

There are four chief obstacles to truth, namely, submission to faulty and unworthy authority, influence of custom, popular prejudice, and concealment of our ignorance accompanied by an ostentatious display of our own knowledge

Roger Bacon, 1214–1292

À Madalena
Ao Pedro Miguel
À Mariana

Pedro Moraes Salgueiro Teixeira de Abreu

Orientado por

Professor Mário João Martins Pimenta

Professor Associado do Instituto Superior Técnico

Doutoramento em Física

submetido ao

Departamento de Física do Instituto Superior Técnico,

Universidade Técnica de Lisboa

em

Dezembro de 1995

com o Título:

Decaimentos $Z^0 \rightarrow \ell\ell V$ no Detector DELPHI em LEP

Resumo

Esta tese aborda os decaimentos raros do bóson Z^0 em um par de léptons ($\ell\ell$) e um par adicional partícula-antipartícula (V), tomando por base os dados adquiridos na experiência DELPHI no período de 1990 a 1994.

A experiência DELPHI é uma das quatro experiências a funcionar no LEP, o anel de colisão electrão-positrão do CERN inaugurado em 1989. CERN é o laboratório de Física de Altas Energias da Organização Europeia de Pesquisa Nuclear, localizado em Genebra, Suíça.

Estes decaimentos constituem um caso particular dos acontecimentos com quatro férmions no estado final, com interesse como teste de precisão do *Modelo Standard*, e pelo facto de contribuírem para um fundo irreduzível nas pesquisas de bósons de Higgs.

Depois de introduzido o sinal e sumariamente descrito o detector DELPHI, apresentam-se os critérios de selecção. Apenas foram considerados neste trabalho os acontecimentos com quatro partículas carregadas provenientes do ponto de interacção e carga total nula. No final da análise é efectuada a identificação das partículas e classificação dos acontecimentos seleccionados.

As comparações da amostra final de acontecimentos com as previsões do *Modelo Standard* traduzem o acordo, dentro do erro estatístico, entre os dados analisados e o *Modelo Standard*. Este resultado é corroborado na comparação feita com análises destes canais efectuadas por outras experiências. Em particular, não se confirmam excessos observados no passado num ou noutro canal, e conforme se refere no último capítulo, as próprias colaborações publicaram para uma maior estatística analisada, resultados no mesmo sentido dos por nós obtidos.

O acordo referido é verificado globalmente e nas distribuições cinemáticas particulares.

Foi também observada uma pequena acumulação de acontecimentos na distribuição de massa invariante do V, nas regiões de massa do J/ψ e do Υ . O aumento significativo da estatística acumulada, bem como a extensão do estudo destes canais aos decaimentos hadrónicos do J/ψ e do Υ , poderá clarificar este ponto.

Palavras-chave

Detector DELPHI, experiências LEP, quatro férmions, quatro léptons, llV, identificação de partículas, medidas de precisão, testes do *Modelo Standard*, decaimentos raros do bóson Z^0 , medida de secções eficazes, comparação de resultados.

Abstract

This thesis deals with the rare decays of the Z^0 boson into a pair of leptons ($\ell\ell$) plus a charged particle-antiparticle pair (V). It uses the data collected in the DELPHI detector, in the years 1990 to 1994.

The DELPHI experiment is one of the four experiments operating in the CERN electron-positron collider, the LEP, that started working in 1989. CERN is the High Energy Physics laboratory of the European Organisation for Nuclear Research, located in Geneva, Switzerland.

These channels are a particular case of the final states with four fermions, which are of interest as a precision test of the Standard Model, and because they contribute to the irreducible background in the Higgs boson searches. After introducing the signal and resumed the detector, the selection criteria are presented. Only events with four charged particles coming from the interaction region and null total charge are considered.

The analysis ends with the particle identification and the classification of the selected events (about one hundred events).

The comparison of the final sample of events with the expected numbers from the Standard Model show the agreement, within the statistical error, between the data collected and the data predicted by the Standard Model. This result is supported by the analysis if these channels performed by other experiments. In particular, previous excesses observed in some channels by other experiments in the past are not confirmed. In fact the same collaborations reported later, with added statistics, results showing the agreement between data collected and predicted by the Standard Model.

The previous agreement is observed globally and in the several kinematic distributions studied.

A small accumulation of events was observed in the invariant mass distribution of the V, in the regions of the J/ψ and Υ . The increment in the statistics collected, and the extension of these studies to the domain of the hadronic decays of the J/ψ and Υ , can shed some light in this matter.

Keywords

DELPHI detector, LEP experiments, four fermions, four leptons, llV , particle identification, precision tests, Standard Model tests, rare decays of the Z^0 , cross section measurements, comparison of results.

Agradecimentos

Agradeço ao Professor Mário Pimenta o ter-me aceite como estudante de doutoramento, uma atitude arrojada tendo em conta *o meu percurso acidentado* no início desta actividade. Agradeço-lhe a muita aprendizagem efectuada com ele ao longo destes anos, na Física em geral e na vida em particular. Agradeço-lhe profundamente a paciência (de que se pode bem orgulhar) e as muitas horas e iterações para transformar um chorrilho de palavras nesta tese.

Um grande obrigado a Mr. le Professeur François Richard, do L.A.L./Orsay, Paris, França, pela preciosa ajuda neste trabalho, e pelas ideias e muito frutuossas discussões de física tidas ao longo destes anos. Merci François.

Agradeço ao Professor João Varela a iniciação na Física Experimental de Altas Energias, a concretização de um sonho estudantil. Em particular agradeço-lhe também a sua persistência com um estudante desconhecido proveniente de outra Universidade.

Agradeço ao Professor Gaspar Barreira o apoio prestado pelo LIP, onde este trabalho foi integralmente realizado.

Agradeço ao Professor José Mariano Gago as lições de Física e de pedagogia ao longo destes anos.

Agradeço a Daniel Treille, investigador do CERN, pela aprendizagem em física por mim efectuada aquando da minha entrada na colaboração DELPHI.

A Luc Pape, investigador do CERN, agradeço-lhe o ter-me aceite para integrar o grupo de trabalho de DELPHI para o programa gráfico, permitindo assim a minha iniciação dentro da colaboração DELPHI.

Ao Professor Daniel Bertrand da Universidade U.L.B./V.L.B. de Bruxelas e I.I.H.E., e Jean-Claude Marin, programador do CERN, do grupo do programa gráfico, agradeço-lhes terem-me ensinado as técnicas de programação mais tarde indispensáveis para este trabalho.

Ao Professor Pedro Vaz vão os meus agradecimentos pela amizade, presença, apoio e ensinamentos nos primeiros anos deste trabalho.

Ao Engenheiro Fernando Barão, agradeço-lhe a amizade, as muitas e frutuossas discussões sobre assuntos desta tese (*se não conseguir "convencer" o Fernando "daquela ideia", então é porque está errada*).

Ao Professor Luís Peralta da Faculdade de Ciências de Lisboa, e ao Doutor Rui Ferreira, investigador no CERN, agradeço-vos o apoio e a amizade manifestados ao longo destes anos, e em particular as discussões de física e a vossa experiência partilhada com este processador de texto.

Aos membros da colaboração DELPHI, e em particular aos membros do grupo de física "TEAM 6 – Searches in simple topologies", as frutuossas discussões de física antes das conferências internacionais e os comentários sobre o artigo do tema desta tese.

Aos membros do grupo DELPHI no LIP, em particular Mestres Rosa Paula Henriques, Maria Espírito Santo, Bernardo Tomé, e Professora Amélia Maio, o apoio e comentários sobre assuntos aqui tratados.

Agradeço ao Engenheiro Paulo Gomes e ao Dr. Jorge Gomes o enorme apoio na formatação do texto, tratamento de gráficos, experiência em programação e em VMS, e introdução ao Unix.

Agradeço ao secretariado do LIP a paciência que têm para connosco, e o esforço efectuado para manter boas condições de trabalho.

Agradeço a meus Pais e irmãos o apoio, estímulo e confiança em mim depositada ao longo destes anos.

Agradeço por fim à minha mulher o enorme apoio, confiança e estímulo ao longo destes anos, a ajuda nas situações difíceis e a presença silenciosa e constante, e o tempo cedido para efectuar este trabalho. E a meus filhos, que por existirem, me deram coragem e estímulo para terminar este trabalho. A minha mulher e a meus filhos é dedicado este trabalho.

Índice

1	Introdução	1
2	O sinal	5
2.1	Motivação	5
2.2	Produção do sinal	9
2.3	Características marcantes do sinal	11
3	O dispositivo experimental	17
3.1	LEP – O Colisionador Electrão–Positrão	18
3.2	DELPHI – Um conjunto de detectores	20
3.2.1	Detectores de traços	26
3.2.2	Calorímetros	33
3.3	Os sistemas de pré-selecção e recolha de dados	37
3.3.1	Implementação do sistema de <i>trigger</i>	37
3.3.2	As funções de selecção do sistema de <i>trigger</i>	39
3.3.3	O <i>trigger</i> de traços	40
3.3.4	A eficiência do sistema de <i>trigger</i>	42

3.3.5	O sistema de aquisição de dados	44
3.4	Programas de tratamento dos dados	46
3.4.1	DDAPP—A base de dados de DELPHI	47
3.4.2	DELSIM—O programa de simulação	48
3.4.3	DELANA—O programa de reconstrução	48
3.4.4	DELGRA—O programa de visualização de DELPHI	51
4	Análise	53
4.1	A Simulação	55
4.2	A Selecção	59
4.2.1	Introdução	59
4.2.2	Qualidade das partículas carregadas	61
4.2.3	Características da amostra inicial	67
4.2.4	Remoção das várias contribuições do Fundo	71
4.3	A classificação	102
4.3.1	Identificação de partículas carregadas	102
4.3.2	Escolha das partículas do V e classificação dos acontecimentos	117
5	Resultados	123
5.1	Análise dos dados de 1992/1993	123
5.1.1	Comparação dos acontecimentos seleccionados com as pre- visões do <i>Modelo Standard</i>	124
5.1.2	Os acontecimentos de elevada massa do V	132

5.1.3	Secção eficaz total	138
5.2	Comparação com a análise dos dados de 1990 e 1991	141
5.3	Análise preliminar dos dados de 1994	142
5.4	Resultados globais de DELPHI (preliminar)	145
5.5	Comparação com outras experiências	147
5.5.1	Energia no centro de massa inferior a 65 GeV (inferior a m_{Z^0})	147
5.5.2	Energia no centro de massa de 88 a 94 GeV (LEP)	147
5.5.3	Resumo das comparações anteriores	149
6	Conclusões	151

