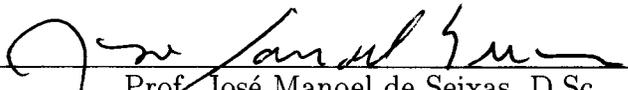


SISTEMA ANALÓGICO PARA A FORMAÇÃO DO SINAL DE VALIDAÇÃO  
DE UM CALORÍMETRO CINTILANTE

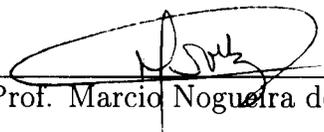
Augusto Santiago Cerqueira

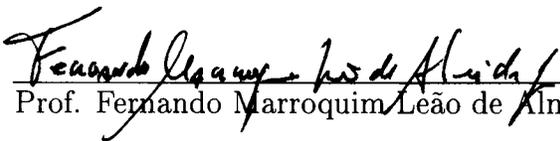
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

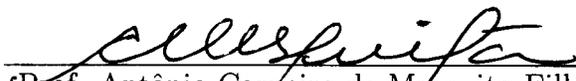
Aprovada por:

  
Prof. José Manoel de Seixas, D.Sc.

  
Prof. Luiz Pereira Calôba, Dr.Ing.

  
Prof. Marcio Nogueira de Souza, D.Sc.

  
Prof. Fernando Marroquim Leão de Almeida Jr., D.Sc.

  
Prof. Antônio Carneiro de Mesquita Filho, Dr.d'Etat

  
Prof. Sidnei Noceti Filho, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

OUTUBRO DE 2002

CERQUEIRA, AUGUSTO SANTIAGO

Sistema Analógico para a Formação  
do Sinal de Validação de um calorímetro  
Cintilante [Rio de Janeiro] 2002

XV, 157 pp., 29,7 cm (COPPE/UFRJ,  
D.Sc., Engenharia Elétrica, 2002)

Tese - Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, COPPE

1. Instrumentação em Eletrônica 2.
- Soma Analógica 3. Validação de Eventos
4. Física de Altas Energias

I.COPPE/UFRJ    II.Título (série)

## Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente a minha família, pais (Paulo e Carmen), irmão (Bráulio) e esposa (Perla), pelo amor, amizade e pelo suporte ao longo destes cinco anos de trabalho, incluindo o suporte financeiro. Eles são os principais responsáveis pela realização deste trabalho.

Aos meus orientadores, José Manoel Seixas e Luiz Pereira Calôba, agradeço por tudo que me ensinaram, não somente como educadores, cientistas e profissionais, mas também como homens e amigos que foram ao longo destes seis anos de trabalho, desde a iniciação científica em 1997.

A todos os amigos do Laboratório de Processamento de Sinais, ou que já passaram por ele, em especial ao André, Bruno, Denis, Felipe, João, Jorge, Paulo Vitor, Ricardo, Rodrigo, Valéria e Wanderlei, listados em ordem alfabética para evitar problemas.

A todos os colegas da colaboração que nos ajudaram em muitos momentos e que propiciaram um ambiente muito saudável e prazeroso de trabalho. Gostaria de agradecer em especial ao prof. James Pilcher (Jim) da Universidade de Chicago, EUA, ao coordenador do *testbeam* Robert Stanek (Bob), pesquisador do laboratório de Argonne, EUA, ao coordenador do ATLAS Marzio Nessi, pesquisador do CERN, Suíça, ao coordenador de projeto do calorímetro de Telhas prof. Rupert Leitner, da Universidade de Praga, República Tcheca, ao coordenador da eletrônica do Telhas François Vazeille, do Laboratório de Física Corpuscular da Universidade Blaise Pascal, França, ao pesquisador Dominique Pallin, do Laboratório de Física Corpuscular da Universidade Blaise Pascal, França, ao colega Tomas Davidek, pesquisador da Universidade de Praga, República Tcheca, e aos amigos Zdenek e Jam, da República Tcheca.

Finalmente, agradeço a todos os meus amigos que não tiveram os nomes citados, mas que são muito importantes na minha vida.

Foi muito bom poder realizar este trabalho. Sempre lembrarei destes cinco anos com muita alegria por ter tido a oportunidade de trabalhar com prazer e de ter feito tantos amigos especiais.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

## SISTEMA ANALÓGICO PARA A FORMAÇÃO DO SINAL DE VALIDAÇÃO DE UM CALORÍMETRO CINTILANTE

Augusto Santiago Cerqueira

Outubro/2002

Orientadores: José Manoel Seixas  
Luiz Pereira Calôba

Programa: Engenharia Elétrica

Neste trabalho, apresentamos o desenvolvimento do sistema que gera os sinais das torres de validação de eventos e o sinal de evidência de múons para um calorímetro, usado em experimentos de física de altas energias, em operação num ambiente de alta taxa de eventos. Duas topologias (uma delas resistente aos níveis de radiação do experimento) para a soma de sinais diferenciais rápidos são apresentadas e sistemas auxiliares são desenvolvidos ou aplicados ao longo do projeto para análise, controle da qualidade de produção e/ou o processamento dos sinais. A integração do circuito com a cadeia eletrônica do detector foi realizada e as especificações para a integração com o sistema de validação *on-line* foram elaboradas. São apresentados resultados de testes de calibração do detector em feixe de partículas. Um estudo detalhado da performance do sinal de validação de múons foi também realizado, demonstrando que, para se obter uma melhor performance, é necessário que seja feita a soma dos dois sinais referentes a mesma célula da terceira camada do calorímetro. Mais de mil circuitos já foram produzidos e o índice de rejeição do controle de qualidade foi menor do que 2%.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

ANALOG SYSTEM FOR BUILDING THE TRIGGER SIGNAL OF A  
SCINTILLATING CALORIMETER

Augusto Santiago Cerqueira

October/2002

Advisors: José Manoel Seixas

Luiz Pereira Calôba

Department: Electrical Engineering

In this work, the system for building the trigger tower and the muon trigger signals for a calorimeter used in a high energy physics experiment is presented. Two topologies for the sum of fast differential signals were developed and a number of auxiliary systems were designed and applied throughout the project for analysis, quality control of the production and signal processing. The circuit was integrated into the calorimeter's electronics chain and the specifications for the integration with the event validation system were defined. Results from laboratory and calorimeter calibration tests are presented. An extensive study of the muon trigger signal was performed, showing that the sum from two third layer signals of the calorimeter is required to achieve a better performance. More than thousand boards were already produced with less than 2% rejection ratio.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	O Ambiente . . . . .	1
1.2	Descrição do Trabalho . . . . .	3
1.3	Documentação . . . . .	4
<b>2</b>	<b>O Ambiente Experimental</b>	<b>5</b>
2.1	Colisionadores de Partículas e o LHC . . . . .	5
2.2	Os Detectores e o ATLAS . . . . .	8
2.3	O Calorímetro de Telhas . . . . .	12
2.4	O Sistema de Validação de Eventos do ATLAS . . . . .	14
2.4.1	O Primeiro Nível de Validação de Eventos . . . . .	15
2.4.2	Os Segundo e Terceiro Níveis de Validação de Eventos . . . . .	15
<b>3</b>	<b>O Sinal do Calorímetro de Telhas</b>	<b>19</b>
3.1	Cadeia Eletrônica do Telhas . . . . .	19
3.1.1	O Circuito 3-em-1 . . . . .	21
3.1.2	O Circuito Digitalizador . . . . .	23
3.1.3	A Placa de Interface . . . . .	23
3.2	O Sinal do Calorímetro . . . . .	26
3.3	Obtenção <i>on-Line</i> da Curva de Carga do Sinal do Telhas . . . . .	27
3.3.1	A Porta Linear . . . . .	28
3.3.2	Performance da Porta Linear . . . . .	31
3.3.3	Obtenção da Curva de Carga . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Somador Discreto</b>	<b>38</b>
4.1	O Circuito . . . . .	38

4.2	Testes em Laboratório . . . . .	40
4.3	Testes com Feixe de Partículas . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Somador com Amplificadores Operacionais</b>	<b>47</b>
5.1	Especificações de Projeto . . . . .	47
5.2	O Projeto do Circuito . . . . .	48
5.2.1	O Estágio de Entrada . . . . .	49
5.2.2	O Estágio de Saída . . . . .	52
5.2.3	O Circuito Final . . . . .	53
5.3	Estimativas de Dispersão de Ganho e Ruído . . . . .	56
5.3.1	Dispersão do Ganho . . . . .	58
5.3.2	Nível de Ruído . . . . .	59
5.4	Implementação do Circuito . . . . .	65
<b>6</b>	<b>Integração do Sistema</b>	<b>69</b>
6.1	Integração do Somador com o Telhas . . . . .	69
6.1.1	Os Cabos de Entrada do Somador . . . . .	71
6.1.2	Cabos de Saída do Somador . . . . .	74
6.1.3	Os Módulos de Produção do Telhas . . . . .	79
6.2	Integração do Somador com o Primeiro Nível de Validação . . . . .	84
6.2.1	Transmissão . . . . .	85
6.2.2	Pré-processamento . . . . .	86
<b>7</b>	<b>Performance do Circuito</b>	<b>88</b>
7.1	Testes em Laboratório . . . . .	88
7.2	Testes com Feixe de Partículas . . . . .	91
<b>8</b>	<b>Performance Para o Sinal de Múons</b>	<b>100</b>
8.1	Testes com Feixe de Partículas . . . . .	101
8.1.1	Sinal de Múon versus Ruído . . . . .	101
8.1.2	Análise do Circuito Final (ganho 225) . . . . .	106
<b>9</b>	<b>Avaliação da Resistência à Radiação</b>	<b>111</b>
9.1	Efeito da Radiação em Componentes e Circuitos Eletrônicos . . . . .	111
9.1.1	Deposição de Energia nos Óxidos . . . . .	112

9.1.2	Deposição de Energia no Silício . . . . .	112
9.2	Condições de Radiação para o Telhas . . . . .	113
9.3	Validação da Pré-Produção do somador . . . . .	115
9.3.1	Configuração . . . . .	116
9.3.2	Resultados . . . . .	121
9.4	Validação da Produção . . . . .	126
<b>10</b>	<b>Produção</b>	<b>127</b>
10.1	A Produção do Somador . . . . .	127
10.2	<i>Burn-in</i> . . . . .	130
10.3	Testes de Performance das Placas . . . . .	132
10.3.1	Os Critérios para Aprovação . . . . .	133
10.3.2	O Banco de Dados . . . . .	134
<b>11</b>	<b>Conclusão</b>	<b>137</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>140</b>
<b>A</b>	<b>Produção Científica</b>	<b>145</b>
<b>B</b>	<b>Cabos do Somador</b>	<b>152</b>
B.1	Montagem dos Cabos de Entrada . . . . .	152
B.2	Cabos de Saída do Somador . . . . .	153

# Lista de Figuras

1.1	Ilustração do LHC com os seus principais detectores, o ATLAS e o CMS. . . . .	2
2.1	Localização geográfica do LHC. . . . .	7
2.2	Geometria típica dos detectores usados em experimentos de física de altas energias. . . . .	9
2.3	Decaimento típico das partículas, relacionando-as às camadas de um detector. . . . .	10
2.4	Ilustração do detector ATLAS. . . . .	11
2.5	Vista de um corte longitudinal no ATLAS. . . . .	11
2.6	Ampliação da parte central do corte longitudinal, mostrando a interação das partículas em cada calorímetro. . . . .	12
2.7	O Telhas (esquerda) e o diagrama de um módulo do calorímetro (direita). . . . .	13
2.8	Definição geométrica das células dos módulos do calorímetro de Telhas	17
2.9	Diagrama em blocos do funcionamento do sistema de aquisição/validação do detector ATLAS. . . . .	18
3.1	Diagrama em blocos simplificado da cadeia eletrônica que processa o sinal do Telhas. . . . .	20
3.2	Esquema em blocos do circuito 3-em-1. . . . .	22
3.3	Esquemático elétrico da parte de processamento analógico do circuito 3-em-1. . . . .	24
3.4	Diagrama em blocos da leitura e transmissão do sinal para uma gaveta de um módulo do barril . . . . .	25
3.5	Diagrama em blocos da placa de interface do Telhas. . . . .	26

3.6	O sinal típico do calorímetro de Telhas. . . . .	27
3.7	Diagrama em blocos da porta linear utilizada para obtenção da curva de carga do sinal do Telhas . . . . .	29
3.8	Esquemático elétrico da porta linear . . . . .	30
3.9	Transmissão de sinal da porta linear . . . . .	32
3.10	Transientes da Porta Linear . . . . .	33
3.11	Arranjo experimental utilizado para obtenção <i>on-line</i> da curva de carga do calorímetro de Telhas com feixe de partículas. . . . .	35
3.12	Curva de carga do sinal do calorímetro de telhas obtida com o uso da porta linear. . . . .	37
4.1	Esquemático do somador baseado em transistores discretos. . . . .	39
4.2	Recuperação a saturação para um pulso de entrada de $\pm 4$ V. . . . .	42
4.3	Configuração experimental do calorímetro para o teste com feixe de partículas com o somador discreto. O longo módulo no centro é o módulo 0 e ao redor temos os 5 módulos de dimensões menores. . . . .	43
4.4	Correlação entre o sinal do somador e a correspondente soma <i>software</i> para eventos de píons. . . . .	44
4.5	Energia depositada no detector por píons de 100 GeV. . . . .	45
4.6	Linearidade do somador para píons de 20, 100, 300 GeV. . . . .	46
5.1	Diagrama em blocos da versão final do somador. . . . .	49
5.2	Configuração básica para o MAX435 (a) e seu modelo elétrico. . . . .	50
5.3	Curvas de operação do amplificador MAX435 para dissipação de potência e máxima corrente de saída, conforme o valor de $R_{SET}$ . . . . .	51
5.4	Topologia do estágio de saída do somador. . . . .	52
5.5	Esquemático elétrico do somador com ganho 8 para ambas as saídas do circuito. . . . .	54
5.6	Esquemático elétrico do somador que será utilizado no LHC (ganho de 225 para a saída de múons). . . . .	57
5.7	Transformada discreta de Fourier do sinal de saída do circuito 3-em-1. . . . .	60
5.8	Exemplo de um sinal de ruído no tempo. . . . .	61

5.9	Módulo da resposta em frequência estimada para ambas as saídas do somador. . . . .	63
5.10	Módulo da resposta em frequência estimada para a saída da soma (esquerda) e para a saída de múons. . . . .	65
5.11	Foto da parte superior (acima) e inferior (abaixo) do circuito somador.	67
5.12	Foto do circuito somador. . . . .	68
6.1	Geometria de um módulo do barril com a quantidade e tamanho das fibras para cada célula. . . . .	75
6.2	Geometria de um módulo do barril estendido com a quantidade e comprimento das fibras para cada célula. . . . .	76
6.3	Módulo do barril onde foi marcada a definição geométrica das células.	80
6.4	Módulo de produção do barril estendido totalmente equipado com a parte ótica e mecânica. . . . .	81
6.5	Gaveta eletrônica do detector pronta para ser inserida em um módulo de produção do Telhas. . . . .	82
6.6	Detalhe do trabalho de interconexão entre as partes interna e externa da gaveta . . . . .	83
6.7	Detalhe da interconexão da gaveta já realizada. . . . .	83
6.8	Configuração usada para os testes de calibração dos módulos de produção do Telhas em feixe de partículas. . . . .	84
6.9	Esquema do cabo usado para transmitir os sinais dos módulos do Telhas até o <i>rack</i> do primeiro nível de validação de eventos. . . . .	86
7.1	Arranjo experimental para os testes de laboratório. . . . .	89
7.2	Saída do circuito 3-em-1 e a correspondente saída soma do somador. .	90
7.3	Saída de múons do somador juntamente com a saída <i>high-gain</i> do circuito 3-em-1. . . . .	91
7.4	Configuração do detector para os testes com feixe de partículas. . . .	93
7.5	A saída do somador, a respectiva soma <i>software</i> e a correlação entre eles. . . . .	94
7.6	Linearidade do somador para feixe de píons. . . . .	95

7.7	A carga injetada em cada 3-em-1, a energia da soma <i>software</i> e a energia na saída do somador. . . . .	96
7.8	<i>Fitting</i> linear da resposta do somador para eventos de injeção de carga.	97
7.9	Pulso de saída do somador para eventos de injeção de carga, reconstruídos com uma taxa de amostragem de 1 ns. . . . .	98
8.1	Eficiência na detecção de múons (soma de duas saídas do somador). .	102
8.2	Energia na saída de múons do somador. . . . .	103
8.3	Relação sinal-ruído para múons de 180 GeV incidindo em $\eta = 1,05$ . .	104
8.4	Relação sinal-ruído para a saída do somador como função da HV da foto-multiplicadora. . . . .	105
8.5	Separação entre o sinal de múon e o ruído, levando em consideração as melhoras obtidas na configuração de leitura dos sinais. . . .	107
8.6	Separação entre o sinal de múon e o ruído da saída de múons do somador. . . . .	109
8.7	Separação entre o sinal de múon e o ruído da saída de múons do somador. . . . .	110
9.1	Os mapas de radiação para o experimento ATLAS gerados pelo GEANT. . . . .	114
9.2	Diagrama em blocos da parte analógica do sistema de injeção de sinais.	117
9.3	Diagrama de tempos do sinais de controle do sistema de injeção de sinais. . . . .	119
9.4	Interface gráfica do sistema de aquisição e monitoração desenvolvido para o teste de radiação da pré-produção do somador. . . . .	120
9.5	Arranjo experimental para os testes de resistência à radiação para validação da pré-produção do somador. . . . .	121
9.6	Histograma da amplitude da saída da soma do circuito somador para os eventos adquiridos ao longo da exposição a radiação gama. . . . .	122
9.7	Evolução da amplitude do sinal de saída do somador ao longo de toda a duração do teste de radiação, para uma das placas testadas. . . . .	124
10.1	Fluxograma da produção do somador. . . . .	128

10.2	Folha de controle de qualidade para uma das placas já enviada ao CERN. . . . .	135
10.3	Página Web de entrada para o banco de dados, aonde as folhas de controle de qualidade de cada somador produzido é armazenada, podendo ser acessada por toda a colaboração. . . . .	136
B.1	Proposta de como agrupar os cabos de entrada do somador, de forma a facilitar a montagem. . . . .	153
B.2	Cabos de entrada do somador. . . . .	154
B.3	Esquema dos cabos de saída do somador para o barril. . . . .	155
B.4	Esquema dos cabos de saída do somador para o barril estendido. . .	156
B.5	Foto dos cabos de saída utilizados para transmitir os sinais das saídas dos somadores até o painel de interface da gaveta do detector. . . . .	157

# Lista de Tabelas

2.1	Estrutura das torres de validação do calorímetro de Telhas para o barril (acima) e para o barril estendido (abaixo). . . . .	16
3.1	A performance do circuito em simulação e em laboratório. . . . .	31
3.2	Percentual de carga para diferentes fatias do sinal do calorímetro, obtidos <i>on-line</i> através da porta linear. . . . .	36
4.1	Resumo da performance do circuito em testes de laboratório. . . . .	41
5.1	Valor dos parâmetros para o cálculo teórico do ganho do circuito somador. . . . .	53
5.2	Lista de componentes final do somador. . . . .	56
5.3	Valor e dispersão dos parâmetros para o cálculo teórico da dispersão do ganho do circuito somador. . . . .	58
5.4	Valor do ganho e de sua dispersão ( $\sigma$ ) para as saídas do circuito somador. . . . .	59
5.5	Resposta em frequência do WTA (estágio de entrada do somador). Estimado a partir das curvas da folha de dados do dispositivo. . . . .	62
5.6	Resposta em frequência do amplificador operacional. . . . .	62
5.7	Resposta em frequência do filtro $R//C$ do circuito somador. . . . .	63
5.8	Ruído estimado para ambas as saídas do circuito somador. . . . .	65
6.1	Diferentes versões do circuito somador devido as modificações de projeto. . . . .	70
6.2	Comprimento dos cabos de entrada do somador, calculados de forma a alinhar os sinais nas entradas de cada somador. . . . .	77

6.3	Continuação da tabela anterior. Comprimento dos cabos de entrada do somador, calculados de forma a alinhar os sinais nas entradas de cada somador. . . . .	78
7.1	Estudo do ruído do sistema de leitura (3-em-1 + somador). . . . .	92
7.2	Ruído na saída da soma do somador medido durante os testes com feixe de partículas. . . . .	99
8.1	Melhora na relação sinal-ruído, medido para a saída de múons do somador no barril estendido $\eta = 1,05$ . . . . .	106
9.1	Níveis de radiação simulados para o pior caso dentre os somadores, para os 10 anos de funcionamento previstos para o LHC. . . . .	115
9.2	Performance do somador antes e depois do teste de resistência à radiação gama. . . . .	123
9.3	Performance do somador antes e depois da exposição do circuito somador ao fluxo de nêutrons. . . . .	125
9.4	Fatores de segurança e níveis de radiação, a que uma pequena parte das placas da produção, deverão ser expostas. . . . .	126

# Capítulo 1

## Introdução

Em experimentos que envolvem uma alta taxa de geração de eventos, sendo interessante apenas uma pequena parte dos eventos gerados, sistemas de validação de eventos *on-line* são desenvolvidos para que seja possível eliminar a parte não-interessante dos dados, reduzindo a quantidade de informação a ser armazenada.

A alta taxa de eventos exige que o sistema de validação *on-line* seja forçado a processar rapidamente a informação, criando, eventualmente, a necessidade de compactação da informação, muitas vezes realizada pela redução da dimensão do espaço de dados da entrada.

Para atender aos requisitos de velocidade, resolução e faixa dinâmica do experimento, o sistema de validação *on-line* pode requerer um processamento analógico de alto desempenho que venha a agrupar informações, com o objetivo de tornar a informação menos granular e reduzir, assim, a complexidade de processamento posterior.

### 1.1 O Ambiente

Na física experimental de altas energias, detectores altamente segmentados têm sido projetados para operar em ambientes que se caracterizam por apresentarem uma taxa de eventos que tem crescido com o passar do tempo. Este é o caso dos calorímetros, importantes detectores multi-célulares, que são usados para medir a energia de partículas aceleradas em grandes colisionadores de partículas. Os calorímetros são usados não apenas para determinar a energia das partículas

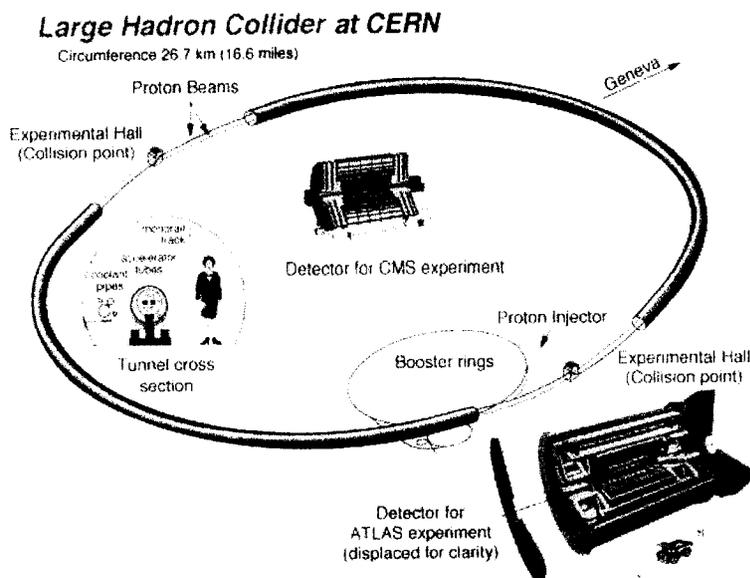


Figura 1.1: Ilustração do LHC com os seus principais detectores, o ATLAS e o CMS.

resultantes de cada colisão, mas também para determinar a classe à qual uma dada partícula pertence, devido à sua granularidade fina (dezenas a centenas de milhares de células de leitura).

No CERN (Laboratório Europeu para a Física de Partículas), localizado na Suíça, encontra-se em fase final de desenvolvimento o experimento LHC (*Large Hadron Collider*), que colisionará prótons com 14 TeV no centro de massa, em períodos de 25 nanosegundos. Ao redor dos pontos de colisão, dois complexos conjuntos de detectores (ATLAS e CMS) com leitura eletrônica serão colocados em funcionamento, visando fornecer uma informação detalhada das reações produzidas por estas colisões. Desta forma, espera-se poder avançar significativamente no conhecimento da estrutura da matéria. Na Figura 1.1, podemos ver uma ilustração do LHC com seus principais detectores.

O sistema de validação *on-line* de eventos do ATLAS utiliza a informação detalhada da calorimetria, reduzindo a granularidade da aquisição (número de canais a serem analisados) pela soma analógica das células que compõem as chamadas torres de validação de eventos de seus calorímetros, atingindo uma redução da dimensão do conjunto de dados de até 5 vezes.

## 1.2 Descrição do Trabalho

Neste trabalho, apresentamos todo o desenvolvimento e projeto do circuito somador ativo utilizado na geração das torres de validação de eventos do calorímetro hadrônico de Telhas, um dos calorímetros do ATLAS, para o qual mais de 2000 destes circuitos estão sendo produzidos com sucesso. Duas versões para este circuito foram projetadas e são apresentadas ao longo do trabalho, juntamente com os circuitos e sistemas desenvolvidos e aplicados em diferentes etapas do projeto, uma descrição detalhada da cadeia eletrônica dos sinais gerados pelo detector, visando a integração do circuito com os demais componentes do detector, todos os métodos e procedimentos utilizados na produção do circuito (testes de resistência a radiação, *burn-in* e controle de qualidade), e a análise dos resultados obtidos em vários testes em laboratório e com feixe de partículas realizados em módulos de produção (módulos que integrarão o experimento quando este entrar em funcionamento) do detector.

Devido à energia das colisões, a elevada taxa de colisões, as restrições de acesso aos detectores e seus componentes (as colisões ocorrem à 100 metros de profundidade), e a duração do experimento, que deve se estender por um período superior a 10 anos, requisitos adicionais de projeto foram incorporados. Um importante requisito é a resistência à radiação ionizante e ao fluxo de nêutrons que o circuito somador deve ter, levando a um extensivo programa de testes específicos para certificação do somador, segundo este aspecto. Por outro lado, a necessidade de robustez do sistema leva a procedimentos de testes de *burn-in*, visando garantir que os circuitos a serem instalados não venham a falhar nos primeiros anos de operação do LHC, evitando-se a necessidade de acesso ao detector. Por fim, um detalhado sistema de certificação de qualidade sobre a totalidade da produção é necessário, assim como a disponibilização das informações dos testes de controle de qualidade para o conjunto da colaboração que desenvolve o detector, com especificidades de estar geograficamente distribuída pelo mundo. Desta maneira, as folhas de controle de qualidade do circuito somador foram disponibilizadas via Web, utilizando um sistema especialmente desenvolvido para este fim.

