

4

O Experimento LHCb

Para estudar as interações fundamentais das partículas, criar partículas mais massivas bem como os estados de antimatéria, é preciso recriar algumas condições energéticas que existiam logo após o Big Bang. Isto pode ser feito usando aceleradores gigantes de partículas, como o do CERN¹.

O LHC² [36] é a mais poderosa ferramenta da física de partículas no mundo, foi originalmente projetado para colidir feixes de prótons com uma energia de centro de massa de 14 TeV e luminosidade de $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, com o escopo principal de revelar física além do modelo padrão em colisões de altas energias. Nas condições de tomada de dados de 2010-2011 (ver tabela 4.1), a energia de centro de massa é de 7.0 TeV (3.5 TeV por feixe de prótons). A análise destas colisões poderá responder a perguntas fundamentais sobre o nosso universo, tais como: qual é a origem da massa? porque que existe uma assimetria na natureza que resultou em mais matéria do que anti-matéria? A tabela 4.1 apresenta algumas das condições do feixe durante o ano 2010.

Parâmetro	LHC Esperado	Condições Julho 2010
Energia de colisão (TeV)	7	3.5
Luminosidade, $\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	1.0×10^{34}	1.65×10^{30}
Campo do dipolo a energia máxima, T	8.88	4.17
Número de nuvens por feixe	2808	12
Partículas/ núvem	1.15×10^{11}	0.9×10^{11}
Função beta nas IPs β^*	0.55 m	3.5 m
Tamanho típico do feixe no anel, μm	200-300	300-500
Tamanho do feixe no IP	17	59

Tabela 4.1: Resumo com as condições de rodada do LHC para 2010.

O LHC é um colisor de hádrons de dois anéis supercondutores que está instalado no antigo túnel subterrâneo de 27 Km do LEP na fronteira entre a Suíça e a França (100 m abaixo da superfície). Uma representação gráfica

¹Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire: Conselho Europeu de Pesquisas Nucleares

²Large Hadron Collider: Grande Colisor de hádrons

deste conjunto de experimentos pode ser observado na figura 4.1. Os prótons são primeiramente acelerados por um acelerador linear (LINAC) até 50 MeV e injetados nos dois anéis Proton Synchrotron Booster (PBS). Logo o Proton Synchrotron (PS) é alimentado com partículas de 1 GeV, acelerando-as até 26 GeV antes da sua injeção no Super Proton Synchrotron (SPS), onde atingirão uma energia de 450 GeV antes de ingressarem nos dois túneis TI 2 e TI 8 que os conduzem até o LHC.

O número de eventos gerados em colisões do LHC é determinado pela expressão

$$N_{eventos} = L\sigma_{pp} \quad (4.1)$$

onde $\sigma_{eventos}$ é a seção de choque para o evento sob estudo e L corresponde à luminosidade da máquina, que depende somente de parâmetros do feixe e pode ser escrita -para um feixe de distribuição gaussiana- como sendo:

$$L = \frac{N_b^2 n_b f_{rev} \gamma_r}{4\pi \epsilon_n \beta^*} F \quad (4.2)$$

levando em conta as definições para as variáveis envolvidas:

N_b Número de prótons por nuvem (pacote de prótons).

n_b Número de nuvens por feixe.

f_{rev} Frequência de revolução.

γ_r Fator gama relativístico.

ϵ_n Emitância normalizada do feixe transversal.

β^* Função óptica β no ponto de colisão, que é modulada para alcançar uma dada luminosidade, dependendo da física a ser estudada.

F Fator de redução de luminosidade geométrica devido ao ângulo de cruzamento no ponto de interação (IP).

$$F = 1 / \sqrt{1 + \left(\frac{\theta_c \sigma_z}{2\sigma^*} \right)^2}$$

θ_c É o ângulo de cruzamento completo no IP.

σ_z Tamanho do feixe, igual á raiz quadrada da média do valor da distribuição longitudinal das partículas.

σ^* A duração do feixe, definida como $\sigma^* = \sigma_z/v$, e v é a velocidade das partículas no anel de armazenamento.

Uma vez que os prótons atingem a energia necessária, os feixes são levados a colidir em pontos específicos onde estão localizados os detetores que realizarão as respectivas tomadas de dados fornecidos pelas colisões; os quatro experimentos principais serão apresentados a seguir.

4.1

Os Experimentos do LHC

Cada um dos quatro pontos de colisão do LHC aloca um detetor que captura e analisa os resultados da colisão dos prótons. Os quatro experimentos principais são:

ALICE *A Large Ion Collider Experiment* [37]

É um detetor de íons pesados que é dedicado ao estudo das interações fortes (QCD) em densidades de energia extrema, onde é esperada a formação de uma nova fase de matéria, o plasma de quarks e glúons.