Lista de Figuras

1.1	O processo dominante na produção de acontecimentos com 2 léptões e 2 partículas carregadas, para energias no centro de massa iguais à massa do bóson Z^0	2
2.1	Diagrama de Feynman para a produção e decaimento do bóson de Higgs a partir do Z^0 , para valores de massa do bóson de Higgs superiores a duas vezes a massa do <i>quark</i> b (A)), e acoplamento triangular nos decaimentos em fóton-fóton (B)).	7
2.2	Os quatro grupos em que se enquadram os diagramas envolvidos em primeira aproximação na produção do sinal. Nem todos os grupos contribuem para todos os estados finais.	9
2.3	Multiplicidade	15
2.4	Energia visível	15
2.5	Ângulos de isolamento	15
2.6	Massa do par proveniente do Z^0 , em função da massa do par seleccionado para o V.	15
2.7	Ângulo entre o V e o léptão mais próximo	16
2.8	Ângulo entre as partículas do V	16
2.9	Soma dos ângulos entre as partículas	16
2.10	Energia do V	16

3.1	Esquema de LEP (com os elevadores de acesso às zonas experimentais, a ± 100 m de profundidade) e outros aceleradores do CERN.	18
3.2	Esquema em perspectiva do corpo central(Barril) e parte frontal A(frente) do detector DELPHI (a)), e sistema de coordenadas usado para referenciar os pontos (b)).	22
3.3	Quadrante superior direito de um corte longitudinal de DELPHI contendo o eixo do feixe(a)), e de um corte transversal contendo o ponto de colisão(b)).	23
3.4	Esquema das linhas de força do campo magnético, visto no quadrante superior direito de corte longitudinal.	24
3.5	Perspectiva simples das três camadas do Vertex Detector (1994) (a)) e um acontecimento $Z^0 \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$ visto neste detector (b) pontos medidos no VD e c) resultado do ajuste dos vértices).	28
3.6	Quadrante superior direito do corte transversal (no ponto de interação) do ID – Câmara de traços interna.	29
3.7	Esquema em perspectiva da TPC – Câmara de traços central. . .	31
3.8	Sector (1/6) de uma das tampas da TPC.	32
3.9	Um dos 144 módulos da HPC – Calorímetro electromagnético do barril (a) Detalhe de construção; b) Estrutura do plano de leitura dos cátodos).	33
3.10	Dependência no ângulo polar da eficiência de <i>trigger</i> de DELPHI para pares de electrões e muões (ref. [TRG94]).	45
3.11	Estrutura de dados suporte de DELANA e DELGRA.	49
3.12	Acontecimento e algumas componentes de DELPHI, mostrados em perspectiva pelo programa de visualização DELGRA (na pequena janela, mostra-se a distribuição do momento em função dos ângulos polar e azimutal).	52
4.1	Luminosidade tomada nos anos de 1990 a 1993, em função da energia no centro de massa.	54

4.2	Diagramas de Feynman para o processo $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ incluídos no programa BABAMC (termos de Born).	56
4.3	Figura 1a) da referência [DEL94]: Número de partículas carregadas por acontecimento (com energia superior a 10 GeV).	59
4.4	Esquema da extrapolação do traço até ao ponto de interacção. O-Ponto de interacção; C-Centro da circunferência; V-Ponto de Referência. Em cima- plano transverso; em baixo- plano longitudinal	62
4.5	Coordenadas em que são representados os momentos em DELPHI: X, Y, Z cartesianas, P, θ, ϕ esféricas (respectivamente momento, ângulo polar e ângulo azimutal).	62
4.6	O número de pontos medidos no VD incluídos nos traços, em função do ângulo polar do traço (decaimentos do Z^0 em muões ou electrões).	64
4.7	O Parâmetro de impacto com sinal, para partículas carregadas com ângulos polares na gama de valores de 40 a 140 graus com pontos no VD (linha a cheio) ou sem pontos no VD (linha a tracejado), e para partículas carregadas fora dessa região angular (linha a pontilhado).	65
4.8	Momento das partículas carregadas (para acontecimentos com duas partículas colineares e opostas, identificadas como muões).	66
4.9	Número total de partículas carregadas (para acontecimentos com menos de 9 partículas carregadas provenientes do ponto de interacção).	68
4.10	Soma das energias das partículas carregadas (acontecimentos com multiplicidade carregada igual a 4 e carga total nula). Círculos: Dados; Região traçada: Simulação de decaimentos do Z^0 em muões; Região sombreada de tom intermédio: acontecimentos "Bhabha" simulados; Região sombreada de tom mais escuro: Simulação de decaimentos do Z^0 em τ s e hádrões e figura incluída: Simulação do sinal.	70
4.11	Co-seno do ângulo polar da partícula carregada mais isolada.	71

4.12	Separação entre $(e^+e^-, \mu^+\mu^-)V$ e $\tau^+\tau^-V$: energia visível para amostras enriquecidas em decaimentos do Z^0 em pares de electrões ou muões (A) e em τ s (B).	74
4.13	Momento da partícula mais isolada (amostra B2).	74
4.14	Número de acontecimentos com X partículas carregadas na zona de aceitação do VD, e Y partículas carregadas com dois ou mais pontos associados medidos no VD. A) dados. B) Simulação Sinal. C) Simulação τ s e hadrónicos. D) Simulação Bhabhas e Dimuões.	76
4.15	Configuração dos acontecimentos após agrupamento das partículas (algoritmo de "JADE") para vários valores de y_{cut}	78
4.16	Configuração dos acontecimentos com carga total diferente de zero, para $y_{\text{cut}} = 0.05$	78
4.17	Configuração dos acontecimentos simulados (sinal a cheio, acontecimentos hadrónicos a tracejado, decaimentos do Z^0 em τ s a pontilhado), para $y_{\text{cut}} = 0.05$	79
4.18	Número de acontecimentos após topologia em função de NPB (horizontal) e de $NPBV$ (vertical). A) dados. B) Simulação Sinal. C) Simulação τ s e hadrónicos. D) Simulação Bhabhas e Dimuões.	80
4.19	Massa invariante das três partículas mais próximas (triplete). A) Amostra $(e^+e^-, \mu^+\mu^-)V$, triplete com pontos VD; B) Amostra $(e^+e^-, \mu^+\mu^-)V$, triplete sem pontos VD; C) Amostra $\tau^+\tau^-V$, triplete com pontos VD; D) Amostra $\tau^+\tau^-V$, triplete sem pontos VD.	82
4.20	Esquema de uma possível reinteracção nuclear, que afectaria o valor da massa do triplete.	83
4.21	Número de (re)interacções nucleares sofridas por partículas em acontecimentos hadrónicos, em função da distância ao eixo dos feixes.	84
4.22	Número de acontecimentos $(e^+e^-, \mu^+\mu^-)V$ seleccionados em função de NPB (horizontal) e de $NPBV$ (vertical). A) dados. B) Simulação Sinal. C) Simulação τ s D) Simulação Bhabhas e Dimuões.	86

4.23	Número de acontecimentos $\tau^+\tau^-V$ seleccionados em função de NPB (horizontal) e de $NPBV$ (vertical). A) dados. B) Simulação Sinal. C) Simulação τ s, Bhabhas e Dimuões D) Simulação Hadrónicos.	87
4.24	Distância entre as circunferências para pares de partículas. A) Partículas com $NPBV$ igual a 3; B) Outros casos.	89
4.25	Massa invariante do par. A) Acontecimentos $(e^+e^-, \mu^+\mu^-)V$ com $NPBV$ igual a 3; B) Outros acontecimentos $(e^+e^-, \mu^+\mu^-)V$; C) Acontecimentos $\tau^+\tau^-V$ com $NPBV$ igual a 3; D) Outros acontecimentos $\tau^+\tau^-V$	90
4.26	Número de acontecimentos previstos pelo sinal e pelo fundo em função do produto mixto. A) Amostra $(e^+e^-, \mu^+\mu^-)V$; B) Amostra $\tau^+\tau^-V$	94
4.27	Número de acontecimentos previstos pelo sinal e pelo fundo em função da soma dos ângulos. A) Amostra $(e^+e^-, \mu^+\mu^-)V$; B) Amostra $\tau^+\tau^-V$	96
4.28	Energia hadrónica neutra (cf. texto). A) Amostra $(e^+e^-, \mu^+\mu^-)V$; B) Amostra $\tau^+\tau^-V$	97
4.29	Excesso de energia hadrónica (cf. texto). A) Amostra $(e^+e^-, \mu^+\mu^-)V$; B) Amostra $\tau^+\tau^-V$	99
4.30	Acontecimentos esperados para valores de corte no excesso de energia hadrónica no hemisfério (excluindo electrões ou muões identificados, cf. texto). A) Amostra $(e^+e^-, \mu^+\mu^-)V$; B) Amostra $\tau^+\tau^-V$	100
4.31	Distribuição da medida da taxa de ionização do gás da TPC (dE/dX), para dados reais em função do momento (topo), e para uma simulação de electrões (linha a cheio) e outra de muões (linha a tracejado), para alguns intervalos de momento (indicados).	106
4.32	Distribuição da razão entre energia depositada no calorímetro electromagnético e momento (E/P), para uma simulação de electrões (linha a cheio) e outra de muões (linha a tracejado), para alguns intervalos de momento (indicados), para a zona do barril (histogramas no topo) e da frente (em baixo).	107

4.33	Distribuição do número de pontos medidos nas câmaras de muões. Topo: muões simulados com momento inferior a 2 GeV; Meio: muões simulados com momento compreendido entre 2 GeV e 3 GeV; Baixo: para momentos superiores a 3 GeV, muões simulados a cheio, electrões simulados a tracejado e π simulados a pontilhado.	108
4.34	Distribuição dos depósitos de energia no calorímetro hadrónico pela percentagem dessa energia na primeira, segunda, terceira ou quarta camadas.	110
4.35	Determinação das probabilidades das hipóteses electrão, muão ou π para cada gama de valores de E/P, para partículas com momentos superiores a 20 GeV e na aceitação do calorímetro do barril (HPC).	111
4.36	Níveis de confiança para a hipótese electrão, para dados simulados (topo – electrões, meia-altura – muões e em baixo – π), e para o caso momentos superiores a 5 GeV, e ângulo polar (modulo 90) compreendido entre 55 e 87 graus.	114
4.37	Eficiência global de identificação (pura) de electrões(topo), muões(meio) e π (baixo) em função do ângulo polar, para momentos inferiores (coluna da esquerda) ou superiores a 5 GeV (coluna da direita), para acontecimentos simulados (electrões, muões, ou π).	116
4.38	Eficiência global de identificação (pura) de electrões(topo), muões(meio) e π (baixo) em função do ângulo polar, para momentos inferiores (coluna da esquerda) ou superiores a 5 GeV (coluna da direita), para dados reais previamente enriquecidos em electrões, muões, ou π	118
4.39	Distribuição dos acontecimentos seleccionados para a massa invariante do V, nos casos em que o V foi identificado em μ/π	122
5.1	Distribuição dos acontecimentos seleccionados para a massa invariante das partículas provenientes do Z^0 . Esquerda: Amostra $(e^+e^-, \mu^+\mu^-)V$; direita: amostra $\tau^+\tau^-V$	125
5.2	Distribuição dos acontecimentos seleccionados para a massa invariante do V. Esquerda: Amostra $(e^+e^-, \mu^+\mu^-)V$; direita: amostra $\tau^+\tau^-V$	125