Como requisito adicional, o sistema somador deve prover acesso ao sinal da última camada do detector, visando fornecer um indicativo da presença ou não de

múons, partículas de interesse para a física que se pretende detectar no LHC. Assim, um circuito com capacidade de soma de até seis sinais diferenciais rápidos (50 ns de largura à meia altura) e com uma saída de múons com capacidade de corrente suficiente foi projetado atendendo a todos os requisitos.

### 1.3 Documentação

No próximo capítulo, o ambiente experimental é descrito em maiores detalhes, sendo apresentado o LHC, o ATLAS e o calorímetro de Telhas, juntamente com suas torres e com o sistema de validação *on-line* de eventos. O sinal do calorímetro de Telhas é apresentado em detalhes no Capítulo 3, com toda sua cadeia eletrônica que processa o sinal do detector. Neste mesmo capítulo, a curva de carga do detector é extraída *on-line*, por meio de uma porta linear rápida. O primeiro circuito projetado para formar as torres de validação de eventos é apresentado no Capítulo 4, utilizando transistores discretos de alta velocidade resultando em um circuito de alto desempenho e baixo consumo. Para esta versão, também apresentamos os testes em laboratório e em feixe de partículas, juntamente com os demais componentes de calorímetro. No Capítulo 5, é apresentado o projeto do circuito somador final utilizado para gerar o sinal das torres de validação de eventos do calorímetro de Telhas, implementado com amplificadores de transcodutância e amplificadores operacionais comerciais de banda-larga. A integração final do somador com os demais componentes do detector é apresentada no Capítulo 6. Os testes em laboratório e em feixe de partículas são apresentados no Capítulo 7, sendo verificada a performance do circuito instalado no calorímetro com todos os componentes finais de produção. No Capítulo 8, voltamos a apresentar resultados de testes com feixes de partículas do circuito, com interesse apenas no sinal utilizado para detecção de múons, onde uma exaustiva análise da performance do sistema é realizada. Testes de resistência à radiação são apresentados no Capítulo 9, juntamente com o sistema para injeção e aquisição automática de sinais, usado tanto para os testes com radiação ionizante como para nêutrons. No Capítulo 10, são descritas, em detalhes, todas as fases do processo de produção, desde a fabricação das placas PCBs até os testes de controle de qualidade. Finalmente, as conclusões são apresentadas no último capítulo.

# Capítulo 2

## O Ambiente Experimental

Neste capítulo, é apresentado, em maiores detalhes, o ambiente experimental no qual o trabalho foi desenvolvido, com destaque para o LHC e sua física rara, o detector ATLAS, o calorímetro de Telhas e o sistema de validação de eventos do ATLAS.

### 2.1 Colisionadores de Partículas e o LHC

Nos colisionadores, partículas são aceleradas até velocidades próximas a da luz, e como a energia cinética é transferida a um objeto extremamente pequeno, ela se encontra enormemente concentrada. Aceleram-se normalmente partículas estáveis (como prótons, no LHC), através da aplicação de forças eletromagnéticas.

Experimentos nesta área podem ser de alvo fixo ou colisionadores. Nos colisionadores, quando partículas de mesma energia se chocam umas com as outras, toda a energia da aceleração se encontra disponível para conversão em novas partículas. No caso de experimentos de alvo fixo, quando partículas são aceleradas e colidem diretamente com o detector, a maior parte da energia é gasta no movimento contínuo das partículas que foram produzidas.

Normalmente, os aceleradores têm forma circular, sendo utilizados enormes ímãs para aceleração e controle da trajetória das partículas. Quanto menor for o círculo, maior deve ser a força do ímã para provocar curvas na trajetória; portanto, grandes círculos devem ser utilizados nestes experimentos. Outro motivo para a utilização de grandes círculos, é o fato das partículas aceleradas irradiarem, sendo

que com círculos maiores a irradiação é menor.

O LHC é um acelerador que colisionará prótons a energias muito altas, 14 TeV no centro de massa, e que nunca foram atingidas antes, permitindo ao homem penetrar ainda mais profundamente na estrutura da matéria, recriando-se as condições primordiais do Universo, após somente  $10^{-12}$  segundos do "Big-Bang", quando a temperatura teria sido de  $10^{16}$  °C [1].

O LHC usará o mais avançado supercondutor magnético e as mais avançadas técnicas de aceleração, no intuito de observar fenômenos preditos teoricamente. Entretanto, devemos nos preparar para possíveis surpresas. O LHC pode colidir feixes de prótons com energias em torno de 7 TeV cada, e, nos pontos de cruzamento de feixes, atingirá uma luminosidade<sup>1</sup> até aqui inalcançável. Ele também poderá colidir íons pesados com energia total de colisão de 1,250 TeV. Portanto, o potencial de pesquisa, técnico e educacional do LHC e seus experimentos é enorme.

O túnel do LHC terá 26,7 km de circunferência e será abastecido com prótons entregues por um outro acelerador (SPS), no qual os prótons são pré-acelerados a 0,45 TeV. Dois canais supercondutores magnéticos acelerarão os prótons até 7 TeV, depois o feixe circulará por várias horas, colidindo nos pontos aonde se localizam os detectores. Quando os feixes de prótons ficarem bastante degradados, a máquina tem que ser esvaziada e reabastecida. Na Figura 2.1, podemos ver a localização geográfica do LHC.

Para curvar os prótons com 7 TeV pelo anel do LHC, os dipólos do LHC devem ser capazes de produzir campos de 8,36 Tesla, que são cinco vezes maior que aqueles usados há alguns anos no SPS, e quase 100.000 vezes maior que o campo magnético da terra. Estes campos magnéticos são criados graças à supercondutividade<sup>2</sup>.

O que foi visto nos dá uma idéia do que será o LHC, de seu funcionamento e da complexidade que cerca este ambiente, sendo que para a leitura e análise destas colisões precisamos dos detectores de última geração, que serão abordados na

---

<sup>1</sup>Luminosidade é o número de partículas por centímetro quadrado por segundo geradas num feixe de partículas de alta energia.

<sup>2</sup>Supercondutividade é a capacidade de certos materiais, usualmente a temperaturas muito baixas, de conduzir corrente elétrica sem resistência e perdas de potência, produzindo assim altos campos magnéticos.

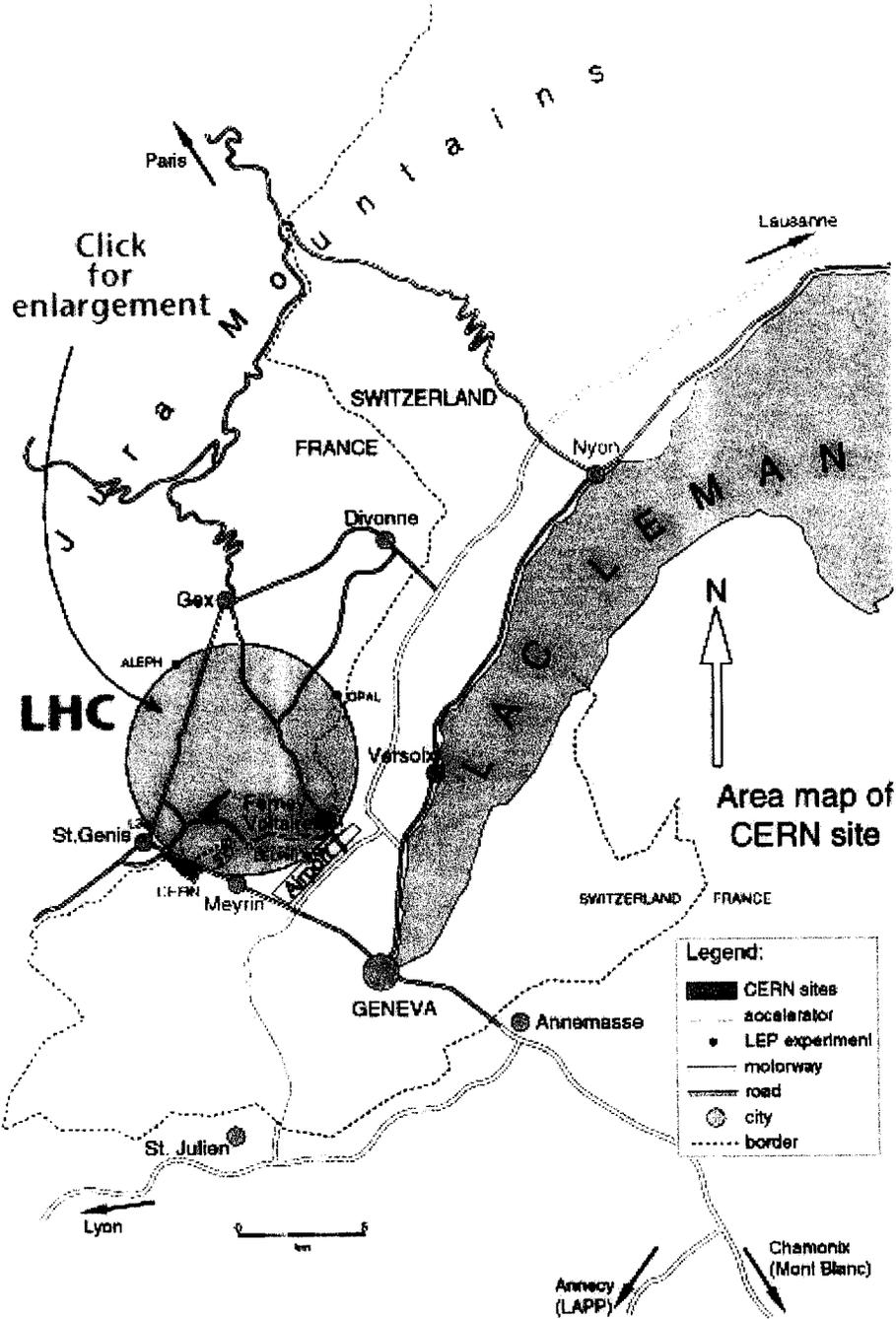


Figura 2.1: Localização geográfica do LHC.

próxima seção.

## 2.2 Os Detectores e o ATLAS

Detectores são aparatos que tornam possível a visualização de várias partículas e dos produtos de seus decaimentos quando da sua interação com os elementos de detecção. Normalmente, esses detectores têm múltiplos componentes que testam diferentes aspectos de um evento. Cada componente de um detector moderno é usado para medição da energia das partículas e seus momentos, e/ou distinguir diferentes tipos de partículas, medir a posição em que ocorreu o decaimento de uma partícula e sua trajetória. Quando todos estes componentes trabalham conjuntamente para a detecção de um evento, partículas individuais podem ser separadas do resto, para análise.

Cada evento é coletado e o conjunto é analisado por algoritmos que interpretam a vasta quantidade de dados vindos dos detectores, apresentando resultados físicos. O interesse está nos eventos que ocorrem durante e depois da colisão; por esta razão, colocam-se detectores ao redor dos pontos de colisão. Eles são construídos de diferentes maneiras, de acordo com o tipo de evento que será analisado e da eficiência de detecção desejada.

Para experimentos de alvo fixo, a produção de partículas geralmente segue uma única direção, ou seja, os feixes são colimados. Assim os detectores têm forma cônica o que pode ser visto no canto esquerdo da Figura 2.2. Entretanto, na moderna física de altas energias, os detectores devem analisar feixes que foram colididos e como nestes experimentos as partículas são produzidas em todas as direções, a forma dos detectores deve ser cilíndrica, envolvendo o ponto da colisão. Na Figura 2.2 (direita), podemos ver a forma geral de um detector para os colisionadores de partículas.

Uma importante função de um detector é medir a energia e o momento de uma partícula. Por esta razão, a parte central mais interna de um detector para experimentos com colisionadores, que são detectores rastreadores que produzem uma imagem da colisão junto ao vértice, está submetida a campos magnéticos intensos. O sinal da carga das partículas pode ser facilmente lido através de suas trajetórias, já

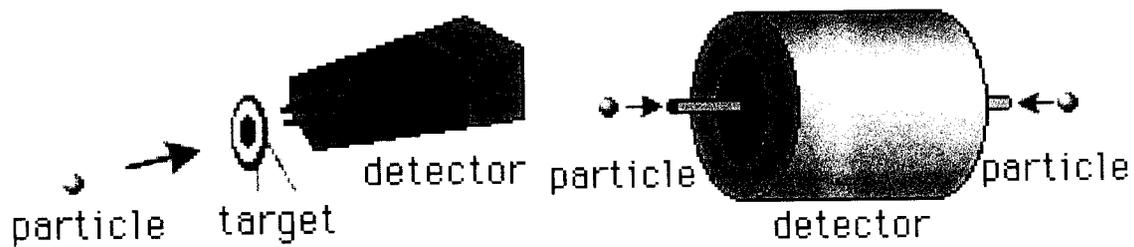


Figura 2.2: No canto esquerdo, vemos a geometria típica de um detector para experimentos de alvo fixo e, na direita, um detector usado em colisionadores.

que partículas positivas e negativas se curvam em direções opostas para um mesmo campo magnético. O momento da partícula pode ser calculado, devido a trajetória de uma partícula com maior momento se curvar menos do que uma com menor momento. Isto ocorre, porque partículas com grande momento têm uma inércia maior do que partículas com momento menor.

Os detectores são divididos em alguns componentes, já que cada componente se dedica a um conjunto especial de partículas ou medidas. Eles são empilhados e, em geral, as partículas passam sequencialmente através das diferentes camadas. Uma partícula não pode ser identificada antes que ela interaja com o detector de uma forma mensurável, ou decaia em partículas detectáveis. Na Figura 2.3, vemos como cada partícula interage tipicamente com as diferentes camadas de um detector. As retas representam a incidência de feixes de partículas. Quando uma reta se divide, isto representa o decaimento de uma partícula incidente em partículas com menor energia, ocorrendo neste ponto deposição de energia. Assim, vemos que elétrons só depositam energia no calorímetro eletromagnético e que prótons penetram mais no detector, só vindo a interagir com o calorímetro hadrônico. Múons, por sua vez, interagem fracamente com o detector como um todo, sendo detectado por elementos especiais que se encontram na parte traseira do detector, as chamadas câmaras de múons.

O ATLAS é um dos dois principais detectores que serão utilizados no LHC. Ele consiste de diferentes equipamentos, os quais relacionam-se a diferentes aspectos de um evento. Na Figura 2.4, vemos as diferentes partes que compõem o experimento, sendo a parte mais externa o detector de múons, já que somente múons e neutrinos atingem esta região. Logo em seguida, temos os imãs toroidais de múons,

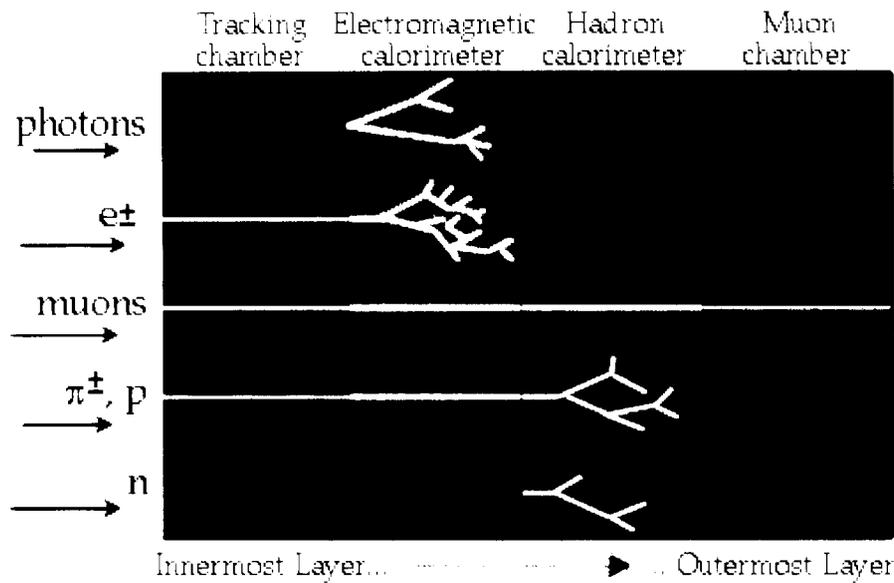


Figura 2.3 – Decaimento típico das partículas – relacionando as as camadas de um detector.

que criam campos magnéticos para o estudo dos múons – sendo que este campo magnético passa pelo centro do conjunto de toróides circulando a fronteira da parte central do detector. Mais internamente, temos os calorímetros hadrônicos que medem a energia total dos hádrons, que desenvolvem sua cascatas no material denso desta região. Um pouco mais no centro, temos os calorímetros eletromagnéticos que medem a energia total dos pósitrons, elétrons e dos fótons. Os ímãs toroidais se localizam nas extremidades do detector e, finalmente, a região central tem um sensor altamente segmentado para determinar as trajetórias das partículas carregadas com bastante precisão, sendo chamado de detector de traços.

Na Figura 2.5, temos a visão de um corte longitudinal do ATLAS e na Figura 2.6, temos a parte central do corte longitudinal ampliada, mostrando a localização das partículas em cada camada de detector.

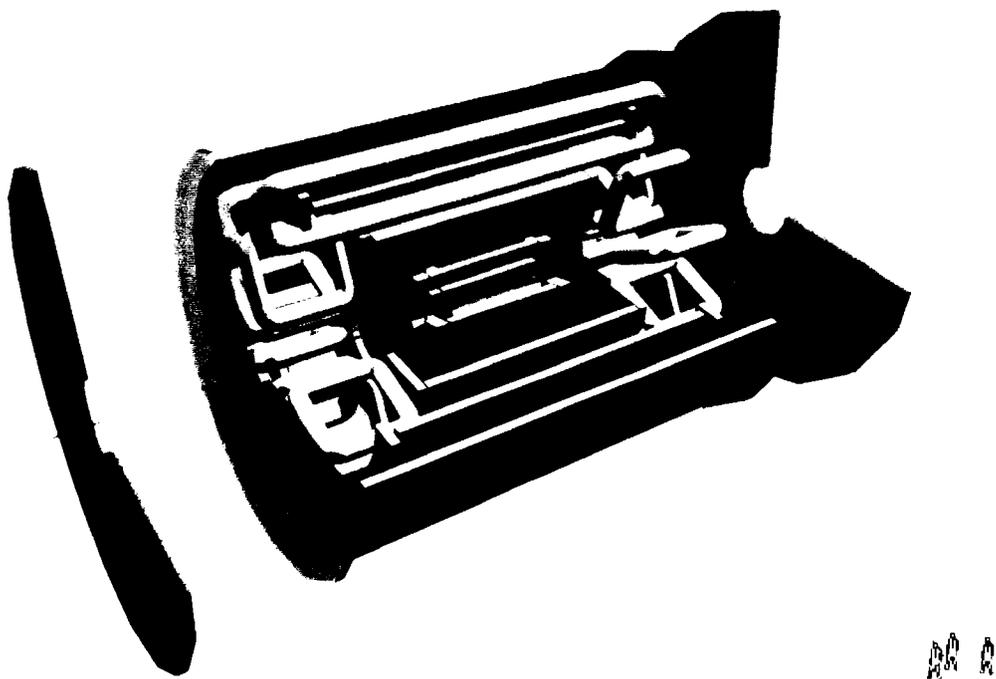


Figura 2.1: Ilustração do detector AFIAS. Um corte foi feito para visualização dos calorímetros que localizam-se na parte interna do cilindro, envolvendo o ponto de colisão das partículas.

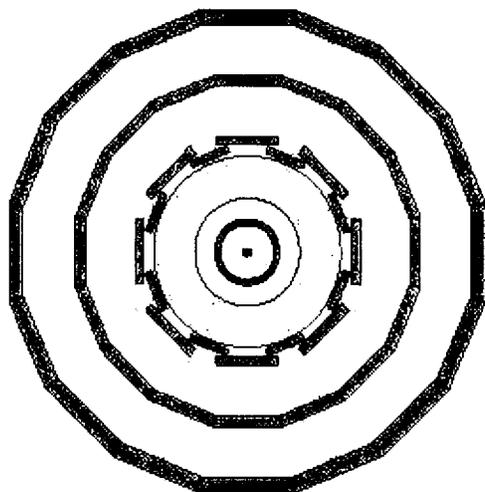


Figura 2.2: Vista de um corte longitudinal no AFIAS.

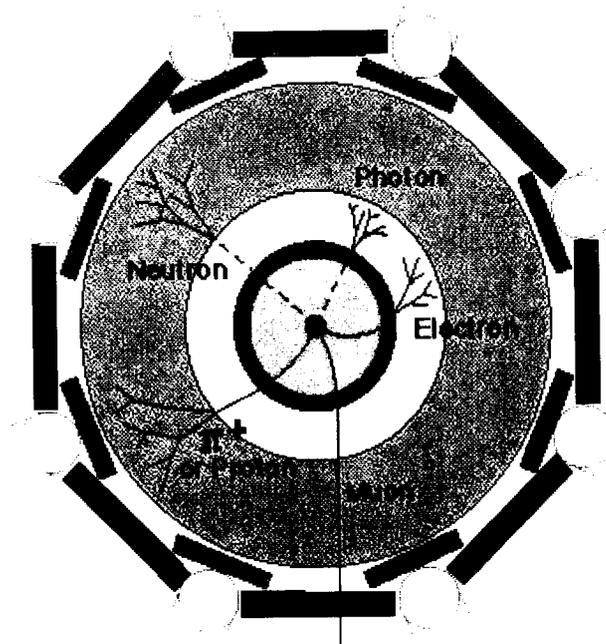


Figura 2.6: Ampliação da parte central do corte longitudinal, mostrando a interação das partículas em cada calorímetro.

## 2.3 O Calorímetro de Telhas

O calorímetro hadrônico de Telhas tem duas funções básicas. A primeira é medir a energia e direção dos jatos<sup>3</sup> e a segunda função é inferir a presença de partículas neutras que não são diretamente detectáveis (neutrinos) devido a sua pequena interação com a matéria. Detecta-se a presença destas partículas, através do vetor de momento transversal de todos os produtos de uma colisão<sup>4</sup>.

O Telhas é um calorímetro formado por sanduíches de placas de ferro, para absorver a energia da partícula incidente, e telhas de material cintilante que se excitam com a passagem das partículas resultantes, permitindo sua amostragem

<sup>3</sup>Não podemos medir diretamente os quarks, objeto básico da matéria, ou glúons, partículas que ajudam a manter os quarks unidos para formar os hadrons. Portanto, quarks (e glúons) produzidos em colisões emergem rapidamente como jatos de hadrons, sendo um jato uma coleção de partículas se movendo muito próximas em um cone.

<sup>4</sup>Como o momento transversal deve ser conservado numa colisão, o vetor resultante deve ser zero. Portanto, calculado o momento das partículas detectadas no calorímetro, o valor da soma desses momentos deve ser o valor do momento das partículas que não foram detectadas (os neutrinos) com sinal oposto.

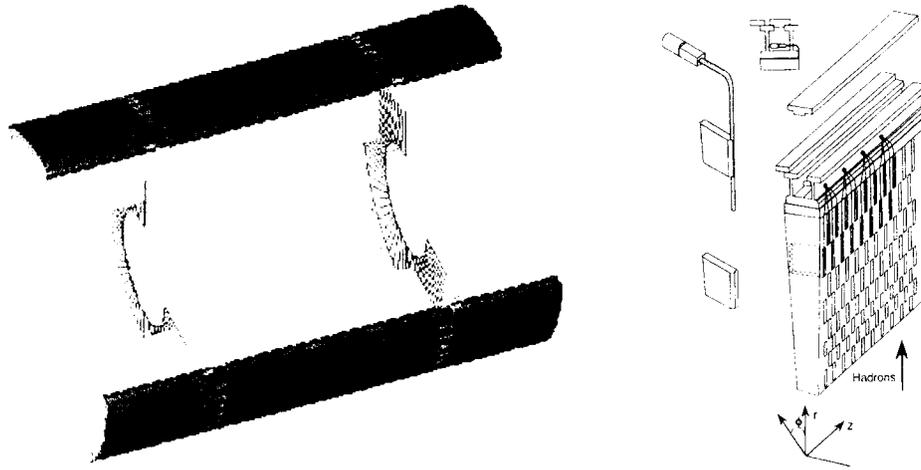


Figura 2.7: O Telhas (esquerda) e o diagrama de um módulo do calorímetro (direita).

[2]. A Figura 2.7 mostra uma ilustração do Telhas e o diagrama de um módulo do calorímetro. Ele consiste de uma estrutura cilíndrica com raio interno de 2280 mm e raio externo de 4230 mm. Longitudinalmente, é composto de uma parte central com 5640 mm, chamada de barril, e nas extremidades por 2 seções de 2910 mm, conhecidas como barril estendido. Para atingir a forma cilíndrica, são necessários 64 módulos empilhados tanto para o barril quanto para os dois barris estendidos, sendo necessários 192 módulos para formar o calorímetro [3].

A segmentação longitudinal e radial de um módulo é obtida pelo agrupamento específico das fibras óticas que se encontram acopladas às laterais livres das telhas cintilantes que recolhem o sinal luminoso. Um módulo do barril possui 45 células com dupla leitura, resultando em 90 canais, enquanto que o barril estendido possui 16 células e 32 canais.

Os cintiladores plásticos são usados como elementos de amostragem do sinal que está sendo desenvolvido no calorímetro. Quando uma partícula carregada de alta energia atravessa o cintilador, ela deixa ao longo do seu caminho um traço de átomos excitados que quando voltam ao seu estado normal emitem fótons de luz visível que podem viajar através do cintilador transparente [4]. Fibras plásticas coletam e transmitem esta luz por, alguns metros, até as foto-multiplicadoras, onde o sinal de luz é transformado em sinal elétrico através de um elemento foto-sensível [5]. Este sinal elétrico é processado e amostrado digitalmente por um ADC (conversor analógico digital). Esta compacta eletrônica de leitura localiza-se na base de cada

módulo do detector.

A informação segmentada do Telhas fornece bastante detalhe da forma pela qual a partícula incidente deposita a sua energia. A informação sobre este perfil de deposição de energia permite também que o calorímetro indique a classe da partícula que com ele está interagindo, sendo vital para o sistema de validação *on-line* do ATLAS.

## 2.4 O Sistema de Validação de Eventos do ATLAS

No LHC, a cada 25 ns ocorrerá uma colisão, sendo que o ATLAS possui cerca de  $10^6$  canais de leitura para os detectores de traços,  $10^5$  canais para os calorímetros e  $10^6$  canais para a câmara de múons, o que produzirá uma imensa quantidade de dados [6]. Esta quantidade de dados precisa ser reduzida, para que possa ser lida, sem a introdução de um tempo-morto muito grande e os dados possam ser salvos pelo sistema de aquisição numa taxa razoável. Para realizar esta tarefa, um sistema altamente sofisticado de redução *on-line* de dados e seleção de eventos de interesse, sem que haja perda para a nova e a possivelmente imprevisível física que pode ser detectada no experimento, é requerido para esta tarefa. O sistema de validação de eventos do ATLAS é baseado em três níveis de validação, com um alto grau de paralelismo em cada estágio.