ATLAS *A Toroidal LHC Apparatus* [38]

É um detetor de propósito geral destinado a cobrir a mais ampla gama possível de física no LHC, desde a busca do Bóson de Higgs até supersimetria (SUSY) e dimensões extras.

CMS *Compact Muon Solenoid* [39]

É um detetor de propósito geral com os mesmos objetivos do ATLAS mas com técnicas e concepção diferentes.

LHCb *Large Hadron Collider beauty* [40]

É um experimento configurado para estudar o que aconteceu após o Big Bang que permitiu que existisse uma leve assimetria entre matéria e anti-matéria, que está relacionada com a violação de carga-paridade.

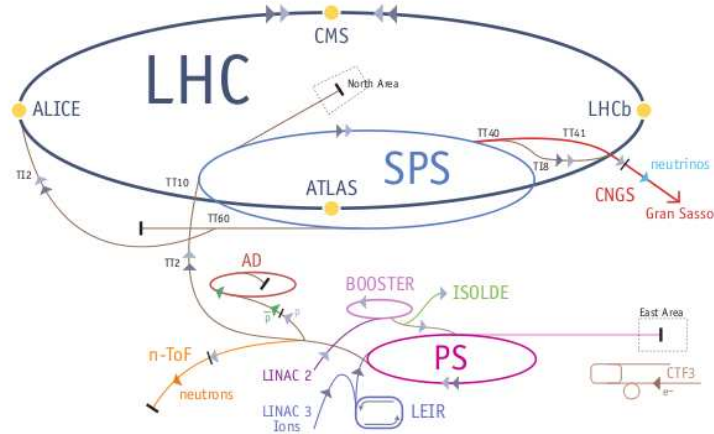


Figura 4.1: Localização dos experimentos na circunferência de 27 km do LHC.

4.2

O Detetor LHCb

O LHCb é um experimento dedicado a fazer medições de precisão de sabores pesados no LHC. Seu objetivo principal é procurar por evidência indireta de nova física em violação de CP bem como medidas de decaimentos raros de hádrons contendo quarks b ou c .

É um detetor de braço único que coleta somente eventos frontais, geometria que foi escolhida levando em consideração que a colisão próton-próton (p-p) produzirá pares quark-antiquark $b\bar{b}$ principalmente na direção do eixo de colisão, com um *boost* de Lorentz que em conseqüência forma um cone, e cobre os limites angulares de 15 mrad até 300 mrad no plano horizontal, e de 10 até 250 mrad no plano vertical, como ilustra a figura 4.2. Para fins de metodologia de análise, as componentes principais do experimento LHCb podem ser agrupadas como: sistema de seleção de eventos ou trigger, sistema de reconstrução de trajetórias e identificação de partículas.

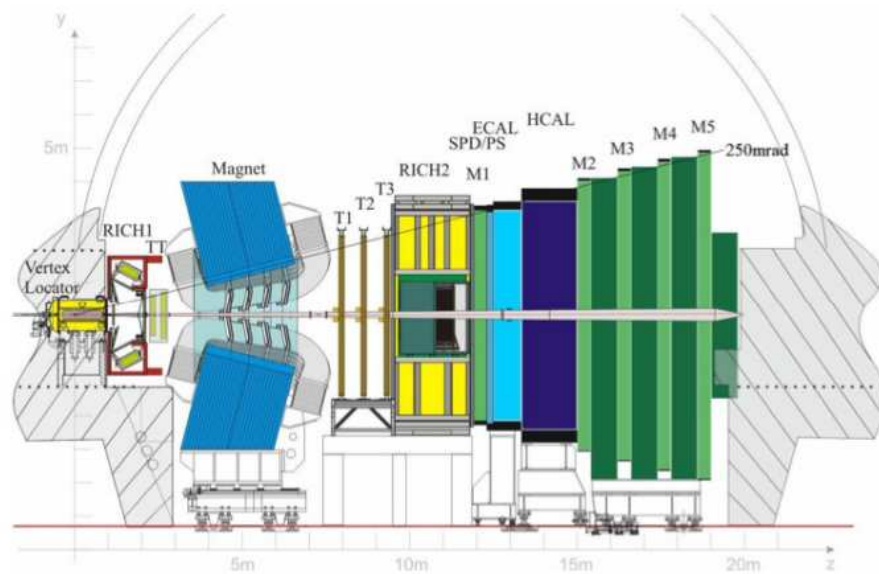


Figura 4.2: Vista lateral do LHCb. Foi adotado o lado positivo do eixo z desde a posição do vértice de interação até o detector de múon. O eixo y representa a coordenada vertical e o eixo x é perpendicular aos dois.

