de violação de CP no modelo padrão, pelo fato do canal $D^\pm \rightarrow K^\pm K^\mp \pi^\pm$ apresentar a fase complexa anteriormente aludida, esta violação de CP deveria ver-se refletida através de assimetria ou anisotropia ao comparar o espaço de fase do Dalitz Plot para D^+ e D^- . Com isto em mente, nossa amostra deve ser o mais limpa possível para evitarmos ter que lidar com ruídos aleatórios ou provindos de outros canais de decaimento. Aplicaram-se cortes na identificação de partícula que correspondem a cortes de $DLL_{K\pi} > 7$ para káons e $DLL_{K\pi} < 3$ para pions e encontrou-se que a significância estatística é máxima para um corte de momento transversal $P_T > 2800 \text{ GeV}/c$. Na figura 5.7 apresentamos os ajustes das amostras finais para as amostras 1 e 3 de $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$, com 333.750 eventos de sinal e pureza de 89.9%. A amostra total (amostras 1, 2 e 3) que

será usada para o *mirandizing* (Cap. 6) tem 377.784 eventos entre 1856.7 e 1882.1 MeV/c², 166.500 correspondendo a decaimentos em D⁺ e 167.200 para D⁻, com pureza estimada de 91%. Na tabela 5.6 estão mostrados os cortes das variáveis pedidos para o ajuste.

