7 Anisotropia no Dalitz Plot

Neste capítulo, discutiremos os aspectos envolvidos na implementação da análise de Anisotropia de Dalitz plot sugerida pela referência [40], além de sua aplicação nos primeiros dados tomados pelo LHCb. Apresentaremos um estudo acerca da significância da anisotropia do DP, a partir de amostras de simulação simplificada (Fast MC) de $K\pi\pi$. Em seguida, já no ambiente do experimento LHCb, serão discutidos os possíveis efeitos de assimetria de produção, deteção e seleção, e metodologias para sua verificação. Por fim, aplicaremos este método nos dados produzidos no ano de 2010, em que iremos comparar com o comportamento esperado pela simulação.

7.1 Estudo da Anisotropia no DP via Monte Carlo

Com base no que foi discutido no capítulo 3, vamos iniciar uma série de etapas que buscam validar a aplicação e resultados do método de Anisotropias do DP para o canal $B^{\pm} \rightarrow K^{\pm}\pi^{\pm}\pi^{\mp}$. Iremos investigar as duas metodologias de ${}^{DP}S_{CP}$ dadas pelas equações 3-44 e 3-46 (tipo I e II). Para isso, vamos utilizar dois tipos de simulação: Fast Monte Carlo e Monte Carlo do LHCb. O primeiro caso se caracteriza como uma amostra gerada considerando apenas a cinemática e dinâmica envolvida no processo, enquanto que a segunda foi descrita no capítulo anterior, definida pela simulação de todas as etapas que envolvem a seleção do nosso candidato no LHCb.

Em um segundo momento, queremos ser capazes de saber qual é a estatística necessária para estabelecer a observação de Violação de CP no canal $B^{\pm} \rightarrow K^{\pm}\pi^{+}\pi^{-}$ de maneira simplificada – por Fast MC. Esta discussão será apresentada uma vez que discutirmos todas as etapas que assegurem o método da Anisotropia do DP.

7.1.1 Fast Monte Carlo

O primeiro passo é produzir a mesma quantidade para amostras de B^+ e B^- , sem considerar a dinâmica, ou seja, gerando DP homogêneo. Isto é análogo ao que foi feito no estudo em [40]. Porém, além de reproduzir seus resultados, queremos ver se, na presença de efeitos de produção/deteção que geram assimetrias globais (não relacionadas à violação de CP), seria possível corrigir este efeito. Para produzir todas as simulações descritas nesta seção, utilizaremos um software chamado URCA[77], que foi desenvolvido pelo grupo do LHCb-Rio CBPF. Foram gerados 500K eventos de B^+ e de B^- , e em seguida calculamos sua significância pelo tipo I e II. Seu resultado pode ser visto na figura 7.1.



Figura 7.1: Resultado da aplicação do ${}^{DP}S_{CP}$ do tipo I e II em duas amostras com a mesma quantidade de eventos, considerando apenas o decaimento não ressonante do canal $B^{\pm} \to K^{\pm}\pi^{\pm}\pi^{\mp}$.

Para compararmos ambos os métodos, estamos considerando apenas valores absolutos para o tipo I. Além disso, os valores do centro e da largura do ajuste foram fixados em zero e um, de forma que possamos comparar, nas etapas seguintes, como o efeito de assimetria global desloca a distribuição em relação a esta gaussiana. Podemos observar que em ambas as figuras o ajuste se adequa perfeitamente às simulações, demonstrando a situação apresentada na seção 3.5.1, em que não há assimetria entre B^+ e B^- . Por construção, neste caso, o fator de correção α , da referência [41], é igual a 1. No entanto, no cenário em que existam diferentes quantidades de B^+ e B^- , devemos estabelecer até que ponto o método pode corrigir esta assimetria através do fator α . Estudos anteriores [41] demonstraram que em assimetrias de até 10%, os métodos I e II são equivalentes. Como não é esperada uma assimetria desta magnitude, nas próximas discussões apresentaremos os resultados apenas considerando o método I. Produzimos uma amostra com uma quantidade 1%, 3% e 5% maior de B^+ do que os 500K gerados de B^- e aplicamos o método das Anisotropias do DP. Na figura 7.2 à esquerda, está ilustrada a aplicação de ${}^{DP}\mathcal{S}_{CP}$ sem fator de correção, e na direita o resultado se corrigirmos pelas assimetrias correspondentes, $\alpha = 1.01, 1.03 \text{ e} 1.05.$