4.3 Reconstrução de Trajetórias

Os feixes produzidos pelo LHC passam através do detector do LHCb dentro de um tubo que consiste de quatro seções cônicas que tem de 2 até 6 metros de comprimento e ligado a uma câmara de vácuo onde está localizado o VELO, que será explicado mais a frente. Os primeiros três segmentos do tubo localizados após a câmara de vácuo são compostos de berílio e medem 1,9 m, 3,7 m e 6,0 m respectivamente. Foi escolhido o berílio devido à sua transparência e elasticidade pois, como o LHCb procura eventos em direções próximas à direção do feixe, as propriedades do tubo influenciam diretamente a tomada de dados, e as características da quantidade de material atravessado pelas partículas têm impacto direto nas informações coletadas.

4.3.1 O Magneto

Um dipolo magnético [41] é usado no experimento para as medidas da carga e do momento linear das partículas carregadas. Como as trajetórias destas partículas são defletidas pelo campo magnético quando atravessam o magneto, então os seus momentos lineares são medidos pela deflexão devida à componente dominante do campo magnético B_y e portanto as trajetórias são

observadas no plano xz :

$$\int B_y \times dz = 4.2 \text{ Tm} \quad (4.3)$$

Com o intuito de atingir a resolução de momento requerida para partículas carregadas, a integral de campo magnético tem de ser medida com uma precisão relativa de $\sim 10^{-4}$, e a posição do pico do campo B com precisão de poucos milímetros. A medida das três componentes magnéticas é fornecida pelo mapeamento do campo dentro do volume de traços do detetor para ambas as polaridades do magneto, visando a controlar os efeitos sistemáticos do detetor. A figura 4.3 apresenta uma visão esquemática do magneto do LHCb.

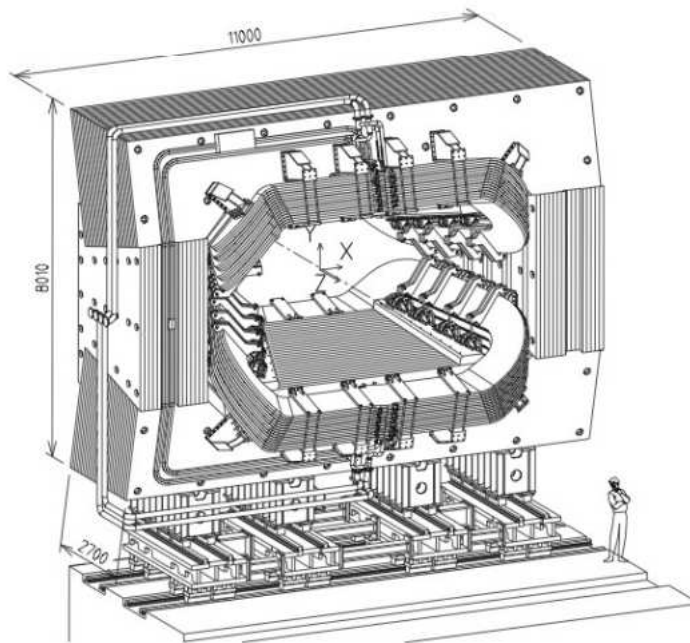


Figura 4.3: Visão esquemática do magneto do LHCb

4.3.2

Sistema de Traços

O sistema de traços do LHCb consiste do VELO e quatro estações planares de traços TT e T1-T3 como explicado a seguir. Foi projetado para reconstruir os traços de partículas carregadas com a informação do momento associado bem como os seus correspondentes vértices primário e secundário.

VErtex LOcator (VELO)

A capacidade de reconstruir os traços das partículas é de importância fundamental no LHCb; o VELO [42] está localizado ao redor do ponto de

interação, consiste de uma série de tiras de silício e fornece medidas precisas das coordenadas do ponto de interação -vértice primário- as quais são usadas para identificar os vértices secundários que são uma característica distintiva dos decaimentos dos hádrons B e D , permitindo medir com precisão os seus tempos de decaimento e parâmetros de impacto.

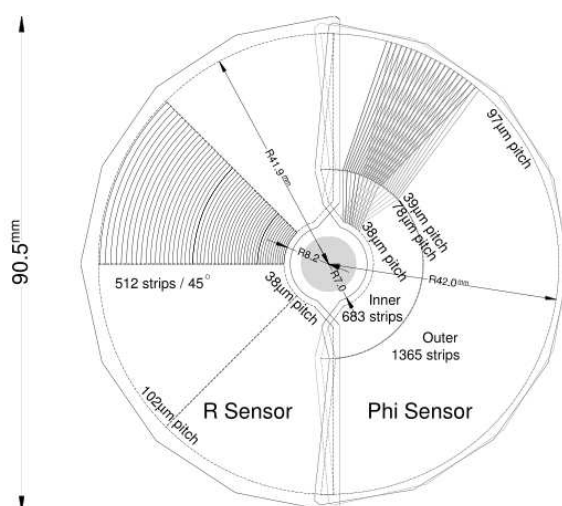


Figura 4.4: Esboço que ilustra a geometria $r\phi$ dos sensores do VELO.