5.3	Distribuição dos acontecimentos seleccionados em função da massa do V , quando este foi identificado em e^+e^- (esquerda) ou em $\mu^+\mu^-$ (direita).	126
5.4	Distribuição dos acontecimentos seleccionados em função da massa invariante do par proveniente do Z^0 (eixo vertical) e da massa invariante do V (eixo horizontal). Esquerda: Amostra $(e^+e^-, \mu^+\mu^-)V$; direita: amostra $\tau^+\tau^-V$	127
5.5	Distribuição dos acontecimentos seleccionados em função da energia do V (soma das energias das partículas constituintes do V). Esquerda: Amostra $(e^+e^-, \mu^+\mu^-)V$; direita: amostra $\tau^+\tau^-V$	128
5.6	Distribuição dos acontecimentos seleccionados em função do ângulo de abertura do V (ângulo entre as partículas constituintes do V).	129
5.7	Distribuição dos acontecimentos seleccionados em função do ângulo do V com o leptão mais próximo (partícula proveniente do Z^0 mais próxima).	129
5.8	Em função da massa do V , número máximo de acontecimentos observáveis, com origem em processos não incluídos nas previsões do <i>Modelo Standard</i>	130
5.9	Diagrama de Feynman de possíveis extensões ao <i>Modelo Standard</i> com um hipotético novo bóson X . A) acoplamento de X aos leptões; B) acoplamento de X ao Z^0	131
5.10	Em função da massa do V , eficiências para dois exemplos de novos canais (respectivos diagramas representados acima), não incluindo efeitos do detector ou de reconstrução.	131
5.11	Em função da massa do V , limites nas razões de fraccionamento do Z^0 para dois exemplos de novos canais (respectivos diagramas representados acima), não incluindo efeitos do detector e de reconstrução.	132
5.12	Acontecimentos com massa do V acima de 9 GeV.	135
5.13	Distribuição de acontecimentos simulados com massas geradas (do γ^*) iguais a 3 GeV (esquerda) e 10 GeV (direita), em função da massa do V (par seleccionado).	137

5.14	Extraída de [DEL93]distribuição dos acontecimentos seleccionados de 1990 e 1991 em função da massa do V	143
5.15	Distribuição preliminar dos acontecimentos seleccionados de 1994 em função da massa do V	144
5.16	Distribuição preliminar dos acontecimentos seleccionados pela análise dos dados de DELPHI de 1990 a 1994, em função da massa do V	146
6.1	Distribuição dos acontecimentos seleccionados pela análise dos dados de DELPHI de 1990 a 1994, em função da massa do V	154

Lista de Tabelas

2.1	Secções eficazes do sinal σ para alguns estados finais e cortes cinemáticos: partículas presentes no estado final, ângulo polar mínimo das partículas com o feixe (modulo 90) e massa invariante mínima para o V (em GeV). As contribuições dos diferentes grupos de diagramas, A.-Aniquilação, B.-"Bremsstrahlung", C.-Conversão, e M.-Multiperiférico, não incluem os efeitos de interferência negativa ou positiva entre eles.	12
3.1	Características principais do acelerador LEP.	20
3.2	Resolução na medida do momento, em função de algumas regiões do ângulo polar (modulo 90°) e dos detectores participantes na reconstrução do traço (* VD a partir de 25° só em 1994).	24
3.3	Especificações dos detectores de traços (ID: I é a camada Interna, ID: E a externa). A aceitação no ângulo polar ($\theta \geq \theta_l$) subentende o limite equivalente no ângulo complementar ($\theta \leq 180^\circ - \theta_l$). . . .	25
3.4	Especificações dos calorímetros (X_0 é o comprimento de radiação e λ é o comprimento de interacção).	26
3.5	Tabela de combinações de sinais de <i>trigger</i> implementadas no segundo nível ("*" indica a operação lógica "e", e "+" a operação lógica "ou/e") (ref. [TRG94]).	41
4.1	Números de acontecimentos nas várias amostras em estudo, após cortes definidores da amostra inicial.	71

4.2	Números de acontecimentos nas várias amostras em estudo, após cortes definidores da amostra inicial, de número extra de "maus traços" e dos ângulos polares.	75
4.3	Números de acontecimentos nas várias amostras em estudo ($(e^+e^-, \mu^+\mu^-)V$ e $\tau^+\tau^-V$), após rejeição de acontecimentos sem pontos medidos no VD e de acontecimentos tipo "2+2".	79
4.4	Números de acontecimentos nas várias amostras em estudo, após rejeição de acontecimentos com massas do tripleto inferiores a 2 ou 2.5 GeV(cf. texto).	85
4.5	Números de acontecimentos nas várias amostras em estudo, após rejeição de acontecimentos com fótons convertidos (cf. texto). . . .	91
4.6	Correlação entre os acontecimentos aceites ou não pelos cortes massa invariante do tripleto (M.Tripleto) e massa invariante do par (M.Par).	91
4.7	Números de acontecimentos nas várias amostras em estudo, após rejeição de acontecimentos em que a soma dos três ângulos interiores é inferior a 345 graus (cf. texto).	96
4.8	Números de acontecimentos nas várias amostras em estudo, após rejeição de acontecimentos com excesso de energia hadrónica (cf. texto).	101
4.9	Processo de determinação do nível de confiança (um traço indica não utilização desse critério). Neste exemplo a partícula hipotética tem momento de 39 GeV, ângulo polar de 75 graus e ângulo azimutal de 185 graus.	112
4.10	Níveis de confiança mínimos para a identificação em electrão, muão ou π (classificação restrita).	115
4.11	Níveis de confiança mínimos para a identificação em electrão, muão ou π (classificação suave).	115
4.12	Classificação dos acontecimentos nas várias amostras em estudo, em relação às partículas provenientes do V (cf. texto).	120
4.13	Classificação dos acontecimentos nas várias amostras em estudo, em relação às partículas provenientes do Z^0 (cf. texto).	121

4.14	Classificação dos acontecimentos de dados seleccionados em relação ao decaimento do V (linhas horizontais) e em relação ao decaimento do Z^0 (linhas verticais) (cf. texto).	121
5.1	Classificação dos acontecimentos nas várias amostras em estudo, em relação às partículas provenientes do Z^0 (cf. texto).	124
5.2	Algumas características dos acontecimentos com massas do V superiores a 2.6 GeV. *Acontecimentos em que não foi realizado ajuste cinemático.	134
5.3	Matriz T de transferência de acontecimentos entre canais (cf. texto).	140
5.4	Eficiência média de selecção da análise (ε) e secção eficaz (σ) medida nesta análise para os três canais (energia no centro de massa igual a 91.25 GeV), e secção eficaz prevista pelo <i>Modelo Standard</i>	141
5.5	Retirada da referência [DEL93], a tabela mostra a classificação dos acontecimentos seleccionados dos dados de DELPHI de 1990 e 1991, em relação às partículas provenientes do Z^0 (cf. texto).	142
5.6	Características do acontecimento de elevada massa do V publicado na análise dos dados de 1990 e 1991.	142
5.7	Resultados preliminares da análise dos dados de DELPHI de 1994, mostrando a classificação dos acontecimentos seleccionados em relação às partículas provenientes do Z^0 (cf. texto).	144
5.8	Características dos acontecimentos de elevada massa do V seleccionados na análise preliminar dos dados de 1994.	145
5.9	Resultados da análise dos dados de DELPHI de 1990 a 1994 (resultados de 1994 preliminares), mostrando a classificação dos acontecimentos seleccionados em relação às partículas provenientes do Z^0 (cf. texto).	145
5.10	Resumo da classificação dos acontecimentos seleccionados pelas diferentes experiências em relação às partículas provenientes do Z^0 (por simulação entenda-se a soma das previsões do <i>Modelo Standard</i> para o sinal e para o fundo).	150

- 6.1 Comparação dos acontecimentos seleccionados na análise dos dados de 1992 e 1993, em função das partículas provenientes do Z^0 , com as previsões do *Modelo Standard*. 152

- 6.2 Eficiência média de selecção da análise (ε) e secção eficaz (σ) medida nesta análise para os três canais (energia no centro de massa igual a 91.25 GeV), e secção eficaz prevista pelo *Modelo Standard*. 153

Capítulo 1

Introdução

Em 1989 teve início o funcionamento do colisionador electrão-positrão LEP no CERN, o laboratório de Física de Altas Energias da Organização Europeia de Pesquisa Nuclear (CERN) localizado em Genebra na Suíça. Este colisionador foi desenhado e construído para estudar o bosão Z^0 com grande detalhe, e permitiu, a cada uma das quatro experiências aí instaladas, a aquisição de 3.5 a 4.5 milhões de acontecimentos com a produção do bosão Z^0 no período compreendido entre 1989 e 1994.

O bosão Z^0 , conjuntamente com os bosões $W^\pm$, foram descobertos experimentalmente no CERN em 1983 [Arn83], e deram consistência definitiva ao designado *Modelo Standard* das interacções electrofracas, proposto em 1961, 1967 e 1968 por S.Glashow, S.Weinberg, A.Salam [GWS68], para leptões, e depois extendido ao sector hadrónico [GIM70], incluindo a mistura de Cabibbo [CKM73] e o conceito de côm [Nam63], e provada a sua renormalizabilidade [Hoo71]. Este modelo já tinha sido responsável pela interpretação de um dos mais famosos resultados do CERN, a descoberta das correntes neutras em 1973 [Has73].

Com a elevada estatística acumulada passa-se em LEP do acordo qualitativo para, pela primeira vez e para a energia no centro de massa de valor igual à massa do Z^0 , fazer o teste quantitativo. Assim, determinaram-se parâmetros do *Modelo Standard* com grande precisão ($M_{Z^0} = 91.189 \pm 0.005$ GeV, $\Gamma_Z = 2.497 \pm 0.004$ GeV [LEP94], quando as medidas anteriores eram $M_{Z^0} = 92.4 \pm 1.8$ GeV, $\Gamma_Z < 5.6$ GeV [PDG88]), estudaram-se decaimentos raros do Z^0 , e pesquisaram-se sinais de "Nova Física" e partículas previstas pelo *Modelo Standard* ainda por descobrir.