Notamos que as figuras à esquerda têm suas distribuições com os centros gradativamente deslocados, variando de acordo com a magnitude da assimetria. Ao aplicarmos o método ${}^{DP}\mathcal{S}_{CP}$ com o fator α a fim de corrigir esta



Figura 7.2: Simulações para diferentes cenários de assimetria de produção, em especial para 1%, 3% e 5%. As figuras à esquerda representam o efeito da assimetria com o fator de correção $\alpha = 1$, enquanto à direita suas correções correspondentes.

assimetria, observamos que recuperamos a concordância entre as distribuições e a gaussiana.

A próxima etapa consiste em adicionarmos as informações da dinâmica e em seguida a própria violação de CP, da forma que foi discutido na seção 3.4. Simulamos então amostras para B^+ e B^- incluindo as ressonâncias pelo formalismo de Zemach. Para isso, utilizamos os valores das amplitudes e fases dados pela referência [40]. Como queremos estudar primeiramente a potencialidade da correção do fator α em relação à assimetrias não relacionadas a violação de CP, consideramos o mesmo modelo para B^+ e B^- , em particular a mesma fase de $\rho^0 K^+$ em ambas. Dessa forma, recordando a tabela 3.2, fixamos o valor do parâmetro $\delta_- = \delta_+$ em -34° . Seguindo o mesmo procedimento anterior, geramos amostras com quantidades de B^- com 1%, 3% e 5%, menores do que B^+ , e analisamos as distribuições de ${}^{DP}S_{CP}$ com e sem o fator de correção α . Na figura 7.3 estão ilustrados os efeitos destas diferentes quantidades de eventos de B^+ e B^- . Vê-se que, com a correção nas distribuições, resgata-se a gaussiana centrada em zero e largura 1.

Como havíamos discutido, foram observadas evidências de assimetria no



Figura 7.3: Simulações incluíndo as ressonâncias com os parâmetros baseados na referência [40], não inserindo violação de CP. As figuras representam o efeito da correção de produção de uma quantidade 1%, 3% e 5%, inferior de B^- a B^+ .

canal intermediário $\rho^0 K^{\pm}$ [42], o que pode ser visualizado em uma região de interferência com outra ressonância no DP. O próximo passo então é simular amostras com violação de CP e também com assimetria de produção/deteção, para verificar se seríamos capazes de identificar sinais de violação de CP. Assim, simulando uma amostra com os mesmos parâmetros da tabela 3.2, geramos quantidades inferiores em 2%, 3% e 5% para B^- do que para B^+ . Os efeitos e as respectivas correções pelo fator α estão ilustrados na figura 7.4.

Podemos notar que, embora estejamos corrigindo pelo fator α observado, ainda se encontra um desvio da distribuição gaussiana. Em outras palavras, a assimetria devido à produção/deteção, se corretamente corrigida, não mascara efeitos reais de violação de CP.

Neste primeiro exemplo, utilizamos simulação de Fast Monte Carlo que serve muito bem para demonstrar o método. No entanto, é importante agora entender se existem efeitos de assimetria, ocasionados por produção/deteção no LHCb, o que será feito utilizando o Monte Carlo completo do LHCb.



Figura 7.4: Simulações incluíndo violação de CP dado pela referência [40]. As figuras à esquerda representam os efeitos de produção de 2%, 3% e 5% e à direita seus respectivos fatores de correção.