Ele consiste de 21 estações colocadas ao longo do eixo do feixe, cada uma contando com dois planos de medida; um plano (sensor- r) é usado para medir as coordenadas radiais (r), o segundo plano (sensor- ϕ) é o encarregado da medição das coordenadas azimutais³ (ϕ). A terceira coordenada é obtida do conhecimento da posição do plano de cada sensor dentro do experimento. A figura 4.4 ilustra a geometria dos sensores do VELO.

Silicon Tracker

Forma parte do sistema de traços e consiste de três sub-detetores: Tracker Turicensis [43] e os chamados Inner [44] e Outer trackers [45].

Tracker Turicensis

Visa a capturar as informações dos traços de partículas de baixo momento; utiliza quatro camadas de detetores feitos de micro tiras de silício rotacionadas respectivamente em -5° e 5° no formato (x, u) e (v, x) , que facilita o trabalho dos algoritmos de reconstrução da trajetória (ver figura 4.3.2).

³Escolheu-se o sistema de coordenadas cilíndricas a fim de permitir uma reconstrução rápida dos traços e fornecer a informação espacial 3 – D .

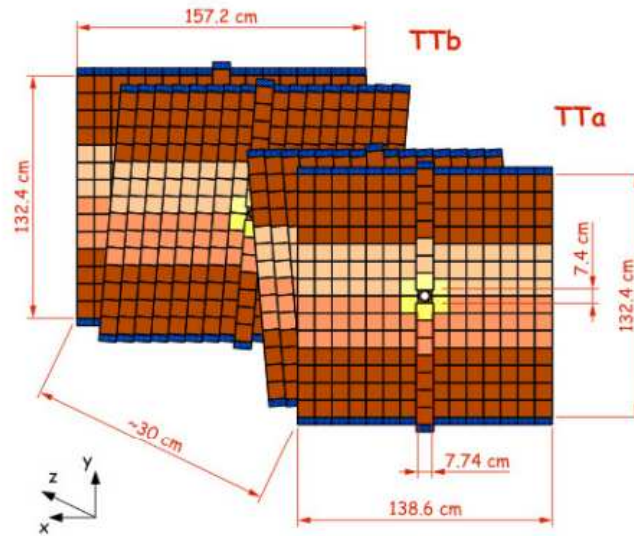


Figura 4.5: Tracker Turicensis. Disposição das camadas do TT, rotacionadas em $\pm 5^\circ$.

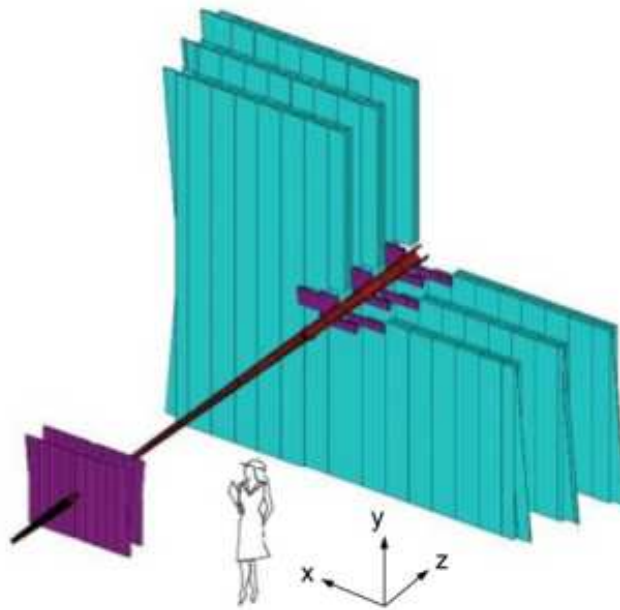


Figura 4.6: Estações de traços Inner Trackers (roxo) e as Outer trackers (verde).

Inner Tracker

Cobre a região interna das estações T1-T3, tem 120cm de amplitude e 40cm na região transversal superior no centro das três estações de traços dentro do magneto; usa tecnologia de tiras de silicone e cobre a região interna que corresponde ao redor de 20% do fluxo de partículas.

Outer Tracker

Fica na região externa das estações T, tem o objetivo de detetar a posição dos traços que estejam na região de aceitação do LHCb, com um ângulo maior do que 15 mrad. Uma ilustração das estações Inner e Outer Tracker pode ser visualizada na figura 4.3.2

4.4

Identificação de Partículas

Na maioria dos decaimentos de mésons, medidas congruentes de violação de CP somente são possíveis mediante a correta identificação de partículas. Assim, para os propósitos do experimento é uma exigência essencial separar, por exemplo, káons de píons. Este sistema é composto por detetores RICH, calorímetros e detetores de múons. Para as partículas carregadas comuns, os elétrons são selecionados no calorímetro eletromagnético, os múons nas câmaras de múons, káons píons e prótons são separados pelo RICH e têm a sua energia medida no calorímetro hadrônico, para todos os hádrons em geral. As partículas neutras são identificadas no calorímetro eletromagnético, (como no caso de fótons) ou hadrônico (neútrons).