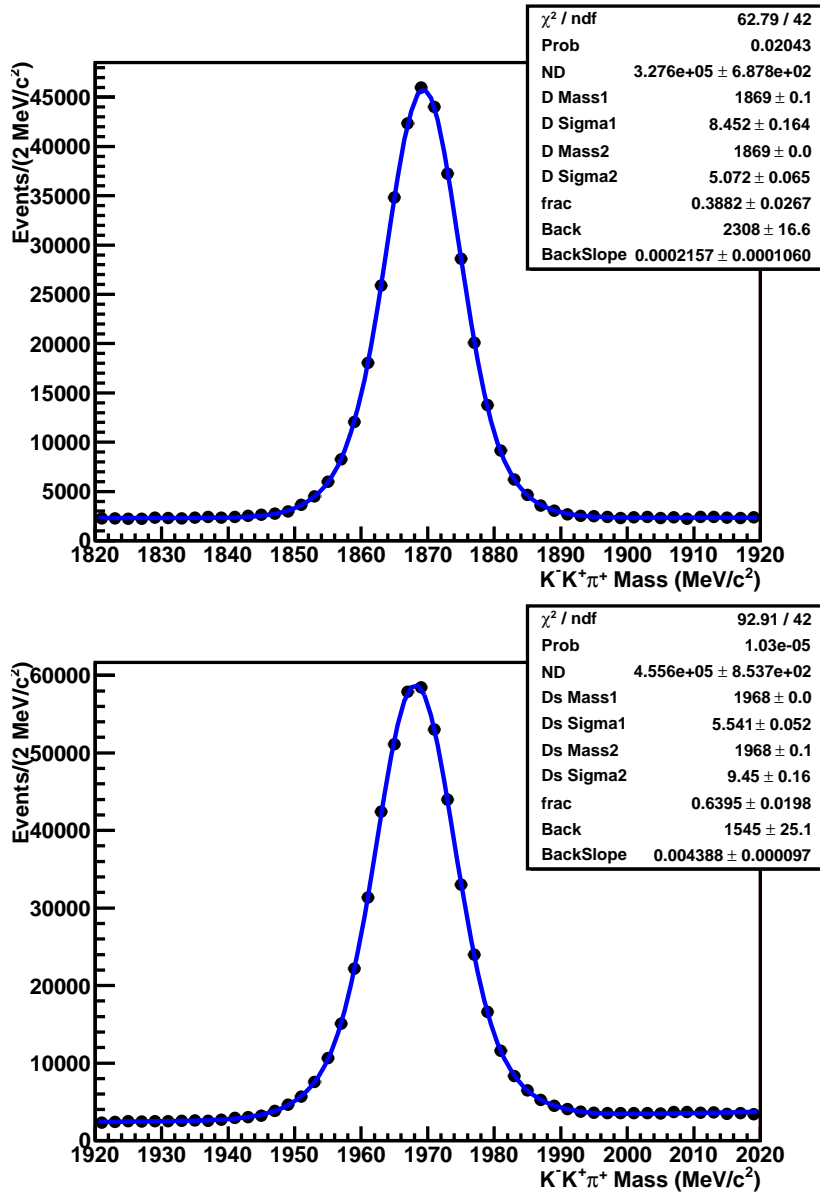


Figura 5.7: Ajuste da janela de massa para os decaimentos $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$ (acima) e $D_s^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$ (abaixo), com as respectivas regiões de sinal definidas como 1854-1884 e 1952-1982, respectivamente.

5.4.3 Seleção do canal de estudo PPP

Sabemos que as principais contribuições ao canal de decaimento $D^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+$, vêm de $D^\pm \rightarrow \rho\pi^\pm, \sigma\pi^\pm, f\pi^\pm$. Os canais que apresentam estas ressonâncias poderiam mostrar uma pequena contribuição de violação de CP devido à presença de uma fase fraca, como discutido no Capítulo 3. No Modelo Padrão, assimetrias poderiam ser da ordem de 0.1%. Valores da ordem de 1% já poderiam indicar nova física.

O decaimento em 3π apresenta o problema do alto nível de ruído de fundo combinatorial devido à reconstrução do estado final com três píons. Apesar da realização de cortes tradicionais de identificação de partícula, no parâmetro de impacto e na distância de vôo, não foi possível diminuir os níveis de ruído e atingir níveis de sinal que permitissem realizar estudos congruentes do decaimento. Mostramos na figura 5.8 a distribuição de massa após a saída da Stripping e após os cortes mostrados na tabela 5.7; pode-se ver que estes cortes não são suficientes para diminuir os níveis de contaminação da amostra.

Variável	Valor do Corte
PTsum	> 2500 MeV
PTlo	> 350 MeV
p1_IPCHI2_OWNPV	> 15
p2_IPCHI2_OWNPV	> 15
p3_IPCHI2_OWNPV	> 15
D_FDCHI2_OWNPV	> 250
D_{IPCHI2_OWNPV}	< 12
$DLL_{K\pi}$	< 3 (para os píons 1 e 2)
$DLL_{K\pi}$	< 10 (para o terceiro pión)

Tabela 5.7: Cortes lineares aplicados às variáveis da amostra do decaimento $D^+ \rightarrow \pi^-\pi^+\pi^+$.

Em casos como este, a maneira mais eficiente para separar sinal de ruído é realizar uma análise usando classificadores multivariados, por exemplo redes neurais artificiais e estimação multi-dimensional de verossimilhança, que pertencem à família de algoritmos de aprendizado supervisionado.

Foi feita uma análise usando o pacote TMVA⁷ do Root que usa classificadores de variáveis para aplicar cortes não tradicionais⁸ nas variáveis da amostra, como explicado na referência [53].

A ideia principal por trás da implementação de redes neurais artificiais é, a partir de uma amostra que contém os dados que não conseguimos separar com métodos tradicionais, conseguir uma amostra contendo a maior quantidade

⁷Toolkit for Multivariate Analysis.

⁸Cortes não lineares.