Este trabalho aborda os decaimentos raros do Z^0 em um par de leptões ($\ell\ell$)

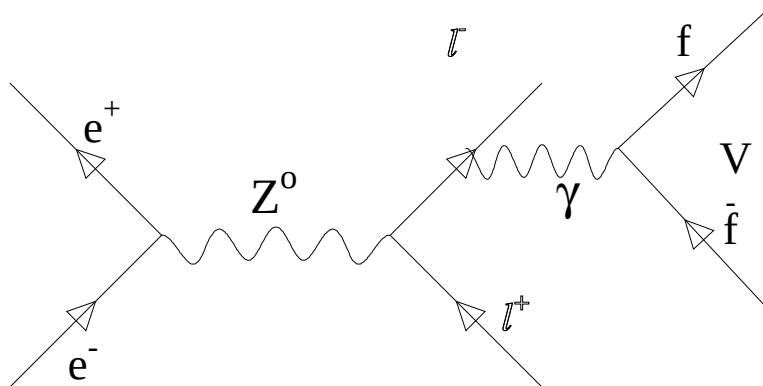


Figura 1.1: O processo dominante na produção de acontecimentos com 2 léptões e 2 partículas carregadas, para energias no centro de massa iguais à massa do bóson Z^0 .

e um par adicional partícula-antipartícula (V), cujo processo dominante é esquematicamente representado na figura 1.1, tomando por base os dados adquiridos em DELPHI [DEL83].

Estes acontecimentos têm interesse por vários motivos. Constituem um teste de precisão às previsões do *Modelo Standard*, e podem assim indicar sinais de "Nova Física"; acontecimentos com quatro fermiões constituem um fundo irreduzível nas pesquisas do bóson de Higgs, e têm por isso de ser estudados em detalhe; finalmente, têm ainda interesse pelo facto de, na segunda fase de LEP, a energia no centro de massa permitir a produção de dois bósons $W^\pm$, decaindo em quatro fermiões.

A maioria dos resultados publicados neste campo por experiências anteriores fora do CERN são no sentido do acordo entre as previsões do *Modelo Standard* e os dados adquiridos [PEP89]. Contudo, em 1990 a experiência AMY/TRISTAN apresentou sinais de alguma discrepância entre os dados adquiridos e previsões do *Modelo Standard* [AMY90], nos estados finais com múões. Em Abril de 1991 uma experiência no CERN, Aleph/LEP, publicou resultados [ALE91] em que se observava uma discrepância significativa entre os dados analisados e as previsões do *Modelo Standard*, nos estados finais $\tau\tau V$.

Uma primeira análise foi por nós efectuada, tendo por base os dados de 1990 e parte dos dados de 1991, tendo sido apresentada numa conferência internacional [DEL91a]. Tendo sido completada com os dados de 1991 adquiridos poste-

riormente, esta primeira análise foi também publicada [DEL93]. O trabalho agora apresentado resulta de uma análise mais aprofundada dos dados adquiridos em 1992 e 1993. Este trabalho tira proveito do facto do detector de vértice ter funcionado quase em pleno durante o período de dados de 1992 e 1993. O detector de vértice de DELPHI permite melhorar alguns aspectos da análise, nomeadamente na melhoria da qualidade da reconstrução de partículas carregadas e da reconstrução de vértices.

Esta tese está organizada da seguinte forma:

No capítulo um introduz-se o tema e algumas motivações.

No capítulo dois (O sinal) descreve-se mais extensivamente o sinal, e são introduzidos os programas para estimar a secção eficaz do sinal.

No capítulo três (O aparelho experimental) é apresentado o detector DELPHI, com maior detalhe nas suas componentes que foram importantes para este trabalho. Neste capítulo são também resumidos o acelerador LEP onde está instalado o detector DELPHI, e os programas de simulação do detector, sistema de aquisição e de pré-selecção de dados (sistema de "trigger"), terminando este capítulo com o programa de visualização de acontecimentos.

O capítulo quatro (Análise) aborda a análise, introduzindo e justificando critérios para obter uma amostra final, em que a proporção de acontecimentos de sinal seja elevada face ao número de acontecimentos do fundo.

Os resultados da análise efectuada no capítulo quarto, em números de acontecimentos seleccionados, eficiências médias de selecção e secções eficazes, ou em distribuições cinemáticas desses acontecimentos, são mostrados no capítulo dos resultados (capítulo cinco). Nesse capítulo são também comparados os resultados deste trabalho com os resultados publicados de trabalhos ou experiências neste campo.

As conclusões deste trabalho, e das comparações com outros resultados, são apresentadas no sexto e último capítulo.

Capítulo 2

O sinal

Estudam-se neste trabalho os estados finais com um par leptão-antileptão e um par de fermiões, resultantes, na maioria dos acontecimentos, do decaimento de um Z^0 e de um fóton virtual (γ^*) respectivamente. Dado que o fóton virtual decai em duas partículas com um ângulo muito pequeno entre elas (*semelhante à letra V*), como veremos posteriormente, associa-se a estes acontecimentos a nomenclatura $\ell\ell V$, em que $\ell\ell$ é o par leptão-antileptão.

Nas secções seguintes serão revistas as motivações para estudar este canal, estudadas as formas de produção do sinal e secções eficazes, e as características principais destes acontecimentos.

2.1 Motivação

O estudo em detalhe dos acontecimentos com dois leptões e dois fermiões no estado final tem interesse como estudo de precisão do *Modelo Standard*, como fundo para as pesquisas do bóson de Higgs, e como estudo preparatório para a segunda fase de LEP, em que a energia no centro de massa acima do limiar de produção de um par de bósons W permite obter acontecimentos maioritariamente com quatro fermiões no estado final.

- Como estudo de precisão do *Modelo Standard*.

Estudos de precisão do *Modelo Standard* podem, no caso de serem descobertas discrepâncias, revelar sinais de novos processos e nova Física, e no caso contrário, reforçar a confiança depositada neste modelo.

Em 1991 uma discrepância importante no canal $\tau^+\tau^-/\mu^+\mu^-$, em que o Z^0 decai em $\tau^+\tau^-$, foi avançada pela colaboração Aleph, a funcionar também em LEP no CERN, com base nos dados recolhidos em 1989 e 1990 [ALE91]. Uma pequena discrepância foi também observada no canal $e^+e^-/\mu^+\mu^-$, para energias no centro de massa compreendidas entre 50 e 61 GeV [AMY90], pela colaboração AMY (no acelerador TRISTAN no KEK, Japão). Estudos destes canais baseados em amostras de dados com uma estatística significativamente superior, tornaram-se assim de extrema actualidade.

- Contribuição para os erros sistemáticos nas medidas de precisão.

Uma das medidas habituais para caracterizar os decaimentos do Z^0 consiste no quociente entre a razão de fraccionamento do Z^0 para hadrões e a razão de fraccionamento do Z^0 para leptões. As razões de fraccionamento são obtidas através do número de acontecimentos hadrónicos e leptónicos, corrigidos pelas respectivas eficiências [LEP94].

Na selecção de acontecimentos hadrónicos inclui-se em geral os acontecimentos $Z^0 \rightarrow q\bar{q}V$ (um fotão virtual adicional (V) decaindo em duas partículas carregadas fica diluído no meio das outras partículas).

Na selecção dos acontecimentos leptónicos, em particular no estudo dos decaimentos do Z^0 em electrão-positrão ou em muões, os programas utilizados para simular esses processos (BABAMC [BMC89] e DYMU3 [DYM89] conforme descrito em [DEL94a]) não incluem a produção de um fotão virtual adicional. Assim, acontecimentos com um fotão virtual adicional decaindo num par partícula-antipartícula, não são incluídos nas estimativas das previsões do *Modelo Standard* para esses processos.

Enquanto a estatística acumulada é pequena, a medida da razão entre os acontecimentos hadrónicos e leptónicos tem um erro estatístico elevado, e o processo $q\bar{q}V$, que contribui para o erro sistemático, não produz um número de acontecimentos superior a esse erro estatístico. Quando uma quantidade elevada de acontecimentos é analisada (DELPHI adquiriu entre 1989 e 1994 aproximadamente 3.2 milhões de decaimentos hadrónicos do Z^0), o erro estatístico é pequeno e um esforço deve ser feito no sentido de reduzir o erro sistemático, portanto subtrair do numerador o número de acontecimentos previstos pelos processos tipo $q\bar{q}V$. Daí a necessidade de comparar para os processos tipo $f\bar{f}V$ as previsões do *Modelo Standard* com dados reais seleccionados. Em primeira aproximação, se as previsões do *Modelo Standard* para o processo $f\bar{f}V$ estiverem de acordo com os dados analisados para canais simples (f ser um leptão, $\ell\bar{\ell}V$, portanto um número de partículas carregadas próximo de quatro), também devem coincidir para canais hadrónicos ($q\bar{q}V$).

- Como fundo para as pesquisas do bóson de Higgs.

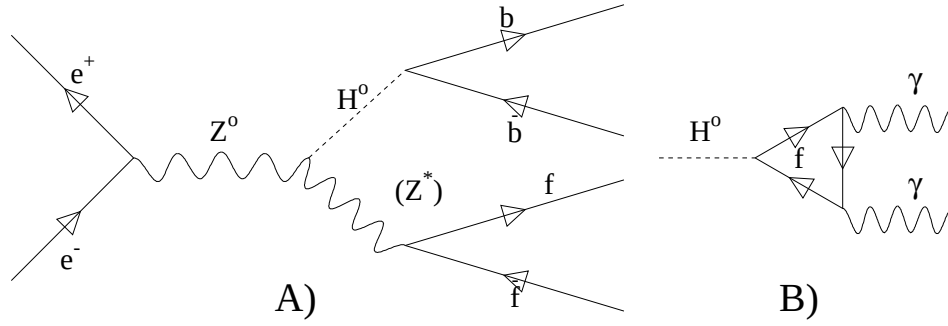


Figura 2.1: Diagrama de Feynman para a produção e decaimento do bóson de Higgs a partir do Z^0 , para valores de massa do bóson de Higgs superiores a duas vezes a massa do *quark* b (A)), e acoplamento triangular nos decaimentos em fóton-fóton (B)).

O bóson de Higgs [Hig64] é a última das partículas cuja existência é prevista pelo *Modelo Standard* e que ainda não foi descoberta. O *Modelo Standard* não facilita a descoberta do bóson de Higgs, pois não dá indicações para o valor da sua massa.

Os acoplamentos do bóson de Higgs com as outras partículas do *Modelo Standard* são proporcionais à massa dessas partículas, pois a origem da massa das partículas está na importância do acoplamento destas com o bóson de Higgs. Assim, o bóson de Higgs decairá mais frequentemente para o par partícula-antipartícula de maior massa que seja inferior a metade da massa do bóson de Higgs.

A produção e decaimento do bóson de Higgs está esquematizada na figura 2.1, para valores de massa do bóson de Higgs superiores a duas vezes a massa do *quark* b .

Se a massa do bóson de Higgs for inferior a duas vezes a massa do *quark* b , mas ainda superior a duas vezes a massa do electrão, o diagrama dominante para a produção e decaimento do bóson de Higgs ainda é o mesmo, desde que se substitua o *quark* b pela partícula de massa mais elevada inferior a metade da massa do bóson de Higgs. No caso limite da massa do bóson de Higgs ser inferior a duas vezes a massa do electrão, o bóson de Higgs só poderá decair em fóton-fóton, através de um acoplamento triangular.