7.1.2 Monte Carlo do LHCb

A amostra de $B^{\pm} \to K^{\pm}\pi^{+}\pi^{-}$ de Monte Carlo do LHCb foi discutida no capítulo anterior, quando definimos nossa seleção. Naquele ponto, uma grande procupação era evitar possíveis efeitos de ineficiência nos cantos do DP, regiões estas populadas por ressonâncias e, portanto, mais sensíveis aos efeitos de violação de CP. Entretanto, na análise do capítulo anterior, não estudamos as amostras de B^{+} e B^{-} separadamente, ou seja, não verificamos efeitos de assimetria (vale lembrar que a amostra de Monte Carlo $B^{\pm} \to K^{\pm}\pi^{\pm}\pi^{\mp}$ foi gerada sem violação de CP). Separando a amostra da *StrippingBu2hhh* em candidatos a B^{+} e B^{-} , podemos ajustar suas distribuições por meio de uma dupla gaussiana e uma exponencial, em que novamente utilizamos o método de Verossimilhança do MINUIT [74] para ajustarmos evento a evento. O resultado para as duas amostras pode ser visto na figura 7.5.

Vemos que há 5772 ± 78 eventos para B^+ e 5740 ± 78 para B^- , o que resulta em $\alpha = N(B^+)/N(B^-) = (0.55 \pm 1.9)\%$. Sendo assim, estatisticamente



Figura 7.5: Distribuições de massa para para o decaimento $B^+ \to K^+ \pi^+ \pi^-$ e seu conjugado após as etapas do Trigger e Stripping no Monte Carlo do LHCb.

as amostras são compatíveis no número de eventos. Isto demonstra que, ao estudarmos esta estatística de Monte Carlo, não se observam efeitos de produção/deteção/seleção, como pode ser visto ao aplicarmos o método da Anisotropia (figura 7.6).



Figura 7.6: Resultado da aplicação do método "Mirandizing" nos eventos selecionados da simulação.

Ainda assim, devemos constantemente estar preocupados em estudar tais possíveis efeitos, uma vez que as condições de tomada de dados influenciam nesta medida. Nesse sentido, na próxima seção estudaremos a assimetria em diversos níveis de nossa simulação, criando um perfil dos nossos eventos desde sua geração até sua análise de dados.

7.2

Efeitos de Assimetrias de Produção, Detecção e Seleção no Monte Carlo

Com intuito de identificar as possíveis contribuições da assimetria observada no Monte Carlo na seção anterior, vamos investigar separadamente efeitos provenientes da colisão, deteção e seleção.

7.2.1 Efeitos de Produção ("Leading Effect")

Em uma colisão p-p, uma diferença de produção de B^+ e B^- é esperada como resultado do mecanismo conhecido como *Efeito Leading*¹. A interpretação deste fenômeno fica clara se considerarmos as composições dos mésons e prótons envolvidos no processo. Como os prótons da colisão são compostos exclusivamente de quarks do tipo up e down, o méson B^+ ($\bar{b}u$) produzido pode estar carregando o quark up originado do próton, enquanto que para o B^- ($b\bar{u}$) isto não é possível. Este quark de valência up, presente no próton e apenas no méson positivo, é responsável por uma produção maior de B^+ do que B^- . Este tipo de fenômeno pode ser entendido como uma assimetria de produção, e não dependente, portanto, do processo de decaimento posterior.

O efeito leading está incluído no Pythia do Monte Carlo do LHCb (através da extrapolação para 7 TeV). Podemos, então, verificar qual é a diferença relativa entre B^+ e B^- produzidos. Este valor é igual a (1.04 ± 0.887)%, sendo já compatível com o valor encontrado de (0.55 ± 1.9)%.

7.2.2 Efeitos de Deteção

Uma vez investigados possíveis efeitos de produção, devemos nos preocupar com efeitos de deteção que levem a quantidades desiguais de $B^+ \to K^+ \pi^+ \pi^-$ e $B^- \to K^- \pi^- \pi^+$. Esta assimetria pode ser uma convolução de diferentes contribuições [78]: a interação das partículas filhas com o material; geometria, como ineficiência dos detetores e mau alinhamento; software. Na nossa discussão vamos nos concentrar no primeiro e segundo ponto.