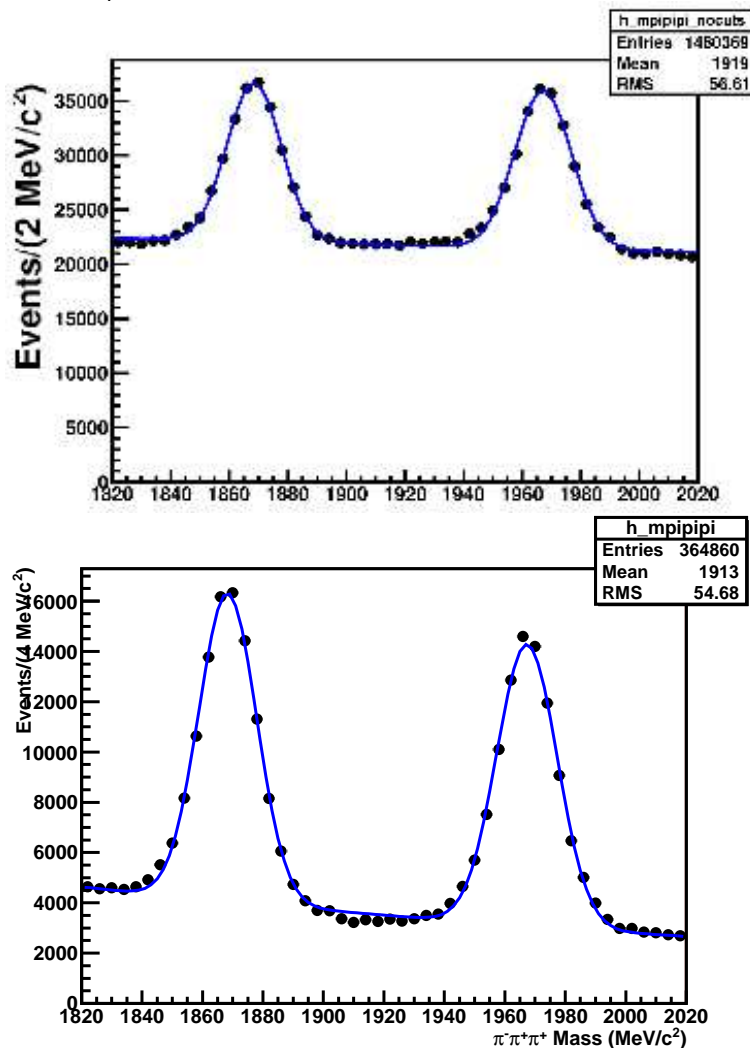


Figura 5.8: Espectro de massa para o decaimento $D \rightarrow \pi\pi\pi$. Acima: Ajuste da distribuição de massa após a saída da Stripping. Abaixo: Ajuste da distribuição de massa com cortes tradicionais. A eficiência ainda é muito pobre, $S/B = 1.3$ ou pureza = 43%.

possível de eventos de interesse para nossa análise. Para que a rede neural artificial possa realizar com eficiência esta separação, é preciso primeiramente “treinar” a rede para que lhe seja permitido aprender o comportamento dos dados que são de nosso interesse, para depois, com os valores numéricos do aprendizado, aplicar o método à amostra que queremos limpar. Na fase de treinamento, os dados são analisados de acordo com vários algoritmos conhecidos como classificadores, que implementam diferentes técnicas para treinar a rede e, de acordo com as informações coletadas, aplicar o algoritmo que mostrou melhor capacidade de separar sinal de ruído. Tais classificadores podem ser BDT (Boosted Decision Tree), MLP (Multilayer Perceptron), Fisher e Likelihood, por exemplo.

Para realizar o treinamento é necessário fornecer uma amostra

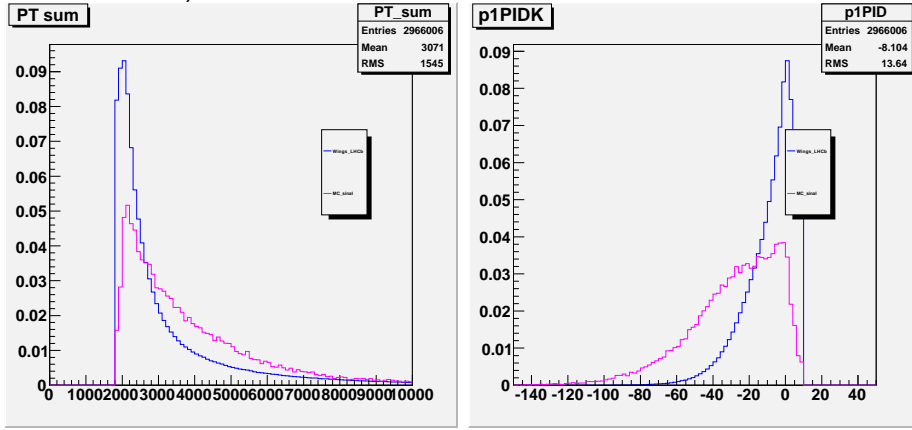


Figura 5.9: Distribuição de algumas variáveis comparadas na região de sinal de $MC_{\pi\pi\pi}$ com a região das wings dos dados do LHCb. Vemos que grande parte das distribuições destas variáveis está misturada em ambas as regiões de sinal e ruído.

