

4

O experimento LHCb

4.1

Introdução

Numa visão idealista de uma reação entre partículas elementares, poderíamos acessar todas as etapas de seu processo. No entanto, a única informação que coletamos é proveniente dos seus produtos finais. Para descrever todo o mecanismo e propriedades das partículas envolvidas, se torna necessário reconstruir todo o processo a partir destas informações disponíveis. A maneira pela qual detectamos uma partícula é pela sua interação com a matéria. Existem interações específicas para partículas carregadas que diferem das neutras, além de interagirem de maneira diferente para determinados regimes de energia. Podemos dizer que as bases da concepção de um detetor necessariamente devem estar pensadas em interpretar estes possíveis processos. As informações que deveríamos obter basicamente nos proporcionaria um quadro dos eventos: momento, massa e energia das partículas e propriamente o caminho que elas percorreram (traços). Como a riqueza das interações é muito extensa, vamos discutir brevemente os principais processos que nos ajudam a compreender os diversos dispositivos que compõe um detetor.

– Partículas Carregadas

Uma partícula só pode ser detetada uma vez que esta deposita energia no meio. Esta perda de energia pode ocorrer tanto por meio da excitação como da ionização dos elétrons. Ambas as situações podem ser descritas pela equação de Bethe-Bloch, definida como a média da energia perdida dE por comprimento dx . Em detetores reais, não medimos $\langle dE/dx \rangle$ devido à limitação dada pela granularidade. Medimos na verdade a energia ΔE depositada na camada de espessura finita δx .

Existem alguns outros processos nos quais as partículas carregadas podem excitar fótons do meio com características particulares, dentre os quais a radiação de Cherenkov se destaca. Este processo é de vital relevância na identificação de partículas, uma vez que elas deixam assinaturas que estão associadas às suas massas.

Além da anergia perdida pela ionização, partículas rápidas perdem energia por interação com o campo de Coulomb dos núcleos do meio. Se a partícula é desacelerada pelo campo do núcleo, uma parcela da sua energia cinética será emitida em forma de fótons (*bremstrahlung*). No caso específico de elétrons que possuem uma massa pequena, a perda de energia por *bremstrahlung* é muito importante. Esta expressão é comumente escrita como:

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = \frac{E}{X_0} \quad (4-1)$$

em que definimos X_0 como o comprimento de radiação, uma grandeza característica do material e que será muito utilizada quando discutirmos sobre os detetores.

Alguns outros mecanismos podem ser importantes na medida da perda de energia. A criação de pares de elétron-pósitron é um exemplo disto, em que são produzidos através de fótons virtuais do campo do núcleo. No caso dos múons, este tipo de processo é bem mais importante do que o fenômeno *bremstrahlung*.

De uma maneira geral, as perdas de energia por meio de processos radioativos estão caracterizados por uma larga flutuação. Em outras palavras, discutirmos sobre uma média de energia perdida pode proporcionar uma grande imprecisão. No entanto, pelos processos mencionados anteriormente a energia pode ser parametrizada pela soma de todas as contribuições disponíveis.

– Interação do fóton e de partículas neutras

Para que um fóton possa ser detetado ele precisa criar partículas carregadas e/ou transferir energia para elas. As interações dos fótons são fundamentalmente diferentes do processo de ionização, visto que ou o fóton é inteiramente absorvido (efeito fotoelétrico e produção de pares) ou ele é espalhado em um ângulo relativamente grande (Efeito Compton). Processos que envolvem fótons estão presentes absolutamente em todos os aspectos do detetor. Entre as considerações mais importantes destacam-se: a medida da interação das partículas carregadas pela produção de fótons nos cintiladores, auxílio na identificação de partículas neutras e a própria criação de chuveiros de partículas no calorímetro eletromagnético.

Os nêutrons, da mesma forma que os fótons, são detetados ao produzirem partículas carregadas. No entanto, diferentes técnicas são aplicadas para sua identificação, dependendo principalmente de sua energia cinética: reações do tipo $n + {}^6\text{Li} \rightarrow \alpha + {}^3\text{H}$, espalhamento elástico e produção de cascatas por

interações inelásticas. A partícula que representa o maior desafio de ser medida é o neutrino, principalmente devido à sua pequena seção de choque. Para ser identificada, são requeridos grandes detetores ou, em experimentos herméticos, associarmos a energia faltante aos neutrinos.

Processos específicos tanto de partículas carregadas como neutras serão discutidas com mais detalhe quando apresentarmos os detetores do LHCb.

4.2

O Grande Colisor de Hádrons

O *Large Hadron Collider*¹ (LHC) [45] é o maior experimento em atividade do mundo, localizado no CERN, *Centre Européenne pour la Recherche Nucléaire*². O LHC é um acelerador de hádrons constituído por dois anéis supercondutores de 26.7km de circunferência. Está localizado entre 45m e 170m abaixo da superfície, na fronteira entre a Suíça e a França, nos arredores de Genebra (Fig. 4.1). Tendo recentemente entrado em funcionamento,

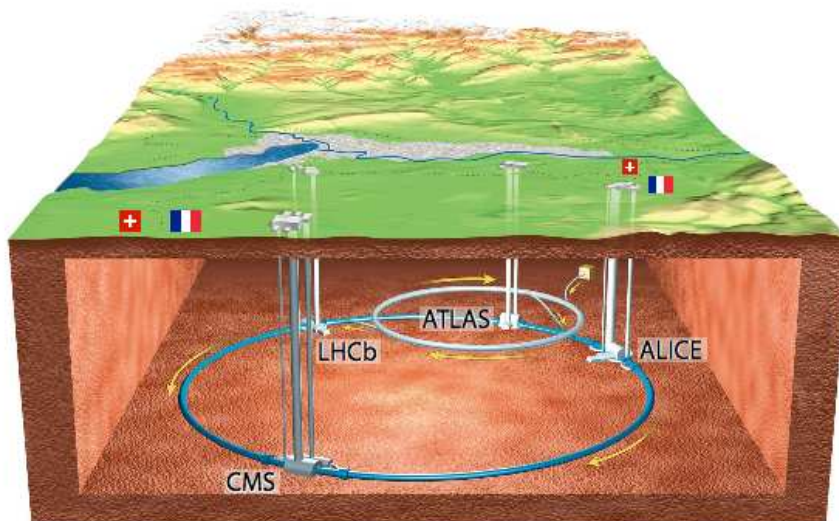


Figura 4.1: Imagem ilustrativa do anel de colisão LHC entre a fronteira da Suíça com a França, com destaque para os quatro pontos de interação.