Interação das partículas com o material

Nosso candidato a B^+ será reconstruído a partir do estado final $K^+\pi^+\pi^-$, enquanto B^- possuirá igualmente um par $\pi^+\pi^-$ porém um K^- . Devemos checar se K^+ e K^- interagem de maneira diferente com a matéria. Este efeito, na verdade, é bem conhecido, visto que a seção de choque do K^-p é maior que K^+p , o que resulta numa maior interação do K^- com o detetor. A figura 7.7, retirada do PDG [20], comprova este comportamento.

Assim, é esperada uma maior interação de K^- para traços com momentos abaixo de 100GeV, o que fará com que este traço venha a ser "perdido"e, na prática, haja mais $B^+ \to K^+ \pi^+ \pi^-$ caso tenham sido produzidos em igual quantidade. Nesse sentido, é importante dedicarmos um pouco mais da nossa

 $^{^{1}}$ Leading é uma expressão do inglês que pode ser interpretada como a ação de liderar, no caso, o efeito de carregar uma maior quantidade em relação ao outro.



Figura 7.7: As figuras ilustram as seções de choque para $K^-p \in K^+p$. Na figura do alto apresentamos a seção de choque total e elástica para K^- , enquanto que a figura inferior para K^+ . Note que temos valores maiores para K^- até 100GeV, o que em seguida entra em concordância. Figura retirada do PDG [20]

discussão nesta região. O primeiro ponto que podemos levantar diz respeito a capacidade da nossa amostra de Monte Carlo representar este comportamento. Na referência [79] foi feito um estudo da seção de choque utilizada na simulação do LHCb, em que se estimou a assimetria K^+/K^- produzida. Seu resultado pode ser visto na tabela 7.1, em que P_{int} é a probabilidade de interação de uma dada partícula. Notamos que o Monte Carlo representa muito bem o comportamento medido experimentalmente da seção de choque.

Como primeira etapa de nosso estudo, vamos analisar a amostra definida na seção 6.4.1, em que princípio, estaríamos considerando exclusivamente efeitos de reconstrução. Neste ponto, se existirem assimetrias, ainda não podemos garantir que seja resultado da interação K^+/K^- , uma vez que devemos considerar outros efeitos como de software, mau alinhamento e ineficiências de reconstrução. Para estudarmos a assimetria K^+/K^- , separamos as amostras de Monte Carlo $B^{\pm} \to K^{\pm}\pi^{\pm}\pi^{\mp}$ em faixas de momento, a cada 10 GeV, para que possamos contar o número de eventos por faixa. Este procedimento pode ser uma boa estratégia para estudarmos isoladamente a

Partícula	p(GeV/c)	P_{int}	razão de $P_{int} K^-/K^+$	
K^+	1	0.0026 ± 0.0002	1.92 ± 0.17	
K^{-}	1	0.0050 ± 0.0002		
K^+	5	0.0018 ± 0.0001	1.33 ± 0.13	
K^{-}	5	0.0024 ± 0.0002		
K^+	10	0.0019 ± 0.0001	1.21 ± 0.12	
K^{-}	10	0.0023 ± 0.0002		
K^+	100	0.0021 ± 0.0001	$1. \pm 0.06$	
K^-	100	0.0021 ± 0.0001		

Tabela 7.1: Sumário dos resultados para as interações do $K^+ \in K^-$ com o material simulado. Tabela retirada da referência [79].

questão da seção de choque K^+/K^- , uma vez que outros efeitos não dependem do momento. Na figura 7.8 estão ilustrados nossos resultados.



Figura 7.8: Resultados para diferentes faixas de momento para a assimetria de K^+ e K^- no Monte Carlo do LHCb.