Em seu primeiro nível, o sistema de validação utiliza o sinal resultante da combinação de até seis sinais do calorímetro de Telhas, sinais estes, que exploram a informação longitudinal de cada setor do calorímetro. Como o detector final possui mais de 10000 canais de leitura espalhados pelos seus 192 módulos, cerca de 2400 sistemas somadores devem ser construídos para realizar esta tarefa de validação. Desta forma, a dimensão do conjunto de dados a ser analisado no primeiro nível, é reduzida em aproximadamente 5 vezes, tornando possível o processamento dos dados em tempo hábil.

Será dada maior ênfase à descrição do primeiro nível de validação, já que o sinal das torres de validação de eventos do Telhas é utilizado neste nível.

### 2.4.1 O Primeiro Nível de Validação de Eventos

O primeiro nível de validação de eventos (LVL1) [7] recebe dados na taxa máxima do LHC (40 MHz) e utiliza dados dos calorímetros e de detectores rápidos de múons (RPCs), com granularidade reduzida, para aplicar uma seleção de eventos baseada num menu de canais físicos de interesse, que são anunciados por mensageiros tais como elétrons, fótons, múons, jatos e a energia transversal não-detectada (*missing transverse energy*). Espera-se que o LVL1 valide eventos de tal modo que, à sua saída, a máxima taxa de eventos seja 100 kHz.

A redução de granularidade, necessária para o LVL1, é obtida pela combinação linear de um certo número de canais dos detectores, de forma a se reduzir o número de informações a serem processadas, preservando as informações necessárias para que esta tarefa seja realizada.

No calorímetro de Telhas, o sinal para o LVL1 (torres de validação) é formado pela soma linear de até seis sinais do calorímetro na direção  $\eta$ , que é a direção de provável incidência das partículas no calorímetro. Na Figura 2.8, vemos metade de um módulo do barril e um barril estendido, com a definição das células e das torres em  $\eta$  e na Tabela 2.1, vemos a composição das torres de validação do Telhas. O valor de  $\eta$  é calculado conforme a Equação 2.1, onde  $\theta$  é o ângulo de incidência das partículas no calorímetro em relação a direção radial do detector.

$$\eta = -\ln\left(\tan\frac{\theta}{2}\right) \quad (2.1)$$

O LVL1 não somente reduz a taxa de eventos por um fator de 400, mas também identifica, para cada evento aceito, a região de interesse (RoI). Estas são regiões do detector onde, efetivamente, partículas interagiram e, portanto, há informação relevante a ser adquirida.. Estas regiões são passadas para o nível 2 (LVL2) de validação para guiar a seleção de eventos adicional [8].

### 2.4.2 Os Segundo e Terceiro Níveis de Validação de Eventos

O LVL2 utiliza os dados com toda a granularidade e precisão, mas atua somente nas regiões de interesse, passadas pelo LVL1. A maior precisão nos dados dos calorímetros, do detector de múons e dos sistemas rastreadores permitem um

$\eta$	PMT por célula	PMT por posição
0-0.1	A1R A1L BC1R BC1L D0R	5 2 3 4 1
0.1-0.2	A2R A2L BC2R BC2L D1L	9 6 7 8 14
0.2-0.3	A3R A3L BC3R BC3L D1R	11 10 13 12 15
0.3-0.4	A4R A4L BC4R BC4L D2L	19 16 17 18 26
0.4-0.5	A5R A5L BC5R BC5L D2R	21 20 23 22 27
0.5-0.6	A6R A6L BC6R BC6L D3L	25 24 29 30 40
0.6-0.7	A7R A7L BC7R BC7L D3R	31 28 35 36 43
0.7-0.8	A8R A8L BC8R BC8L	37 34 41 42
0.8-1.0	A9R A9L B9R B9L A10R A10L	39 38 45 46 47 48

$\eta$	PMT por célula	PMT por posição
0.8-1.0	D4R D4L C10R C10L D5R	3 4 5 6 17
1.0-1.1	B11R B11L D5L	9 10 18
1.1-1.2	A12R A12L B12R B12L D6R	7 8 15 16 37
1.2-1.3	A13R A13L B13R B13L D6L	11 12 23 24 38
1.3-1.4	A14R A14L B14R B14L	21 22 33 34
1.4-1.6	A15R A15L B15R B15L A16R A16L	29 30 43 44 41 42

Tabela 2.1: Estrutura das torres de validação do calorímetro de Telhas para o barril (acima) e para o barril estendido (abaixo).

## TILECAL CELLS

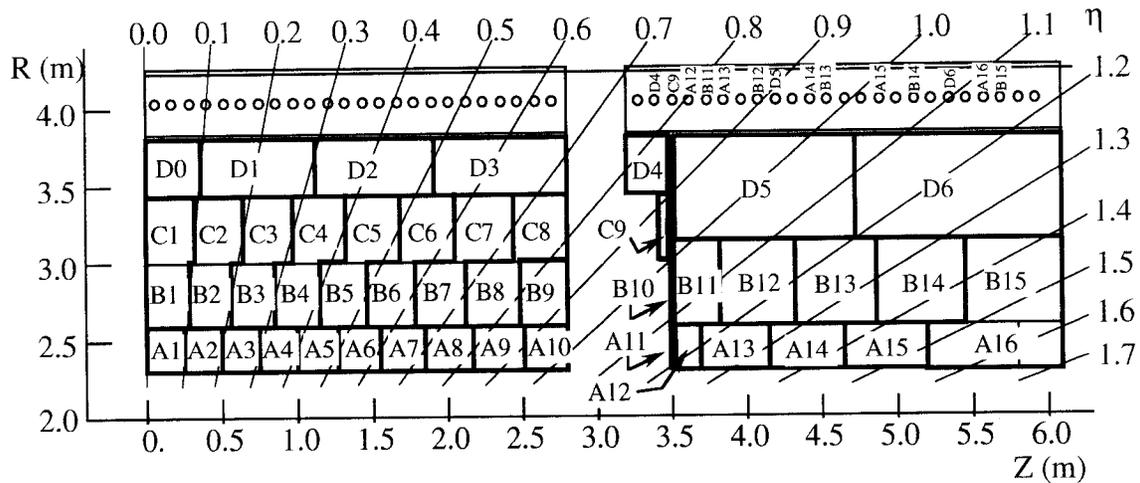


Figura 2.8: Definição da geometria dos módulos do Telhas, aonde vemos metade de um módulo do barril e um barril estendido para  $\eta < 0$ . Para  $\eta > 0$  a figura deve ser espelhada. Pode-se observar também o espaço deixado entre o barril e o barril estendido para a passagem de cabos e serviços para os detectores mais internos.

refinamento maior na decisão do LVL1. Contando com este intrincado conjunto de informações, um fator de 100 na redução da taxa de eventos deve ser obtida. O nível 2 deve fornecer, então, em sua saída, uma taxa de aceitação de eventos máxima de 1 kHz.

O nível 3 de validação (LVL3) atuará com a informação completa para cada evento e reduzirá a taxa de aceitação de um fator adicional de 10. Neste nível, uma reconstrução detalhada do evento pode ser realizada, embora seja desejável manter os limites abaixo dos usados para análise, evitando assim, alguma polarização causada pelo sistema de validação e facilitando também estudos do ruído de fundo do experimento. A taxa de aceitação final de eventos é, assim, reduzida de 40 MHz para 100 Hz. Ao final do processamento dos três níveis de validação, os eventos selecionados são armazenados pelo sistema de aquisição [8]. Na figura 2.9, vemos um diagrama em blocos da aquisição de eventos no ATLAS.

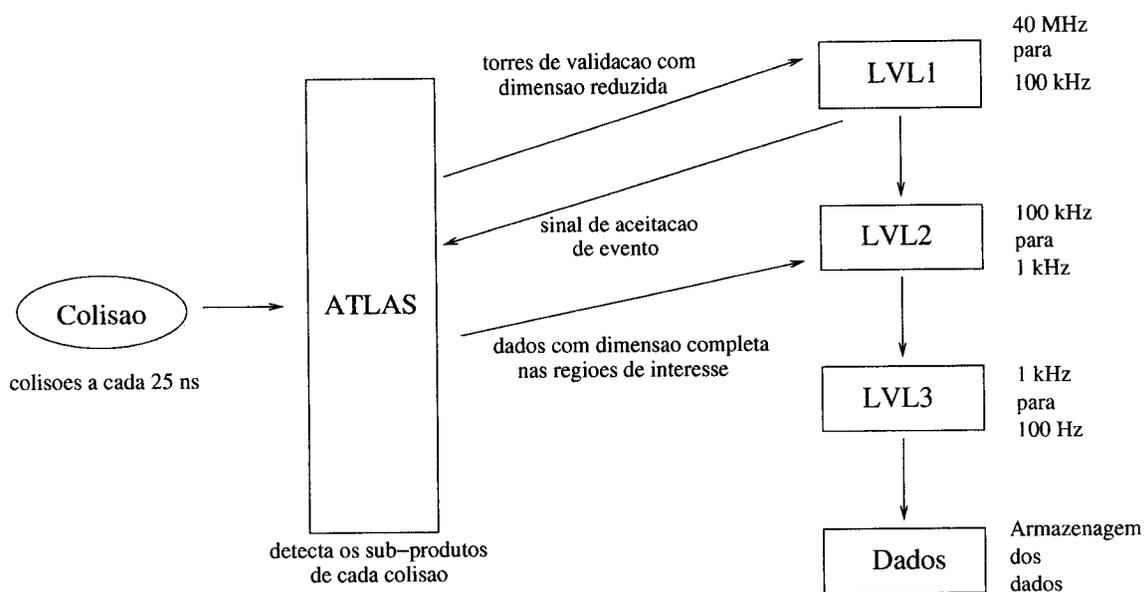


Figura 2.9: Diagrama em blocos do funcionamento do sistema de aquisição/validação do detector ATLAS. Este sistema reduz a taxa de eventos de 40 MHz para 100 Hz.

# Capítulo 3

## O Sinal do Calorímetro de Telhas

Neste capítulo, além de apresentarmos a cadeia eletrônica do detector, faremos um estudo para obtenção *on-line* da curva de carga do sinal do Telhas, utilizando uma porta linear especialmente projetada para este fim. Este é um parâmetro importante do detector, indicando a velocidade do sinal do calorímetro, que é fundamental no LHC, dada a alta taxa de eventos gerada.

### 3.1 Cadeia Eletrônica do Telhas

Conforme descrito no Capítulo 2, o sinal do detector é gerado nas telhas cintilantes, quando excitadas pelo chuveiro de partículas que se forma pela absorção da energia da partícula incidente no material pesado do calorímetro. O sinal de luz gerado pelas telhas cintilantes é transmitido para a base do módulo por meio de fibras óticas WLS (*Wavelength Shift Fibers*), que são ligadas às laterais livres das telhas cintilantes, de modo a coletar a luz produzida. Cada telha cintilante possui conexão com duas fibras, uma de cada lado livre da telha. A definição das células do detector é feita através do agrupamento de várias fibras que formarão dois sinais por célula, o superior e o inferior. O sinal resultante do agrupamento das várias fibras (os sinais das várias fibras são misturados pelo *light-mixer*) chega a foto-multiplicadora, que o transforma em sinal elétrico [2].

A saída da foto-multiplicadora conecta-se com o circuito 3-em-1 [9], desenvolvido por colegas de Chicago<sup>1</sup>, assim chamado por ter três principais funções.

---

<sup>1</sup>Colegas do Instituto Enrico Fermi da Universidade de Chicago, localizada nos EUA.

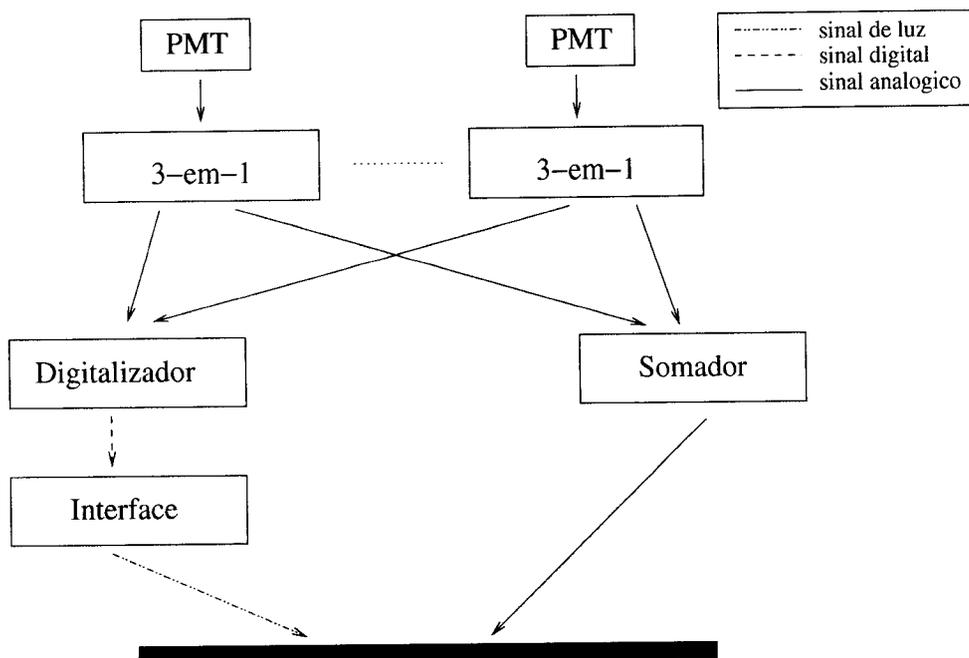


Figura 3.1: Diagrama em blocos simplificado da cadeia eletrônica que processa o sinal do Telhas.

Atuando enquanto conformador de onda [10], o circuito 3-em-1 conforma o sinal da foto-multiplicadora, transformando-o em um sinal unipolar diferencial com 50 ns de largura a meia altura (Veja Figura 3.6 [11]). Este sinal é dividido em três pelo 3-em-1. Dois sinais são enviados ao digitalizador, desenvolvido por colegas de Estocolmo<sup>2</sup>, para que a faixa dinâmica requerida pelo sistema seja atendida (16-bits), tendo um dos sinais ganho  $1/2$  (*low-gain*) e o outro ganho de 32 (*high-gain*). O terceiro sinal, destinado ao somador, possui ganho  $1/2$  e pode ser desabilitado pelo 3-em-1 no caso do respectivo canal de entrada se tornar ruidoso. Além do 3-em-1 processar os três sinais acima, ele possui mais outras duas funções principais: o sistema de calibração de carga e o integrador, que é usado para calibração com fonte radioativa (Cs).

O digitalizador recebe os dois sinais diferenciais provenientes do circuito 3-em-1 e digitaliza-os com 40 MHz de taxa de amostragem e 10-bits de faixa dinâmica [12]. Todos os dados são enviados serialmente para a placa de interface [13], desenvolvida por colegas de Chicago, que os paraleliza e converte em informação luminosa, a ser enviada por fibras óticas para o sistema de aquisição, que se localiza a mais de 60 metros de distância do detector.

<sup>2</sup>Colegas do Departamento de Física da Universidade de Estocolmo, localizada na Suécia.

O somador é responsável por formar o sinal da torre de validação de eventos do detector, recebendo até seis sinais provenientes dos circuitos 3-em-1, combinando-os linearmente e fornecendo duas saídas diferenciais analógicas: uma referente à soma e outra funcionando como um *buffer* para o sinal da terceira camada do detector.

Na Figura 3.1, vemos o diagrama em blocos simplificado da cadeia eletrônica<sup>3</sup> que processa o sinal do Telhas. Toda esta eletrônica, localiza-se na base de cada módulo, no interior de uma gaveta eletrônica, incluindo ainda a placa mãe [13], também desenvolvida por colegas de Chicago, que provê alimentação, terra, e comunicação entre os circuitos 3-em-1 e os comandos para controle de suas funções, além da eletrônica relativa à parte de alta tensão que alimenta as foto-multiplicadoras.

### 3.1.1 O Circuito 3-em-1

Na Figura 3.2, vemos o diagrama em blocos do circuito 3-em-1 aonde identificamos o sinal da foto-multiplicadora (PMT na figura) que segue por dois caminhos, o de sinal e do integrador. No caminho de sinal, vemos o filtro conformador que conforma o sinal, transformando-o em um pulso unipolar com 50 ns de largura e divide-o em dois, um que formará o sinal de *low-gain* e *trigger sum* (entrada do somador) com ganho 1/2 e outro para formar o sinal de *high-gain* com ganho 32. Após a filtragem estes sinais são limitados em suas amplitudes máximas por dois circuitos grampeadores que os transmitem para as três saídas, aonde a razão *high-gain/low-gain* é de 64. O segundo caminho para o sinal da foto-multiplicadora leva-o ao circuito integrador e a sua saída, que é usada para calibração do sistema. Carga é injetada, pelo circuito de injeção de carga, no filtro conformador e também no integrador, servindo para calibração e teste do circuito. Finalmente, temos a parte lógica para controle de suas funções, representada no diagrama pelo circuito de controle.

Especialmente nos interessa o caminho percorrido pelo sinal desde a foto-multiplicadora até a saída *trigger sum* do circuito, pois este sinal é utilizado como

---

<sup>3</sup>Cada componente do detector, incluindo sua cadeia eletrônica de processamento do sinal, é desenvolvido por diferentes laboratórios em diferentes partes do mundo. Em experimentos da magnitude do LHC, este tipo de colaboração internacional é bastante utilizada, para que, além de repartir custos, as conquistas científicas e tecnológicas também sejam repartidas.

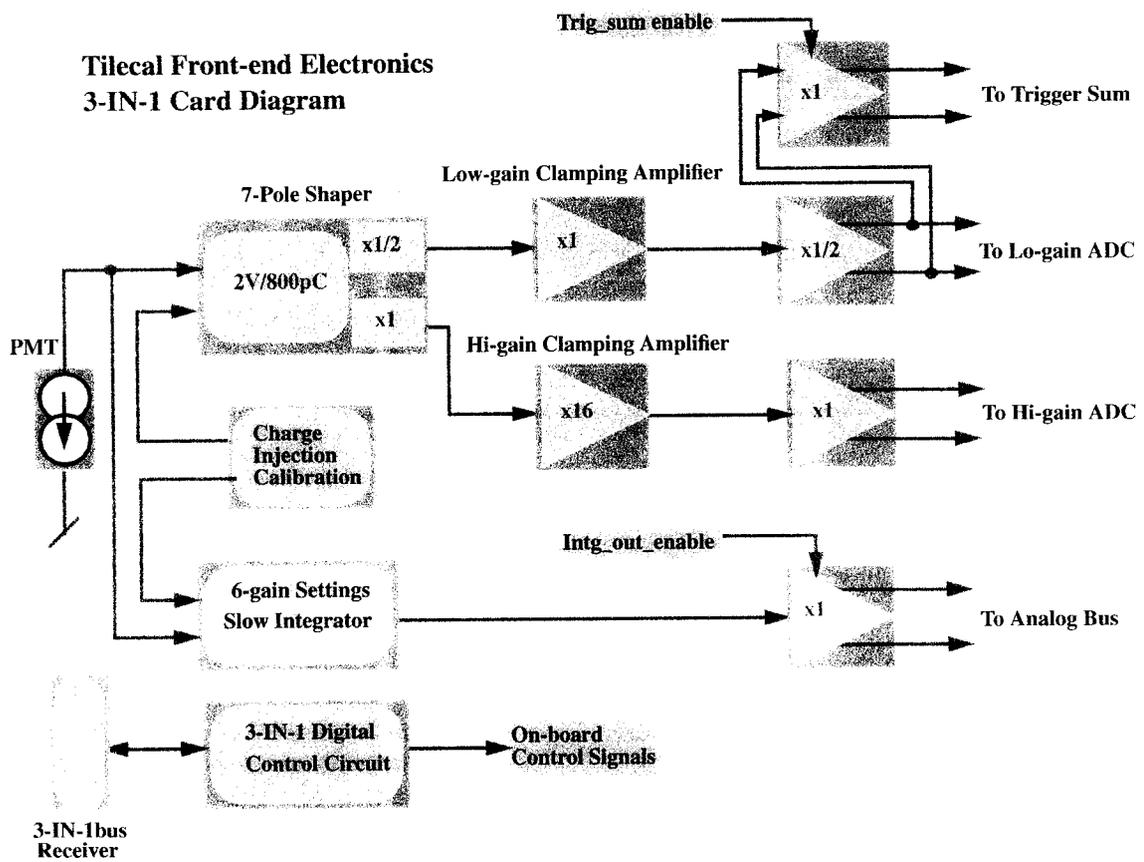


Figura 3.2: Esquema em blocos do circuito 3-em-1.

entrada para o somador. A Figura 3.3 mostra o esquemático elétrico deste circuito, aonde vemos o filtro conformador de 7 pólos implementado apenas com indutores e capacitores. Os sinais nas duas saídas do filtro são processados pelos circuitos grampeadores e transmitidos para os amplificadores das saídas, cujas funções são tornar os sinais de saída diferenciais e prover capacidade de corrente para que o sinal possa excursionar em cargas de  $50 \Omega$ . O sinal diferencial da saída de *low-gain* é transmitido para dois *buffers* que o disponibiliza para a saída *trigger out*. Estes *buffers* são habilitados ou não por um sinal lógico, desta forma, sinais ruidosos podem ser removidos da soma de uma determinada torre de validação.

### 3.1.2 O Circuito Digitalizador

Os sinais de *high-gain* e *low-gain* são transmitidos para os circuitos digitalizadores que têm como função, digitalizar os sinais analógicos do calorímetro e armazená-los numa fila, até que seja enviado o sinal de aceitação de eventos do primeiro nível de validação de eventos (LVL1).

Cada digitalizador pode receber até seis canais, portanto, para ler uma gaveta do barril são necessários 8 digitalizadores (46 canais). Os pulsos de entrada são digitalizados por ADCs de 40 MHz com 10-bits de resolução e são armazenados temporariamente em memórias *pipeline* a espera do sinal de aceitação do LVL1. Uma seqüência de amostras é transferida para *buffers* decodificadores quando o sinal de aceitação é enviado, desta forma, todos os pulsos correspondentes ao evento aceito são selecionados e enviados a placa de interface. Um evento pode conter até 15 amostras, aonde o formato da palavra digital com 32 bits contém dados de 3 canais empacotados conjuntamente. Na Figura 3.4, vemos o esquema de leitura para uma gaveta de um módulo do barril.

O Sistema TTC (*Trigger Timing and Control*) [14] é usado para geração de *clock*, para envio do sinal de aceitação do LVL1, e para controle e configuração da operação do digitalizador.

### 3.1.3 A Placa de Interface

A placa de interface, como o próprio nome já diz, faz a interface entre os sinais das PMTs do detector com o mundo exterior (o sistema de aquisição do ATLAS).

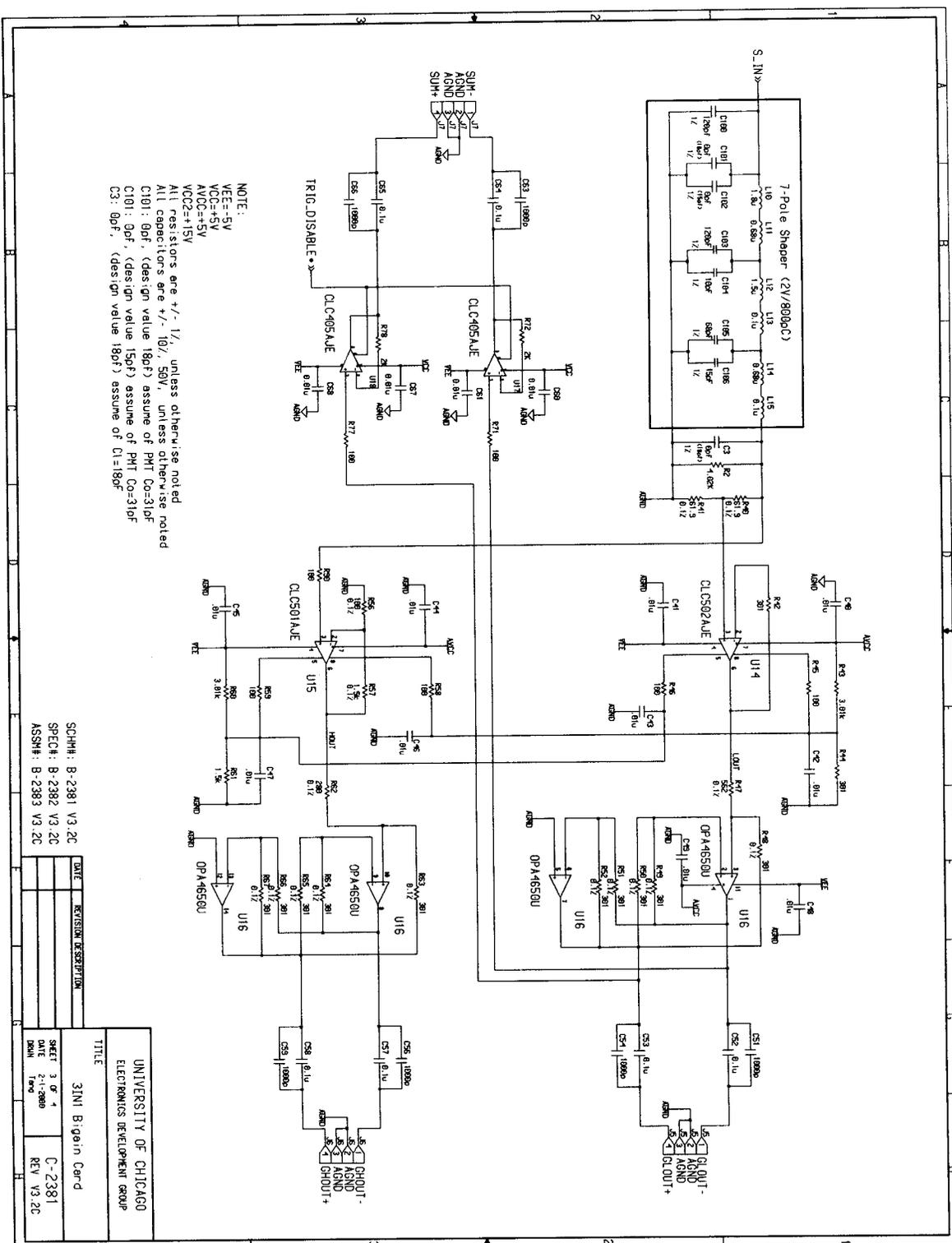


Figura 3.3: Esquemático elétrico da parte de processamento analógico do circuito 3-em-1.