Os decaimentos do Z^0 determinam o tipo de acontecimentos que se esperam no estado final, se a massa do bóson de Higgs for suficientemente elevada para favorecer o seu decaimento em $b\bar{b}$. Neste caso, o decaimento do Z^0 em hádrões é um canal particularmente difícil, pois estes acontecimentos não se

distinguem dos outros decaimentos do Z^0 em hádrões em que as partículas são agrupadas em quatro conjuntos diferentes (em quatro "jets"). Os canais restantes são todos analisados em detalhe (correspondentes ao caso em que, no diagrama da figura 2.1A), f representa qualquer léptão) [DEL92].

Com o aumento da estatística acumulada, torna-se necessário compreender muito bem o fundo, para não confundir acontecimentos de fundo com os possíveis acontecimentos de bóson de Higgs. Na ausência destes, uma deficiente compreensão do fundo pode invalidar o efeito do aumento de estatística na obtenção de limites na massa do bóson de Higgs.

As características principais dos acontecimentos com um bóson de Higgs em que o Z^0 decai em léptões, são a presença de dois léptões isolados e dois conjuntos de partículas. O fundo constituído pelos acontecimentos hádrónicos com um fóton virtual adicional decaindo em um par fermião-antifermião constitui uma amostra que tem quase as mesmas características do sinal do bóson de Higgs, e portanto é importante verificar se as previsões do *Modelo Standard* são compatíveis com os dados analisados. Se o *Modelo Standard* prevê os resultados observados nos canais leptónicos, também o deve fazer nos canais hádrónicos.

- Como preparação de LEP-2.

Com a entrada em funcionamento da nova fase de LEP, com energia no centro de massa suficiente para produzir um par de bósons W , os estados finais vão ter na sua maioria quatro partículas ou jactos de partículas no estado final. A estes, juntam-se os acontecimentos f^+f^-V , também com quatro partículas ou conjuntos de partículas no estado final.

Sendo a determinação das características dos bósons W (massa, largura, acoplamentos com o Z^0) um dos objectivos principais de LEP-2, importa retirar correctamente dos dados adquiridos o fundo provocado pelos acontecimentos $\ell\ell V$ ou $q\bar{q}V$, tanto mais quanto o número de acontecimentos com bósons W é diminuto [LEP2].

Tem todo o interesse, neste contexto, comparar as previsões do *Modelo Standard* com dados adquiridos em feixe no canal f^+f^-V , mesmo a energias no centro de massa significativamente inferiores às de LEP-2. Esta comparação permite determinar a precisão com que se pode usar o *Modelo Standard* para estimar a contribuição desta componente do fundo, de forma a subtraí-la convenientemente.

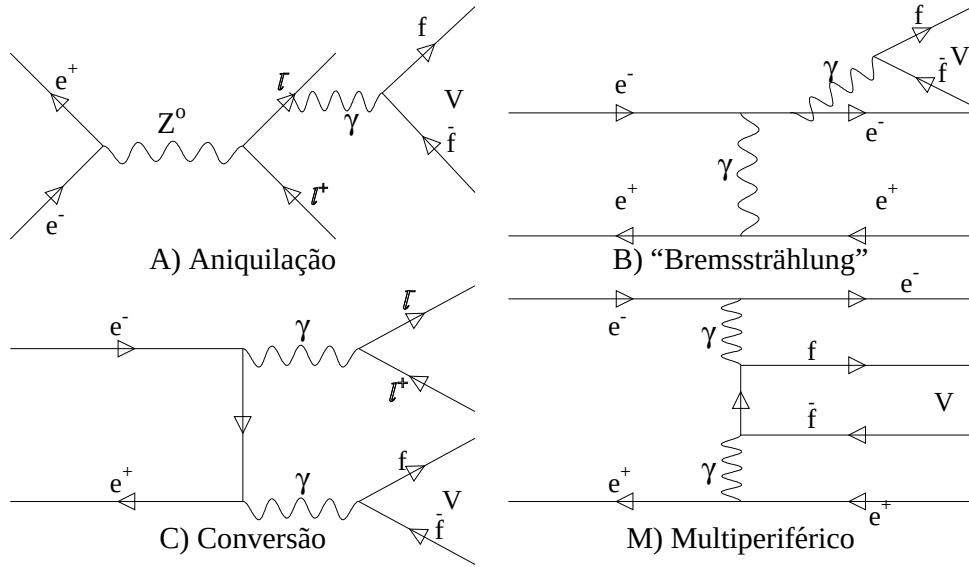


Figura 2.2: Os quatro grupos em que se enquadram os diagramas envolvidos em primeira aproximação na produção do sinal. Nem todos os grupos contribuem para todos os estados finais.

2.2 Produção do sinal

O número de diagramas que contribui para a produção do sinal varia substancialmente com as quatro partículas do estado final. Nos canais sem electrões no estado final, por exemplo, contribuem em primeira aproximação apenas 8 diagramas [CER89a], enquanto que para o estado final com quatro electrões esse número já é igual a 36 [CER89b]! Estes diagramas são classificados em quatro categorias, sendo que nem todas contribuem para alguns estados finais, de acordo com a figura 2.2.

Para as energias no centro de massa envolvidas neste estudo (aproximadamente iguais à massa do Z^0) e para a região de aceitação geométrica central de DELPHI (discutida em detalhe no próximo capítulo), o grupo dominante é o grupo "Aniquilação", com a produção do Z^0 a partir das partículas do estado inicial, e do fóton virtual a partir de um fermião. Para zonas angulares mais abrangentes (por exemplo, ângulo com o tubo de feixe abaixo de 30 graus), o grupo "Bremsstrahlung" tem grande importância nos canais com electrões no estado final, em particular se o número de electrões for igual a 4. Também para estes estados finais e para zonas angulares muito próximas do tubo de feixe (0-10 graus de ângulo com o tubo de feixe), o grupo "Multiperiférico" torna-se relevante ("Física $\gamma\gamma$ ").

Estes processos privilegiam fótons virtuais de baixas massas invariantes, originando estados finais caracterizados por dois pares de partículas com massas invariantes fortemente assimétricas: um com massa invariante elevada, próxima da massa do Z^0 , e outro com massa invariante muito baixa, inferior a alguns GeV.

As amostras de sinal foram obtidas por simulação de Monte-Carlo, usando três programas sequencialmente: um programa para gerar acontecimentos com as distribuições cinemáticas previstas pelo sinal, um programa para simular o detector DELPHI e o programa de DELPHI usado para reconstruir os dados adquiridos com o detector.

O programa utilizado para gerar os acontecimentos de sinal [Hil92] é um programa que inclui todos os diagramas em primeira ordem para estados finais com quatro férmions, e tem em conta as massas das partículas e as correcções radiativas (radiação de estado inicial e final). O programa também usa os valores correctos para os parâmetros do *Modelo Standard*, nomeadamente as constantes de acoplamento dependentes da energia no centro de massa.

O programa tem por base um programa anterior [Dav85], que não incluía as massas das partículas nem as correcções radiativas. Ambos os programas utilizam um mecanismo de vários geradores, que privilegiam diferentes regiões do espaço de fases, conforme o grupo de diagramas considerado. O utilizador do programa pode definir o peso a dar a cada gerador, de forma a obter uma maior eficiência para acontecimentos com as condições requeridas. Por exemplo, para as condições desta análise, o gerador correspondente ao grupo "Aniquilação" é utilizado em 80% dos casos para gerar acontecimentos. A cobertura completa do espaço de fases, para uma estatística gerada elevada, é garantida pela utilização numa percentagem não nula de um gerador completamente aleatório ("RAMBO"). Ambos os programas têm em conta efeitos de simetria quando os pares partícula-antipartícula no estado final são iguais.

Para DELPHI, o programa [Hil92] foi adaptado para produzir os estados finais com píões [Con91]. Estes estados finais foram obtidos usando estados finais $\ell^+\ell^-\mu^+\mu^-$, e em seguida substituindo os muões por píões. A secção eficaz destes acontecimentos obtida pelo programa (e em que foram excluídos efeitos de simetria normalmente presentes quando $\ell = \mu$) foi multiplicada pela razão entre produção de um par de píões e produção de um par de muões, medida em experiências de aniquilação e^+e^- com baixas energias no centro de massa [Bar85]. Para a consulta destas tabelas, foi usada como energia no centro de massa o valor da massa do fóton virtual. Para valores de massa do fóton virtual acima de 1.6 GeV, o valor desta razão é desprezável [Bar85] e foi tomado como zero. Esta razão tem em linha de conta tanto a produção contínua de píões como a produção das ressonâncias hadrónicas nessa zona de massa invariante (ρ, ω, ϕ),

e decaimentos em píões respeitando as respectivas distribuições angulares. A produção de outros pares de hádrões no estado final tem uma frequência inferior em uma ordem de grandeza [Ber90] e por isso não foi incluída.

A utilização posterior dos programas de simulação do detector de DELPHI e de reconstrução de acontecimentos de DELPHI (idêntico ao utilizado para reconstruir os dados adquiridos em DELPHI), descritos no próximo capítulo, permitiu converter os acontecimentos gerados em dados simulados comparáveis com a realidade.

A tabela 2.1 mostra, para alguns cortes cinemáticos, o valor das secções eficazes para os alguns estados finais, e as contribuições dos diferentes grupos de diagramas (A - Aniquilação, B - "Bremsstrahlung", C - Conversão, M - Multiperiférico). Não estão incluídos efeitos de interferência nas contribuições, mas estes podem ser contabilizados através da expressão

$$\sigma_{\text{interf.}} = \sigma_{\text{total}} - \sigma_A - \sigma_B - \sigma_C - \sigma_D$$

representando interferência positiva ou negativa conforme o sinal da expressão.

2.3 Características marcantes do sinal

Os acontecimentos produzidos pelo sinal $\ell\ell V$ caracterizam-se geralmente por uma baixa multiplicidade de partículas carregadas (inferior a 8), provenientes do ponto de interacção e distribuídas por todo o detector, e por uma energia total superior a 10% da energia no centro de massa.

Conforme o canal do sinal que se pretenda analisar, isto é, o tipo de leptão proveniente do Z^0 a considerar, assim podem aparecer diferentes características específicas desse canal. Por exemplo, nos canais em que o Z^0 ou o V decaem em τ , estes decaem também muito rapidamente, em uma ou mais partículas carregadas, dando origem a diferentes multiplicidades carregadas. Também neste exemplo a energia total é inferior à energia no centro de massa, devido à existência de neutrinos provenientes dos τ , que passam invisivelmente pelo detector transportando parte dessa energia.