apresentaremos nesta seção as especificações originais do seu projeto, colidindo feixes de prótons com energia de centro de massa de $\sqrt{s} = 14$ TeV. No próximo parágrafo, discutiremos as especificações deste primeiro ano de tomada de dados. O número de eventos gerados pelas colisões do LHC é dado por:

$$N_{proc} = L\sigma_{proc} \quad (4-2)$$

¹Traduzido do inglês como Grande Colisor de Hádron

²Traduzido do francês como Centro Europeu para Pesquisa Nuclear

onde σ_{proc} é a seção de choque do processo estudado e L é a luminosidade dada por:

$$L = \frac{N_b^2 n_b f_{rev} \gamma_r}{4\pi \epsilon_n \beta^*} F \quad (4-3)$$

onde N_b e n_b são respectivamente o número de partículas por núvem (“bunches”)³ e de núvens por feixe, f_{rev} a frequência de revolução, γ_r o fator relativístico, ϵ_n a emitância normalizada do feixe transverso, β^* a função de amplitude que mede a habilidade dos magnetos em focar o feixe de interação e F o fator de redução da luminosidade geométrica. Com um máximo de luminosidade projetada de $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, a estatística e energia envolvidas no processo são de forma que possibilita a observação de Nova Física na escala de 1 TeV.

Nas condições nominais do LHC, cada feixe de 7 TeV que circula consiste de 2808 nuvens, com uma frequência de cruzamento de 40 Mhz. O feixe é estruturado em núvens de 24.95 ns, com cada núvem contendo aproximadamente 1.1×10^{11} prótons, resultando em uma média de 600 milhões de colisões por segundo. Antes de serem injetados no LHC, os prótons são acelerados por uma série de processos (fig. 4.2):

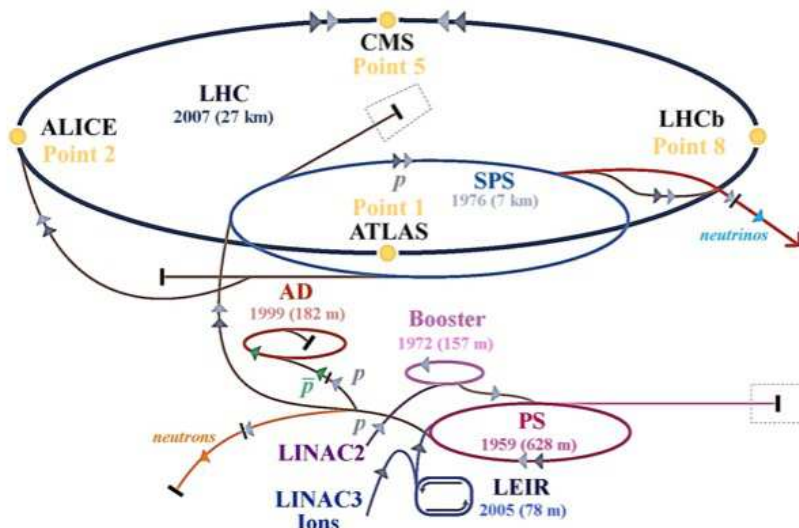


Figura 4.2: Vista esquemática do complexo de aceleradores do CERN.

- Prótons são criados em fontes de Duoplasmatron de íon pelo bombardeamento do gás de hidrogênio por elétrons e então acelerados até 50 MeV por um acelerado linear, LINAC2.

³O anel do acelerador é preenchido por núvens densas de prótons.

- O feixe é injetado no Proton Synchrotron Booster (PSB) que o separa em quatro pacotes. Cada anel de Booster acelera seu feixe até 1.4 GeV.
- Estes prótons são injetados no Proton Synchrotron (PS) em que são acelerados até 25 GeV. Em seguida, uma nova separação é aplicada para criar os 24.95 ns de intervalo de núvens de prótons que são requeridos pelo LHC.
- O Super Proton Synchrotron (SPS) tem suas núvens de prótons acelerados até 450 GeV.
- Por fim, os feixes são injetados no LHC ~ 130 m à esquerda do Point 2 e a ~ 160 m à direita do Point 8 (ver fig. 4.2).

Os feixes de prótons possuem quatro pontos de interação no anel do LHC, em que se localizam quatro detetores que funcionam de maneira simultânea. O Atlas (A Toroidal LHC ApparatuS)[46] e o CMS (Compact Muon Solenoid)[47] são dois detetores de propósitos gerais que buscam tanto a confirmação do Modelo Padrão (e.g. Higgs), como também Nova Física na escala de TeV. Foram projetados principalmente para compreender as janelas de massa esperadas para ser possível a descoberta de novas partículas, tais como o Higgs e as partículas supersimétricas. O LHCb (LHC Beauty)[48] é um experimento de propósito específico de estudar fenômenos físicos de sabores pesados. Ele compreende tanto a busca por Nova Física em processos de “loops” quânticos como medidas precisas de violação de CP no setor de quarks pesados. O ALICE (A Large Ion Collider Experiment)[49] também é um detetor de propósito específico em que estudará a formação do plasma de quark-glúon criado a partir de colisões de íons pesados (Pb-Pb).

O processo final para tomada de dados do LHC começou no final de 2009, com o colisor recebendo feixes do SPS com uma energia de 450 GeV, e em seguida circulando porém sem aceleração antes da colisão. A luminosidade e a energia vêm crescendo, com os feixes atualmente colidindo com energia de centro de massa de $\sqrt{s} = 7$ TeV.

4.3

O Experimento LHCb

O experimento LHCb é atualmente a maior fonte de produção de mésons B do mundo. A colisão próton-próton (p-p) a altas energias produzirá todas as espécies de hádrons b incluindo B_d^0 , B_s^0 , B^+ , B_c^+ e bárions de B. Três tipos de mecanismos são esperados para contribuir para a produção de pares $b\bar{b}$: fusão de glúon-glúon e aniquilação $q\bar{q}$; separação de glúons no estado final ou inicial; e excitação de sabor (Fig. 4.3a). Os três processos envolvem interação

entre os constituintes partônicos de ambos os prótons. Na energia do LHC, é improvável que os pártons espalhados tenham momento similares. Como a massa do par de quark $b\bar{b}$ é pequena comparada à energia do centro de massa do párton, o glúon irradia com alto momento. Como consequência o hádron B produzido no LHC tem as seguintes características:

- Os pares b e \bar{b} são produzidos correlacionados de forma que predominantemente suas trajetórias seguem para o mesmo sentido, ambos para frente ou para trás (Fig. 4.3b).
- os hádrons B produzidos sofrem um boost de Lorentz predominantemente ao longo do eixo do feixe formando um cone.