classificada como “sinal” e outra classificada como “ruído”. Como amostra para ruído foi usada a região entre os picos de massa para D^+ e D_s^+ , definida acima ($1900 < D_MM < 1940$) MeV/c^2 . Para a amostra de sinal, tivemos duas opções: usar sinal de Monte Carlo para $D^+ \rightarrow \pi^-\pi^+\pi^+$ ou usar sinal real de $D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$, como descrevemos a seguir. Para isto comparamos as distribuições de cada uma das variáveis que seriam usadas no treinamento, tanto para Monte Carlo de $D^+ \rightarrow \pi^-\pi^+\pi^+$ como para $D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$, com a distribuição de tais variáveis nos dados reais de $D^+ \rightarrow \pi^-\pi^+\pi^+$ com a subtração de ruído. Para tal subtração devemos realizar os passos que explicamos a seguir:

- Toma-se a distribuição de uma dada variável na região de sinal de $\pi\pi\pi$.
- Toma-se a distribuição desta variável nas laterais.
- Reescala-se a contribuição nas laterais para a região central.
- Realizamos a subtração da distribuição de sinal desta variável pela distribuição das laterais reescalada.
- Esta é a distribuição do sinal.

Após a comparação, resolveu-se que usar os dados reais da região de sinal de $D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$ resulta ser a melhor escolha, como mostrado na figura 5.10, onde pode-se observar esta situação comparando as distribuições de algumas variáveis de $D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$, $D^+ \rightarrow \pi^-\pi^+\pi^+$ e simulações de Monte Carlo. Assim, podemos proceder à fase de classificação usando o TMVA em conjunto com as variáveis escolhidas para o estudo mostradas na tabela 5.7.

Após a fase de classificação, onde é realizado o treinamento da rede com grande parte dos classificadores de interesse e as variáveis mostradas na tabela