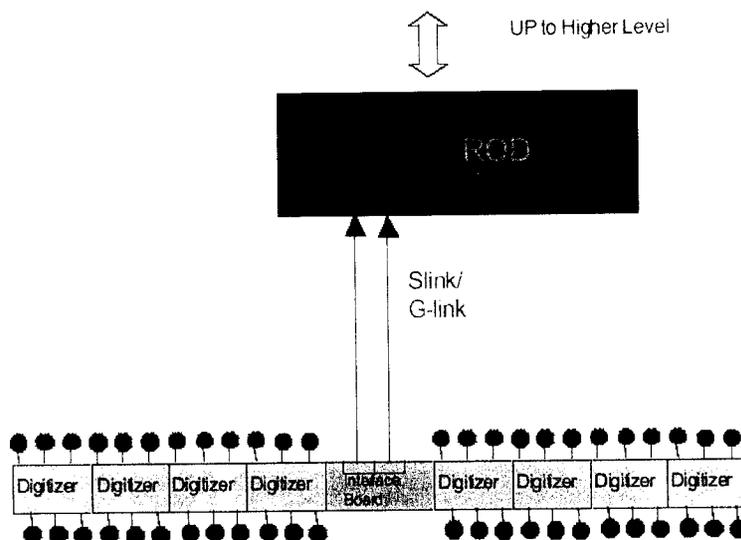


Figura 3.4: Diagrama em blocos da leitura e transmissão do sinal para uma gaveta de um módulo do barril. Os oito digitalizadores enviam seus dados a placa de interface, quando recebem o sinal de aceitação do LVL1. A placa de interface converte os dados digitais em luz e envia-os para os RODs, localizados a 60 metros do detector.

Ela recebe o sinal do TTC, que é gerado fora do detector, e os distribui para os oito digitalizadores (barril). Quando chega o sinal de aceitação de eventos do LVL1 pelo TTC, os oito digitalizadores enviam os dados dos eventos serialmente para a placa de interface que inicialmente os paraleliza, forma uma nova palavra de 32-bits para os eventos, converte os dados em luz e transmite-os para o ROD (*Readout Drivers*) [15]. Na Figura 3.5, vemos um diagrama em blocos da placa de interface.

Como todos os dados do calorímetro passam por esta placa, ela é de fundamental importância para o sistema, e por isso, ela possui um canal redundante. Caso ocorra problema no primeiro canal, o segundo é usado pelo sistema de aquisição.

O ROD já não faz parte do detector e localiza-se a mais de 60 metros da gaveta. Os dados são enviados por fibras óticas para o ROD que converte novamente os dados de luz para sinal elétrico, verifica a palavra digital enviada pelo detector e decodifica-a para que o sistema de aquisição possa finalmente armazenar o evento.

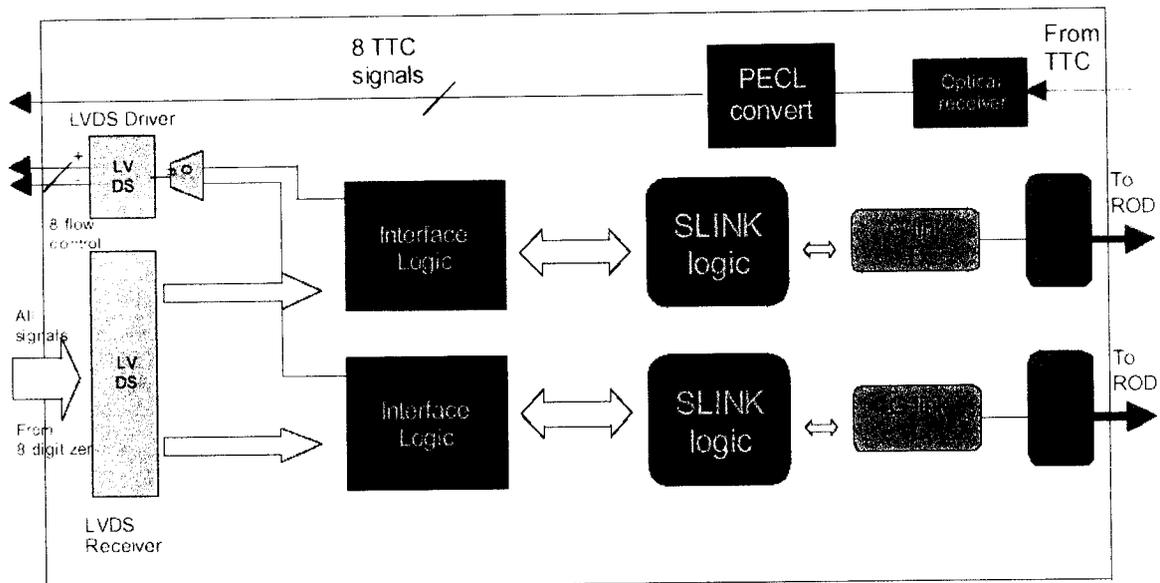


Figura 3.5: Diagrama em blocos da placa de interface do Telhas. Vemos claramente a redundância da placa para tornar o sistema mais robusto.

## 3.2 O Sinal do Calorímetro

Conforme descrito na seção anterior, o sinal elétrico do calorímetro de telhas é gerado na foto-multiplicadora, sendo posteriormente conformado pelo circuito 3-em-1. Este sinal é transmitido digitalizado para o sistema de aquisição, formando então o sinal do detector. O sinal analógico, conformado pelo circuito 3-em-1, também é transmitido para o somador, que deve formar o sinal da torre de validação do detector e o sinal para validação de múons.

O sinal de cada canal do calorímetro de Telhas, que pode ser visto na Figura 3.6, é um sinal diferencial que possui 50 ns de largura a meia altura e simétrico, com 25 ns de tempo de subida e descida. Este sinal deve ser mantido casado com 50  $\Omega$  de impedância ao longo da cadeia de leitura, para evitar reflexões e para se obter a máxima transferência de potência na transmissão [16].

Devido a alta taxa de eventos gerada no LHC, onde uma colisão ocorre a cada 25 ns, os sinais dos calorímetros que formam o ATLAS devem ser rápidos para se evitar o empilhamento de eventos. Desta forma, a curva de carga do sinal do Telhas nos dá uma importante informação de qual é o tempo requerido para a aquisição de uma dada fração da carga depositada, o que define a velocidade do detector. Tipicamente esta velocidade é dada pelo tempo requerido para se absorver 90% da

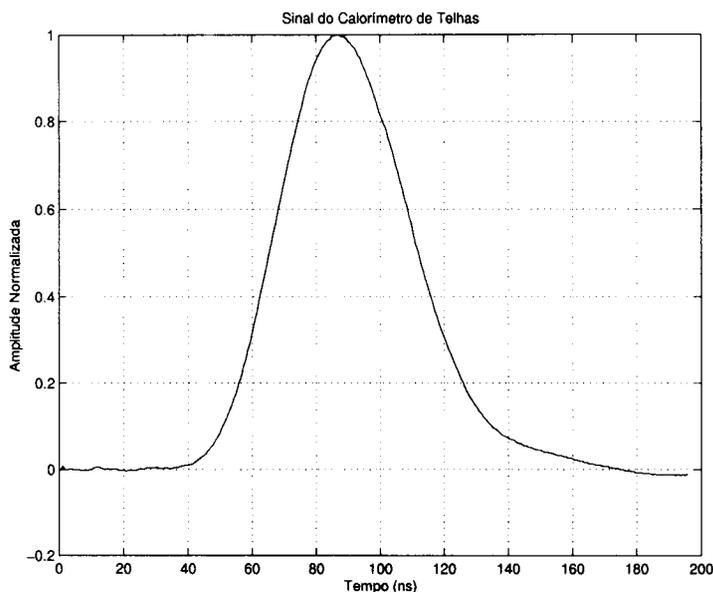


Figura 3.6: O sinal típico do calorímetro de Telhas (50 ns de largura a meia altura e 25 ns de tempo de subida e descida).

carga total.

A curva de carga do sinal do Telhas foi calculada *on-line*, em um teste com feixe de partículas, e os resultados mostraram que 90% da carga do sinal está contida em tempos inferiores a 120 ns. Maiores detalhes sobre a obtenção da curva de carga do detector podem ser vistos na próxima seção.

### 3.3 Obtenção *on-Line* da Curva de Carga do Sinal do Telhas

A curva de carga do sinal do calorímetro nos dá uma informação preciosa sobre a velocidade do sinal, o que é de fundamental importância para o sistema de aquisição do ATLAS, devido a alta taxa de eventos geradas no LHC. Para uma maior acuidade desta medida, a curva de carga deve ser obtida, de forma *on-line* em testes com feixes de partículas, com a técnica de medida integrada ao sistema de aquisição de dados.

Para obter a curva de carga *on-line* do sinal do Telhas em testes com feixe de partículas, foi utilizada uma porta linear rápida que atua sobre o sinal analógico do detector fatiando-o no tempo, em janelas configuráveis por meio de um sinal de

controle. Desta forma, podemos calcular a curva de carga do sinal variando o sinal de controle da porta linear e adquirindo a da porta linear através de um ADC de carga, que já nos dá diretamente a informação da carga do sinal do calorímetro.

Nesta seção, descreveremos a porta linear, o método pelo qual a curva de carga foi extraída e os resultados obtidos.

### 3.3.1 A Porta Linear

Uma porta linear tem como função transmitir um sinal analógico com o mínimo de distorção, quando um pulso lógico está presente na sua entrada de controle. É necessário assegurar que o pulso de controle tenha duração apropriada e que esteja sincronizado no tempo de forma apropriada, tal que se sobreponha ao sinal analógico ou, pelo menos, com a parte deste que se deseja transmitir.

As portas lineares podem ser vistas, dependendo das realizações, como chaves em série ou paralelo (ou como uma combinação de ambas), aonde um pulso controla o estado de condução da chave [17].

Problemas podem aparecer, na prática, devido a imperfeições no chaveamento do circuito. Quando o pulso de controle está presente, mas não temos sinal na entrada a ser transmitido, o circuito pode produzir um pedestal e, possivelmente, alguns transientes, quando o circuito está na transição entre a condução e o corte. Quando tanto o sinal de controle quanto o sinal a ser transmitido estão presentes, o sinal de saída será o sinal de entrada somado ao pedestal, com possíveis distorções introduzidas pela porta linear. Por outro lado, quando a porta está cortada, a razão finita entre os estados de condução e corte da condutância ativa do circuito causa algum vazamento (*feedthrough*), no caso de algum sinal chegar à entrada do circuito. Finalmente, o tempo de chaveamento da porta linear impõe restrições adicionais na velocidade dos sinais de entrada a serem transmitidos através da porta.

O diagrama em blocos da porta linear utilizada pode ser visto na Figura 3.7. Nele,  $E_1$  é a entrada para o sinal analógico  $V_s$ , que será fatiado pela porta linear. Este sinal passa através de um conversor tensão-corrente, o amplificador de sinais rápido, e através do circuito de chaveamento, que é comandado pelo circuito de controle de chaveamento. Esta parte do circuito controla o estado da porta linear por meio de um pulso lógico  $V_c$ . Na saída  $S$  do circuito, o sinal resultante será uma

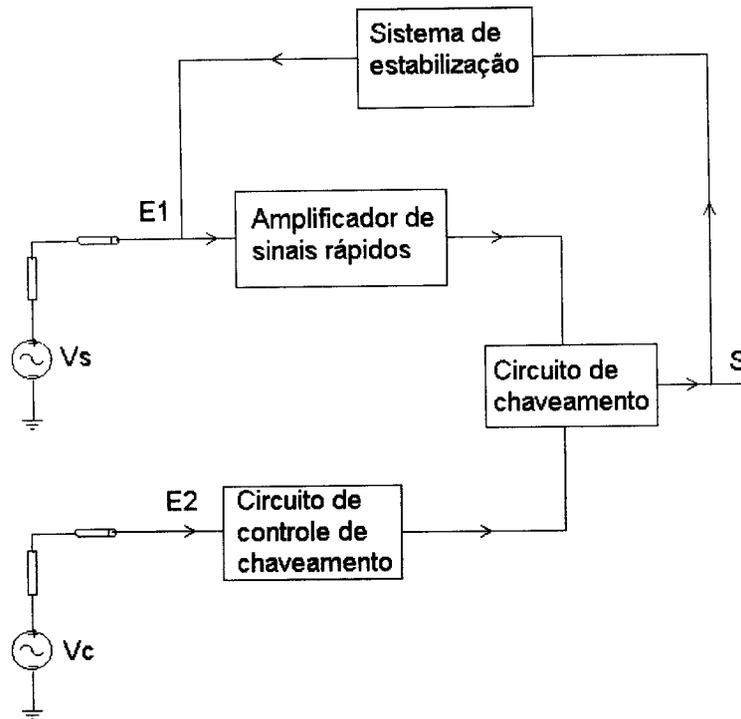


Figura 3.7: Diagrama em blocos da porta linear utilizada para obtenção da curva de carga do sinal do Telhas

réplica do sinal de entrada  $V_s$  ou somente uma parte dele, de acordo com o pulso de controle  $V_c$ . O circuito utilizado é uma atualização do circuito originalmente projetado em [18], de modo a ser aplicado aos requisitos de medição com o sinal do calorímetro.

O diagrama do circuito é mostrado na Figura 3.8. O circuito age como uma porta serial com acoplamento DC. As fontes de alimentação são +24,  $\pm 12$  e +6 Volts. O circuito provê duas saídas complementares, com ambas as saídas e entrada casadas com impedâncias de  $50 \Omega$ . O circuito de polarização é formado por duas fontes de corrente, os transistores T7 e T8. Quando um sinal de entrada é aplicado à porta, o pulso de corrente correspondente formado pelo amplificador de sinais rápidos, transistores T1 e T2, é transmitido ao estágio de saída. O sinal de controle determina para qual nó de saída será transmitido o sinal fatiado, pela atuação do circuito de controle de chaveamento, formado pelos transistores TA' e TA, e do circuito de chaveamento, formado pelos transistores T3, T4, T5 e T6.

Transistores de banda larga (BFQ23 e BFR967S) foram usados para o caminho de sinal nos estágios de saída e de entrada e também para o de chaveamento, de

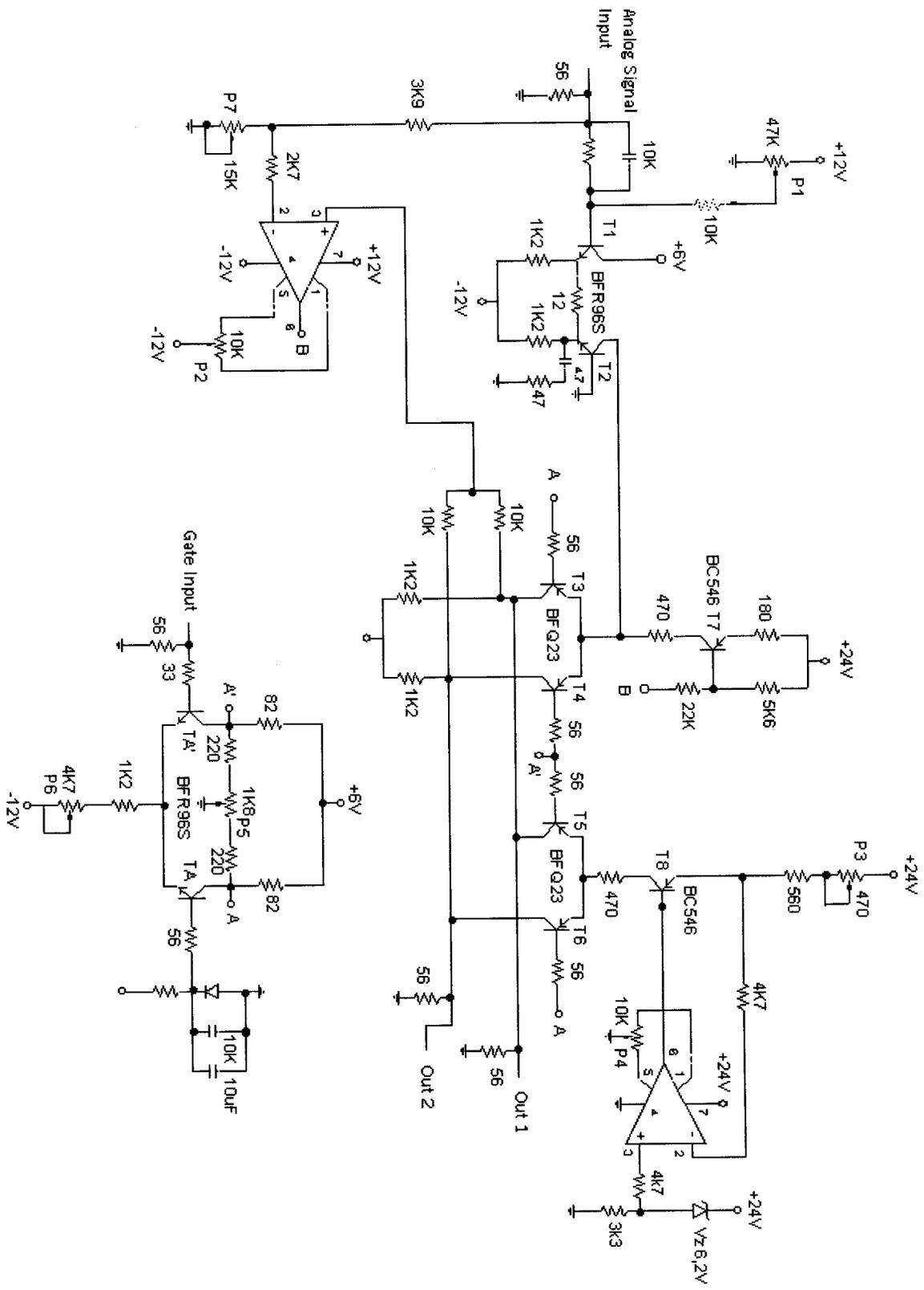


Figura 3.8: Esquemático elétrico da porta linear utilizada para obtenção da curva de carga do sinal do Telhas. Valor dos resistores em  $\Omega$ .

Parâmetro	Simulação	Lab.
pedestal	nulo	nulo
tempo de chaveamento	2,5 ns	3,3 ns
<i>feedthrough</i>	3%	0,3%
ganho	0.68	0.66
transientes	15 mV pp	15 mV pp

Tabela 3.1: A performance do circuito em simulação e em laboratório.

modo a prover uma boa transmissão de sinal e capacidade de chaveamento rápido. Transistores de uso geral foram usados no circuito de polarização.

A máxima excursão para o sinal de entrada deve ser de 300 mV, com um ganho próximo ao unitário. Vários ajustes são possíveis de serem feitos, para otimizar os parâmetros principais do circuito. O potenciômetro P5 ajusta o tempo de chaveamento e o *feedthrough*, P3 ajusta o pedestal, P1 ajusta o nível DC da entrada, P2 e P4 ajustam o *offset* do amplificador operacional e P7 permite ajustar a reposta em baixa frequência do circuito (*tilt*).

### 3.3.2 Performance da Porta Linear

Inicialmente, simulações do circuito foram realizadas usando um simulador do tipo SPICE [19]. Depois de realizar alguns ajustes no intuito de otimizar a performance do circuito (minimizar o pedestal e o vazamento, atingir tempos de chaveamento mais rápidos, eliminar níveis DC na saída e na entrada), os principais parâmetros da porta linear foram obtidos conforme pode ser visto na Tabela 3.1. Na simulação, foi atingido zero volts de pedestal, um pequeno *feedthrough* e tempos de chaveamento rápidos. A resposta em frequência foi medida como sendo desde DC até 200 MHz, para a frequência de corte em 3 dB. Para todas as simulações, o pulso de controle utilizado foi um pulso retangular com amplitude de -0,7 V, exibindo 1 ns de tempo de subida e descida.

O circuito foi montado e testado em laboratório. Nestes testes, um único gerador de pulsos foi utilizado para prover ambos sinais de controle e de entrada para o circuito. O pulso retangular de controle tinha  $\pm 1,5$  V, 18 ns de tempo de subida e descida e largura variável (Figura 3.9). Após os ajustes, as características

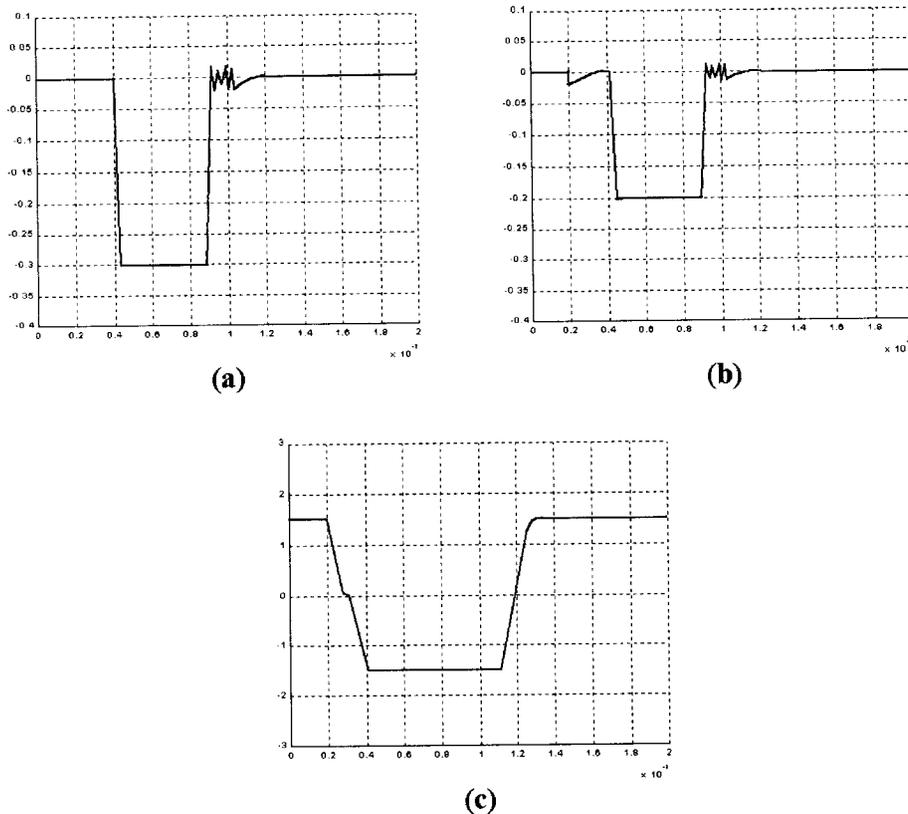


Figura 3.9: Transmissão de sinal da porta: (a) sinal de entrada, (b) saída da porta (c) sinal de controle. A amplitude está em Volts (eixo vertical) e o tempo em segundos (eixo horizontal).

principais do circuito foram medidas (ver Tabela 3.1). Uma boa transmissão de sinal foi atingida para um pulso de entrada com até 300 mV, 2 ns de tempo de subida e descida e 50 ns de largura (o pulso de saída da porta linear apresentou tempo de subida e descida de 3 ns e largura de 50 ns). Tanto o pulso de saída quanto o de entrada podem ser vistos na Figura 3.9, para um sinal de controle com duração de 90 ns. A distorção ocorrida na saída da porta linear, antes do começo do pulso foi causada pelo pulso de controle, sendo sua duração correspondente ao tempo de descida do sinal de controle. A Figura 3.10 mostra os transientes na saída da porta linear, quando um sinal de controle de 200 ns de duração é usado.

Pode-se observar na Tabela 3.1 que, para a maior parte dos parâmetros, as medidas de laboratório concordam com as de simulação. A diferença notada no tempo de chaveamento e no *feedthrough*, entre a simulação e o resultado em laboratório, se deve principalmente à diferença nos ajustes realizados para o circuito.

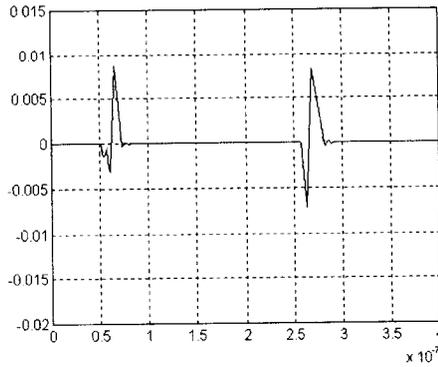


Figura 3.10: Transientes do circuito para o pulso de controle com 20 ns de tempo de subida e descida e 200 ns de largura. A amplitude está em Volts (eixo vertical) e o tempo em segundos (eixo horizontal).

A avaliação da performance do circuito, mostra tempos de chaveamentos rápidos (3,3 ns resultado experimental), uma resposta em frequência (0 a 200 MHz) suficiente para transmissão do pulso do calorímetro (banda de 14 MHz), e um *feedthrough* (0,3% resultado experimental) pequeno o suficiente para influenciar muito pouco na medição da curva de carga do calorímetro.

### 3.3.3 Obtenção da Curva de Carga

Devido aos requerimentos de alta velocidade no LHC, é muito importante saber quanta energia pode ser coletada pelo calorímetro para uma dada janela de tempo do sistema de aquisição. Esta informação pode ser extraída da curva que mostra a fração coletada da carga em função do tempo. Devido a alta taxa de eventos gerada no LHC, onde as colisões ocorrem a cada 25 ns, o sistema de aquisição especificou que 90% da carga do sinal do Telhas deve ser adquirida em tempos menores do que 200 ns, para que a probabilidade de empilhamento de eventos seja pequena o suficiente para não influenciar significativamente na performance do experimento.

Nos testes realizados com a porta linear em feixe de partículas, as janelas completas de aquisição do sinal foram de 400 ns e foram usados conversores A-D de carga para aquisição. Estes conversores abrem uma janela de duração controlada e integram o sinal do calorímetro ao longo da duração desta janela [20]. A carga

resultante é linearmente convertida para um valor digital, que é armazenado em fita pelo sistema de aquisição.

Uma possibilidade de se obter a curva de carga *on-line* do calorímetro é combinar linearmente um número de células do detector, produzindo quase a totalidade do sinal do detector, e adquirir o sinal resultante com o ADC de carga, reduzindo-se continuamente a janela de controle deste ADC e, assim, obter a carga do sinal cortado em fatias no tempo. Entretanto, o pedestal introduzido pelo ADC pode variar significativamente quando a largura da janela é reduzida, além da estabilidade do sinal no ADC diminuir proporcionalmente ao tamanho da janela de aquisição, resultando em distorções nos sinais adquiridos que tendem a degradar a resolução da medida [21, 22].

Como alternativa, a curva de carga pode ser acuradamente obtida através de uma porta linear. Deixando a porta linear a tarefa de fatiar o sinal do calorímetro, podemos manter constante a janela de aquisição ótima do ADC e produzir fatias decrescentes do sinal do detector, com a duração de cada fatia determinada pelo sinal de controle da porta linear. Neste caso, o ADC pode trabalhar em condições nominais e a porta linear transmite, pelo seu nó de saída, a fração desejada do sinal que resulta da combinação linear das células do detector.