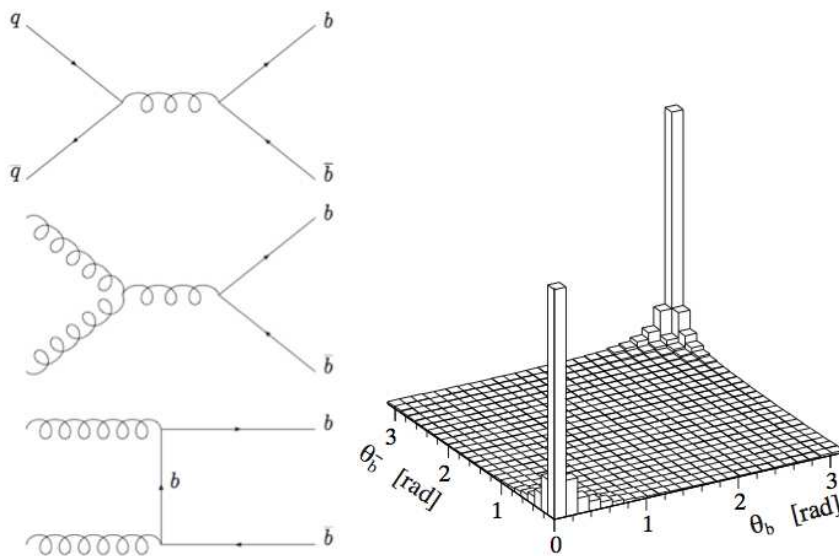


Figura 4.3: Na figura (a) estão dispostos os diagramas de Feynman descritos no texto para a produção do par $b\bar{b}$ no LHCb. De cima para baixo, temos a aniquilação $q\bar{q}$, separação de glúons e fusão de glúons. A figura (b) ilustra a simulação da correlação polar entre o par $b\bar{b}$ produzidos na colisão p-p no LHCb.

Estas duas características influenciam no desenho do experimento LHCb: foi projetado como um espectrômetro de apenas um braço. Esta geometria fornece uma aceitação angular frontal que compreende um limite angular de 10 mrad até 300(250) mrad no plano de superior (no plano lateral), ou equivalente ao limite de pseudorapidez⁴ de $1.9 < \eta < 4.9$. O objetivo do LHCb é reconstruir os produtos dos decaimentos de mésons B que estejam dentro da aceitação. Para tanto, o experimento utiliza coerentemente as informações de seus diversos subdetetores. Na figura 4.4 está indicado como estes subdetetores estão arranjados para formarem o espectrômetro LHCb. O

⁴Pseudorapidez é definida como $\eta = -\ln(\tan \theta/2)$, em que θ é o ângulo em relação ao eixo do feixe.

o sistema de coordenada do LHCb é definido de forma que o eixo z é paralelo ao eixo do feixe, na direção das estações de múon e o eixo y aponta para cima. Neste sistema, o principal campo magnético é ao longo do eixo y .

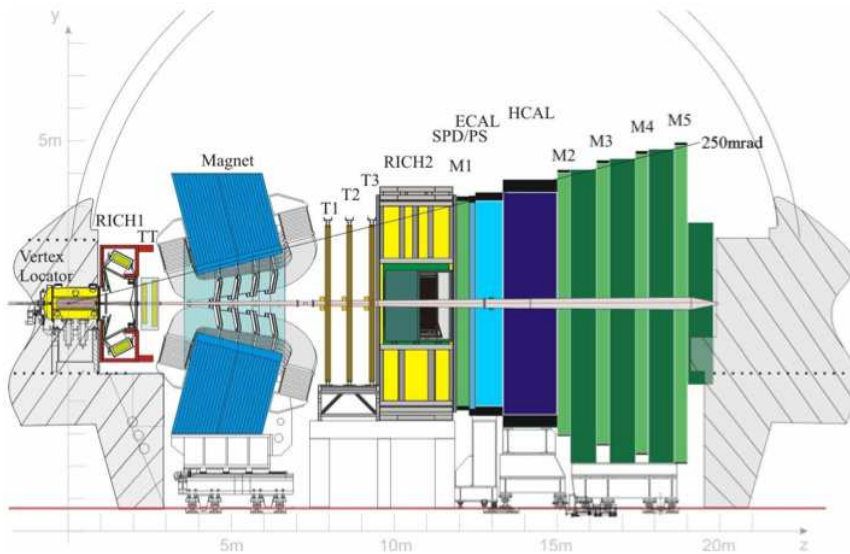


Figura 4.4: Visão lateral do espectrômetro do LHCb. O sistema de coordenada do LHCb é destro com o sentido da colisão sendo para z positivo.

O experimento LHCb foi projetado para operar em uma luminosidade nominal de $\mathcal{L} = 2 \times 10^{32} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, que é inferior aos outros detectores. A questão é que um cruzamento de núvens com a luminosidade do LHC envolveria tipicamente mais do que uma interação inelástica próton-próton. O número de colisões p-p por cruzamento é descrito pela distribuição de Poisson:

$$\mu = \frac{\mathcal{L} \times \sigma_{p-p}}{f} \quad (4-4)$$

em que σ_{p-p} é a seção de choque p-p usada no LHCb (80mb) com um total de 37 p-p colisões. Se uma maior quantidade de pares $b\bar{b}$ fosse produzida, haveria uma alta ocupação do detetor, o que prejudicaria significativamente a performance de reconstrução dos traços. Com uma baixa qualidade de reconstrução, a própria performance do LHCb é afetada no que diz respeito a medidas de precisão. Na figura 4.5 temos a probabilidade de interação p-p em função da luminosidade. Notamos que a probabilidade de ter uma colisão pp é maximizada com $\mathcal{L} = 4 \times 10^{32} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. No entanto, outros fatores como o dano devido a radiação nos eletrônicos e a própria ocupação do detetor, fez com que a luminosidade escolhida no LHCb fosse $2 \times 10^{32} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. Para atingir esta luminosidade, o feixe é desfocalizado (modifica-se o parâmetro β na eq. 4-3) ao chegar próximo do ponto de interação no LHCb.