4.4.1

RICH

O RICH⁴ [46] baseia-se no efeito conhecido como radiação de Cherenkov para determinar a velocidade de uma partícula medindo o ângulo no qual emite radiação. O efeito Cherenkov consiste na radiação eletromagnética emitida por partículas que se propagam com velocidade maior do que a luz em um dado meio. O ângulo entre a direção de propagação e de emissão da luz de Cherenkov permite determinar a velocidade da partícula. Se conhecemos o índice de refração do meio e o momento da partícula, é possível determinar a massa e assim a identidade dessa partícula.

Para grandes ângulos polares o espectro de momentos é suave, enquanto para ângulos pequenos este espectro é maior, por isso o sistema de PID⁵ consiste de dois detetores RICH, que serão explicados a seguir, para cobrir totalmente o intervalo de momentos mostrado na figura 4.7.

⁴Ring-Imaging Cherenkov detetor

⁵usaremos PID, do inglês Particle Identification, sempre que falarmos de Identificação de Partículas

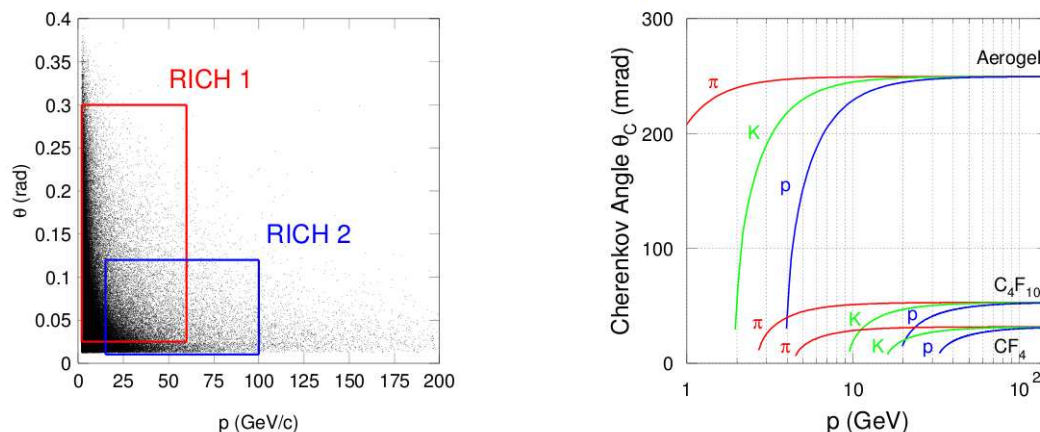


Figura 4.7: Gráficos da distribuição de momentos do RICH. Esquerda: gráfico de dispersão dos eventos com ângulo de radiação de Cherenkov em função do momento. Direita: Gráfico que mostra os distintos intervalos de momento para as partículas.

RICH 1

Está localizado entre os detetores VELO e Trigger Tracker, serve para identificar partículas carregadas de baixo momento ($\sim 1 - 60 \text{ GeV}/c$), e usa radiadores de Aerogel e FluoroButano (C_4F_{10}).

RICH 2

Localizado entre o Outer Tracker e o Calorímetro Eletromagnético, contém o radiador de gás TetraFluoroMetano (CF_4), fornece PID para partículas de alto momento (entre 15 a 100 $\text{ GeV}/c$) dentro da região de aceitação do ângulo polar ± 120 mrad (horizontal) até 100 mrad (vertical). A representação de ambos os detetores RICH 1 e 2 pode ser observada na figura 4.8.

4.4.2

Sistema de Calorímetros

O escopo principal do sistema de calorímetros [47] é identificar candidatos para o primeiro nível de trigger ($L0$) como hádrons, fótons e elétrons para medir as suas energias e a posição de cada uma delas e reconstruir os canais de decaimento necessários. As partículas, ao atravessarem placas de material denso, geram chuviscos de partículas mais leves e de menor energia. Estes chuviscos excitam estados internos de partículas de um cintilador que emitem radiação em um comprimento de onda bem determinado. A medição dos fótons desta radiação, por fotomultiplicadoras, permite a determinação da energia total da partícula incidente.