O arranjo experimental, utilizado para medir a curva de carga do detector em testes com feixes de partículas realizados no CERN, pode ser visto na Figura 3.11. O sinal do detector foi obtido através da soma analógica de três sinais das torres de validação de eventos, por meio de outro somador ativo de alto desempenho [23]. Desta forma, três sinais foram transmitidos por cabos coaxiais especiais (com boa resposta em frequência e baixa atenuação) de 50 metros de comprimento até a sala de controle, aonde eram combinados linearmente pelo somador de alto desempenho e transmitidos para a porta linear. O sinal de controle da porta linear foi fornecido por um gerador de pulsos<sup>4</sup>, sincronizado pelo sinal de aceitação do sistema de aquisição, podendo ter sua largura ajustada manualmente. A saída da porta linear era lida pelo ADC de carga com uma janela de aquisição fixa em 400 ns, sincronizada conforme o sinal de controle da porta linear, para que finalmente seus dados fossem transmitidos para o sistema de aquisição que os armazena para posterior análise.

---

<sup>4</sup>HP8081 pulse generator.

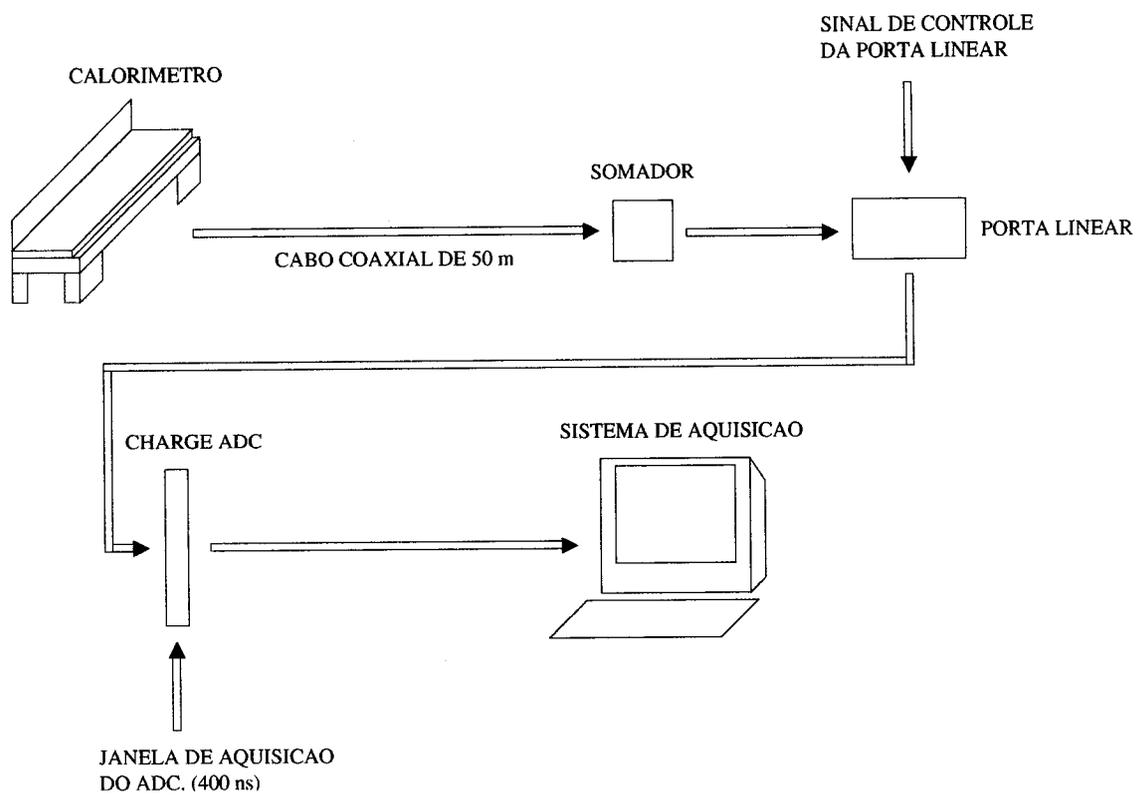


Figura 3.11: Arranjo experimental utilizado para obtenção *on-line* da curva de carga do calorímetro de Telhas com feixe de partículas.

Gate (ns)	Carga (%)	Incerteza (%)
20	1,8	0,2
40	9,3	0,2
60	31,7	0,5
80	64	1
100	85	1
120	94	1

Tabela 3.2: Percentual de carga para diferentes fatias do sinal do calorímetro, obtidos *on-line* através da porta linear.

Feixes de píons foram incididos sobre o detector<sup>5</sup>, e variando-se a largura da janela de controle da porta linear em passos de 20 ns foi possível calcular a curva de carga para o sinal do detector. Na Tabela 3.2, podemos ver o percentual de carga para diferentes fatias do sinal do calorímetro, sendo que 94% da carga está contida em 124 ns de sinal, mostrando que o calorímetro de Telhas atende à especificação do sistema de aquisição. A curva de carga pode ser vista na Figura 3.12.

---

<sup>5</sup>Os sinais incidiam na torre central, relativamente as três torres adjacentes do detector que foram somadas, e cujo sinal resultante foi utilizado como entrada da porta linear.

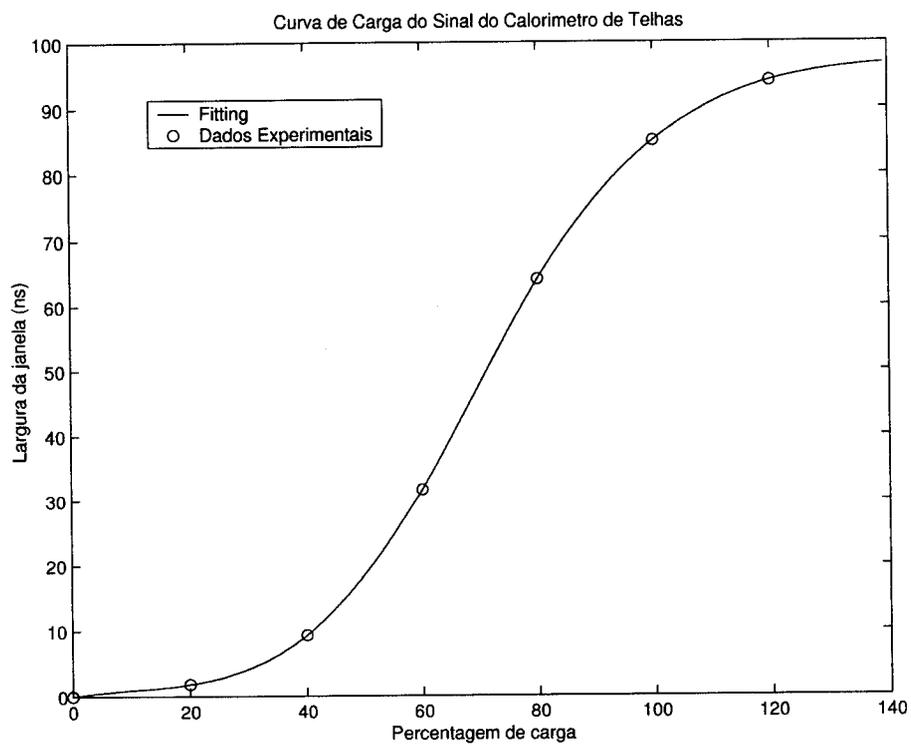


Figura 3.12: Curva de carga do sinal do calorímetro de telhas obtida com o uso da porta linear.

# Capítulo 4

## Somador Discreto

Neste capítulo, descrevemos a versão discreta do circuito somador, que foi desenvolvida para as especificações iniciais do projeto para formação das torres de validação do calorímetro de Telhas, as quais foram posteriormente alteradas com a evolução dos demais circuitos da cadeia de leitura eletrônica do detector e dos requisitos do primeiro nível de validação de eventos.

Esta versão do somador foi projetada para combinar linearmente até seis sinais diferenciais casados com  $50\ \Omega$ , alimentado pelas fontes de tensão de baixa voltagem que já são usadas pelo circuito 3-em-1 ( $\pm 5$  Volts), com ganho de tensão unitário. A saída do somador deverá excursionar até 2,5 Volts (corresponde a 250 GeV) em cargas de  $50\ \Omega$ , com uma faixa dinâmica de 10-bits<sup>1</sup>. Condições de saturação podem ocorrer, durante a operação no ambiente do LHC; portanto, o circuito deve possuir também uma boa capacidade de recuperação à saturação.

### 4.1 O Circuito

O circuito projetado (Figura 4.1) é capaz de combinar até seis sinais diferenciais de entrada através de pares diferenciais de alta velocidade, que utilizam transistores complementares de banda larga. Os estágios de entrada foram projetados como classe AB para atender as especificações de baixo consumo de potência, pois 10 circuitos são utilizados para equipar uma gaveta de um módulo do barril.

As entradas recebem sinais diferenciais com acoplamento AC (nos nós in<sub>+</sub>

---

<sup>1</sup>Ruído menor do que  $1,25\ \text{mV}_{RMS}$ .

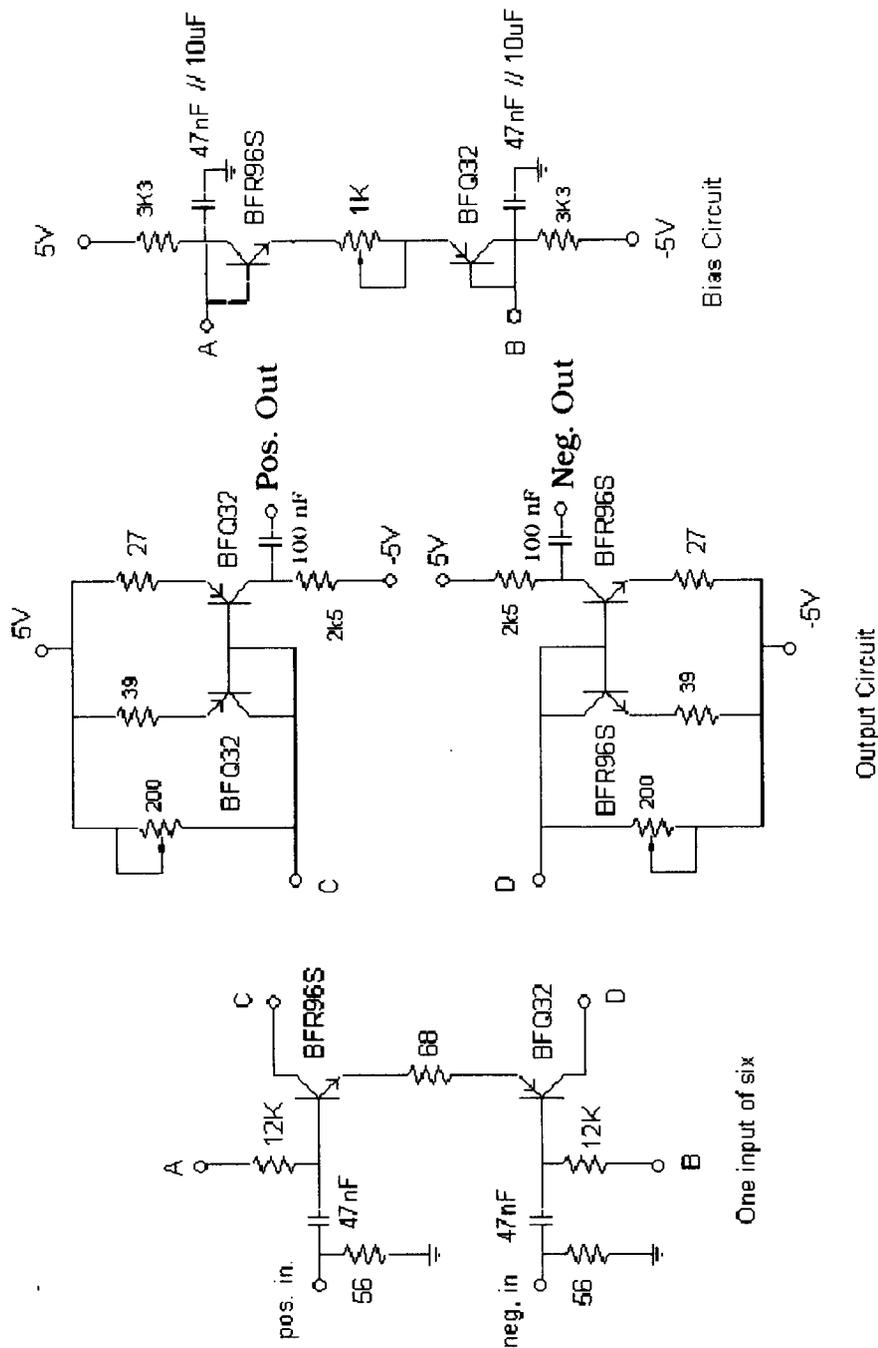


Figura 4.1: Esquemático do somador baseado em transistores discretos. Temos três blocos distintos, o bloco da esquerda mostra um dos seis estágios de entrada que convertem a tensão de entrada para corrente, no meio temos o estágio de saída que espelha a corrente dos sinais de entrada para a saída do circuito, e o bloco da direita é o circuito de polarização comum aos seis canais de entrada. O valor dos resistores está em  $\Omega$ .

e in<sub>-</sub>) e disponibilizam as correntes diferencialmente nos nós C e D, funcionando como um conversor tensão-corrente. Cada estágio é polarizado por uma corrente de 1 mA através de um circuito (ajustável) de polarização comum (polariza todas as entradas), que faz também a compensação térmica para os transistores de entrada. O potenciômetro de ajuste de 1 k $\Omega$  é necessário para compensar flutuações devido a tolerância de 5% dos resistores usados originalmente, mas pode ser suprimido no caso mais realístico de produção com resistores de 1% de tolerância.

As correntes de saída fornecidas pelos circuitos de entrada são somadas nos nós C e D. Estes nós são a entrada de dois espelhos de corrente, que utilizam também transistores de banda-larga<sup>2</sup>, que alimentam os terminais de saída (os nós out<sub>+</sub> e out<sub>-</sub>). O potenciômetro de 200  $\Omega$  fornece um caminho para a corrente de polarização em excesso proveniente dos circuitos de entrada, ajustando o *offset* da saída. Este circuito fornece ganho de tensão unitário para cargas de 50  $\Omega$ .

## 4.2 Testes em Laboratório

Para avaliar a performance do circuito, 10 unidades foram montadas e submetidas a testes em laboratório. A placa tinha 60 mm x 75 mm, atendendo as especificações mecânicas para montagem na gaveta do calorímetro<sup>3</sup>. Tanto os conectores de entrada, bem como os de saída, são do tipo BERG número 78208-103 [24]. Capacitores de cerâmica e tântalo de 100 nF e 6,5 uF, especificamente, foram usados para desacoplamento, nos pinos nos quais são conectadas as fontes de alimentação do circuito.

Primeiramente, foram injetados pulsos retangulares (com 50 ns de largura, tempo de subida de 7 ns, e tempo de descida de 9 ns) em cada uma das entradas. O sinal de saída do circuito foi amostrado por um osciloscópio digital<sup>4</sup>, que mediu também parâmetros do pulso como amplitude, largura, etc.

O circuito exibiu 9,1 ns de tempo de subida e 9,4 ns de tempo de descida e

---

<sup>2</sup>Todos os transistores usados no circuito são bipolares de banda-larga, sendo que o BFR96S é PNP e o BFQ32 é NPN.

<sup>3</sup>As especificações mecânicas relativas ao circuito foram definidas ao longo do projeto, à medida que os componentes eletrônicos da gaveta do Telhas foram sendo produzidos.

<sup>4</sup>Tektronix TDS640.

Medida	Somador
tempo de subida (7 ns entrada)	9,1 ns
tempo de descida (9 ns entrada)	9,4 ns
não-linearidade	< 2 %
excursão (simétrica)	2,5 V
ruído (RMS)	360 $\mu$ V
dispersão do ganho	5 %
<i>crosstalk</i>	-60 dB
recuperação a saturação (500 GeV)	29 ns
consumo	120 mW

Tabela 4.1: Resumo da performance do circuito em testes de laboratório.

uma largura de pulso de 50 ns. A excursão máxima de saída foi de  $\pm 2,5$  V, para um nível de ruído na saída de 360  $\mu$ Vrms. O *crosstalk* medido entre as diversas entradas foi abaixo de -60 dB, e o circuito apresentou um consumo de 120 mW. Considerando o nível de ruído e a excursão de saída do circuito, pode-se concluir que o circuito atingiu a faixa dinâmica correspondente a 10 bits, conforme especificado. A não-linearidade do circuito foi calculada medindo-se o maior desvio entre os dados experimentais e a melhor reta que os aproxima, sendo menor do que 2%.

Com relação à recuperação à saturação, o primeiro nível de validação de eventos do ATLAS deseja que o sinal das torres de validação do Telhas tenha uma recuperação rápida para até 500 GeV na entrada (4 V) e mantenha a subida e a descida do pulso sem grandes distorções, portanto, para obter a recuperação devido à saturação do circuito, os somadores foram submetidos a uma entrada de  $\pm 4$  V conforme a especificação. A Figura 4.2 mostra o pulso de saída resultante, notando-se que 29 ns são necessários para que o circuito possa se recuperar. O transiente que ocorre na saída do somador deve-se ao capacitor de desacoplamento DC da saída. Para um sinal de entrada com  $\pm 8$  V (um caso extremo de saturação), o circuito leva 48 ns para se recuperar da condição de saturação, porém, o pulso de saída fica bastante distorcido.

Na Tabela 4.1, é apresentado um resumo da performance do circuito, obtida nos testes em laboratório.

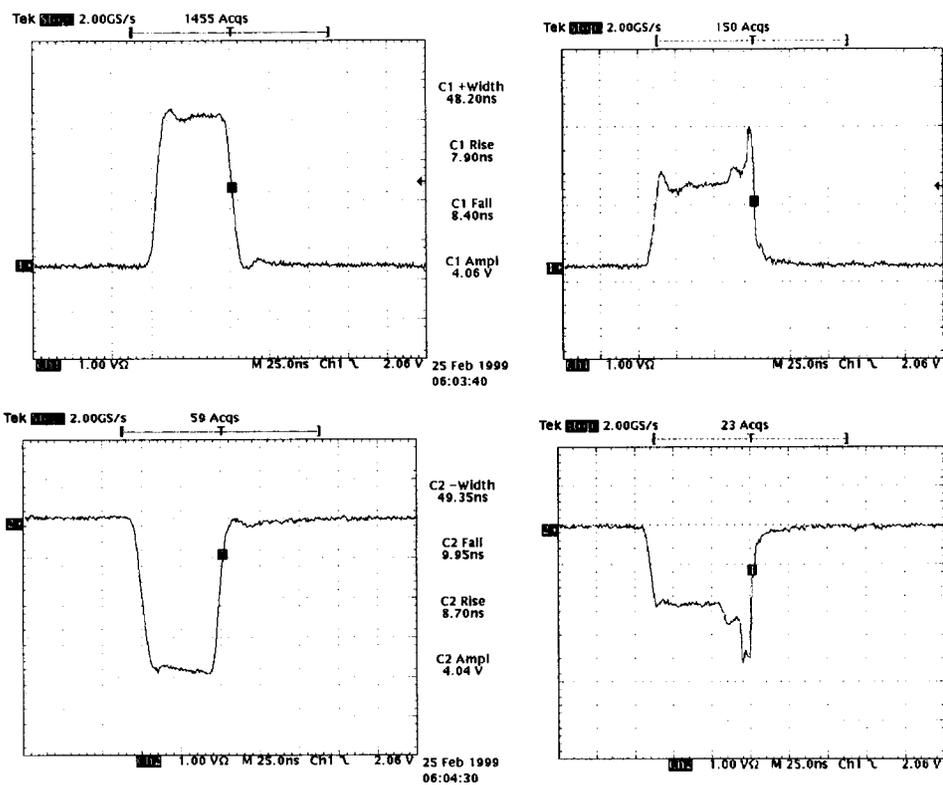


Figura 4.2: Recuperação a saturação para um pulso de entrada de  $\pm 4$  V. Na esquerda, vemos o pulso de entrada e, na direita, a saída do somador.

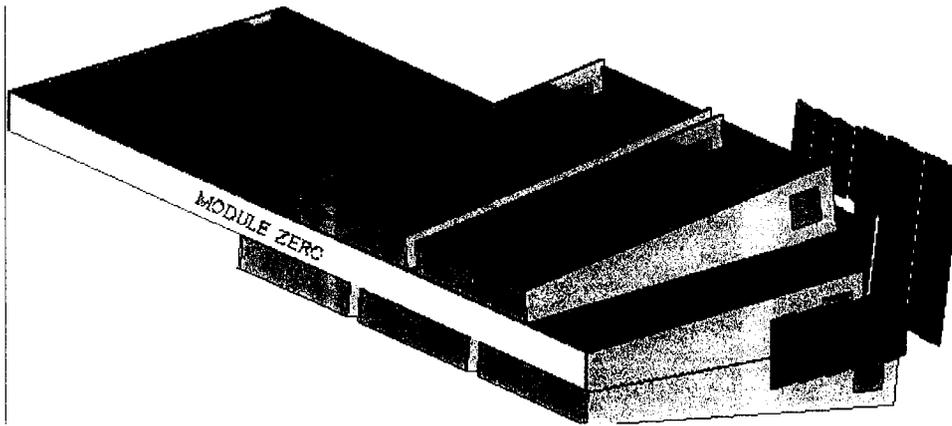


Figura 4.3: Configuração experimental do calorímetro para o teste com feixe de partículas com o somador discreto. O longo módulo no centro é o módulo 0 e ao redor temos os 5 módulos de dimensões menores.

### 4.3 Testes com Feixe de Partículas

No CERN, o circuito foi instalado no detector e testes com feixes de partículas foram realizados. Nestes testes, partículas (elétrons, píons e múons) de diferentes energias (variando de 20 até 400 GeV) foram incididas no detector, com diferentes pontos de impacto e ângulos de incidência.

Nove circuitos foram instalados na gaveta do protótipo de última geração do detector (denominado Módulo 0). A Figura 4.3 mostra como o detector foi montado, sendo que o Módulo 0 é o longo módulo central. Cinco protótipos de uma versão anterior de módulos do detector foram colocados ao redor do Módulo 0, para minimizar o vazamento de energia que pode ocorrer, dependendo do feixe que incida no detector, pelas dimensões reduzidas do calorímetro formado por um único módulo. Tanto nas laterais, quanto atrás do calorímetro, um detector para múons, chamado de parede de múons (*muon wall*), foi colocado para rejeitar múons indesejáveis (contaminação) presentes nos feixes de píons e elétrons.

Os sinais do calorímetro e dos somadores foram lidos por ADCs de 12 bits e 40 MHz [25], possibilitando a comparação dos sinais dos somadores com a soma obtida por meio de *software* dos respectivos sinais do calorímetro que formam as torres de validação, adquiridos individualmente e de forma simultânea pelo sistema de aquisição.

A correlação entre a soma *software* das células com a correspondente soma

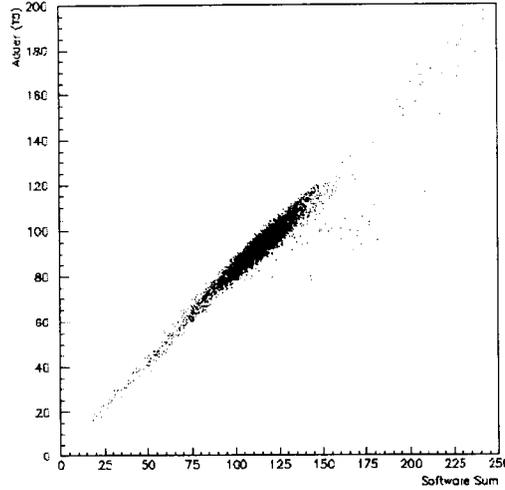


Figura 4.4: Correlação entre o sinal do somador e a correspondente soma *software* para eventos de píons. No eixo horizontal, temos a energia para a soma *software* e, no vertical, a energia para a saída do somador, ambos em GeV.

*hardware*, fornecida pelos somadores, mostrou bom resultado ao longo de toda a faixa dinâmica. Como exemplo, a Figura 4.4 mostra a correlação para eventos de píons de 180 GeV. O coeficiente de correlação medido foi 98%.

Na Figura 4.5, vemos o histograma da energia da saída do somador e da respectiva soma *software* aonde podemos verificar a similaridade entre as duas estruturas e calcular a resolução em energia para ambos os histogramas pela Equação 4.1, onde  $E$  é a média e  $\sigma_E$  o desvio padrão do histograma. Ambos os histogramas apresentaram uma resolução de 0,14.

$$\rho = \sigma_E/E \quad (4.1)$$

A Figura 4.6 mostra a linearidade do circuito medida usando a metodologia já descrita na seção anterior. Sinais de píons de diferentes energias atingindo a respectiva torre de validação foram usados. No eixo horizontal, temos a média do histograma de energia para a soma *software* e no eixo vertical, a média para a saída do somador. Confirmando o resultado obtido nos testes em laboratório, a não-linearidade do circuito foi menor do que 2%. Devido ao grande número de eventos para os histogramas relativos às diferentes energias, o erro no cálculo das médias

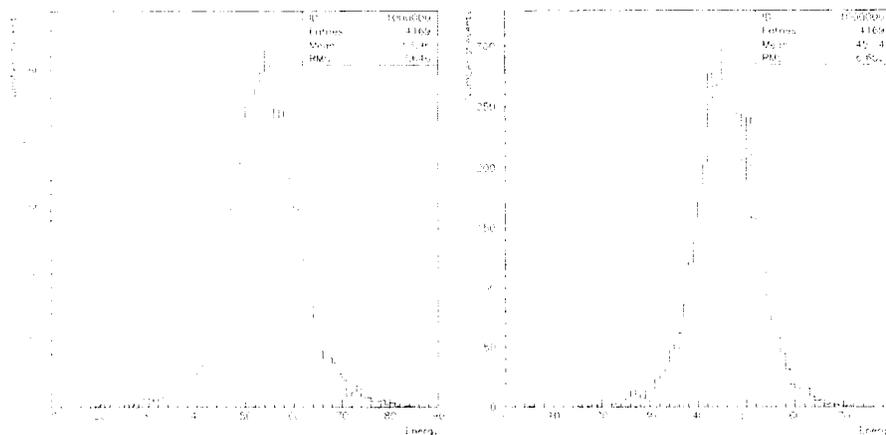


Figura 4.5: Energia depositada no detector por píons de 100 GeV. Soma *software* (esquerda) e saída do somador (direita).

é muito pequeno, desta forma, decidimos usar o desvio padrão para representar a flutuação dos dados no gráfico da linearidade.