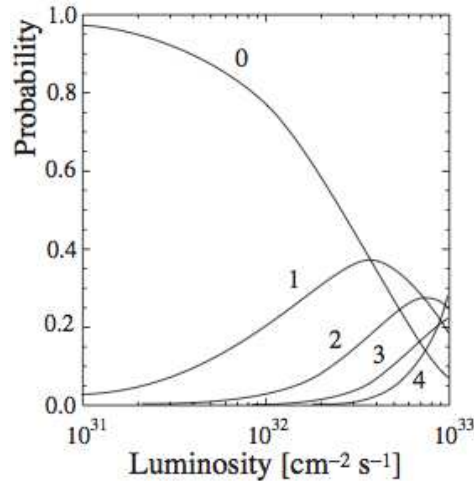


Figura 4.5: Probabilidade de colisão p-p em função da luminosidade considerando a seção de choque igual a 80mb.

Para que o LHCb possa explorar toda a física para qual foi projetado, o detetor deve ser capaz de fornecer algumas informações como também ter o seguinte desempenho:

Distância de vôo : Diversas análises de CP dependem da medida de tempo próprio, como a oscilação e a medida de assimetria de CP de B_s^0 . Portanto, é fundamental uma medida precisa do ponto em que o B é criado (vértice primário) e onde ele decai (vértice secundário). Conhecendo-se o momento da partícula, têm-se então a informação do seu tempo próprio.

Identificação de Partículas : Diversos decaimentos de B possuem similares topologias, o que resulta na competição do nosso sinal de interesse com outros canais. Desta forma, uma discriminação das partículas que compõem o estado final, como K , π e p , se torna fundamental.

Massa Invariante : Uma boa resolução de massa é importante para distinguir os mésons B de seu background. Consequentemente é importante uma precisa medida de momento de suas filhas.

Trigger : A frequência visível no LHCb é de ~ 10 MHz e dessas interações apenas 15KHz são eventos de $b\bar{b}$. Dessa maneira, um sistema que possa separar eventos de interesse físico desta elevada taxa de colisões de forma rápida e precisa é fundamental.

Podemos separar o espectrômetro do LHCb em três grandes sistemas: sistema de trajetórias, identificação de partículas e trigger.

4.4 Sistema de Trajetórias

4.4.1 VERTeX LOcator (VELO)

O VELO [50] é um dos detetores mais importantes do LHCb e tem o papel de fornecer uma medida precisa da coordenada da posição na região de interação, que é utilizada para determinar o deslocamento feito até o vértice secundário (característica distinta dos decaimentos dos hádrons b e c).

O VELO é um detetor de micro tiras de silício (o que permite uma medida precisa da posição), constituído de dois lados idênticos com uma série de módulos de silício arranjados na direção do feixe. Cada lado é equipado com 21 módulos com sensores de R e ϕ . Os módulos possuem três funções básicas: manter os sensores em uma posição fixa; conectar as saídas elétricas com os sensores; ser responsável pelo controle térmico dos sensores no vácuo. Cada módulo do VELO foi projetado para fornecer as informações tridimensionais necessárias para reconstruir os traços e os vértices. O sensor ϕ fornece informações da coordenada azimutal na direção do feixe, enquanto o sensor R nos fornece na direção radial. A terceira coordenada ao longo do eixo z é fornecida pelo conhecimento da posição do plano de cada sensor em relação ao experimento. Há 16 chips (Beetles) que são responsáveis pela saída de dados de um sensor. Cada Beetle lê as informações de 4 links com 32 canais, resultando 64 links por sensor (2048 canais). Além disso, cada metade tem 2 módulos de Pile-Up com apenas um sensor em R . O sistema de Pile-Up é usado para rejeitar múltiplas interações no nível de trigger, o que será discutido com mais detalhes posteriormente.



Figura 4.6: A imagem à esquerda representa a disposição dos módulos do VELO no LHCb. A direita estão os sensores R e ϕ , e sua composição no módulo.

A resolução do VELO é de cerca de $40\mu\text{m}$ na direção z e $10\mu\text{m}$ na direção ϕ para vértices primários e de $150\mu\text{m}$ e $300\mu\text{m}$ para os vértices secundários.

4.4.2 Sistema de Traços

Além do VELO, o sistema de traços inclui quatro estações chamadas de TT, T1-T3. Para que toda a aceitação do detetor seja compreendida, as três últimas são separadas em duas regiões: interna (IT) e externa (OT).

Tracker Turicensis (TT)

O TT [51] segue a mesma filosofia do VELO em utilizar as micro tiras de silício, localizadas antes do magneto (seção 4.4.3). Esta estação tem como principal objetivo fornecer informações dos traços das partículas de baixo momento. É composta por quatro camadas de silício dispostas no formato “x-u-v-x” (Fig. 4.7). A camada x está alinhada verticalmente, enquanto u e v

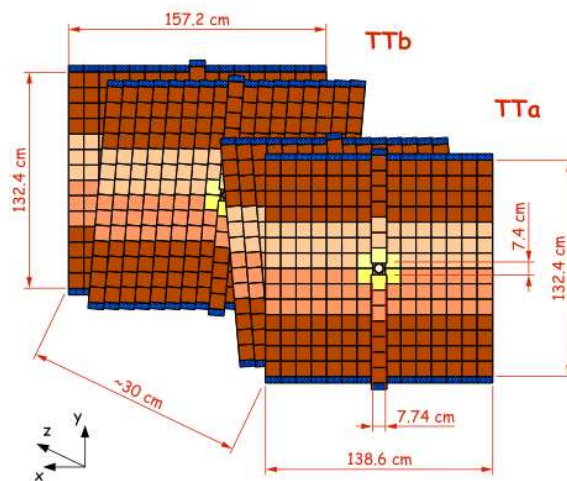


Figura 4.7: As quatro camadas de TT estão representado na figura. As duas camadas internas estão rotacionadas de $\pm 5^\circ$ como descrito no texto.

estão rotacionadas respectivamente em -5° e 5° . Esta disposição permite que a trajetória da componente transversal do momento seja compreendida. O TT foi projetado para ter uma resolução de um único hit de $50\mu\text{m}$, ou seja, cada tira de silício tem uma resolução de $200\mu\text{m}$.