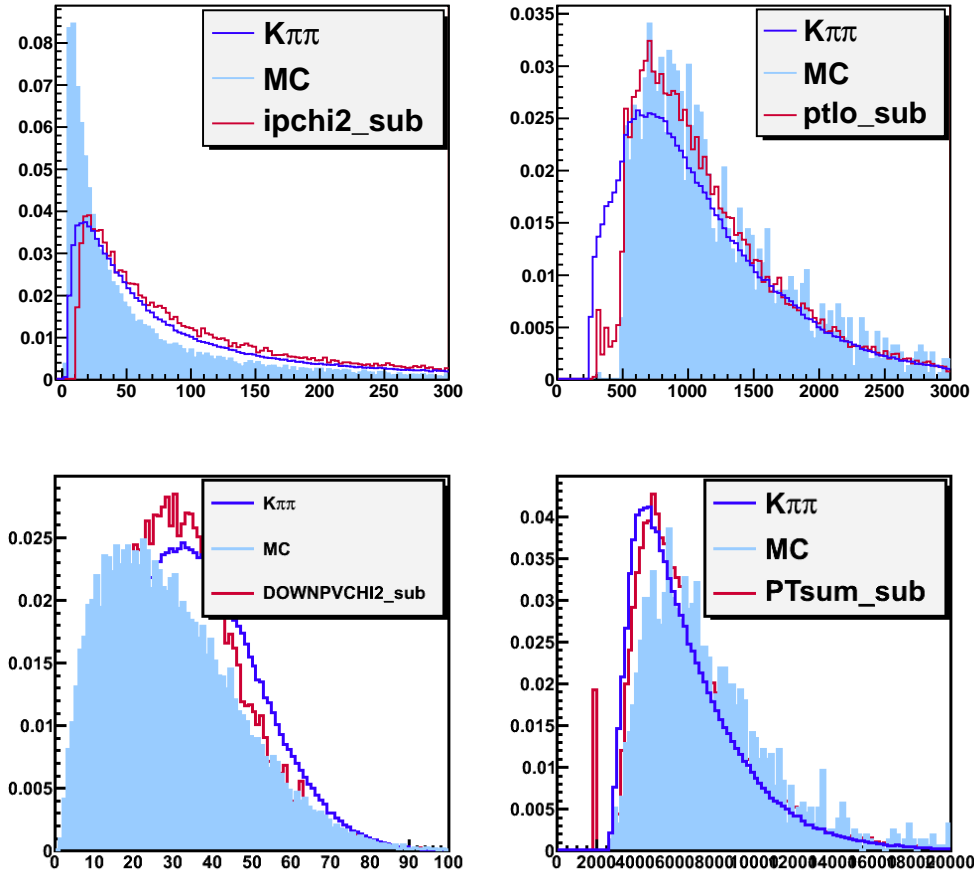


Figura 5.10: Distribuição de algumas variáveis comparadas na região de sinal de $\pi\pi\pi$, para $MC_{\pi\pi\pi}$ (azul celeste), a região de sinal de $K\pi\pi$ (azul) e a região de sinal de $\pi\pi\pi$ (vermelho) com subtração de ruído. Observamos que as distribuições das variáveis de Monte Carlo não se correspondem àquelas dos dados reais.

5.7, foram selecionados os métodos BDT, MLP, Fisher e Likelihood, por serem os classificadores que apresentaram a melhor eficiência nesta fase. Contudo, na seleção final (após a fase de aplicação) unicamente foi escolhido o classificador BDT pelo fato de fornecer a melhor relação sinal/ruído - como ilustrado na figura 5.11 - junto com os cortes adicionais comuns à Stripping12 explicitados na seção 5.3.1 e apenas para as amostras 1 e 3 da amostra com ambas as polaridades do magneto. Os classificadores e as purezas alcançadas com o melhor corte possível neles estão explicitados na tabela 5.8. Na figura 5.12, mostra-se o ajuste final após a aplicação do método multivariável, obtendo uma pureza de $\sim 70\%$ numa janela de massa de $(1850 < m_{\pi\pi\pi} < 1890) \text{ GeV}/c^2$ e na figura 5.13, apresentamos o ajuste de massa para um corte no classificador $BDT > 0.2$, que também rendeu ótimos resultados, equivalendo a $S/B=3$ e pureza $\sim 75\%$.

Foi apresentado nesta seção o procedimento utilizado para obter uma

Classificador	Corte	Pureza da Amostra
BDT	> 0.0	$> 70\%$
Likelihood	> 0.5	$< 50\%$
MLP	> 0.5	$< 55\%$
Fisher	> 0.0	$< 20\%$

Tabela 5.8: Cortes nos classificadores do TMVA, vemos que um corte de $BDT > 0$ representa a pureza de $\sim 70\%$, como especificado acima.

amostra de dados a mais limpa possível nos cinco canais que foram empregados na análise a ser explicada no capítulo seguinte. Após a seleção e os cortes nas amostras, foi feito um ajuste de duas Gaussianas na janela de sinal, mais uma função exponencial para o ajuste do ruído com o intuito de determinar o nível de ruído e a quantidade de eventos produzidos. No caso do decaimento $D^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$, o ajuste foi feito da mesma maneira, sobre a amostra alcançada após a aplicação da análise multivariável (TMVA). As quantidades de eventos obtidas dos cinco canais de decaimento, assim como as purezas e eficiências dos cortes, são apresentadas na tabela 5.9.

Canal	Amostra 1 + 3	Amostra 2	Total
$D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$	338 113	65 781	403 894
$D_s^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$	471 282	91 471	562 753
$D^\pm \rightarrow K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$	3 152 509	687 185	3 839 694
$D^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$	148 387	—	148 387
$D_s^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$	130 801	—	130 801

Tabela 5.9: Amostra final com o número total de eventos da stripping 12 para usar nas análises. Para $D^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ e $D_s^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ usaram-se apenas as amostras 1 e 3 com ambas as polaridades do magneto.