Podemos observar claramente uma tendência de diminuição da assimetria em função do aumento do momento. Em especial, acima de 40GeV a quantidade de eventos de B^+ e B^- já é comparável. Este resultado está em concordância com o que esperamos da seção de choque, o que nos leva a supor que a assimetria produzida é decorrente deste efeito. Outro resultado importante é a assimetria total de $(2.78 \pm 0.60)\%$ observada. Como, após a seleção, temos uma assimetria de somente $(0.55 \pm 1.9)\%$, algum processo posterior é responsável por mascarar o efeito original e também deve ser entendido.

Polarização do Magneto

A amostra que acabamos de analisar é composta de metade dos eventos tomados com magneto com polaridade para cima e metade para baixo. Com isso, podemos separar novamente nossos resultados entre estes dois tipos de tomada de dados. Nosso objetivo é caracterizar o perfil destes eventos e ser capaz de identificar possíveis efeitos sistemáticos relacionados a polaridade do magneto do LHCb. Os valores encontrados estão listados na tabela 7.2. Podemos notar uma assimetria equivalente nos dois cenários. Isso nos leva a

	Magneto Down	Magneto Up
Assimetria $B^+/B^-(\%)$	2.59 ± 0.838	2.19 ± 0.842

Tabela 7.2: Resultados para assimetria de Monte Carlo em função da polaridade do magneto do LHCb.

concluir que em princípio, esta não seria uma fonte de assimetria na nossa amostra.

7.2.3

Seleção de eventos (Trigger e Análise)

Devemos então entender como chegamos a uma assimetria de $(0.55 \pm 1.9)\%$ se partimos de uma amostra que possui $(2.78 \pm 0.60)\%$. Após a reconstrução dos eventos apenas duas etapas podem afetar nossos dados: o Trigger e a Seleção. Utilizando o mesmo procedimento das seções anteriores, podemos estimar a assimetria causada de forma sequencial. Aplicando "TOS" no "L0Hadron" e em seguida em "HLT1", encontramos uma assimetria de $(1.77 \pm 0.970)\%$ e $(0.236 \pm 1.38)\%$ respectivamente. A conclusão mais expressiva desses valores é que existe uma grande assimetria para o decaimento negativo em relação ao positivo tanto na linha do "L0" como no "HLT1". Este comportamento ainda deve ser estudado com mais detalhes no futuro, no entanto, foi possível determinar, de forma sequencial, como a assimetria pode surgir em nossa amostra.

Por fim, verificamos que a StrippingBu2hhh não introduz nenhuma fonte de assimetria significativa em nossos dados.

7.3

Estimativas para identificação de Violação de CP pelo método Mirandizing

Com base nos estudos apresentados neste capítulo, podemos estimar a partir de qual estatística seremos capaz de identificar sinais de Violação de CP nos dados produzidos pelo LHCb. Para isso, vamos produzir uma amostra de Fast Monte Carlo que simule esta situação. Especificamente, vamos utilizar o Modelo Isobárico como descrito no capítulo 3 com os valores encontrados pelo experimento BaBar [42], em que foram encontrados evidências de assimetria local. Por simplicidade, optamos por incluir em nossa simulação a componente 0^+ do espectro $K\pi$ (identificado como $(K\pi)_0^{*0}$) na forma da ressonância escalar $K_0^{*0}(1430)$. Os parâmetros e os respectivos valores utilizados estão listados na tabela 7.3

Ressonâncias	a_+	δ_+	a_{-}	δ_{-}
$K^{*0}(892)\pi^+$	1.01	0.237	1.04	0.230
$K_0^{*0}(1430)\pi^+$	1.86	-0.574	1.92	-0.232
$\rho^0(770)K^+$	0.542	0.269	0.865	-0.226
$f_0(980)K^+$	1.29	-1.31	1.16	-0.182
$\chi_{c0}K^+$	0.342	-0.529	0.296	-0.682
Não Ressonânte	0.598	-0.129	0.598	-0.129
$K_2^{*0}(1430)\pi^+$	0.509	-1.01	0.533	-0.897
$w(782)K^{+}$	0.0134	-1.04	0.0134	-1.04
$f_2(1270K^+$	0.358	-0.697	0.105	0.143
$f_X(1300)K^+$	0.278	0.292	0.234	0.549

Tabela 7.3: Parâmetros retirados da referência [42] que foram utilizados na simulação. Os ângulos listados estão em radianos.