As amostras utilizadas para aqui definir as características mais importantes do sinal correspondem a resultados do programa de geração, e portanto não incluem efeitos do detector ou do programa de reconstrução. Incluem no entanto

Estado final	Corte θ	Corte m_V	Total	σ contribuições			
				A.	B.	C.	M.
$eeee$	5	0.05	5.30 ± 0.07	1.19	3.46	0.12	0.70
$eeee$	15	0.05	1.75 ± 0.01	1.09	0.57	0.08	0.03
$eeee$	5	0.2	2.89 ± 0.05	0.68	1.55	0.06	0.79
$eeee$	15	0.2	0.95 ± 0.005	0.61	0.29	0.42	0.03
$ee\mu\mu$	5	0.05	3.93 ± 0.08	1.73	1.38	0.17	0.68
$ee\mu\mu$	15	0.05	2.01 ± 0.02	1.59	0.28	0.12	0.02
$ee\mu\mu$	45	0.05	0.87 ± 0.009	0.81	0.03	0.03	0.0003
$ee\mu\mu$	5	0.2	3.39 ± 0.06	1.26	1.36	0.11	0.66
$ee\mu\mu$	15	0.2	1.50 ± 0.008	1.13	0.26	0.08	0.03
$ee\mu\mu$	45	0.2	0.59 ± 0.004	0.54	0.03	0.02	0.0003
$ee\tau\tau$	5	0.2	1.26 ± 0.04	0.61	0.09	0.06	0.51
$ee\tau\tau$	15	0.2	0.64 ± 0.005	0.55	0.03	0.04	0.02
$\mu\mu\mu\mu$	5	0.2	0.70 ± 0.003	0.64	-	0.05	-
$\mu\mu\mu\mu$	15	0.2	0.62 ± 0.003	0.57	-	0.04	-
$\tau\tau\mu\mu$	5	0.2	0.66 ± 0.004	0.61	-	0.05	-
$\tau\tau\mu\mu$	15	0.2	0.58 ± 0.004	0.53	-	0.04	-

Tabela 2.1: Secções eficazes do sinal σ para alguns estados finais e cortes cinemáticos: partículas presentes no estado final, ângulo polar mínimo das partículas com o feixe (modulo 90) e massa invariante mínima para o V (em GeV). As contribuições dos diferentes grupos de diagramas, A.-Aniquilação, B.-"Bremsstrahlung", C.-Conversão, e M.-Multiperiférico, não incluem os efeitos de interferência negativa ou positiva entre eles.

os decaimentos das partículas produzidas com pequenos tempos de vida ($\tau, \pi^0, \dots$), e só são utilizadas as partículas carregadas.

Para simplificar a comparação entre os diferentes canais, foram utilizadas apenas duas amostras de sinal, uma com o estado final em $\tau^+\tau^-/\mu^+\mu^-$ para representar os canais com τ , e outra com o estado final em $\mu^+\mu^-/\mu^+\mu^-$ para representar os canais sem τ . Os canais com electrões não seriam correctamente representados ao nível do gerador, dado que este nível não contém um elemento importante na perda de energia dos electrões, a radiação destes na matéria do detector.

- Número de partículas carregadas

Como se pode ver na figura 2.3, os acontecimentos $\mu^+\mu^-V$ têm em geral quatro partículas carregadas, enquanto que os acontecimentos $\tau^+\tau^-/\mu^+\mu^-$ podem ter quatro, seis ou oito partículas carregadas.

- Energia visível

A energia total das partículas carregadas varia entre 10% e 75% da energia no centro de massa para os acontecimentos $\tau^+\tau^-/\mu^+\mu^-$ e é predominantemente elevada (superior a 2/3 da energia no centro de massa) para os acontecimentos $\mu^+\mu^-/\mu^+\mu^-$, conforme a figura 2.4.

- Distribuição das partículas no espaço

As partículas nos acontecimentos de sinal estão bem distribuídas no espaço. Em geral há pelo menos uma bem isolada, e duas aproximadas, como se pode concluir da figura 2.5, excepto em alguns acontecimentos $\tau^+\tau^-/\mu^+\mu^-$. Os acontecimentos $\tau^+\tau^-/\mu^+\mu^-$ em que o maior ângulo de isolamento é baixo (inferior a 70 graus), têm seis ou mais partículas carregadas. Nestes casos, o τ mais isolado decaiu em três ou mais partículas carregadas, próximas no espaço, deixando de haver uma partícula carregada isolada para passar a haver três partículas carregadas próximas. Naturalmente que aqui o ângulo de isolamento máximo não reflecte, como nos outros casos com quatro partículas carregadas, o ângulo entre o V e o leptão mais afastado.

Nos acontecimentos com quatro partículas carregadas, uma consequência da relação entre os ângulos de isolamento mínimo e máximo é a de poder constituir-se dois pares de partículas carregadas, um com massa invariante elevada e outro com massa invariante baixa, como se mostra na figura 2.6.

- Proximidade do γ^* a partículas carregadas

Na figura 2.7 pode também ser observado o menor ângulo entre o γ^* (soma vectorial das duas partículas que o constituem) e as partículas provenientes do Z^0 .

- Ângulo de abertura do V.

O ângulo entre as partículas provenientes do V é em geral pequeno, como se pode constatar na figura 2.8. Este ângulo está correlacionado com a massa invariante do V, daí que os pequenos valores observados são também manifestação da tendência para baixos valores da massa do V (conforme eixo horizontal da figura 2.6).

- Planaridade dos acontecimentos.

Tomando o V como a soma vectorial das partículas que o constituem, o V e os dois leptões provenientes do Z^0 devem conservar a Energia e o Momento. Três partículas com um vértice comum só conservam o Momento se estiverem num mesmo plano. Nestas condições, $\vec{P}_{l1} + \vec{P}_{l2} + \vec{P}_V = \vec{0}$, e os ângulos entre os momentos das partículas $\alpha_{ij} = \arccos(\vec{P}_i \cdot \vec{P}_j / (P_i P_j))$ devem respeitar a relação $\alpha_{l1l2} + \alpha_{l2V} + \alpha_{l1V} = 360^\circ$.

No caso dos canais sem τ , diferenças em relação a este valor são esperadas apenas devido a efeitos de radiação no estado inicial ou final, ou após a reconstrução devido a efeitos de resolução na medida dos ângulos polar e azimutais das partículas.

No caso dos canais com τ , alguma discrepância pode ser esperada, dado não serem recuperados todos os produtos de decaimento dos τ . A direcção do τ original foi perdida. Em particular, se um dos τ decair em dois neutrinos e uma partícula carregada, e esta for utilizada para reconstruir o V (soma vectorial da partícula carregada com a outra partícula seleccionada para constituir o V), a direcção do V não traduz a direcção original do V e a soma dos ângulos não chegará a 360° . O efeito da perda das partículas provenientes do τ não é tão importante caso o τ seja considerado proveniente do Z^0 , pois neste caso o τ tem mais energia e a soma dos ângulos é menos sensível às pequenas diferenças entre a direcção do τ original e a dos produtos de decaimento (estes estarão colimados num cone de pequeno ângulo de abertura em torno da direcção original do τ , devido ao facto do τ ter quase 45 GeV de energia, para uma massa de 1.718 GeV, correspondendo a um factor de 25 nas transformações de Lorentz).

A soma dos ângulos pode ser observada na figura 2.9, onde se pode constatar a predominância para valores elevados (maior no caso $\mu^+\mu^-/\mu^+\mu^-$, mas ainda assim importante no caso $\tau^+\tau^-/\mu^+\mu^-$), permitindo concluir que os acontecimentos $\ell\ell V$ (após reconstituição do V) são praticamente planos.

- Energia do V.

A energia do V corresponde à soma dos momentos das partículas constituintes do V. A tendência para baixos valores da massa do V tem também repercussão nesta variável, originando, conforme se pode observar na figura 2.10, uma tendência para baixos valores da energia do V.

Algumas características dos acontecimentos $\mu^+\mu^-/\mu^+\mu^-$ (linha a cheio) e $\tau^+\tau^-/\mu^+\mu^-$ (linha a tracejado), obtidas por simulação de Monte Carlo (gerador):

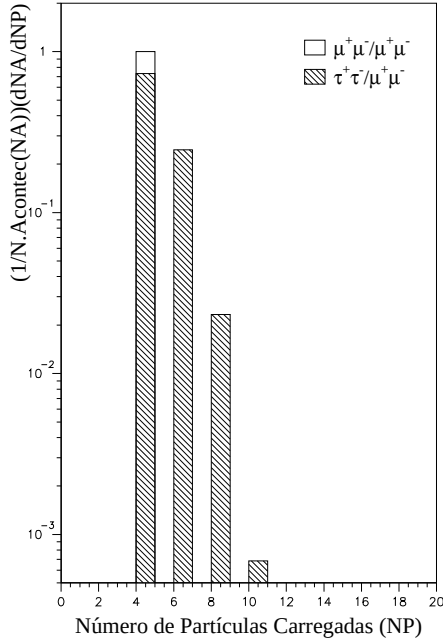


Figura 2.3: Multiplicidade

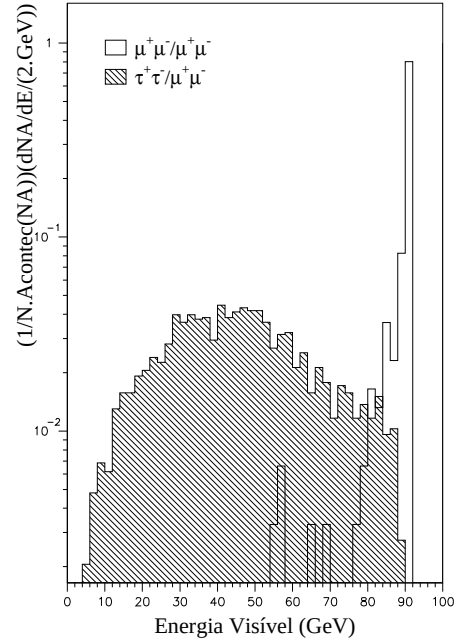


Figura 2.4: Energia visível

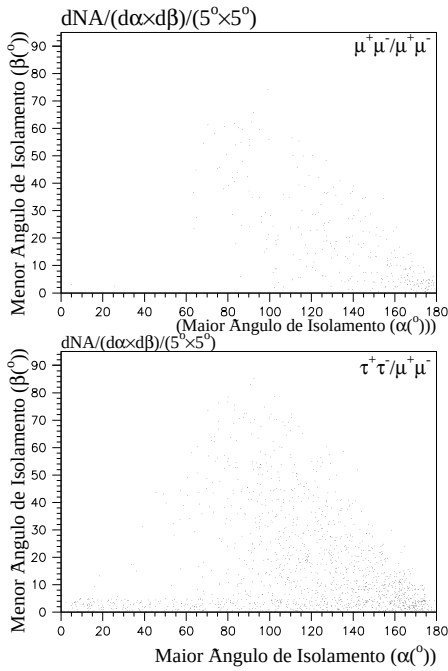
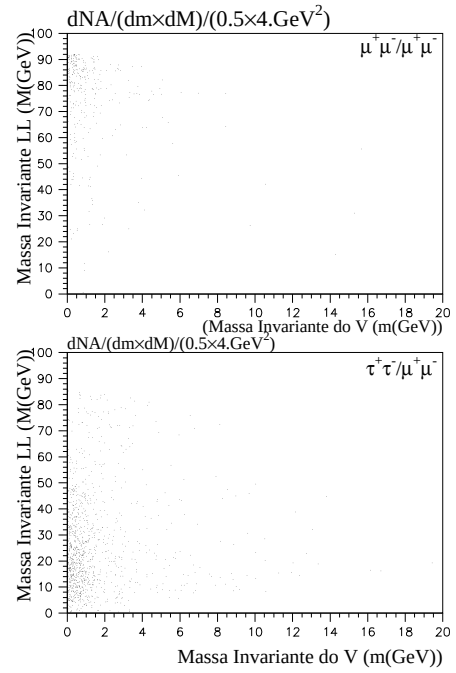


Figura 2.5: Ângulos de isolamento

Figura 2.6: Massa do par proveniente do Z^0 , em função da massa do par seleccionado para o V.