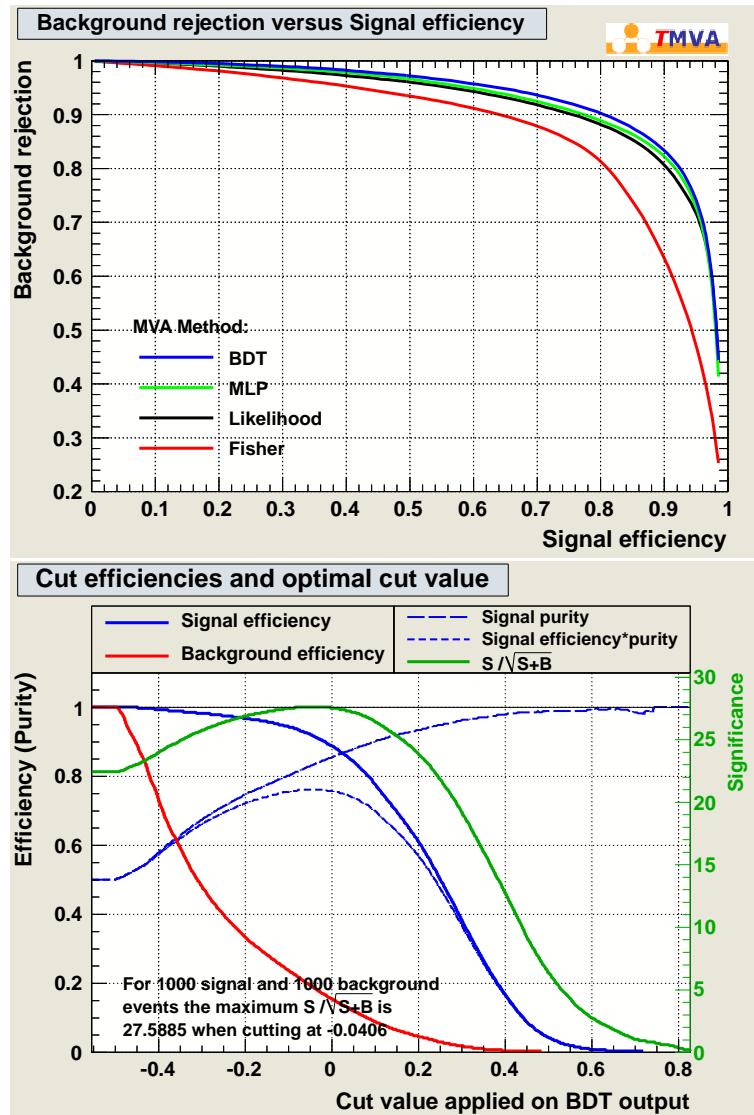


Figura 5.11: Acima: gráfico da rejeção de ruído em função da eficiência no sinal para os classificadores do TMVA no estudo do decaimento $D \rightarrow \pi\pi\pi$, mostrando que o melhor rendimento é obtido pelo classificador BDT. Abaixo: gráfico que mostra a eficiência do classificador BDT de acordo com o corte aplicado.