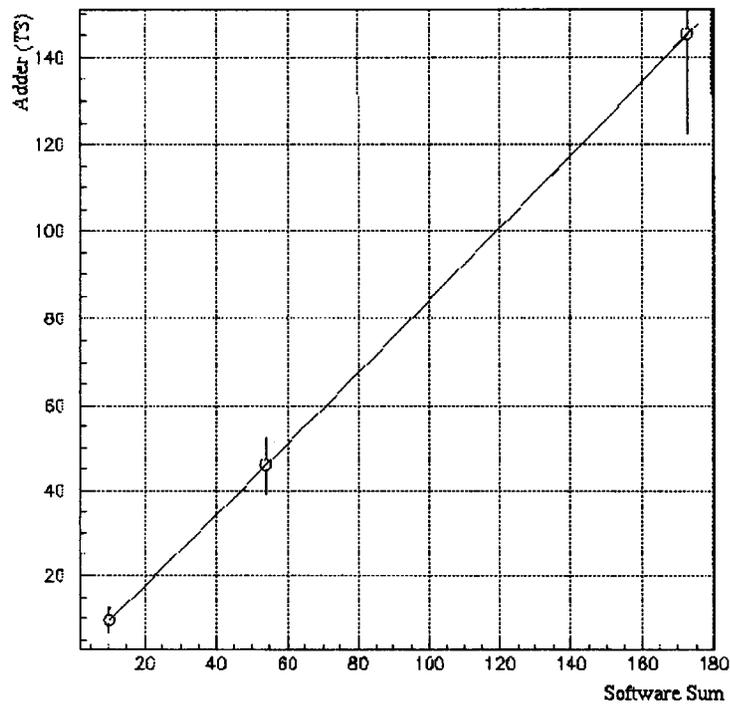


Figura 4.6: Linearidade do somador para píons de 20, 100, 300 GeV.

# Capítulo 5

## Somador com Amplificadores Operacionais

Devido às mudanças nas especificações e a evolução natural do projeto ao longo do tempo, quando novas características da física de interesse são incorporadas, o circuito final, que está sendo instalado no detector para operação no LHC, é diferente do circuito apresentado anteriormente. Optamos por projetar um tal somador com circuitos integrados comerciais, para que ele fosse de fácil manutenção, robusto e que atendesse às novas especificações de projeto.

### 5.1 Especificações de Projeto

Os sinais de entrada do somador são provenientes do circuito 3-em-1, como para o caso anterior, possuindo as seguintes características:

- Unipolares com 50 ns de largura a meia altura (FWHM).
- Diferenciais com 1,0 V de excursão máxima (800 pC).
- Devem ser casados com 50  $\Omega$  de impedância.
- Possuem calibração de 1,25 mV/pC.
- Devem ter coincidência no tempo, nas entradas do somador, de  $\pm 1,5$  ns.

O somador deve fornecer dois sinais diferenciais de saída, ambos capazes de excursionar  $\pm 2,0$  V em cargas 50  $\Omega$ . Um dos sinais deve corresponder à soma das

seis entradas do circuito (saída da soma), formando o sinal das torres de validação de eventos do Telhas. A outra saída deve apenas fornecer, o sinal da terceira camada do calorímetro (saída de múons), que é uma das entradas usadas para compor o sinal de soma e, que será usado pelo sistema de validação de múons. As especificações para os sinais de saída são:

- Unipolares com 50 ns de largura a meia altura (FWHM).
- Diferenciais com 4 V de excursão máxima (400 pC).
- Calibração de 10 mV/pC (ganho de tensão de 8) para a saída da soma.
- Calibração de 10 mV/pC (ganho de tensão de 8)<sup>1</sup> para a saída de múons.
- Cargas de 50  $\Omega$ .
- Faixa dinâmica correspondente a 10-bits para a saída da soma.

As principais mudanças de especificação dizem respeito a nova calibração, pois anteriormente o ganho de tensão era de um e passou para oito, e também com relação ao novo sinal que o somador deve disponibilizar, com respeito à validação de múons.

## 5.2 O Projeto do Circuito

O circuito é baseado na conversão dos sinais de tensão de cada nó de entrada em correntes, através de amplificadores de transcondutância, com a posterior soma destas correntes e a conversão em tensão por meio de resistores. O sinal de tensão de saída resulta de um estágio amplificador de tensão, que possui a requerida capacidade de corrente. O caminho do sinal é mantido sempre diferencial na placa, para evitar que qualquer ruído em modo-comum induzido no circuito resulte em um ruído diferencial em sua saída. Podemos observar que, conceitualmente, o circuito segue a versão discreta apresentada no capítulo anterior.

---

<sup>1</sup>Esta especificação acabou sendo alterada, como será visto mais adiante, mas o circuito foi originalmente projetado para a ganho 8 na saída de múons.

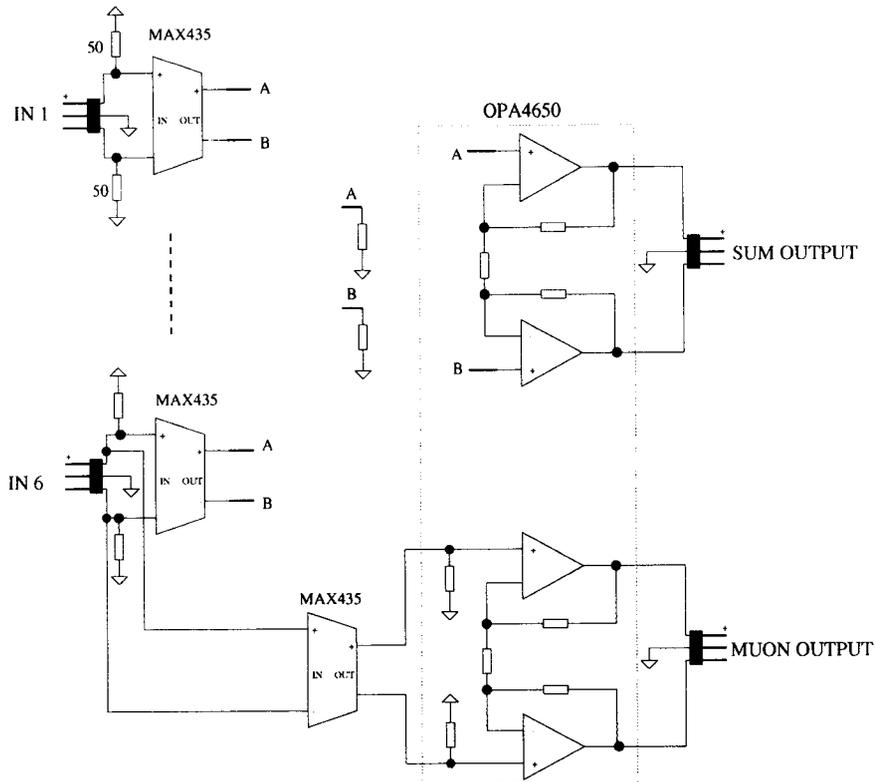


Figura 5.1: Diagrama em blocos da versão final do somador.

O diagrama em blocos do circuito pode ser visto na Figura 5.1. Os circuitos isoladores de entrada casam a impedância com os sinais de entrada e previnem a ocorrência de *crossstalk* entre os canais. Eles são implementados por amplificadores de transcondutância diferenciais (MAX435 da MAXIM), que fornecem uma corrente de saída proporcional à tensão da entrada. As correntes de todos os seis canais são somadas através de um nó elétrico, sendo convertidas para tensão por meio de resistores. O estágio de saída é implementado por um amplificador de instrumentação clássico (OPA4650 da Burr-Brown), fornecendo o sinal diferencial que alimenta o primeiro nível de validação de eventos. A segunda saída é implementada com estágios de entrada e saída idênticos aos usados para a saída da soma, mas independentes, disponibilizando assim o sinal da terceira camada do calorímetro para o sistema de validação de eventos.

### 5.2.1 O Estágio de Entrada

O amplificador de transcondutância de banda-larga (WTA) MAX435, usado como estágio de entrada, atua como uma fonte de corrente controlada a tensão, isto

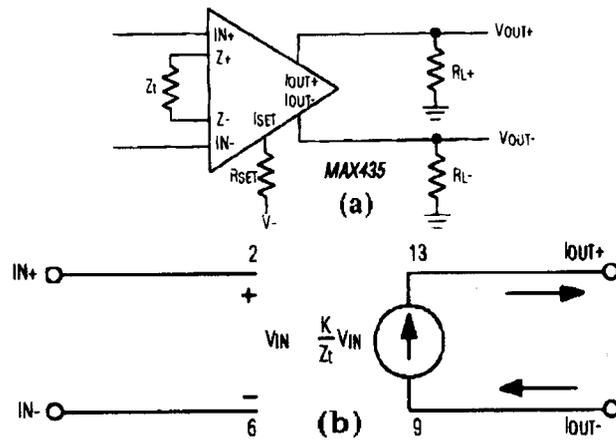


Figura 5.2: Configuração básica para o MAX435 (a) e seu modelo elétrico.

é, a saída do MAX435 é uma corrente proporcional à entrada diferencial de tensão. A saída em corrente e a ausência de realimentação negativa permite que a saída diferencial atinja uma largura de banda de 275 MHz e 800 V/ $\mu$ s de *slew rate*. O amplificador oferece também uma significativa rejeição de modo-comum (53 dB para 10 MHz). O circuito apresenta entradas simétricas de alta impedância (750 k $\Omega$ ), que podem receber grandes tensões diferenciais sem apresentar falhas destrutivas ou saturação, praticamente eliminando o tempo de recuperação a sobrecargas [26]. Na Figura 5.2, podemos ver o modelo elétrico do MAX435 e sua configuração básica.

### 5.2.1.1 Operação

O ganho do MAX435 é dado pela razão de duas impedâncias, a do elemento de transcondutância ( $Z_T$ ), e a impedância de saída ( $Z_L$ ). A tensão diferencial de entrada ( $V_{IN}$ ) provoca a circulação de corrente sobre o elemento transcodutor ( $Z_T$ ). Esta corrente é igual a  $V_{IN}/Z_T$ . Ela é então multiplicada pelo ganho de corrente fixo do amplificador ( $K=4 \pm 2,5\%$ ) e aparece nos terminais de saída como uma corrente igual a  $K \cdot V_{IN}/Z_T$ . Esta corrente circula através da impedância de saída, produzindo a tensão de saída:

$$V_{OUT} = K \cdot \frac{Z_L}{Z_T} \cdot V_{IN} \quad (5.1)$$

O amplificador possui entradas de alta impedância simétricas, permitindo a aplicação de entradas diferenciais, e a inversão de polaridade do sinal pode ser realizada pela inversão dos terminais de entrada. A faixa de tensão de entrada do amplificador é de -2,5 V a +2,5 V, o que é mais do que suficiente para a aplicação

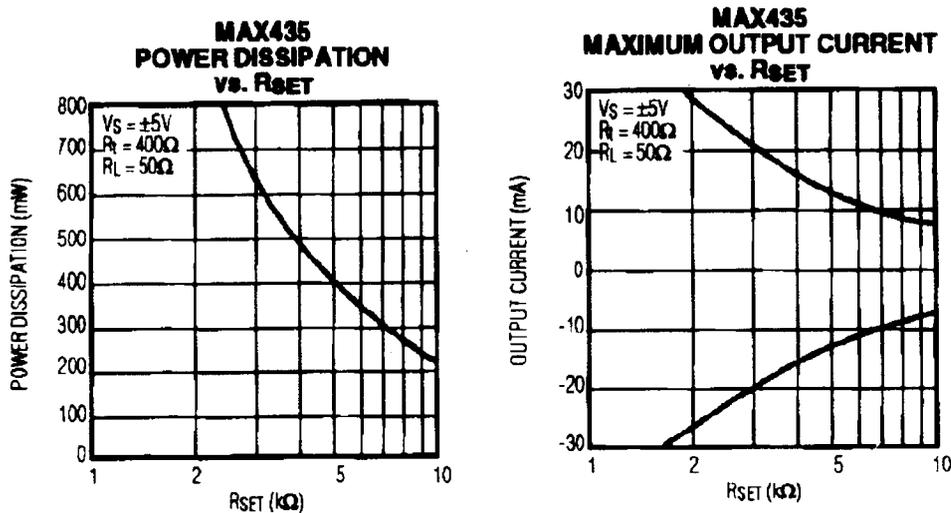


Figura 5.3: Curvas de operação do amplificador MAX435 para dissipação de potência e máxima corrente de saída, conforme o valor de  $R_{SET}$ .

( $\pm 1,0$  V).

### 5.2.1.2 Parâmetro de Projeto

O ganho de tensão do WTA é dado pela Equação (5.1). Uma fonte de corrente externa controla o consumo de corrente do circuito, através da conexão do resistor  $R_{SET}$  do pino  $I_{SET}$  para a fonte de tensão negativa (V-) (veja a Figura 5.2). O valor típico para este resistor é de  $5,9 \text{ k}\Omega$ , o que produz uma capacidade de corrente na saída de  $\pm 10 \text{ mA}$ . O uso de resistores de maior valor reduz a capacidade de corrente e a dissipação de potência do circuito. Resistores de menor valor podem ser utilizados para aumentar a capacidade de corrente do circuito, mas deve-se garantir que a dissipação de potência do encapsulamento do integrado não seja excedida para as condições específicas de operação. As curvas típicas para estes parâmetros de projeto podem ser vistas na Figura 5.3.

Para otimizar a performance do amplificador de transcondutância, as fontes de alimentação devem ser devidamente desacopladas do circuito e cuidados especiais devem ser tomados na elaboração do *layout* da placa. No somador, capacitores de cerâmica de  $0,1 \mu\text{F}$  foram ligados do pino de alimentação para o terra, desacoplando as fontes de cada MAX435.

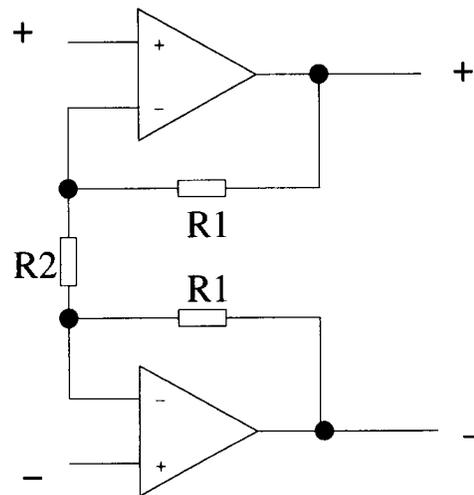


Figura 5.4: Topologia do estágio de saída do somador.

### 5.2.2 O Estágio de Saída

O estágio de saída do circuito é composto por amplificadores operacionais de banda-larga e baixo ruído, o OPA4650, numa configuração de amplificador de instrumentação clássico [27]. O OPA4650 é um circuito com quatro amplificadores operacionais com realimentação de tensão, uma banda de 360 MHz e baixa dissipação de potência [28].

A topologia do estágio de saída pode ser vista na Figura 5.4, e seu ganho diferencial é definido por:

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = 1 + 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad (5.2)$$

Uma característica importante, que deve ser considerada no projeto, é que, quando aumenta-se o ganho do estágio de saída, a banda em frequência do circuito diminui, criando um limite máximo para o ganho deste estágio. Outra característica que também deve ser observada é o valor do resistor  $R_1$ , pois ele deve ser algumas vezes maior do que a carga de  $50 \Omega$  da saída, para evitar uma queda na impedância de saída do operacional, preservando assim sua excursão de saída.

A rejeição de modo-comum deste estágio é da ordem do ganho diferencial, o que melhora ainda mais esta característica para o circuito como um todo.

Parâmetro	Saída da Soma	Saída de Múons
$K$	4	4
$Z_T$	243	243
$R_{out}$	583	3500
$R_S$	136	136
$R_1$	1k	1k
$R_2$	576	618
<b>Ganho</b>	8,12	9,12

Tabela 5.1: Valor dos parâmetros para o cálculo teórico do ganho do circuito somador.

### 5.2.3 O Circuito Final

O circuito final foi obtido usando-se as equações (5.1) e (5.2), as curvas características do MAX435 e do OPA4650, estudos realizados por simulações usando modelos SPICE dos dispositivos, e testes em laboratório. O esquemático elétrico do circuito pode ser visto na Figura 5.5.

O circuito foi projetado para que o ganho de ambas as saídas ficasse por volta de 8. Usando a equação 5.3, podemos verificar o ganho teórico do circuito para ambas as saídas do circuito, aonde  $K$  é o ganho de transcondutância do WTA,  $Z_T$  a impedância de transcondutância,  $R_{out}$  a impedância de saída do WTA,  $R_S$  a carga do primeiro estágio e  $R_1$  e  $R_2$  são os resistores ligados aos amplificadores operacionais do estágio de saída. Na tabela 5.1, vemos o valor dos elementos usados para ambas as saídas do somador e o resultado para o ganho.

$$\frac{K}{Z_T} \left( \frac{R_{out} R_S}{R_{out} + R_S} \right) \left( 1 + 2 \frac{R_1}{R_2} \right) \quad (5.3)$$

As especificações de ruído para o circuito foram atendidas, como será mostrado no próximo capítulo. Entretanto, tais especificações acabaram por ser comprometidas pelo ruído produzido pelo circuito 3-em-1. Como o sinal de saída resulta da combinação de até seis sinais provenientes dos circuitos 3-em-1, o ruído deste circuito tem um impacto significativo no ruído do nó de saída do somador. A saída de múon do circuito também sofre do mesmo problema, já que o sinal da terceira camada do

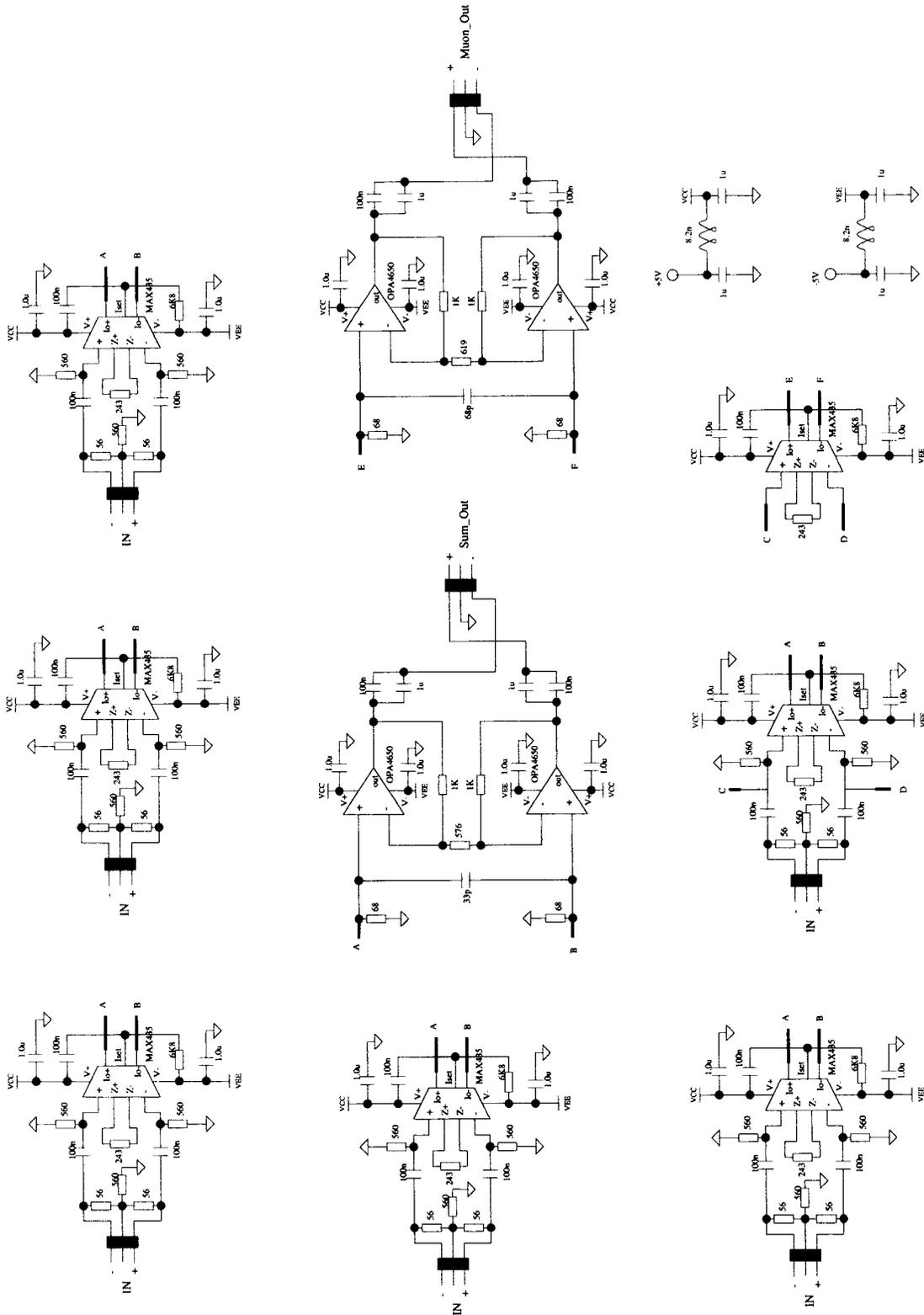


Figura 5.5: Esquemático elétrico do somador com ganho 8 para ambas as saídas do circuito.

detector é relativamente pequeno, sendo o ruído o parâmetro mais importante para esta saída do circuito.

Então, para atingir uma redução ainda maior no ruído das duas saídas do somador, a banda em frequência do circuito foi reduzida pela colocação de um capacitor de cerâmica entre as entradas do estágio de saída, entre os nós A e B (33 pF), e os nós C e D (68 pF) na Figura 5.5. Este capacitor, juntamente com os resistores de saída do estágio de entrada (68  $\Omega$ ), atua como um filtro passa-baixa, reduzindo a banda do circuito.

### 5.2.3.1 Mudança no Ganho da Saída de Múons

Após alguns estudos sobre a performance do sinal da saída de múons em testes com feixe de partículas (Capítulo 8), o primeiro nível de validação observou que não seria possível validar eventos de múons com a pequena relação sinal-ruído da saída de múons do somador e com o pequeno valor de amplitude do sinal. Isto acontece, devido a pouca energia deixada por eventos de múons no calorímetro e ao sinal ruidoso do circuito 3-em-1.

A única solução para o problema, seria aumentar significativamente o ganho desta saída, pois não era possível alterar nada no circuito 3-em-1 (já em produção). O ganho para a saída de múons foi modificado, passando de 8 para 225, para que um simples discriminador de amplitude pudesse ser usado para a detecção de múons e para que o ruído do sistema de aquisição (circuito receptor+ADC) passasse a ser desprezível em relação ao ruído do sinal. Devido a pequena amplitude do sinal de múons do 3-em-1, necessitamos de um alto ganho para que na ocorrência de um evento de múons, um sinal de aproximadamente 80 mV de amplitude seja produzido na saída de múons do somador (requisição do sistema de validação de eventos).

Devido ao alto ganho determinado para a saída de múons do circuito, o sinal torna-se mais lento do que o sinal da soma. Um ponto a ser ressaltado, é que só foi possível atingir um ganho próximo a 230, sem deteriorar significativamente a resposta em frequência do circuito, devido ao amplificador MAX435, que, por ser um amplificador de transcondutância, fez com que o impacto do ganho na resposta em frequência do circuito não seja tão drástico quanto o de um amplificador operacional de tensão.

Item	Componente	Quantidade
1	Capacitor 1 $\mu\text{F}$	24
2	Capacitor 100 nF	23
3	Capacitor 33 pF	1
4	Capacitor 68 pF	1
5	Pins (power and ground)	20
6	Connectors (input and output)	8
7	Inductor 8.2 nH	2
8	Resistor 15 $\Omega$	1
9	Resistor 56 $\Omega$	12
10	Resistor 68 $\Omega$	4
11	Resistor 243 $\Omega$	7
12	Resistor 560 $\Omega$	18
13	Resistor 576 $\Omega$	1
14	Resistor 1 k $\Omega$	4
15	Resistor 6.8 k $\Omega$	7
16	WTA MAX435	7
17	Amplificador OPA4650	1

Tabela 5.2: Lista de componentes final do somador.

Para aumentar o ganho da saída de múons do circuito, alteramos o valor de apenas dois resistores do circuito, o  $Z_T$  (de 243  $\Omega$  para 15  $\Omega$ ) e o  $R_2$  (de 618  $\Omega$  para 243  $\Omega$ ) da Equação 5.3. O esquemático do circuito final pode ser visto na Figura 5.6.

A lista de componentes do circuito final pode ser vista na Tabela 5.2.

### 5.3 Estimativas de Dispersão de Ganho e Ruído

Dois parâmetros importantes de projeto são o nível de ruído nas saídas do circuito e a dispersão do ganho para a produção das placas somadoras. Com base nas especificações dos componentes usados no circuito, e fazendo algumas simplificações quando necessário, é possível estimar estes dois parâmetros teoricamente.

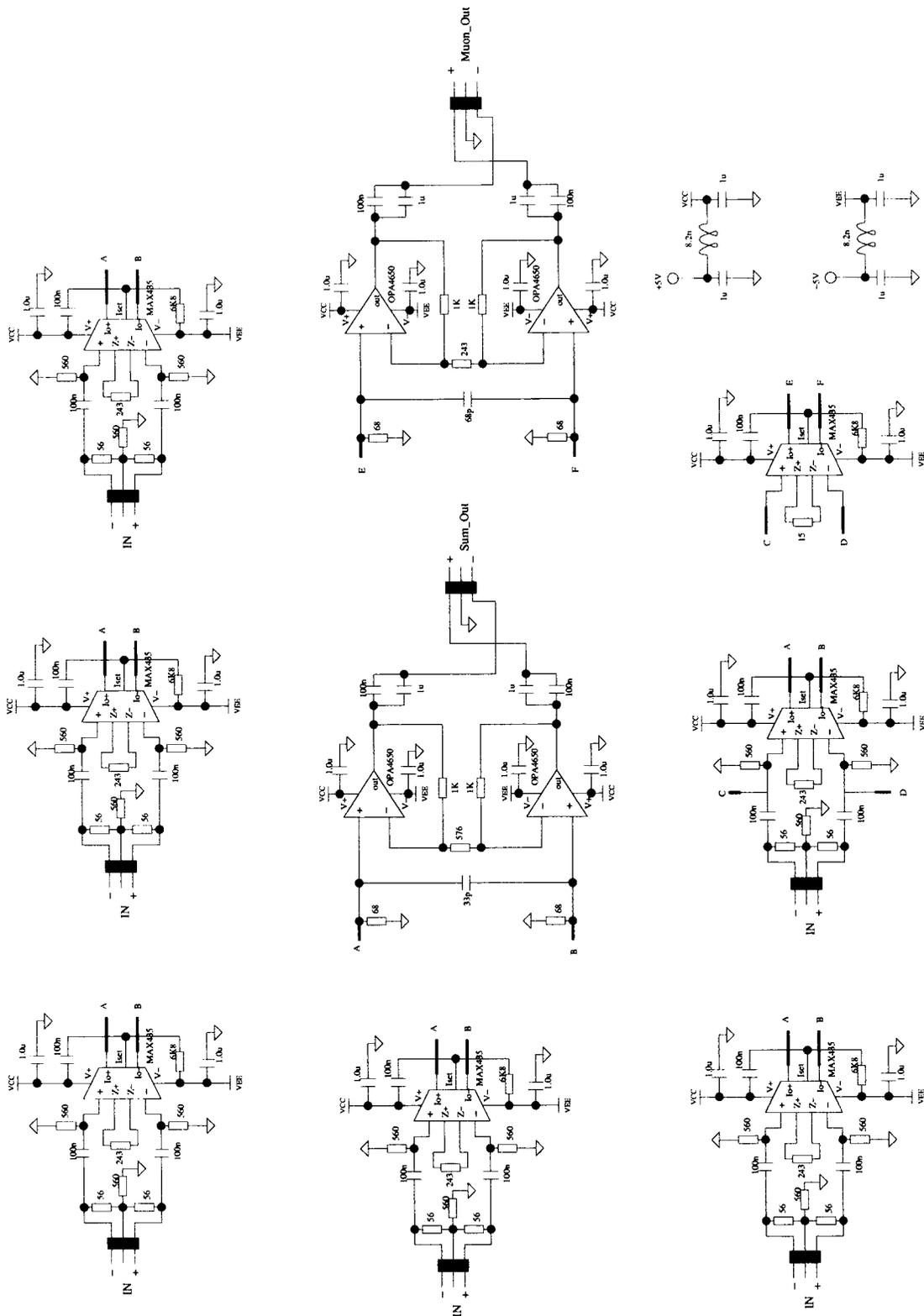


Figura 5.6: Esquemático elétrico do somador que será utilizado no LHC (ganho de 225 para a saída de múons).