Outras características dos acontecimentos $\mu^+\mu^-/\mu^+\mu^-$ (linha a cheio) e $\tau^+\tau^-/\mu^+\mu^-$ (linha a tracejado), obtidas por simulação de Monte Carlo (gerador):

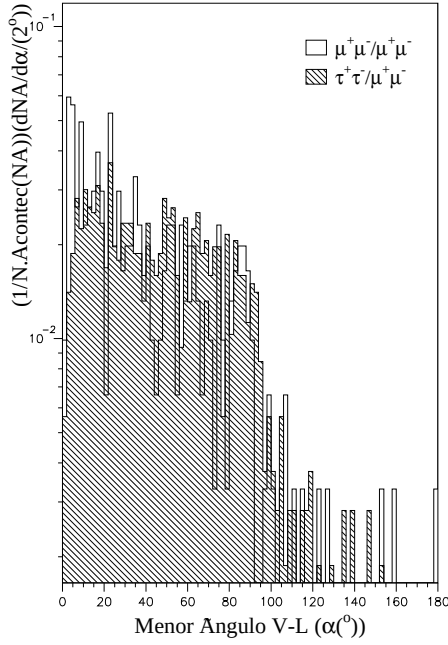


Figura 2.7: Ângulo entre o V e o lépton mais próximo

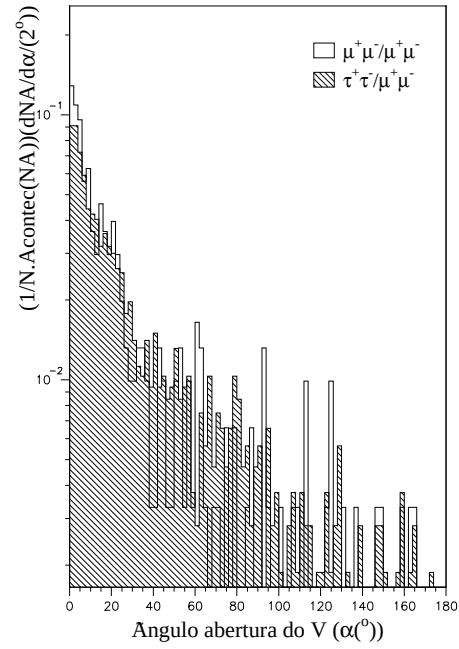


Figura 2.8: Ângulo entre as partículas do V

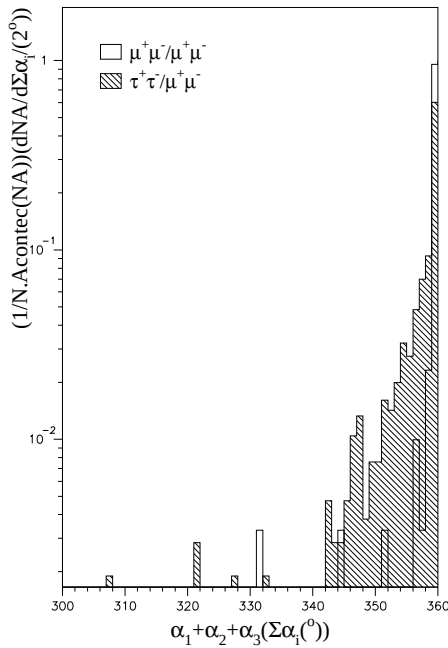


Figura 2.9: Soma dos ângulos entre as partículas

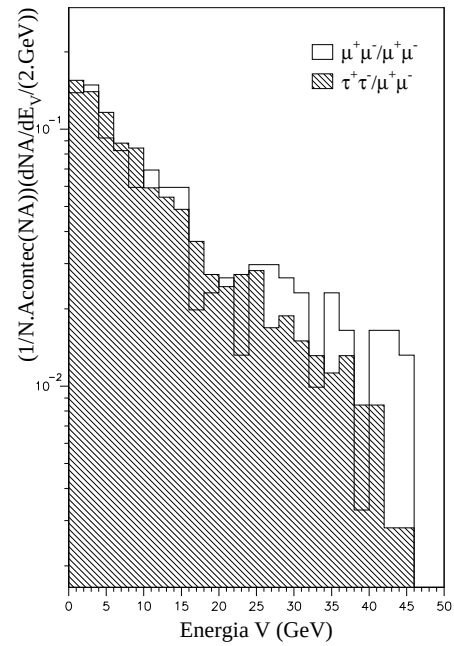


Figura 2.10: Energia do V

Capítulo 3

O dispositivo experimental

Neste capítulo procura-se apresentar o dispositivo experimental utilizado. Começa-se por uma pequena introdução ao laboratório onde os dados foram recolhidos, seguindo-se na secção 3.1 uma descrição sumária do acelerador de partículas. Nas secções posteriores serão expostas as características dos detectores usados, dando ênfase aos detectores mais importantes para este trabalho, o sistema de pré-selecção de dados, e os programas de tratamento dos dados recolhidos.

Os dados analisados neste trabalho foram acumulados pelos detectores instalados pela colaboração DELPHI no CERN, o Laboratório Europeu de Física das Partículas, localizado em Genebra, Suíça.

O CERN, inaugurado em 1954, tem disponibilizado desde 1959 a utilização do seu complexo de aceleradores de partículas por parte de colaborações de cientistas de todo o mundo, bem como de meios de cálculo para analisar os dados recolhidos. Neste contexto, um grupo de cientistas propôs em 1982 a construção de um conjunto de detectores, a instalar no novo colisionador electrão-positrão do CERN então em projecto, dando assim início à colaboração DELPHI.

O novo colisionador, o LEP (*Large Electron Positron collider*), começou a acelerar feixes de electrões e positrões em Agosto de 1989, tendo os detectores instalados iniciado a recolha de dados. Em paralelo, outras três colaborações foram constituídas, instalando os seus detectores em LEP e iniciando a recolha de dados na mesma altura: ALEPH, L3, e OPAL.

Foi no quadro da colaboração DELPHI, e usando o respectivo conjunto de detectores (sumariamente designado por detector DELPHI – DEtector with Lepton, Photon and Hadron Identification), que este trabalho foi desenvolvido.

3.1 LEP – O Colisionador Electrão–Positrão

As motivações para a construção e operação de um colisionador electrão–positrão, face a outros tipos de aceleradores, foram determinantes no projecto de LEP (*Large Electron Positron collider*). Em particular, neste tipo de colisionador há uma maior facilidade em atingir grandes energias no centro de massa (porque sendo um anel de colisão, a energia das partículas é totalmente aproveitada), e em produzir e acumular positrões, permitindo obter luminosidades elevadas.

A desvantagem de um colisionador electrão–positrão está na elevada radiação de sincrotrão libertada pelas partículas ao descreverem trajectórias curvas. Esta radiação é tanto mais elevada quanto mais baixa for a massa da partícula, quanto maior for a sua energia, e quanto menor for o raio da curvatura. Existe a necessidade de contrabalançar a energia máxima que se pretende atingir, com elevados raios de curvatura. A figura 3.1 mostra um esquema simplificado de LEP, com um perímetro aproximado de 27 km, enquadrado com outros aceleradores do CERN (PS, SPS).

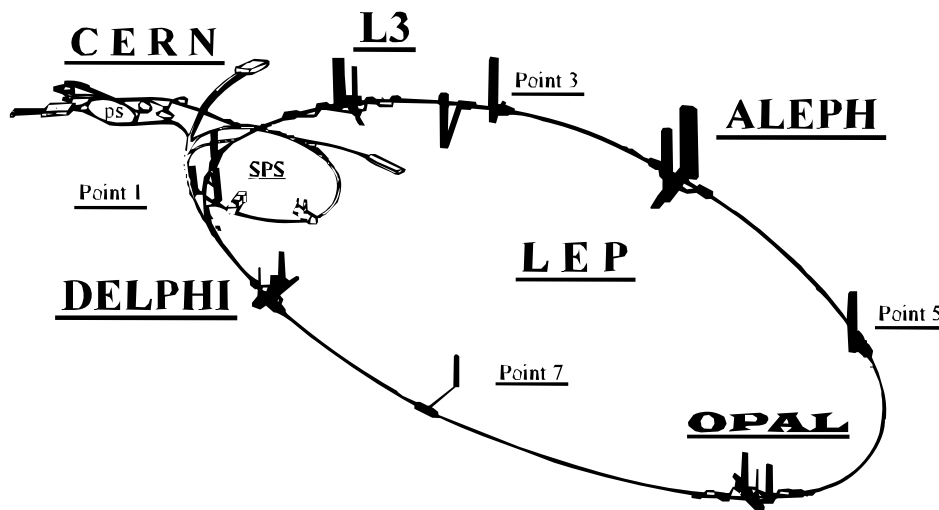


Figura 3.1: Esquema de LEP (com os elevadores de acesso às zonas experimentais, a ± 100 m de profundidade) e outros aceleradores do CERN.

Os electrões são obtidos por ionização e acelerados por um acelerador linear (LIL) até à energia máxima de 600 MeV. Este feixe é também utilizado para interagir com um alvo para produzir positrões, que são acumulados no acumulador electrão–positrão (EPA). Do acumulador EPA, os electrões e positrões são injec-

tados no PS (o sincrotrão de prótons do CERN construído nos anos 1960), onde são acelerados até à energia de 3.5 GeV. São de seguida injectados no SPS (Super Sincrotrão de Protões) para acelerarem até à energia de 20 GeV e finalmente são então injectados em LEP para serem acelerados até à energia máxima de 55 GeV (≈ 98 GeV para LEP-2).

O LEP é constituído por um conjunto de câmaras de vácuo cilíndricas, envolvidas em magnetes e cavidades de aceleração e alinhadas ao longo de uma circunferência de 26.7 Km de perímetro, a uma profundidade média de 100 m. O LEP acelera electrões no sentido dos ponteiros do relógio e positrões no sentido directo, até à energia pretendida (metade da energia no centro de massa), para depois forçá-los a colidir frontalmente nos pontos de interacção. Foram concebidos 8 pontos de interacção e estão 4 em utilização, onde estão instaladas as 4 experiências LEP. Nos 4 pontos vazios, os feixes são separados com separadores electrostáticos, e a 1.3 m de cada lado dos pontos de interacção está colocado um quadropolo com a finalidade de reduzir a dispersão do feixe para valores $\sigma_x = 150\mu\text{m}$ (horizontal) e $\sigma_y = 10\mu\text{m}$ (vertical).