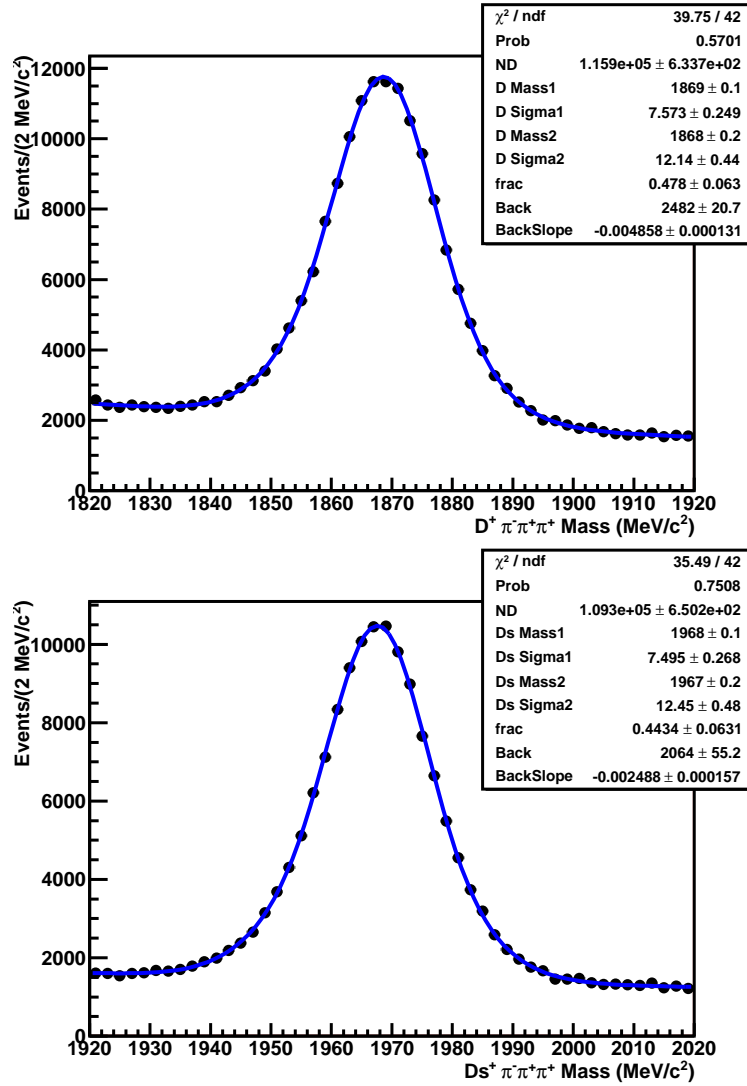


Figura 5.12: Ajuste da distribuição final do espectro de massa (amostras 1 e 2) para o decaimento $D^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ e $D_s^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ após os cortes tradicionais e a utilização de critérios de análise multivariável. Com um corte no classificador $\text{BDT} > 0$ para $D^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$, obtém-se valores de $S/B = 2.2$ ou pureza de $\sim 70\%$ na janela de massa ($1850 < m_{\pi\pi\pi} < 1890$) GeV/c^2 . Para $D_s^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$, na janela de massa ($1950 < m_{\pi\pi\pi} < 1990$) GeV/c^2 , obtém-se valores de $S/B = 3$ ou pureza de 75% .

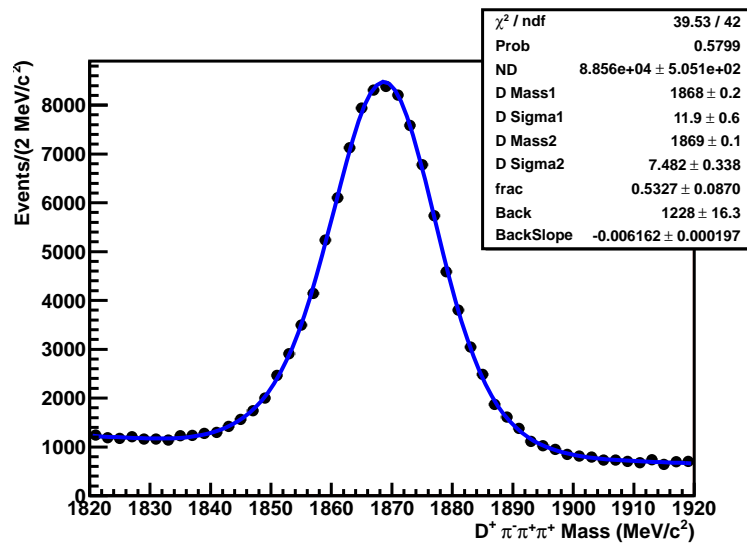


Figura 5.13: Ajuste da distribuição final do espectro de massa (amostras 1 e 2) para o decaimento $D^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ com valor BDT>0.2. Para este caso, obtemos S/B= 3.04 que representa uma pureza de $\sim 75\%$.