Inner Tracker (IT)

As estações de IT [52] consistem de quatro caixas alinhadas no formato de cruz. As caixas superiores e inferiores são formadas de uma única linha com sete sensores, enquanto as caixas laterais possuem duas. Para evitar espaçamento, as caixas superiores e inferiores estão escalonados 4mm no eixo z , em relação às

caixas laterais, e 3mm no eixo x. Seguindo o mesmo princípio das estações TT, cada caixa contém quatro camadas de silício com “x-u-v-x” e aproximadamente $200\mu\text{m}$ de resolução.

Outer Tracker (OT)

As estações OT[53] são um detetor tipo câmara de tempo de deriva, sendo responsáveis também por auxiliar na determinação da trajetória das partículas carregadas, e da associação com o magneto, determinar o seu momento. As estações OT ocupam uma área total de 81m^2 , região em que o fluxo de partículas, e conseqüentemente a ocupação do detetor, é muito inferior. Consistem de quatro camadas contendo 4608 câmaras de arrasto em formato cilíndrico. Da mesma forma que o IT, as camadas são alinhadas no formato “x-v-u-x”. Para atingir a performance requerida na identificação de traços, o tempo de resposta deve ser inferior a 50ns. Duas características fornecem este atributo: o diâmetro de cada tubo é de 4.9mm e o gás utilizado é uma mistura de Argônio (70%) e CO_2 (30%).

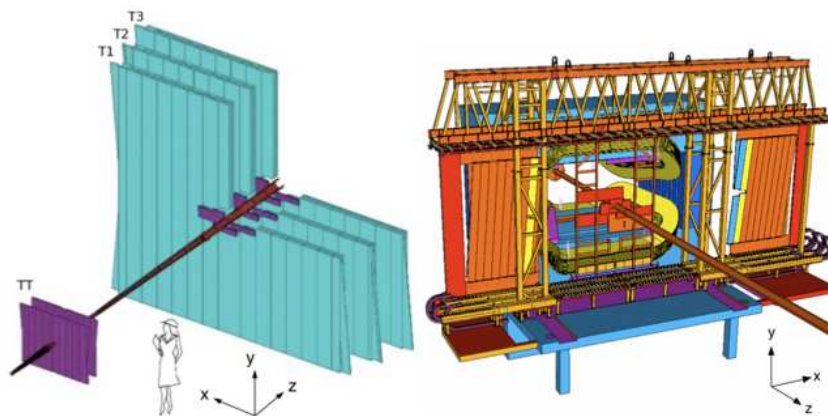


Figura 4.8: Esquema do sistema de traços do LHCb. À direita uma visão de trás do detetor IT e OT com um suporte que permite movimentação em relação ao feixe.

4.4.3 Magneto

O magneto do LHCb [54] está localizado logo após a primeira estação de traços TT. Como principais funções, as informações do magneto auxiliam na reconstrução dos traços e na identificação da sua carga. A medida do momento em associação com o RICH (seção 4.5) auxilia na identificação das partículas. Para atingir uma resolução de momento melhor que $\delta p/p \approx 0.5\%$, o magneto fornece um campo magnético integrado de 4 Tm.

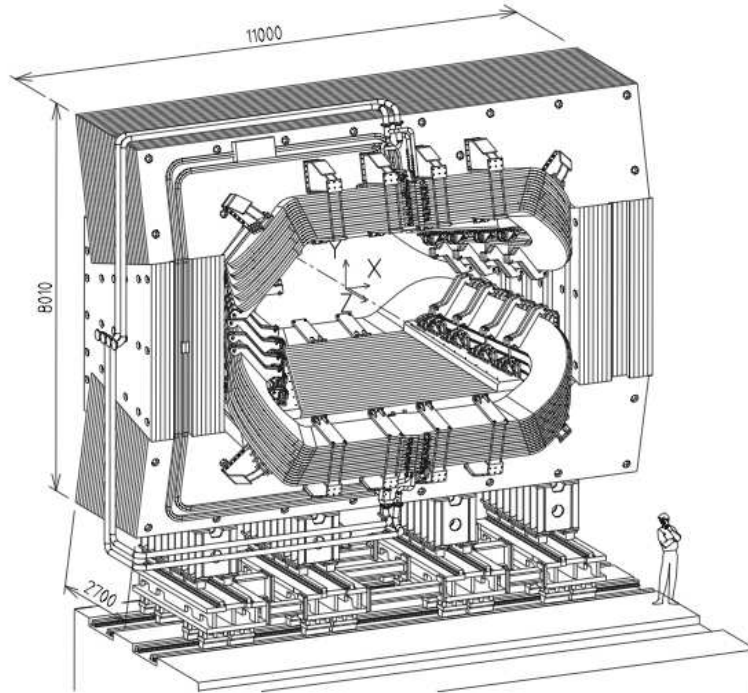


Figura 4.9: Visão esquemática do Magneto do LHCb.

4.4.4 Reconstrução de traços

A reconstrução é feita por um software que combina todas as informações dos detetores de traços para reconstruir a trajetória. O primeiro passo é encontrar uma semente (“seed”) no VELO [55]. Três módulos vizinhos são utilizados para criar um tripleto de vetores tridimensionais, definidos como a distância de um aglomerado (“cluster”) no módulo z de uma linha conectando dois pares R e ϕ nos módulos 1 e 3. Em seguida, o aglomerado é enviado para ser feito o ajuste usando Kalman Filter [56] que tem como resultado a linha em três dimensões. Este processo ocorre de forma recursiva, de forma que o algoritmo progressivamente atualiza as informações do ajuste para atualizar a seed. Além disso, a qualidade dos traços reconstruídos são monitorados pelo χ^2 do ajuste.

São definidas cinco classes de traços reconstruídos no LHCb [57], como ilustrado na figura 4.10. Os traços do VELO são objetos que deixam hits apenas no VELO e saem em seguida da aceitação do detetor. Os traços *Upstream* são aqueles que deixam traços também nas estações TT. Os traços do tipo *Downstream* são aqueles que deixam hits apenas nas estações TT e T1-T3 e em geral decaíam fora do VELO. Os traços longos deixam hits em todos os detetores e por isso têm uma boa resolução de momento. Por último, os eventos de traços T são produtos de interações secundárias.