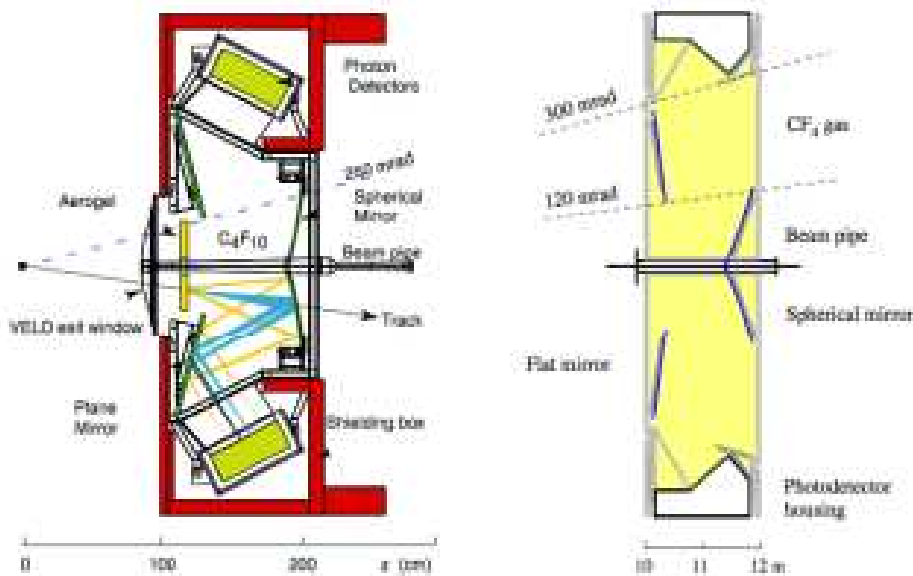


Figura 4.8: Representação lateral de RICH 1 e RICH 2.

O sistema de calorímetros consiste de um Calorímetro Eletromagnético (ECAL) e um Calorímetro Hadrônico (HCAL). O ECAL consiste de 6016 células de diferentes tamanhos, projetado para ter uma resolução de energia de

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{(8 \pm 10)\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}} + 0.9\% \quad (4.4)$$

e está precedido por dois planos de placas cintilantes, o Detetor Cintilante (SPD- Scintillating Pad detetor) e Pré-Chuveiro (PS- Pre-Shower). SPD fornece a separação entre partículas neutras e carregadas e o PS contribui à identificação do chuveiro eletromagnético. Em todos os quatro subdetetores a luz produzida nos cintiladores é capturada por fibras deslocadoras de comprimento de onda e transportada para as fotomultiplicadoras.

O HCAL é um calorímetro composto por placas de ferro e cintiladoras de 16 mm e 4 mm respectivamente, cuja informação é lida pelas 1488 células deslocadoras de comprimento de onda, e tem uma resolução de

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{(69 \pm 5)\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}} + (9 \pm 2)\% \quad (4.5)$$

4.4.3 Sistema de Múons

O sistema de múons [48] (figura 4.9) para decaimentos semi-leptônicos do méson B é uma ferramenta fundamental para a determinação do sabor do quark produzido, o que torna este sistema crucial para o trigger do LHCb e a reconstrução offline.

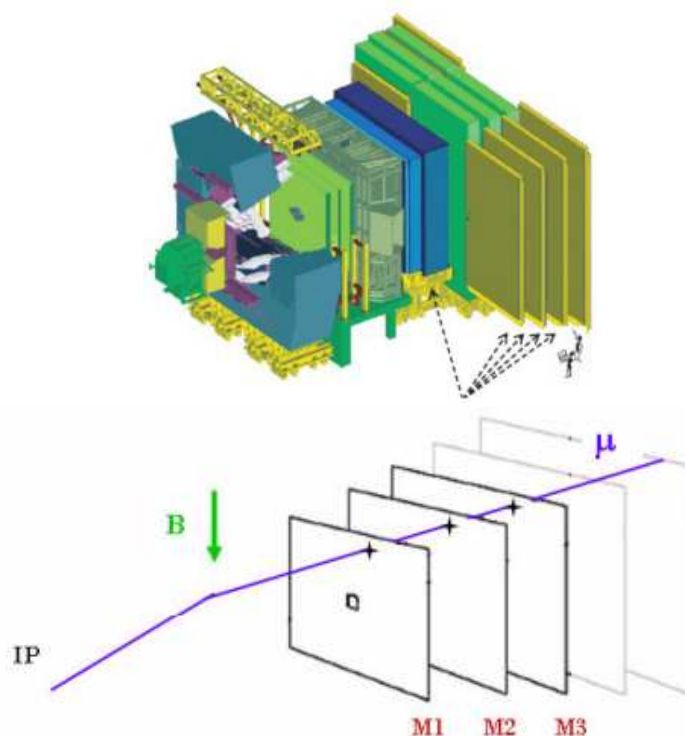


Figura 4.9: Sistema de Múons do LHCb. Esquerda: Desenho em escala da localização do sistema de múons. Direita: Trajetória de um múon desde o ponto de interação até atravessar as 5 estações de traço.