Elemento	Saída da Soma		Saída de Múons	
	Valor	$\sigma$	Valor	$\sigma$
$K$	4	0,033	4	0,033
$Z_T$	243	0,81	15	0,05
$R_{out}$	583	58	3500	350
$R_S$	136	0,32	136	0,32
$R_1$	1k	3,33	1k	3,33
$R_2$	576	1,92	243	0,81

Tabela 5.3: Valor e dispersão dos parâmetros para o cálculo teórico da dispersão do ganho do circuito somador.

### 5.3.1 Dispersão do Ganho

Para o cálculo da dispersão do ganho, considerando as fontes de dispersão com distribuições *gaussianas* independentes, usamos a seguinte equação:

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n}\right)^2 \sigma_{x_n}^2} \quad (5.4)$$

O ganho para ambas as saídas do circuito é definido pela Equação 5.3 para a faixa plana da resposta em frequência do circuito.

Todos os valores e as respectivas dispersões para os elementos da Equação 5.3 podem ser vistos na Tabela 5.3. O valor da impedância de saída do WTA muda relativamente ao ganho da saída da soma e da saída de múons, pois na soma temos 6 amplificadores ligados em paralelo, resultando no valor  $R_{out}/6$  e  $\sigma_{R_{out}}/\sqrt{6}$  para sua dispersão. Outro ponto a ser ressaltado é que não é dado o valor da dispersão na impedância de saída do WTA, o valor utilizado para os cálculos foi de 10%.

Aplicando a Equação 5.4 na Equação 5.3 chegamos a seguinte expressão para

Saída	Ganho	Dispersão ( $\sigma$ )
Soma	8.12	2,1%
Múon	322	1,1%

Tabela 5.4: Valor do ganho e de sua dispersão ( $\sigma$ ) para as saídas do circuito somador.

a dispersão do ganho do circuito:

$$\begin{aligned}
\sigma_{ganho}^2 = & \left[ \frac{1}{Z_T} \left( \frac{R_{out}R_S}{R_{out} + R_S} \right) \left( 1 + 2\frac{R_1}{R_2} \right) \right]^2 \sigma_K^2 + \\
& \left[ \frac{K}{Z_T} \left( 1 + 2\frac{R_1}{R_2} \right) \left( \frac{R_S(R_{out} + R_S) - R_{out}R_S}{(R_{out} + R_S)^2} \right) \right]^2 \sigma_{R_{out}}^2 + \\
& \left[ \frac{K}{Z_T} \left( 1 + 2\frac{R_1}{R_2} \right) \left( \frac{R_{out}(R_{out} + R_S) - R_{out}R_S}{(R_{out} + R_S)^2} \right) \right]^2 \sigma_{R_S}^2 + \\
& \left[ -\frac{K}{Z_T^2} \left( \frac{R_{out}R_S}{R_{out} + R_S} \right) \left( 1 + 2\frac{R_1}{R_2} \right) \right]^2 \sigma_{Z_T}^2 + \\
& \left[ \frac{2K}{Z_T R_2} \left( \frac{R_{out}R_S}{R_{out} + R_S} \right) \right]^2 \sigma_{R_1}^2 + \\
& \left[ -\frac{2K R_1}{Z_T R_2^2} \left( \frac{R_{out}R_S}{R_{out} + R_S} \right) \right]^2 \sigma_{R_2}^2 \tag{5.5}
\end{aligned}$$

Resolvendo a Equação 5.5 chegamos ao resultado mostrado na Tabela 5.4. Vemos que tanto para a saída da soma quanto para a saída de múons temos uma dispersão menor do que 3,5% no ganho. O valor do ganho para a saída da soma se aproxima bastante do ganho medido em laboratório (8), porém para a saída de múons não (225 no laboratório). Isto indica que, para a saída de múons, a banda em frequência do sinal é maior do que a banda do circuito, o que pode introduzir flutuações no ganho maiores do que a prevista nestes cálculos. Na figura 5.7, podemos ver a transformada discreta de Fourier do sinal de saída do circuito 3-em-1, que podemos comparar com a Figura 5.10 e vemos que o sinal possui bastante informação acima de 6 MHz que é aproximadamente a frequência de corte da saída de múons do circuito somador.

### 5.3.2 Nível de Ruído

Nesta seção é apresentado um estudo teórico sobre o ruído presente nas saídas do somador, para servir de comparação para os resultados obtidos em laboratório. Uma breve introdução sobre o ruído inerente a circuitos eletrônicos será dada para

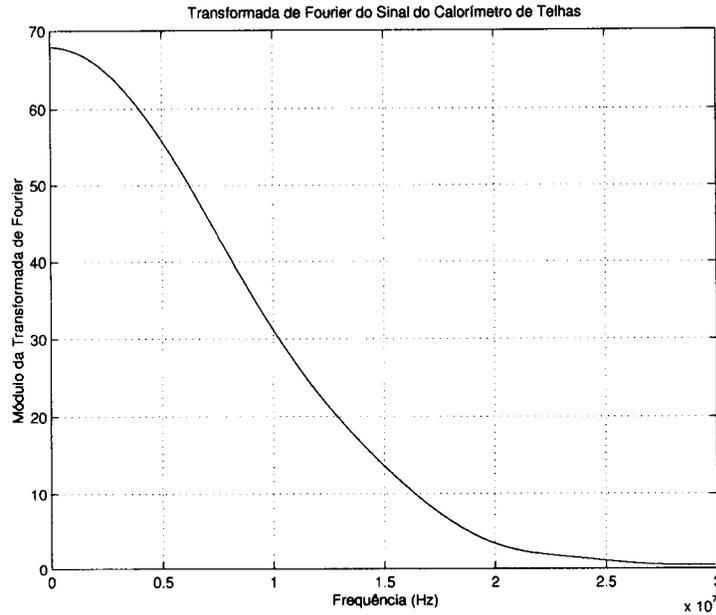


Figura 5.7: Transformada discreta de Fourier do sinal de saída do circuito 3-em-1. Pode-se comparar a banda do sinal com a banda do circuito (Figura 5.10).

depois apresentarmos os cálculos.

Na Figura 5.8, pode-se ver o exemplo de um sinal de ruído. O valor *rms* do sinal pode ser calculado como

$$V_{n(rms)} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_n^2(t) dt} \quad (5.6)$$

O valor *rms* da soma de duas fontes de ruídos pode ser feita da seguinte forma:

$$V_{no(rms)}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T [V_{n1}(t) + V_{n2}(t)]^2 dt \quad (5.7)$$

que pode ser expandido, resultando,

$$V_{no(rms)}^2 = V_{n1(rms)}^2 + V_{n2(rms)}^2 + \frac{2}{T} \int_0^T V_{n1}(t)V_{n2}(t) dt \quad (5.8)$$

Os primeiros dois termos são os valores *rms* individuais das fontes de ruído, enquanto que o último termo mostra a correlação entre as duas fontes. Para o caso em que as fontes são descorrelacionadas, o valor *rms* da soma é:

$$V_{no(rms)} = \sqrt{V_{n1(rms)}^2 + V_{n2(rms)}^2} \quad (5.9)$$

Quando um ruído é filtrado por um sistema cuja função de transferência é  $H(s)$ , aonde  $H(s)$  pode representar uma amplificação por um circuito, filtragem, ou

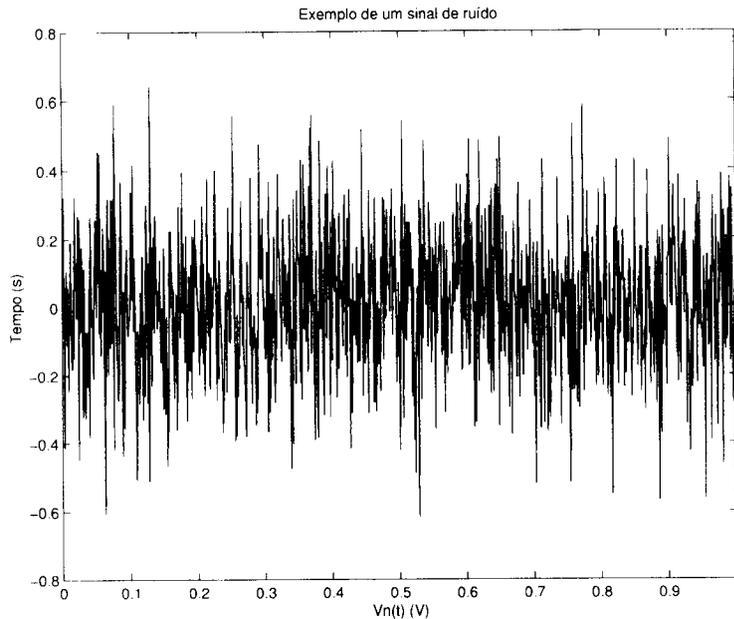


Figura 5.8: Exemplo de um sinal de ruído no tempo.

ambos, o valor *rms* do ruído é dado por [29]

$$V_{no(rms)}^2 = \int_0^{\infty} |H(j2\pi f)|^2 V_n^2(f) df \quad (5.10)$$

Desta forma, para calcular o ruído nas saídas do somador é necessário estimar a função de transferência do circuito.

O circuito possui basicamente três filtros passa-baixas, desconsiderando os capacitores de desacoplamento na saída do circuito que introduzem cortes em baixa frequência. O primeiro filtro é introduzido pelo estágio de entrada (WTA), e sua forma pode ser estimada a partir da folha de dados do dispositivo [26]. O segundo filtro é formado pela capacitância de saída do (WTA) em paralelo com a carga de saída do primeiro estágio do circuito, que é composta por um capacitor em paralelo com um resistor, e o terceiro filtro é introduzido pela resposta em frequência do amplificador operacional usado no estágio de saída do somador e, consultando a folha de dados do operacional [28], pode-se aproximar a resposta em frequência deste estágio.

Nas Tabelas 5.5 e 5.6, os dados sobre a resposta em frequência do WTA (estágio de entrada) e do operacional (estágio de saída) podem ser vistos para ambas as saídas, tendo sido estimados a partir das curvas de resposta em frequência dos respectivos dispositivos.

Para se calcular o último filtro passa-baixas do circuito, precisamos primeiro

Parâmetro	Saída da Soma	Saída de Múons
<b>Ganho</b>	1,8	33,9
<b>fc</b>	150 MHz	10 MHz
<b>ordem</b>	1	1

Tabela 5.5: Resposta em frequência do WTA (estágio de entrada do somador). Estimado a partir das curvas da folha de dados do dispositivo.

Parâmetro	Saída da Soma	Saída de Múons
<b>Ganho</b>	4,5	9,2
<b>fc</b>	37 MHz	18 MHz
<b>ordem</b>	1	1

Tabela 5.6: Resposta em frequência do amplificador operacional (estágio de saída do somador). Estimado a partir das curvas da folha de dados do dispositivo.

calcular a capacitância de saída do WTA. Para isto, foi considerado que a resposta em frequência do WTA para ganho 1 era limitada pelo filtro formado pelo paralelo da capacitância de saída do circuito com a carga resistiva  $R_L$ . Como o circuito tem uma banda de 275 MHz para uma carga de  $50 \Omega$  [26], a capacitância de saída ( $C_{out}$ ) foi estimada em 11,5 pF.

Finalmente, o filtro formado por  $C_{out} // C // R$  pode ser calculado para ambas as saídas do somador, sendo um filtro de primeira ordem com frequência de corte conforme a Equação 5.11. Para a saída da soma, C é igual a 33 pF enquanto que para a de múons é igual a 68 pF. O valor de R é  $110 \Omega$  e  $131 \Omega$  respectivamente para a saída da soma e de múons, com estes valores, calculamos a frequência de corte.

$$f_c = \frac{1}{2\pi R(C + C_{out})} \quad (5.11)$$

Na Tabela 5.7, podemos ver os parâmetros da resposta em frequência do filtro  $R // C$  do circuito para ambas as saídas. Portanto, o módulo da função de transferência da entrada para a saída do somador pode ser estimada, considerando os três filtros passa-baixas em cascata. Na Figura 5.9, vemos o módulo da resposta em frequência para ambas as saídas do circuito.

Estimada a resposta em frequência do circuito, devemos agora definir quais fontes de ruído serão consideradas no cálculo. As fontes de ruído em circuitos

Parâmetro	Saída da Soma	Saída de Múons
<b>Ganho</b>	1	1
<b>fc</b>	14,1 MHz	18,6 MHz
<b>ordem</b>	1	1

Tabela 5.7: Resposta em frequência do filtro  $R//C$  do circuito somador.

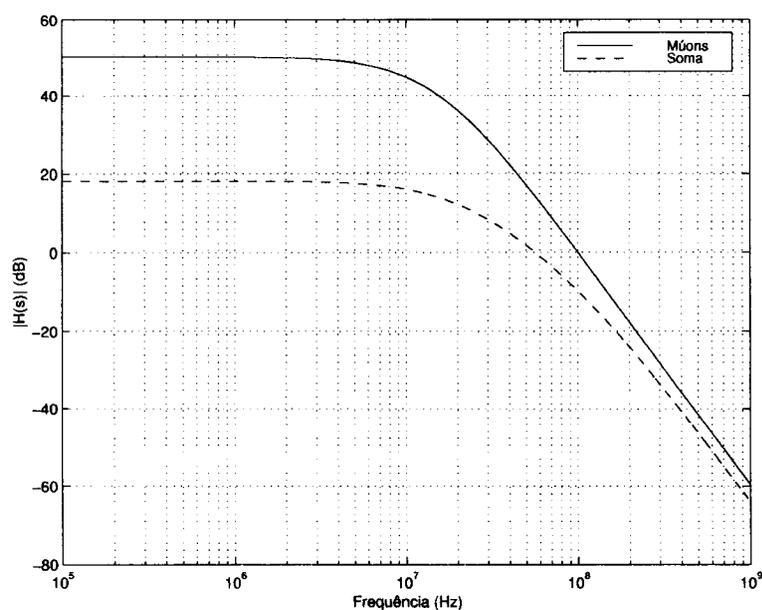


Figura 5.9: Módulo da resposta em frequência estimada para ambas as saídas do somador. A linha tracejada representa a resposta para a saída da soma.

elétricos compostos por resistores, capacitores e amplificadores operacionais, como é o caso do somador, são relacionadas ao ruído térmico dos resistores e ao ruído dos amplificadores. Cálculos preliminares mostraram que o ruído introduzido pelos resistores no circuito somador é desprezível quando comparado ao ruído introduzido pelo WTA e pelos amplificadores operacionais. Portanto, em nossos cálculos, só estaremos considerando como fontes de ruído aquelas associadas aos amplificadores usados no circuito.

O ruído introduzido pelo WTA foi representado como uma fonte de tensão ligada a uma de suas entradas, tendo  $7 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  de densidade de ruído, aonde consideramos uma distribuição uniforme ao longo da frequência, e o ruído introduzido pelo operacional possui  $8,4 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  com distribuição uniforme novamente, estando a fonte ligada a entrada do operacional. Portanto, o circuito possui apenas duas fontes de ruído.

Primeiro calcularemos o ruído introduzido pelo WTA, aonde consideramos a função de transferência da entrada para a saída do circuito, para posteriormente calcularmos o ruído introduzido pelo amplificador operacional. Neste caso, usamos a resposta em frequência apenas do estágio de saída do circuito.

Para simplificar o cálculo e evitar a integral da banda do ruído, resolvemos calcular a banda equivalente de ruído olhando para os gráficos do módulo da resposta em frequência do circuito (Figura 5.10). A banda do ruído seria a resposta de um passa-baixas ideal (retangular) que tivesse a mesma área da resposta do circuito. Para a saída da soma, calculamos a banda de ruído como sendo 20 MHz, e para a saída de múons, 10 MHz.

Para a saída da soma, não podemos esquecer da contribuição do ruído das seis entradas, que é facilmente calculado multiplicando o resultado de uma das entradas por  $\sqrt{6}$ .

Para o cálculo do ruído introduzido pelo amplificador operacional, usamos a resposta em frequência do estágio de saída, que pode ser vista na Tabela 5.6. Como este é um filtro de primeira ordem, resultados presentes na literatura [30] mostram que a banda equivalente do ruído é igual a  $f_c\pi/2$ , onde  $f_c$  é a frequência de corte do filtro passa-baixas.

O ruído total na saída do circuito é calculado conforme a Equação 5.9. Na

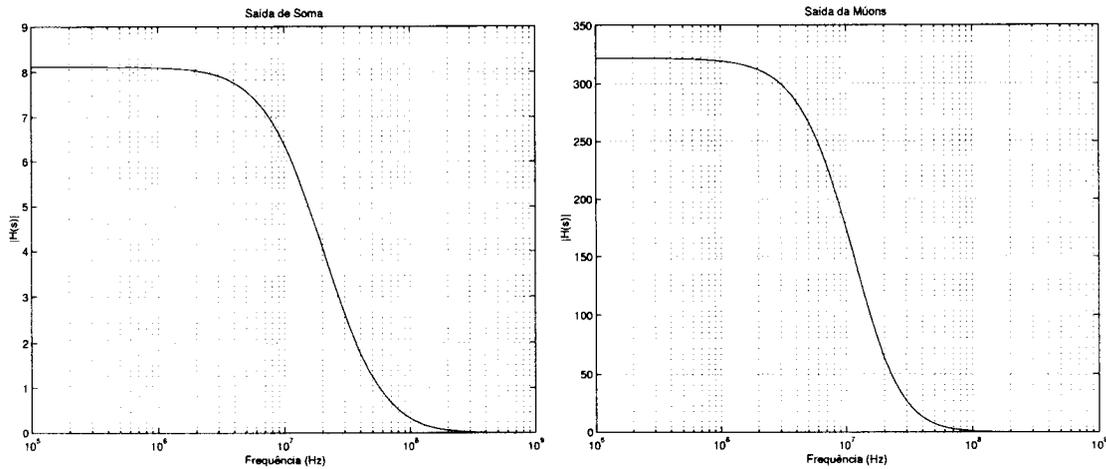


Figura 5.10: Módulo da resposta em frequência estimada para a saída da soma (esquerda) e para a saída de múons.

Ruído	Saída da Soma	Saída de Múons
<b>WTA</b>	630 $\mu V_{rms}$	7 $mV_{rms}$
<b>Operacional</b>	286 $\mu V_{rms}$	412 $\mu V_{rms}$
<b>Total</b>	692 $\mu V_{rms}$	7 $mV_{rms}$

Tabela 5.8: Ruído estimado para ambas as saídas do circuito somador.

Tabela 5.8, vemos os resultados obtidos na estimação do ruído para as saídas do somador. A saída da soma apresentou ruído de 692  $\mu V_{rms}$  e a de múons de 7  $mV_{rms}$ , ambas estando dentro das especificações. A comparação com as medidas de laboratório, confirmaram o resultado para a saída da soma, mas para a saída de múons não (2,5  $mV_{rms}$  medidos em laboratório). Esta diferença, deve-se provavelmente a problemas na modelagem da fonte de ruído para o amplificador de transcondutância, que opera numa região de ganho muito acima da qual o ruído foi especificado.

## 5.4 Implementação do Circuito

Todos os componentes ativos e passivos do circuito, são componentes SMD (*Surface Mounted Device*), com exceção apenas dos conectores de entrada e dos pinos de alimentação do circuito. Estes dispositivos são normalmente mais compactos, o que é de fundamental importância para a implementação do circuito. Os capacitores usados no circuito são de cerâmica e os resistores são de tecnologia *thick*

*film*<sup>2</sup>.

A chegada da fonte no circuito é desacoplada com um filtro  $\pi$ , constituído de dois capacitores de  $1 \mu\text{F}$  e um indutor de  $8,2 \text{ nH}$ . Inicialmente, usamos dois capacitores em paralelo para descoplar as fontes, um de tântalo ( $1 \mu\text{F}$ ) e outro de cerâmica ( $100 \text{ nF}$ ), mas como o capacitor de tântalo mostrou-se sensível aos níveis de radiação do ATLAS, tivemos que substituir este circuito pelo filtro  $\pi$  acima, que atua como um filtro passa-baixa, com frequência de corte aproximada em  $2 \text{ MHz}$ <sup>3</sup>, com o objetivo de eliminar ruídos de alta frequência provenientes das fontes de alimentação. Este filtro é de grande importância para evitar a indução de ruído coerente em toda a cadeia eletrônica do detector, já que os circuitos são alimentados pelas mesmas fontes de alimentação.

Na chegada da fonte de alimentação de cada circuito integrado, foram usados capacitores de cerâmica adicionais ( $1 \mu\text{F}$ ), ligados do pino de alimentação à terra, auxiliando no desacoplamento das fontes de tensão do circuito.

No projeto da placa de circuito impresso, diversos cuidados foram tomados relativos ao processamento de sinais de alta frequência. A placa projetada possui apenas duas camadas (a superior e a inferior) e, tanto o lugar dos componentes, quanto o roteamento das trilhas foram feitos sem o auxílio das ferramentas automáticas do software utilizado. Na parte superior, todos os componentes no caminho do sinal foram montados, enquanto que na parte inferior, temos um plano de terra e os capacitores de descoplamento das fontes de alimentação. Quase todas as trilhas de transmissão do sinal foram mantidas na parte superior da placa (algumas poucas tiveram que passar pela parte inferior). Um outro cuidado foi o de projetar a placa ao máximo simétrica, para que os diversos canais tivessem comportamento semelhante, já que o tamanho das trilhas de sinal e as capacitâncias e indutâncias parasitas afetam o desempenho dos circuitos de alta frequência. Ao redor dos canais

---

<sup>2</sup> *Thick film* é um processo mecânico de aplicação de revestimentos condutivos ou isolantes em um substrato não-condutivo, para formar dispositivos resistivos ou de interconexão. No caso de resistores, usa-se uma pasta contendo partículas de vidro e metal fino suspensas em um veículo temporário. O veículo e a pasta são retirados através da exposição à altas temperaturas, que funde o vidro em uma matriz para as partículas de metal.

<sup>3</sup> Para o cálculo da resposta em frequência deste filtro, foram consideradas as indutâncias do capacitor utilizado ( $2,5 \text{ nH}$ ) e a resistência de saída da fonte de tensão ( $0,01 \Omega$ ).

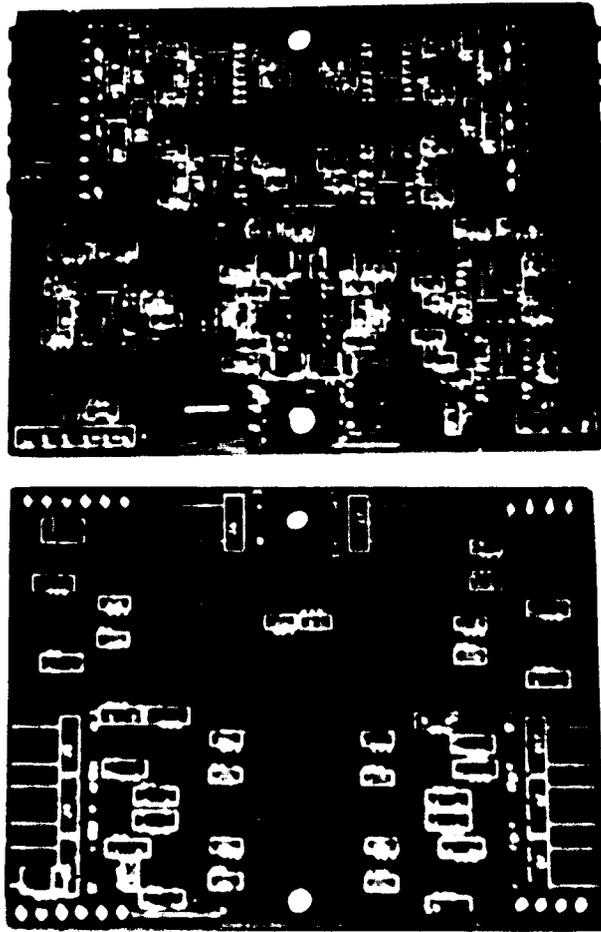


Figura 5.11 Foto da parte superior (acima) e inferior (abaixo) do circuito somador.

de entrada, foram feitas “guardas” (trilhas ligadas ao plano de terra) para evitar o *crosstalk* entre os sinais de entrada. A localização dos pinos de alimentação e dos conectores de entrada foi determinada após discussões com o grupo de Chicago, que é responsável pela produção da placa-mãe e do circuito 3-em-1.

Na Figura 5.11, podemos ver a parte superior da placa (acima) e a parte inferior (abaixo). Na parte superior, temos os conectores das seis entradas nos cantos esquerdo e direito, e das duas saídas na parte inferior. Na parte inferior do circuito, vemos os pinos de alimentação e terra, o plano de terra e os capacitores de desacoplamento das fontes de alimentação. Na Figura 5.12, vemos uma outra foto do circuito que nos dá uma idéia da sua dimensão.