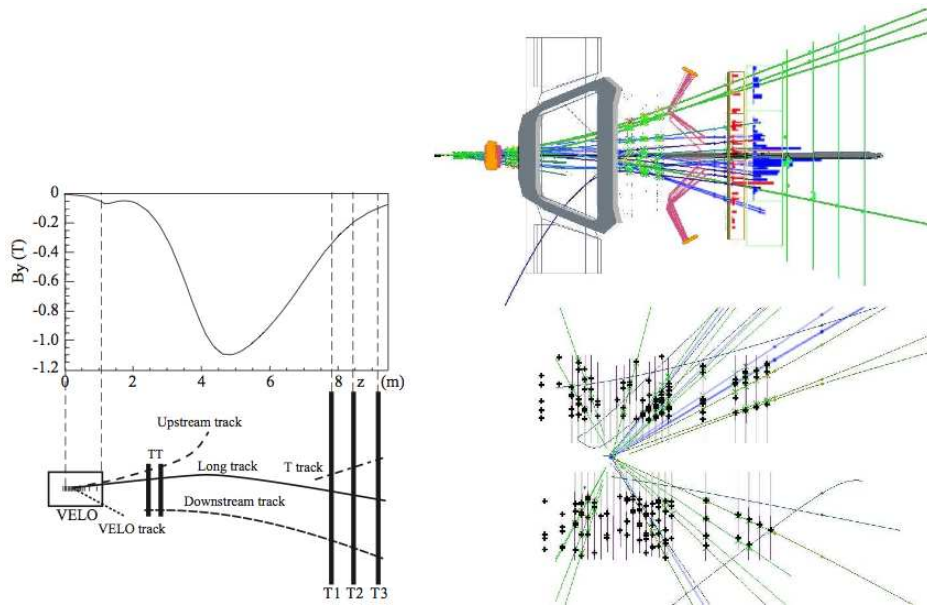


Figura 4.10: Esquema dos vários traços do LHCb, além da informação do campo magnético em função de z . Na direita estão exemplos de um evento reconstruído lateralmente e de frente.

4.5 Sistema de Identificação de Partículas

Como já foi discutido na seção 4.1, as diversas partículas proporcionam assinaturas diferentes nos detetores. Para a física de B, uma boa identificação de partículas é fundamental. O LHCb possui três subdetetores dedicados a identificação de partículas para um limite de momento de 2 – 100 GeV. As duas estações de RICH [58] em associação ao sistema de traços, têm como objetivo identificar as partículas carregadas. Os calorímetros [59] por sua vez medem a energia depositada das partículas e identificam partículas neutras. Por fim, as estações de múons [60] identificam os múons e fornecem informações extras de suas trajetórias.

4.5.1 RICH

O RICH tem como objetivo identificar as partículas em associação com o sistema de trajetórias. Para tanto é utilizada a radiação de Cherenkov como já foi introduzido na seção 4.1. Partículas carregadas ao incidirem em um meio com uma velocidade maior do que a velocidade da luz neste meio, emitem radiação. Uma característica marcante deste fenômeno é que os fótons emitidos formam um cone com um determinado ângulo θ_c em relação a trajetória, de

acordo à seguinte relação:

$$\cos \theta_c = \frac{1}{vn} \quad (4-5)$$

onde θ_c é o ângulo de Cherenkov, v a velocidade da partícula e n o índice de refração do meio. Combinando a medida da velocidade com o momento dado pelo sistema de traços, podemos identificar a partícula.

Como característica da colisão, partículas de alto momento originam-se de ângulos menores, enquanto as de baixo momento de maiores. Desta forma, o experimento foi projetado com duas estações: o RICH 1 (2–60 GeV) localizado entre o VELO e o TT, e o RICH 2 (15 – 100 GeV) entre o T3 e a estação de múon (Fig 4.11). A concepção de ambos os detetores é a mesma, diferindo o

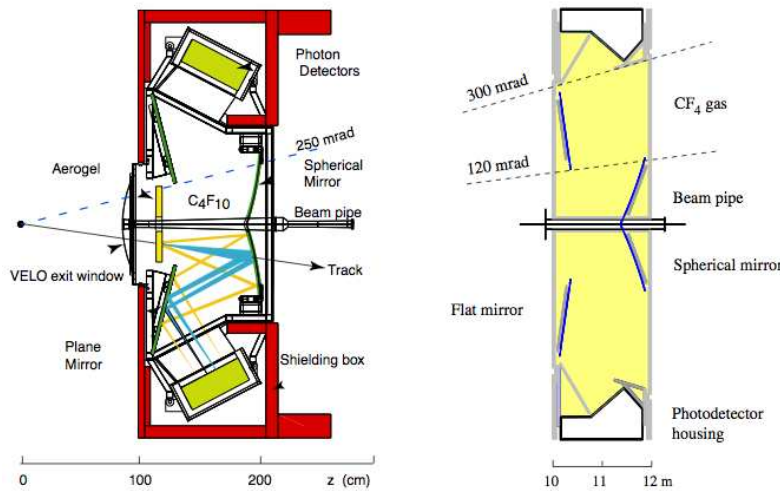


Figura 4.11: Representação lateral do detetor RICH 1(esquerda) e RICH 2 (direita).

gás radiador utilizado. O RICH 1 contém um material feito de aerogel (SiO_2) com $n = 1.03$ e também C_4F_{10} com $n = 1.0014$. O RICH 2 por sua vez possui apenas um gás CF_4 com $n = 1.0005$. A relação entre o gás utilizado e o ângulo produzido pode ser observado na figura 4.12. A luz de Cherenkov por meio de espelhos esféricos (RICH 1) ou planos (RICH 2), é defletida da aceitação do detetor e focalizada nos detetores de fótons híbridos (HPD). Basicamente o fóton incide na superfície do HPD, que libera foto-elétrons do catodo, que por sua vez são acelerados até 20 KeV (seu sinal é amplificado). O processo completo de identificação de partículas ocorre pela combinação dos hits deixados no HPD, a reconstrução dos traços e o padrão de comportamento esperado para cada partícula.