Das partículas que interagem com o detetor, os múons são as que possuem maior poder de penetração. Este sistema tem o papel de determinar a trajetória dos múons, estabelecendo a ligação com o trigger inicial na busca de múons com alto momento transversal, como será explicado nas seções seguintes.

Ele consiste de cinco estações de traços de múons (M1-M5) colocadas ao longo do eixo do feixe, intercaladas com filtros (paredes de aço) para atenuação dos hádrons, elétrons e fótons. M1 está situada antes dos calorímetros e as demais estações situam-se no final do detetor, separadas por paredes de 80 cm de aço que evitam a passagem de outros tipos de partículas.

Cada uma das 5 estações é dividida em quatro regiões, R1-R4, compostas por câmaras de múons de diferentes tipos, dimensões e granularidades. Cada região possui um tamanho de câmara, que por sua vez é dividida em células que

determinam a posição da passagem do múon. Em M1R1 são usados detetores do tipo Gaseous Electron Multiplier (GEM), que consistem em uma fina folha de metal perfurada com uma alta densidade de furos. Aplicando uma alta diferença de potencial criam-se campos elétricos nos buracos que recolhem os elétrons produzidos na ionização do gás. As outras regiões de M1, junto com todas as outras estações, são compostas por câmaras proporcionais MWPC (Multi-Wire Proportional Chambers) baseadas no princípio de ionização de um gás pela passagem de partículas. Os íons criados pela passagem da partícula migram para os eletrodos com polaridade oposta, gerando uma pequena corrente que pode ser amplificada e medida, identificando desta maneira a posição do múon.

4.5 Sistema de Trigger

Cada cruzamento dos feixes do LHC corresponde a cerca de 40 MHz de dados, o que significa uma frequência média de 10 MHz de dados visíveis no detetor do LHCb. Este volume de informação é muito grande para ser lido e guardado em disco a longo prazo. Além do mais, a maior parte dessa informação não é de interesse aos fins de estudo pois a seção de choque de produção de pares $q\bar{q}$, comparada com a seção de choque inelástica da colisão p-p, mostra que uma pequena parcela das colisões gera eventos interessantes aos objetivos de estudo do LHCb. Este sistema toma a decisão rápida se um evento deve ser descartado ou gravado. Por meio de um sofisticado sistema de trigger [49], filtra os dados em tempo real reduzindo desta forma a taxa de saída e escrita em disco por volta dos 2 kHz, esta informação do detetor é lida por um nó numa rede de computadores que roda algoritmos de decisão nos dados para melhor escolher quais deles serão mantidos ou não. Esta redução é atingida em dois níveis de trigger: O trigger de nível-0 L0 (Level-0), baseado em componentes de hardware, e o trigger de alto nível HLT (High Level Trigger), baseado em linhas de software.

4.5.1 Trigger Nível 0

É um trigger baseado nos componentes de hardware [50] do LHCb que reduz a taxa inicial de 10 MHz de colisões visíveis para 1 MHz. Combina as informações da câmara de múons, dos calorímetros eletromagnético e hadrônico e do detetor SPD. Ele aproveita o fato de que os mésons B e D , devido às suas grandes massas, decaem em partículas com momentos transversos P_T relativamente grandes, para acionar o trigger em eventos (de lépton, hádron ou fóton) com grandes energias transversas depositadas no calorímetro ou com altos momentos transversos e reconstrói o grupo de hádrons, elétrons ou fótons com a maior energia transversa no calorímetro, bem como os dois múons com o maior momento transverso na câmara de múons. Esta informação é enviada para a unidade de decisão do L0 ($L0DU$)⁶ que também recebe como entrada o número estimado de interações da unidade de armazenamento. O $L0DU$ executa um cálculo aritmético simples com as contribuições recebidas e emite uma decisão para os tipos diferentes de trigger: muon, dimuon, hadron, elétron e π^0 , sendo que esta decisão é tomada em $4\mu s$ enquanto o tempo de decisão dos algoritmos de reconstrução no calorímetro e no detetor de múons é de $1\mu s$.

⁶ $L0$ Decision Unit

4.5.2

Trigger de Alto Nível HLT

O experimento LHCb usa uma série de servidores para a filtragem dos eventos recebidos do detetor e o começo de uma grande escala de aplicações com os eventos que são interessantes para análise física. Esta é uma tarefa complexa pois a decisão deve ser feita muito rapidamente e de maneira confiável. Os eventos aceitos pelo L0 são analisados pelo HLT [51]. Inicialmente, as partículas que dispararam o trigger L0 são confirmadas, seus traços são reconstruídos em 2D pelo VELO e o seu momento é medido pela atuação do campo magnético na região do detetor TT. Com informações conjuntas de momentos e vértices, é possível determinar o parâmetro de impacto dos traços em relação ao vértice primário, em 3D, usando as informações fornecidas pelo VELO e as estações de traço T, medindo o momento de maneira mais precisa. Cada aplicação de HLT tem acesso total aos dados de cada evento e seleciona primeiro eventos com assinaturas típicas de b ou d , partículas com momento transverso relativo que tenham saído do vértice primário (HLT1) e, num segundo passo, reconstrói e seleciona decaimentos inclusivos e específicos da física de interesse (HLT2).