Com estes valores geramos diferentes quantidades de B^+ e B^- que variam de 350 eventos a 500K eventos e aplicamos o "Mirandizing". O resultado de sua implementação está ilustrado na figura 7.9 e discutido a seguir.

Observamos que para baixas estatísticas (< 1000 eventos) não encontramos evidência da deformação na gaussiana. Para estatísticas da ordem de 5K a 10K a evidência de assimetria global é clara, sendo incontestável a partir de 50K.

7.4 Estudo Preliminar da Anisotropia do Dalitz plot nos dados de 2010

Nesta seção, implementamos o método "Mirandizing" na nossa amostra selecionada, seção 6.6.4, figura 6.18. Analisaremos exclusivamente a região do sinal dado pelo ajuste da gaussiana, correspondendo a 5.22 $< m_{K\pi\pi} < 5.35 \text{ GeV/c}^2$. Esta amostra contém um total de 1024 entradas, sendo 517 para candidatos a B^+ e 507 para B^- . Fazendo um ajuste de Máxima Verossimilhança pelo MINUIT para ambas as amostras, encontramos 408±25 eventos para B^+ e 423±23 para B^- (ou seja, uma assimetria de (3.67±9.66)% compatível com zero). Na figura 7.10 encontramos a significância para os dois



Figura 7.9: Resultado da aplicação do "Mirandizing" para diferentes estatísticas: 350, 800, 1000, 5000, 10K, 50K, 100K e 500K. Note que claramente a partir de 10K a 50K eventos já se observa assimetria global.



métodos (tipo I e II) nesta amostra analisada. Observamos que os dados estão

Figura 7.10: A figura à esquerda representa o resultado de ${}^{DP}S_{CP}$ para o tipo I e à direita para o tipo II, nos dados coletados para o canal $B^{\pm} \to K^{\pm}\pi^{+}\pi^{-}$. Note que fixamos a largura em 1 e o centro em zero para que possamos caracterizar nossa amostra.

de acordo com o ajuste de uma gaussiana centrada em zero e de largura 1, em ambos os casos. Se recordarmos as estimativas feitas da última seção para a simulação de 350 eventos para B^+ e B^- , notamos que os resultados são equivalentes, em que não é esperada a observação de violação de CP.

Como visto no capítulo anterior, a relação S/B encontrada foi de 4.33 ± 0.368 . Para esta estatística, a contribuição do background não adiciona efeitos ao método. Via de regra, as assimetrias do background devem ser cuidadosamente estudadas.

7.5 Considerações Finais

Neste capítulo discutimos a aplicabilidade do método da Anisotropia no Dalitz plot em diversos níveis. Em primeiro lugar apresentamos um estudo da correção do método em função de amostras de Fast MC sem os efeitos da dinâmica, com a dinâmica e com violação de CP, respectivamente. No entanto, o resultado mais expressivo diz respeito à amostra de Monte Carlo do LHCb. Fomos capazes de identificar possíveis efeitos sistemáticos em diferentes etapas da obtenção da amostra final de Monte Carlo, e fazer uma caracterização do perfil dessas assimetrias, o que será de fundamental importância ao analisarmos os dados futuros. Em seguida, definimos as estatísticas necessárias para observação de violação de CP pelo método "Mirandizing".

Relembrando a estimativa para $1fb^{-1}$ encontrada no capítulo anterior, se obtivermos da ordem de 20 mil eventos, estaremos no cenário em que se estima a observação de violação de CP global no decaimento $B^{\pm} \to K^{\pm}\pi^{\pm}\pi^{\mp}$. Isto representaria a primeira observação deste fenômeno em três corpos feita, sendo de grande relevância experimental. Por fim, analisamos os dados de 2010 com o método "Mirandizing", não observando anisotropia para B^+ e B^- para esta estatística. Este resultado está de acordo com o esperado pelas nossas simulações anteriores.