4.5.2

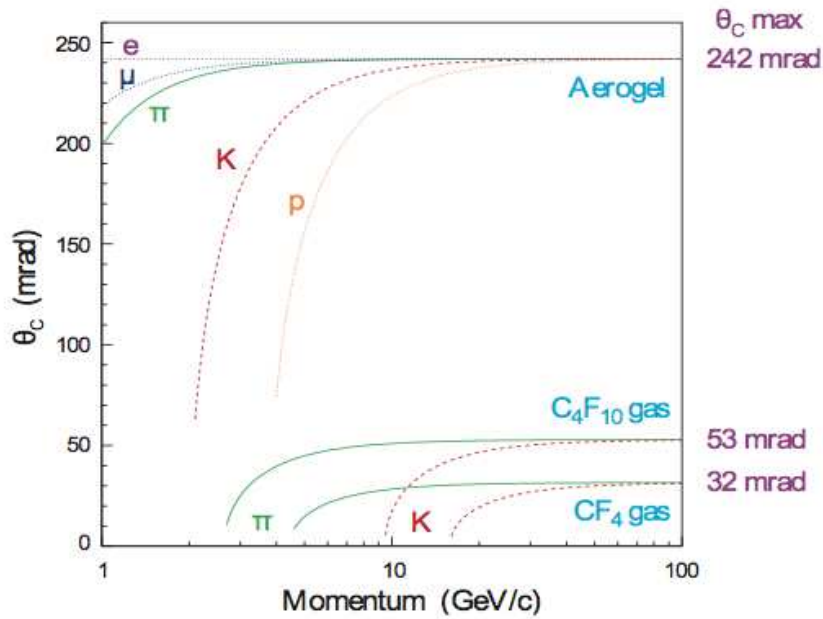


Figura 4.12: Distribuição do ângulo de Cherenkov em função do momento para os radiadores do RICH 1 e 2. Note que temos uma boa separação π/K para baixo momento com o Aerogel e C_4F_{10} e para alto momento com CF_4 , o que justifica a escolha dos radiadores para respectivamente o RICH 1 e RICH 2.

Calorímetros

O sistema de calorímetros do LHCb tem um papel fundamental na determinação da medida da energia e posição de elétrons, fótons e hádrons. Esta informação é de vital importância nas decisões de trigger que discutiremos na próxima seção. Ele consiste de duas estações SPD/PS que auxiliam na identificação das partículas e um calorímetro eletromagnético (ECAL) e hadrônico (HCAL).

A característica básica de um calorímetro está bem enunciada na seção 4.1, que é medir toda a energia depositada no meio. Como visto, a energia perdida é inversamente proporcional ao comprimento de onda da radiação, X_0 (equação 4-1). A partícula, após percorrer um comprimento típico X_0 , irá produzir partículas com menor energia por meio dos diversos processos discutidos anteriormente. Este efeito é conhecido como chuva, visto que cada partícula produzida pode gerar inúmeras outras, dependendo apenas de sua energia incidente. O calorímetro é projetado de forma que seu comprimento possa incluir todo o alcance de penetração das partículas incidentes. Estas partículas produzidas induzem a geração de luz ao passarem pelos cintiladores e os fótons emitidos são em seguida coletados por tubos fotomultiplicadores.

O Silicon Pad Detector (SPD) e o PreShower (PS)

Os dois sistemas têm como principal propósito a verificação especificamente da carga e da natureza eletromagnética. Ambos os sistemas consistem de duas placas cintiladores separadas por uma folha de chumbo de 15mm ($\approx 2.5X_0$). Em termos de estrutura, o PS é formado pelo sanduíche entre a placa do SPD e uma outra folha adicionada antes de chegar ao ECAL.

O SPD tem como principal objetivo ser capaz de auxiliar a discriminação dos chuveiros resultantes de elétrons e fótons. Além disso, para informações coincidentes do ECAL, o SPD pode auxiliar na rejeição do background de $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ e γ da seleção do candidato a elétron. No caso do PS, juntando a informação proveniente do ECAL, pode-se rejeitar background do tipo π^\pm dos candidatos a elétron.

ECAL

O ECAL é responsável por medir a energia de partículas eletromagnéticas e reconstruir os π^0 s. O calorímetro eletromagnético foi dividido em camadas que seguem a ordem: uma folha de chumbo de 2 mm, um cintilador de 4 mm e uma camada branca que evita reflexões para o cintilador. Todo o módulo possui 42 cm e 66 camadas que contêm todos os chuveiros de fótons de altas energias. A resolução típica de energia é uma função da energia da partícula e vale $10\%/\sqrt{E} \otimes 1\%$.

HCAL

O Calorímetro hadrônico tem como objetivo medir a energia dos hádrons. Foi projetado como um calorímetro padrão, que alterna placas de ferro de 16 mm e cintiladores de 4 mm. Em contraste com o ECAL, os cintiladores do HCAL estão em paralelo ao feixe de partículas. As medidas de energia do calorímetro são da ordem de $80\%/\sqrt{E} \otimes 10\%$.

4.5.3

Sistema de Múons

O último detetor do LHCb é o sistema de múons, que como sugere o nome, é responsável pela identificação e por fornecer informações para o trigger de múons. Ele consiste de cinco estações (M1-M5), sendo a M1 posicionada antes dos calorímetros para aumentar a precisão na medida do momentum e os M2-M5 no final do experimento. Para evitar qualquer background de hádrons, são colocados entre as estações (Entre M2-M5 e atrás do M5) uma placa de

ferro. Como existem diferentes granularidades, o plano de cada M é dividido em quatro regiões (R1 a R4 - Fig. 4.13).

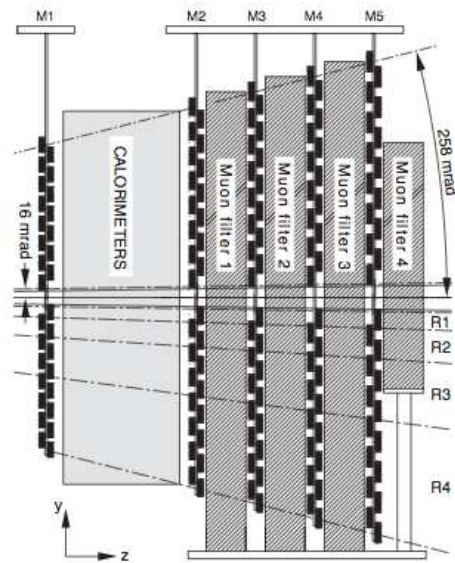


Figura 4.13: Representação lateral do sistema de detecção do múon, com as separações de M1-M5 e R1-R4.

Além disso, duas tecnologias são utilizadas no detector: Multi Wire Proportional Chamber (MWPC) em todos, e na região R1 do M1 se utiliza o Gas Electron Multiplier (GEM). O MWPC é formado por uma mistura de gases Ar, CO₂ e CF₄ que quando um múon passa irá produzir um chuveiro de elétrons. Estes elétrons são acelerados por uma diferença de potencial de 3V produzindo um sinal elétrico. Os GEM, por sua vez, possuem três camadas finas de metal com uma alta densidade de buracos e com campo elétrico induzido de ≈ 100 KV/cm entre o catodo e o anodo. Dessa forma os elétrons ionizados são multiplicados e recolhidos pelos buracos.