HLT1 High Level Trigger 1 - Trigger de Alto Nível 1

Uma vez aceito o evento pelo L0, o HLT1 reconstrói traços em 2D no VELO e mede o momento nas estações T.

HLT2 High Level Trigger 2 - Trigger de Alto Nível 2

Consiste numa série de seleções inclusivas, que permitem determinar vários canais com assinaturas comuns, e exclusivas que escolhem canais de decaimento particulares, reconstrói totalmente os canais individuais e finalmente escreve os dados em fitas.

Após o HLT2, os dados contêm majoritariamente eventos de interesse físico; cada seleção de HLT1 e HLT2 produz informações resumidas para os eventos aceitos, que são escritas nas unidades de armazenamento. Neste primeiro ano de tomada de dados, o experimento LHCb não rodou com as especificações com as quais fora projetado. As condições de tomada de dados mudaram drasticamente ao longo de 2010, provocando que a própria filosofia do trigger fosse constantemente reotimizada para se adequar às características do feixe [52], como explicaremos no próximo capítulo.

4.6

Sistema de Seleção Online

A tarefa do sistema online consiste em garantir a transferência de dados desde os dispositivos eletrônicos no detetor até o armazenamento permanente sob condições conhecidas e controladas.

A arquitetura do Sistema Online do LHCb consiste de três componentes (ver figura 4.10):

DAQ Data Acquisition System.

Sistema de aquisição de dados. Seu propósito é transportar os dados pertencentes ao cruzamento de um grupo dado e identificado pelo trigger, desde os dispositivos eletrônicos no detetor até o armazenamento permanente.

TFC Timing and Fast Control system.

Sistema de Controle dos Tempos e Rapidez. Conduz todos os estágios dos dados lidos do detetor do LHCb entre os dispositivos eletrônicos e o processamento online pela distribuição do relógio de sincronização do feixe, o trigger $L0$ e os comandos de controle de redefinição de sincronia e rapidez.

ECS Experimental Control System.

Sistema de Controle Experimental. Assegura o controle e monitoramento do estado operacional da totalidade do detetor do LHCb. Isto abrange não somente os domínios tradicionais do detetor de controle, como altas e baixas voltagens, temperaturas, fluxos de gás ou pressões, mas também o controle e monitoramento dos sistemas de trigger, TFC e DAQ.

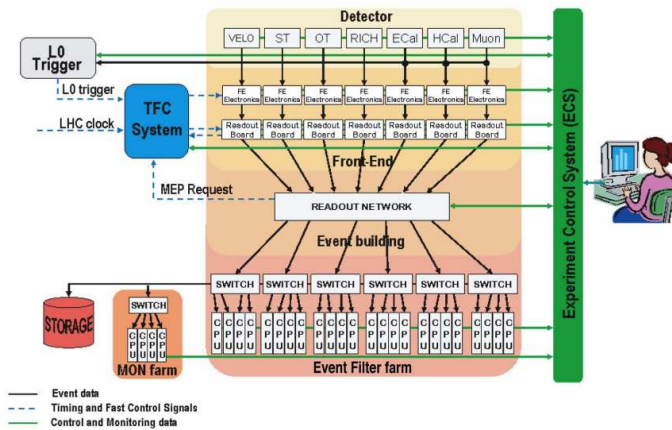


Figura 4.10: Arquitetura geral do Sistema de Seleção Online do LHCb com seus três componentes: DAQ, TFC e ECS.

4.7 Sumário

Em resumo, o LHCb foi descrito desde a sua localização no túnel do LHC até as suas componentes principais que incluem o detetor e sua interface com a máquina, bem como o trigger de primeiro nível baseado em componentes de hardware, o trigger de alto nível baseado em componentes de software, e o sistema de monitoramento online.

Com o anterior em mente, podemos afirmar que se tem um alto nível de confiança nos dados obtidos em cada rodada, o que permitirá estudar o setor da física de sabores pesados com a esperança de obter resultados interessantes, pesquisar por efeitos de nova física através de medidas de alta precisão de violação de CP e decaimentos raros no setor da física de b , d e possivelmente chegar além do que outros experimentos permitiram, no conhecimento dos processos fundamentais da física de partículas, da natureza do universo e da vida mesma.