Os feixes são constituídos por quatro pacotes de $\approx 2 \times 10^{11}$ electrões (positrões) (8 pacotes a partir de meados de 1993), que percorrem o anel de LEP 11000 vezes por segundo. Para estes valores, a luminosidade é de [ALL84]

$$\mathcal{L} = n_e n_p k f / (4\pi \sigma_x \sigma_y) \approx 1.0 \times 10^{31} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} (k = 4)$$

em que n_e (n_p) é o número de electrões (positrões) em cada pacote, k é o número de pacotes, f é a frequência de revolução dos feixes em LEP ($c/26.7\text{km} \approx 11\text{kHz}$) e $\sigma_{x,y}$ (em cm) a dispersão horizontal e vertical da secção transversal do feixe.

Para minimizar o ruído introduzido nos detectores pela radiação de sincrotrão, cada ponto de interacção está colocado no meio de uma secção recta de 30 m de comprimento, e são colocados colimadores a 7.65 m e a 8.55 m de cada lado, com abertura de ± 30 mm (superior a $10\sigma_{\text{feixe}}$ em LEP), e a 100 m e 200 m de cada lado, com abertura de ± 15 mm.

LEP foi idealizado para funcionar em duas fases: a primeira com energias no centro de massa próximas da massa do bóson Z^0 ($91.2 \text{ GeV}/c^2$), e a segunda (a iniciar em 1996) com energias no centro de massa acima do limiar de produção de um par de bósons W ($160 \text{ GeV}/c^2$).

As características gerais de LEP, incluindo o período em que foi realizado este trabalho, são resumidas na tabela 3.1.

	LEP (1 ^a fase)	LEP (2 ^a fase)
Início de colisões	1989	(1996)
Energia máxima do Feixe	55 GeV	88-98 GeV
Luminosidade nominal	$1.1 \times 10^{31} cm^{-2} s^{-1}$	$2 \times 10^{31} cm^{-2} s^{-1}$
N ^o Regiões Experimentais	4	4

Tabela 3.1: Características principais do acelerador LEP.

Na primeira fase, a energia no centro de massa próxima da massa do Z^0 permite obter uma grande quantidade de acontecimentos resultantes do decaimento do Z^0 , em partículas carregadas. Estes são ainda acompanhados por acontecimentos não ressonantes, de que se destaca a dispersão elástica electrão–positrão (os acontecimentos "Bhabha").

O total do número de acontecimentos com o bosão Z^0 decaindo em hadrões, acumulado pelas quatro experiências a funcionar em LEP, foi da ordem de 16 milhões ao longo dos anos de 1989 a 1994.

3.2 DELPHI – Um conjunto de detectores

DELPHI, acrónimo para designar um detector global cobrindo quase todo o ângulo sólido de 4π , com capacidade de identificação de leptões, fotões e hadrões, é na verdade um conjunto de detectores de âmbito muito geral, incluindo a medida dos momentos das partículas carregadas, da energia das partículas, e ainda a identificação indirecta das partículas, através da medição também da sua velocidade.

Uma descrição em pormenor de DELPHI pode ser consultada em [DEL83]. Aqui apenas um resumo do detector é feito, com ênfase para os módulos relevantes para esta análise.

A determinação da carga e a medida do momento para as partículas carregadas faz-se, em geral, usando detectores de posição imersos num campo magnético.

Um esquema em perspectiva de DELPHI, apresentando o corpo central (baril) e um dos corpos laterais (tampas da frente), está exposto na figura 3.2a)), junto com o sistema de coordenadas utilizado (figura 3.2b)). O eixo OZ tem a direcção do feixe e o sentido dos electrões incidentes (coordenada longitudinal),

o eixo OX tem direcção perpendicular ao feixe e está no plano horizontal (contendo o eixo OZ) e o eixo OY tem direcção perpendicular ao feixe e está no plano vertical (contendo o eixo OX). Os eixos OX e OY definem o plano transversal. Também são utilizadas coordenadas esféricas: o ângulo polar θ é o ângulo com o eixo OZ e o ângulo ϕ é o ângulo azimutal com o plano transversal.

Na figura 3.3 pode-se observar o quadrante superior direito de um corte longitudinal(a)) (contendo o eixo do feixe) e de um corte transversal(b)) (contendo o ponto de colisão). A zona do barril é definida pela cobertura do ângulo polar θ de 45° a 135° (e de 0° a 360° no ângulo azimutal ϕ), e a zona da frente pela região complementar no ângulo polar ($0^\circ < \theta < 45^\circ$, ou $135^\circ < \theta < 180^\circ$).

O detector de posição mede pontos de uma trajectória circular, donde se pode calcular a curvatura κ , e cujo raio $R(= 1/\kappa)$ depende do momento P da partícula com carga q de acordo com a relação (campo homogéneo ao longo da trajectória, de intensidade B):

$$P(\text{GeV}/c) = \frac{\text{sen}\theta}{0.3R(\text{m})B(\text{Tesla})q(\text{unidades de } e)} \quad (3.1)$$

em que θ é o ângulo entre $\vec{P}$ e $\vec{B}$.

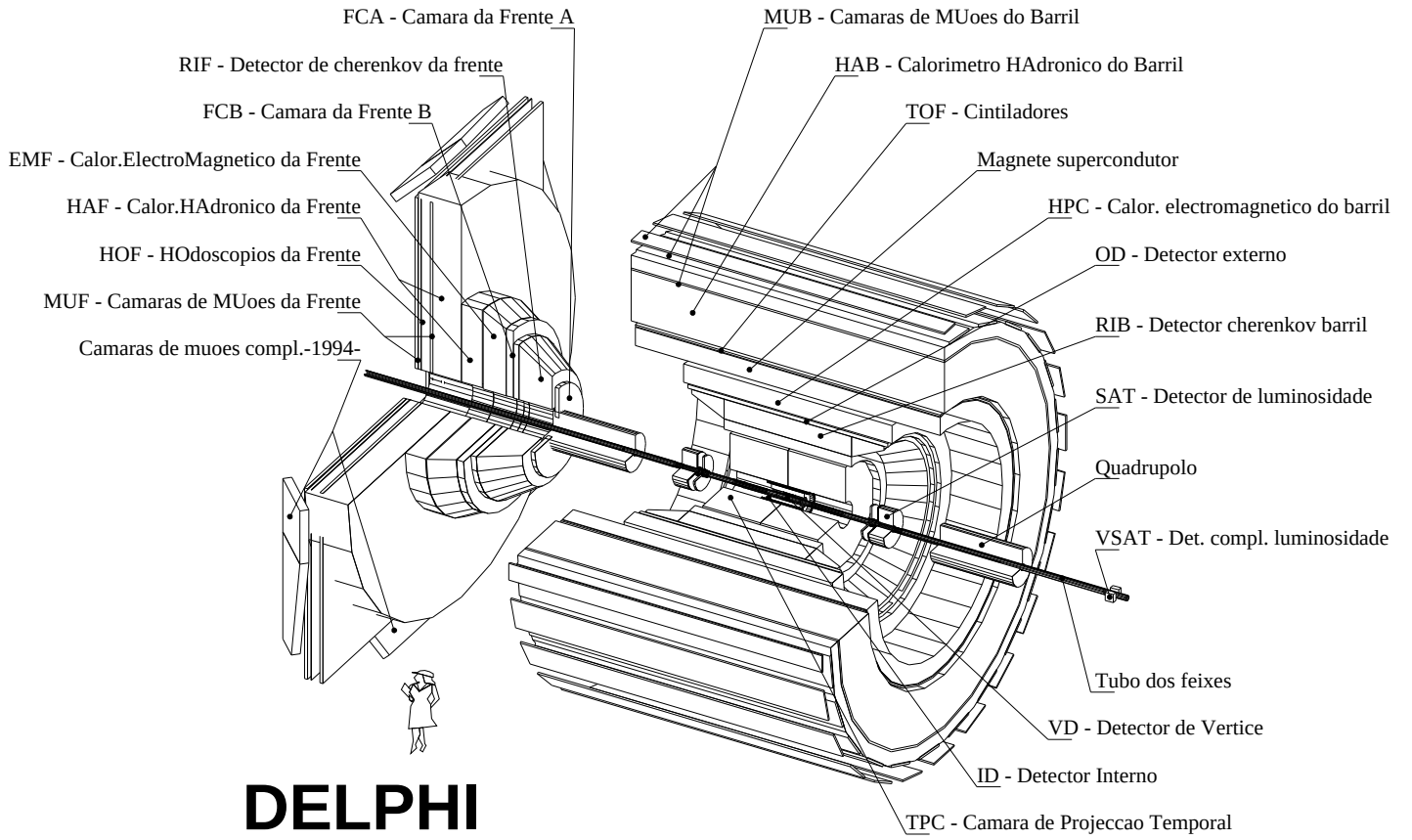
O erro na determinação da curvatura κ depende do número de pontos medidos e respectivo erro, e do comprimento transversal da trajectória (comprimento da trajectória num plano perpendicular a $\vec{B}$ (ao eixo dos feixes neste caso)). A resolução na medida do momento depende deste erro e da forma e intensidade do campo magnético (através de θ e B em 3.1).

As especificações do campo magnético e do aparelho que o produz são uma condicionante importante no desenho do resto do detector. Em DELPHI, o campo magnético é homogéneo (a 1%) e paralelo ao feixe com a intensidade de 1.2 Tesla. É produzido por um solenóide supercondutor, de 7.4 m de comprimento e 5.2 m de diâmetro, centrado no ponto de colisão. Na figura 3.4 mostra-se o diagrama das linhas de força do campo, visto num quadrante de um corte longitudinal (solenóide incluído em DELPHI, em que ferro é usado para conter o fluxo do campo magnético).

Dada a simetria cilíndrica do solenóide, DELPHI tem a imagem aproximada de um barril com duas tampas (as tampas da frente).

Dos objectivos específicos de DELPHI, destacam-se a determinação precisa do vértice primário, capacidade de informação tridimensional de quase todos os

a)



b)

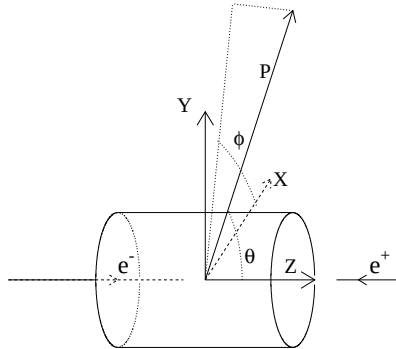


Figura 3.2: Esquema em perspectiva do corpo central(Barril) e parte frontal A(frente) do detector DELPHI (a)), e sistema de coordenadas usado para referenciar os pontos (b)).