4.5.4

Métodos de identificação de partículas

As informações combinadas dos detectores de RICH, calorímetros e do sistema de múons são utilizadas para identificar os e^- , μ , π , káons e prótons. Além disso, o ECAL, SPD e PS são usados para identificar partículas neutras como γ e π^0 s. Os elétrons são identificados por uma combinação de informações: momento do traço e energia das núvens carregadas geradas no ECAL e a correspondência entre a posição da núvem com a extrapolação do ponto de impacto do traço. Com a energia depositada no PS e da extrapolação na trajetória no HCAL, pode-se aprimorar esta medida de identificação. Os fótons são reconstruídos e identificados no ECAL sem necessidade de associação ao

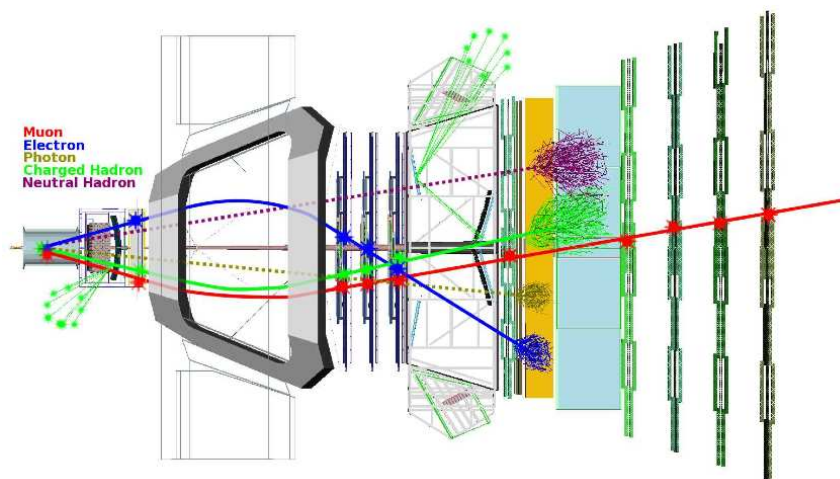


Figura 4.14: Representação do comportamento das diversas partículas ao passarem pelo detector.

traço. Pelos hits deixados no SPD com as cascatas do ECAL, pode-se melhorar esta identificação. Os múons são identificados pela extrapolação dos traços das estações de múons.

4.6 Trigger

Como já foi discutido na seção 4.1, a taxa de colisões no LHC é muito elevada, o que torna impossível o armazenamento da informação de todos os eventos. No desenho original do experimento, cada cruzamento de feixe do LHC corresponde a cerca de 40 MHz, o que significa uma frequência média visível de 10 MHz no LHCb. Na luminosidade nominal do LHCb é esperada uma taxa média de produção de 1 MHz de pares $b\bar{b}$. Destes eventos, apenas 15% possuem pelo menos um b hádron dentro da aceitação. Dessa forma, o sistema de trigger [61] deve combinar dois atributos: reduzir a taxa de eventos para um valor mais adequado (da ordem de 2 KHz) e ser eficiente em selecionar apenas eventos de interesse. Para atingir esta taxa, uma combinação de processos, tanto de nível de hardware como de software, é utilizada.

4.6.1 Level 0 (L0)

A primeira etapa do trigger se chama Level 0 (L0) e atua a nível de hardware, operando em sincronia com o relógio do LHC. O L0 foi projetado para aceitar eventos a uma taxa de 1MHz e deve tomar a decisão $4\mu\text{s}$ após o cruzamento de feixes. Dessa forma, algumas características inerentes a estes tipos de processos são coletadas dos subdetetores e com base nelas a decisão

é tomada (L0 Decision Unit (DU)). A idéia básica é aproveitar o fato que as filhas produzidas do decaimento do B tendem a possuir um alto momento e energia transversa (chuveiros calorímetros). Na figura 4.15 estão mostrados os componentes nos quais o L0 se baseia.

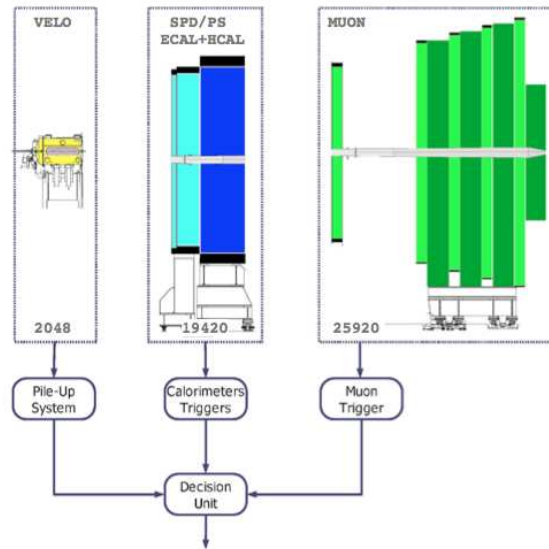


Figura 4.15: Representação dos componentes do L0, com a indicação do número de canais.

4.6.2 High Level Trigger (HLT)

Após os eventos serem aceitos pelo L0, os dados são enviados ao Event Filter Farm para serem analisados pelo trigger de alto nível (HLT). O HLT tem acesso a toda esta informação disponível do evento, porém, devido à limitação computacional e de tempo, o objetivo do HLT é rejeitar a maior parte dos eventos usando apenas parte de toda informação disponível. O HLT é composto de duas etapas: HLT1 e HLT2. No primeiro estágio, o objetivo é chegar a uma taxa de 10kHz o que permite que o HLT2 possa fazer uma reconstrução completa dos traços em cada evento. Para tanto, o HLT1 aplica cortes simples seguindo a mesma concepção do L0. No caso do HLT2, o objetivo é a redução do número de eventos para alguns kHz. Neste estágio, cortes de vértices já são aplicados uma vez que o evento já foi reconstruído.

Como foi indicado na seção 4.2, o experimento neste primeiro ano de tomada de dados, não rodou com as especificações do seu projeto. Dessa forma, no próximo capítulo iremos descrever as condições de tomada de dados de 2010, de forma que a própria concepção do Trigger foi constantemente re-otimizada para se adequar às características do feixe.