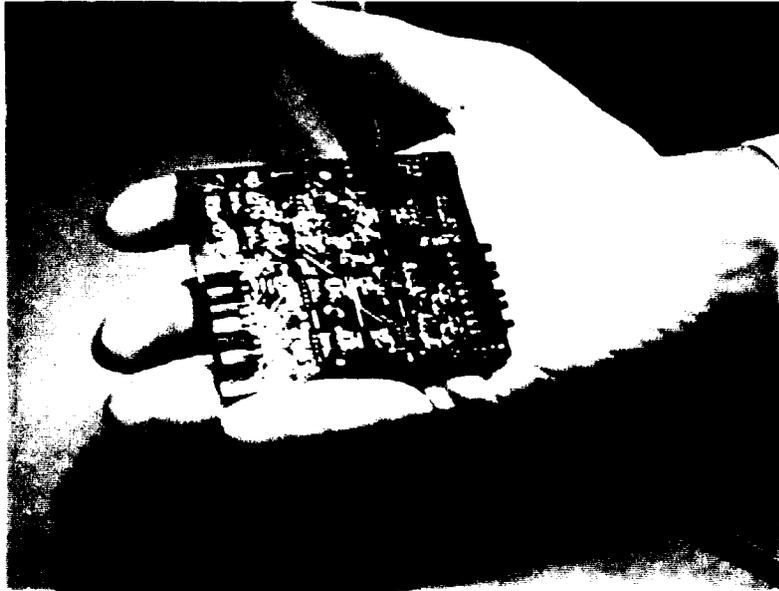


Figura 5.12 Foto do circuito somador

# Capítulo 6

## Integração do Sistema

Como parte integrante da cadeia eletrônica do calorímetro de Telhas, o circuito somador deve ser integrado, mecânica e eletricamente, à gaveta do detector onde ele deve interfacear com a placa mãe, com os sinais de entrada provenientes dos circuitos 3-em-1 e com o painel de interface da gaveta do Telhas. Para completar, os sinais de saída do somador serão utilizados pelo primeiro nível de validação de eventos, portanto, deve-se também definir como será realizada a interface entre os sinais e o primeiro nível.

Cabe ressaltar que em um projeto como o do calorímetro de telhas, a integração dos diversos componentes que compõem o detector acaba sendo um dos maiores desafios de projeto, já que cada componente é de responsabilidade de um laboratório, as vezes localizados em países diferentes, e várias das especificações mecânicas e elétricas acabam mostrando-se inadequadas na hora da integração.

Neste capítulo, é apresentada em detalhes a integração do circuito com a gaveta do detector e as especificações para a integração com o primeiro nível de validação.

### 6.1 Integração do Somador com o Telhas

O cuidado com a integração do circuito somador com o resto da eletrônica de leitura do calorímetro de telhas foi considerado desde a fase inicial do projeto, e traduz-se em algumas das especificações elétricas e mecânicas do circuito. Especificações como número de entradas, ganho de tensão, número de saídas do circuito,

<b>Versão</b>	<b>Característica</b>
V1D	transistores discretos, 5 entradas, ganho 1, dimensão 100x180 mm
V2D	transistores discretos, 6 entradas, ganho 1, dimensão 60x75 mm
V1O	amplificadores operacionais, 6 entradas, ganho 8, dimensão 60x75 mm, saída de múon ganho 8
V2O	amplificadores operacionais, 6 entradas, ganho 8, dimensão 60x75 mm, saída de múon ganho 8, filtro para diminuir ruído
V3O	amplificadores operacionais, 6 entradas, ganho 8, dimensão 60x75 mm, saída de múon ganho 225, filtro para diminuir ruído, versão final

Tabela 6.1: Diferentes versões do circuito somador devido as modificações de projeto.

impedância de entrada e saída, tensão de alimentação, consumo de potência, dimensão da placa de circuito impresso, tipo e posição dos pinos de alimentação e tipo e posição dos conectores de entrada e saída, relacionam-se diretamente com os demais componentes da cadeia eletrônica do detector.

Com o passar do tempo, e conseqüente evolução dos componentes do detector, quase todas as especificações citadas no parágrafo anterior sofreram modificações, mostrando como a integração dos diversos componentes é complicada em um projeto da complexidade do Telhas. Devido a estas modificações, tivemos pelo menos duas versões de circuito com transistores discretos e duas com amplificadores operacionais, para finalmente chegar-se a versão apresentada no capítulo anterior. Na Tabela 6.1, vemos as características principais de cada versão.

Com a versão final do circuito, o próximo passo de integração seria conectar as saídas dos circuitos 3-em-1 com as entradas dos circuitos somadores, o que será visto em detalhes na próxima seção.

### 6.1.1 Os Cabos de Entrada do Somador

Esses cabos devem conectar os sinais de saída dos circuitos 3-em-1 às entradas do somador, introduzindo o mínimo de distorção aos sinais e alinhando-os temporalmente na entrada do somador, de forma que a soma dos diversos sinais de uma torre seja realizada com os pulsos euqualizados no tempo com até 1,5 ns de dispersão. Além dessas especificações elétricas, deve-se levar em consideração como arranjar esses cabos no espaço disponível da gaveta do detector e de forma simples para a montagem.

As especificações elétricas para os cabos são:

- Par trançado blindado com um fio ligado à blindagem.
- Impedância característica entre condutores de  $100 \Omega \pm 10\%$ .
- Atenuação: 11,4 dB/100 m em 10 MHz.
- Seção do condutor 28 AWG (diâmetro externo  $\approx 0,4$  mm).
- Atraso no tempo: 4 ns/m.
- Capacitância nominal: 40 pf/m

O cálculo do tamanho dos cabos depende não só da distância entre os circuitos 3-em-1 e o somador dentro da gaveta do detector, mas também da diferença de alinhamento entre os sinais dos circuitos 3-em-1 [2]. O tempo requerido para a resposta de cada foto-multiplicadora pode ser calculado teoricamente, observando algumas simplificações. Sabendo-se o tempo de resposta de cada foto-multiplicadora, podemos calcular a diferença entre o início do sinal de cada célula do detector, o que nos permite alinhá-los na entrada do somador utilizando o atraso inerente ao cabo utilizado no projeto.

#### Tempo Necessário para o Sinal Chegar a Saída do Circuito 3-em-1

Revisando o Capítulo 3, observa-se que o sinal do calorímetro de Telhas é formado pela deposição da energia da partícula no material pesado (ferro), sendo esta energia amostrada pelas telhas cintilantes que geram um sinal de luz que é transmitido até a base de cada módulo, onde uma foto-multiplicadora (PMT) converte

o sinal de luz em sinal elétrico. A diferença de tempo entre os sinais que compõem uma torre de validação é consequência, principalmente, da posição de cada célula e da diferença de comprimento das fibras óticas acopladas às diversas telhas cintilantes que formam uma célula do detector.

Considerando  $t=0$  o instante em que ocorre uma colisão no ATLAS, temos:

- Partículas atingindo o calorímetro e a cascata se desenvolve com a velocidade  $c=30$  cm/ns.

- As partículas atingem a célula com coordenadas  $(R_{CELL}, Z_{CELL})$  no instante

$$t_1 = \frac{\sqrt{R_{CELL}^2 + Z_{CELL}^2}}{c} \quad (6.1)$$

- O tempo aproximado de decaimento no cintilador baseado em poliestireno é

$$t_2 = 1,5ns \quad (6.2)$$

- A transmissão da luz azul até as fibras WLS leva [31]

$$t_3 = \frac{1}{2} * R_{CELL} \frac{2\pi}{64} \frac{n_{ref}}{\langle \cos(\theta) \rangle c} \quad (6.3)$$

onde  $n_{ref} = 1,59$  é o índice de refração do poliestireno e

$$\langle \cos(\theta) \rangle = \frac{1}{2}(1 + 1/n_{ref}) \quad (6.4)$$

é o cosseno efetivo do ângulo de emissão da luz

- O tempo de decaimento nas fibras WLS é de [3]

$$t_4 = 5,7ns \quad (6.5)$$

- O tempo de transmissão da luz das fibras WLS até as foto-multiplicadoras

$$t_5 = (L_{fibra}(celula)) \frac{n_{ref}}{\langle \cos\phi \rangle c} \quad (6.6)$$

onde  $L_{fibra}(celula)$  são os comprimentos das fibras de cada célula, e

$$\langle \cos\phi \rangle = \frac{1}{2}(1 + n_{clad}/n_{ref}) \quad (6.7)$$

com índice de refração:  $n_{clad} = 1,43$

- O tempo que leva a foto-multiplicadora R5900 para coletar a luz foi medido [32]

$$t_6 = 9ns \quad (6.8)$$

- O atraso introduzido pelo circuito conformador é [31]

$$t_7 = 70ns \quad (6.9)$$

- Finalmente, os sinais chegam à saída do circuito conformador no tempo

$$t_T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_5 + t_6 + t_7 \quad (6.10)$$

## Geometria do Detector

Para o Barril [3]

- O raio interno é de 228 cm.
- O calorímetro é composto por três camadas de telhas (1,2 e 3) na primeira camada (A), três (4,5 e 6) na segunda camada (B), três (7,8,e 9) na terceira camada (C), e duas (10 e 11) na última camada (D).
- As camadas B e C são agrupadas conjuntamente, resultando na camada BC.
- Na direção radial, cada telha tem 9,7 cm na camada A, 12,7 cm na B, 14,7 na C e 18,7 na D.
- A coordenada Z é calculada no centro de cada torre, isto é,  $\eta = 0,05$  para a primeira torre, 0,15 para a segunda torre, e assim por diante.

Para o Barril Estendido [3]

- Temos três camadas de telhas (1,2 e 3) na primeira camada de amostragem (A), quatro (4,5,6 e 7) na segunda camada (B) e quatro (8,9,10 e 11) na última camada (D).
- A célula C10 possui três telhas (7,8 e 9) e a célula D4 possui duas telhas (10 e 11).
- O tamanho das telhas é o mesmo que no barril.

- A coordenada Z é calculada no centro de cada torre.

O sinal de cada foto-multiplicadora é composto por um grupo de fibras conectados a telhas de tamanho diferentes. Conseqüentemente, o comprimento das fibras varia em uma célula como pode ser visto na Figura 6.1 para o barril e na Figura 6.2 para o barril estendido. A diferença de comprimento das fibras, para uma mesma célula, pode chegar até 65 cm na camada de amostragem BC, portanto, numa mesma célula (foto-multiplicadora) temos diversos sinais de luz que chegam em instantes diferentes.

## Resultados

Para alinhar os sinais na entrada do somador, primeiramente é necessário definir em que ponto iremos alinhar os sinais. Se queremos alinhar os sinais pelo início de sua propagação, devemos usar a telha que apresenta a resposta mais rápida para o sinal de determinada célula. Por exemplo: na célula A1 existem três camadas de telhas (1,2 e 3), deve-se portanto computar o tempo requerido para cada telha e escolher a telha de resposta mais rápida.

Os resultados obtidos para o tamanho dos cabos necessários para alinhar o sinal das diferentes células pertencentes a uma mesma torre de validação pode ser visto na Tabela 6.3 para o barril e para o barril estendido. Do ponto de vista da montagem e manipulação dos cabos, é mais prático ter um número menor de cabos de tamanhos diferentes. Para isso, resolvemos ignorar diferenças de até 10 cm (0,4 ns) nos cabos. Nas Tabelas 6.2 e 6.3, vemos também o comprimento de cabo utilizado.

Maiores detalhes sobre a montagem dos cabos podem ser vistos no Apêndice B.

### 6.1.2 Cabos de Saída do Somador

Uma gaveta do barril possui 10 somadores e uma do barril estendido possui 7<sup>1</sup>. Portanto, no barril temos 10 sinais de validação das torres e 7 sinais de validação de múons. No barril estendido, temos 7 sinais provenientes das torres de validação

---

<sup>1</sup>Tanto no barril como no barril estendido, existe um somador a mais para uma possível mudança na configuração das torres ao longo do experimento

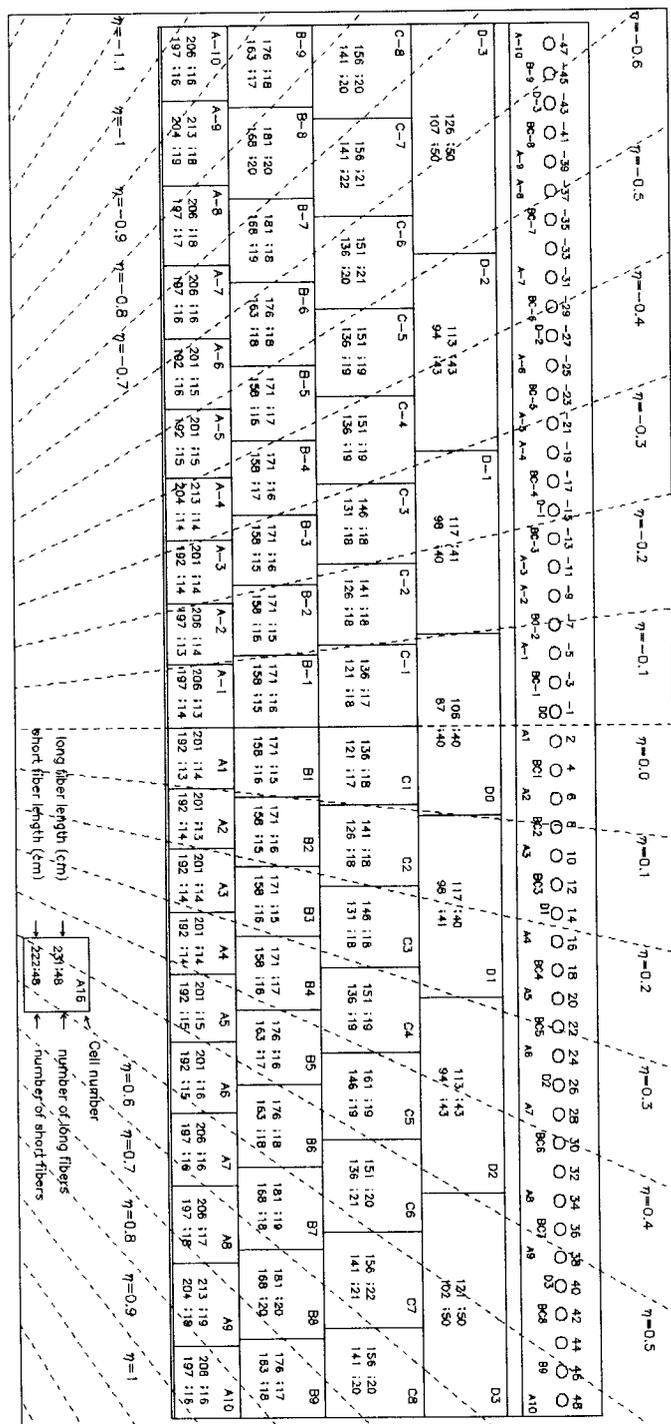


Figura 6.1: Geometria de um módulo do barril com a quantidade e tamanho das fibras para cada célula.

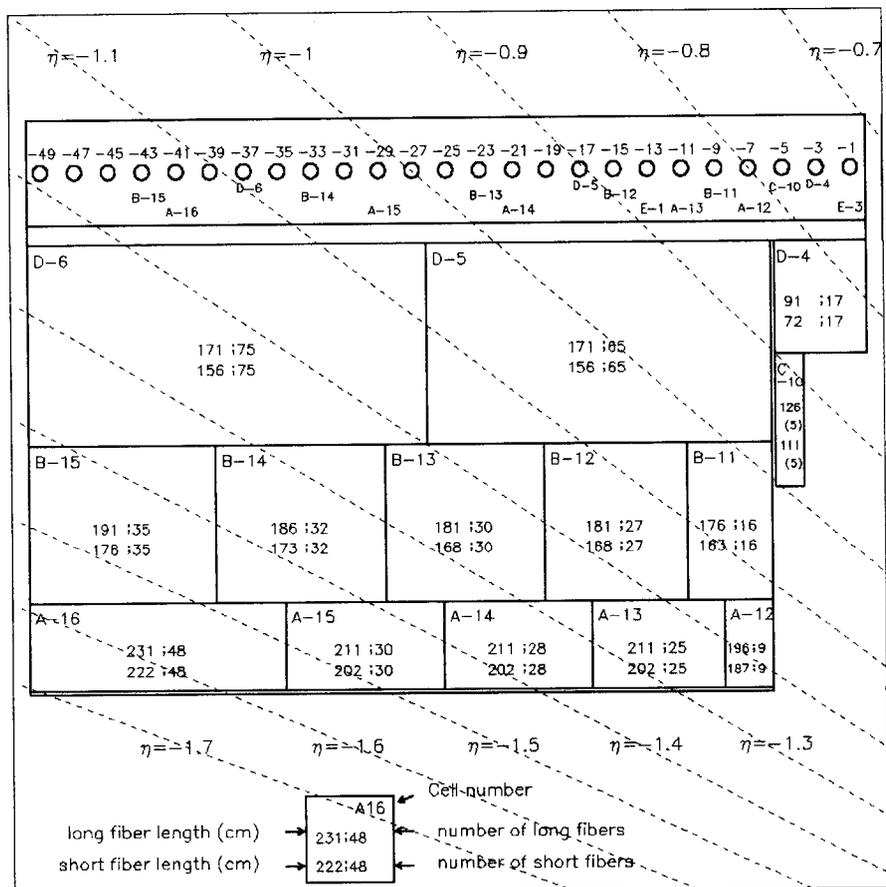


Figura 6.2: Geometria de um módulo do barril estendido com a quantidade e comprimento das fibras para cada célula.

Número da PMT	Comprimento Calculado (cm)		Comprimento Utilizado (cm)	
	Barril	Barril Est.	Barril	Barril Est.
1	59		60	
2	37		40	
3	60	180	60	184
4	61	180	60	184
5	30	165	30	170
6	61	165	60	170
7	84	193	80	207
8	85	193	80	207
9	54	115	50	120
10	42	115	40	120
11	42	239	40	263
12	64	239	60	263
13	64		60	
14	62		60	
15	47	170	50	184
16	94	170	110	184
17	115	71	130	70
18	115	59	130	60
19	77		100	
20	56		80	
21	56	89	80	94
22	69	89	90	94

Tabela 6.2: Comprimento dos cabos de entrada do somador, calculados de forma a alinhar os sinais nas entradas de cada somador.

Número da PMT	Comprimento Calculado (cm)		Comprimento Utilizado (cm)	
23	76	217	100	241
24	122	217	120	241
25	122		120	
26	90		110	
27	60		80	
28	100		100	
29	133	144	130	144
30	133	288	130	144
31	100		100	
33		54		60
34	54	54	50	60
35	108		110	
36	108		110	
37	54	106	50	120
38	50	146	50	170
39	50		50	
40	92		90	
41	59	71	60	70
42	59	216	60	70
43	83	94	80	94
44		239		94
45	60		60	
46	60		60	
47	40		40	
48	40		40	

Tabela 6.3: Continuação da tabela anterior. Comprimento dos cabos de entrada do somador, calculados de forma a alinhar os sinais nas entradas de cada somador.

e 5 sinais de validação de múons. Isto resulta num total de 17 sinais para o barril e 12 sinais para o barril estendido.

Os cabos de saída do somador são também pares trançados com  $100 \Omega$  de impedância característica entre condutores, e devem apresentar pequena atenuação para evitar problemas com a relação sinal-ruído, uma vez que esses sinais serão transmitidos por cabos longos até o receptor do primeiro nível.

As especificações para os cabos de saída do somador são:

- Par trançado blindado com um fio ligado a blindagem.
- Impedância característica entre condutores de  $100 \Omega \pm 15\%$ .
- Atenuação  $< 9 \text{ dB}/100\text{m}$  (10 MHz).
- Seção do condutor 26 AWG (0,5 mm OD).
- Capacitância nominal 42 pF/m.

Estes cabos devem levar os sinais da saída do somador até o painel de interface, onde os cabos do primeiro nível (comprimento de 70 m) devem se encarregar de transmiti-los até um circuito receptor.

Maiores detalhes sobre os cabos de saída podem ser vistos no Apêndice B.

### 6.1.3 Os Módulos de Produção do Telhas

Para montagem da eletrônica nos módulos de produção do Telhas, inicialmente foi necessário resolver todos os problemas de integração dos diversos componentes da gaveta. Uma vez resolvido este problema, os módulos passaram a ser equipados com sua eletrônica, visando calibração em feixe de partículas (apenas 20% dos módulos são calibrados em feixe) e por fonte radioativa (Césio).

Nos módulos do barril (Figura 6.3), são necessárias duas gavetas eletrônicas para instrumentalizá-los, uma para  $\eta > 0$  e outra para  $\eta < 0$ . Na Figura 6.4, vemos um módulo do barril estendido, para o qual apenas uma gaveta eletrônica é necessária.

A inserção da gaveta da eletrônica nos módulos de produção só é feita depois da aprovação da gaveta nos testes de controle de qualidade. Cada gaveta é dividida

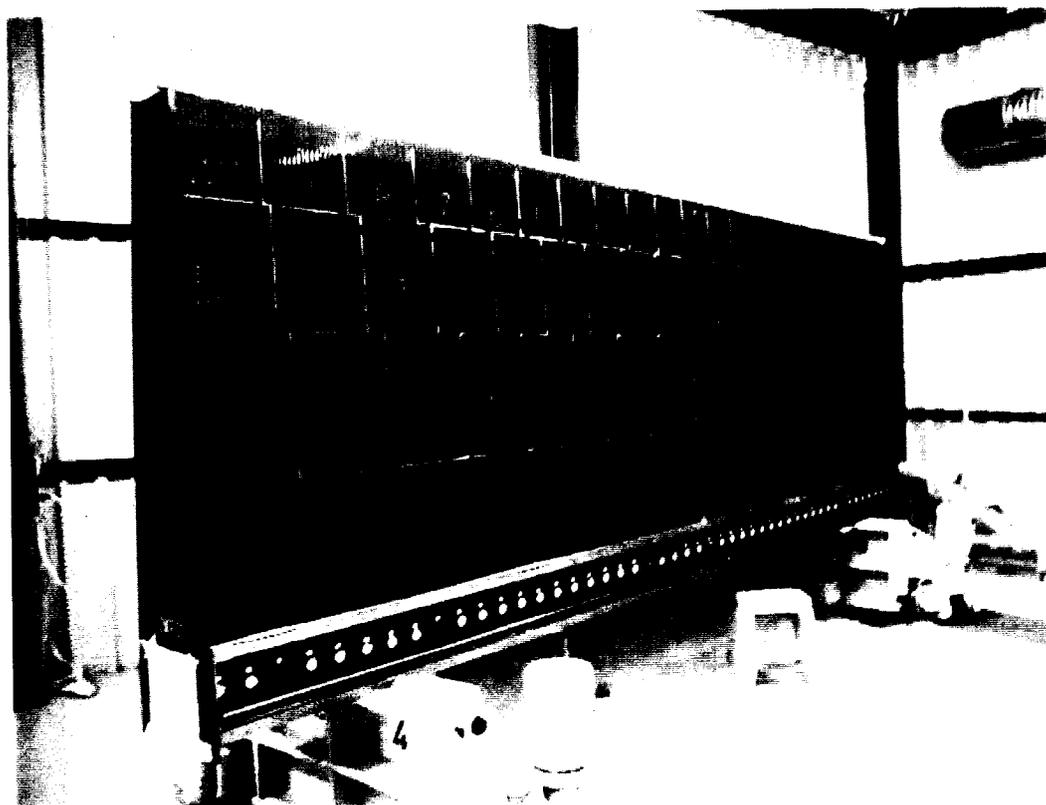


Figura 6.3: Módulo do barril onde foi marcada a definição geométrica das células para ajudar na inserção das fibras. Este módulo serve apenas de referência para a montagem dos módulos de produção do detector. Na parte inferior do módulo, à esquerda, podemos ver o espaço (fechado com um papel) para a inserção da gaveta eletrônica. Os círculos brancos ao longo de toda a parte inferior do módulo, são os buracos para inserção das fibras provenientes das telhas contíguas.

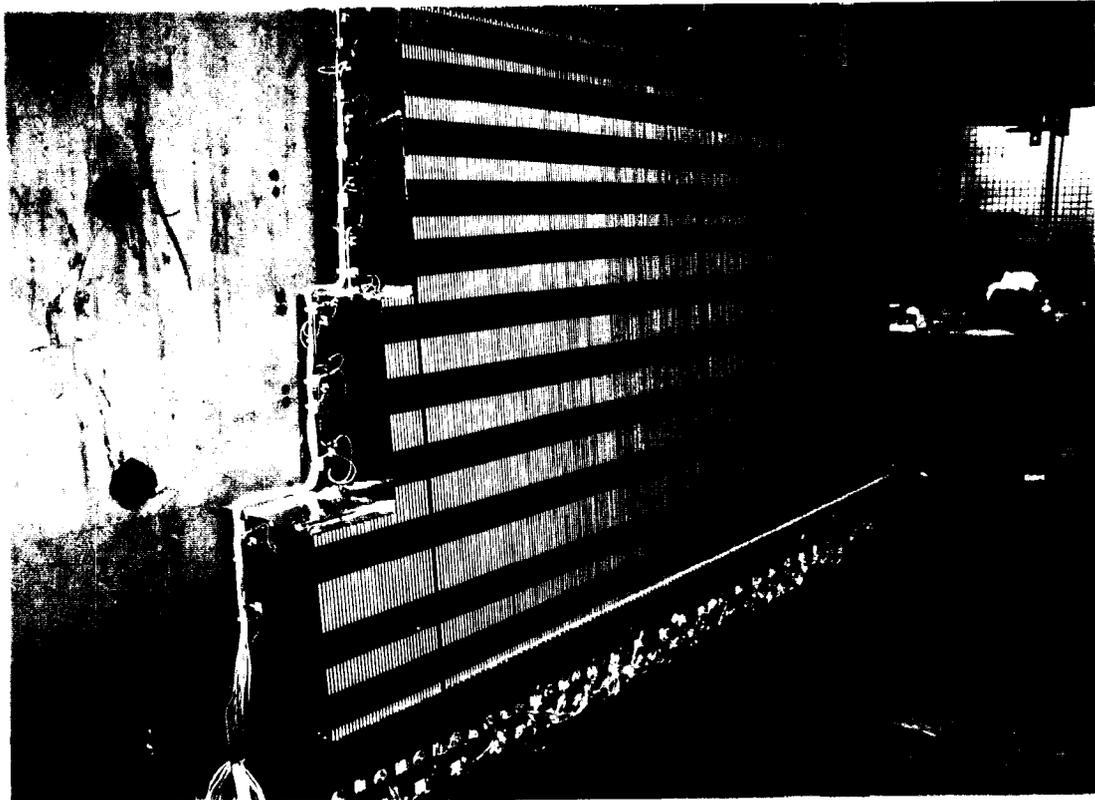


Figura 6.4 - Módulo de produção do barril estendido totalmente equipado com a parte ótica e mecânica. Na base do módulo, podemos ver as fibras chegando das telhas emilantes e entrando nos seus respectivos bracos.

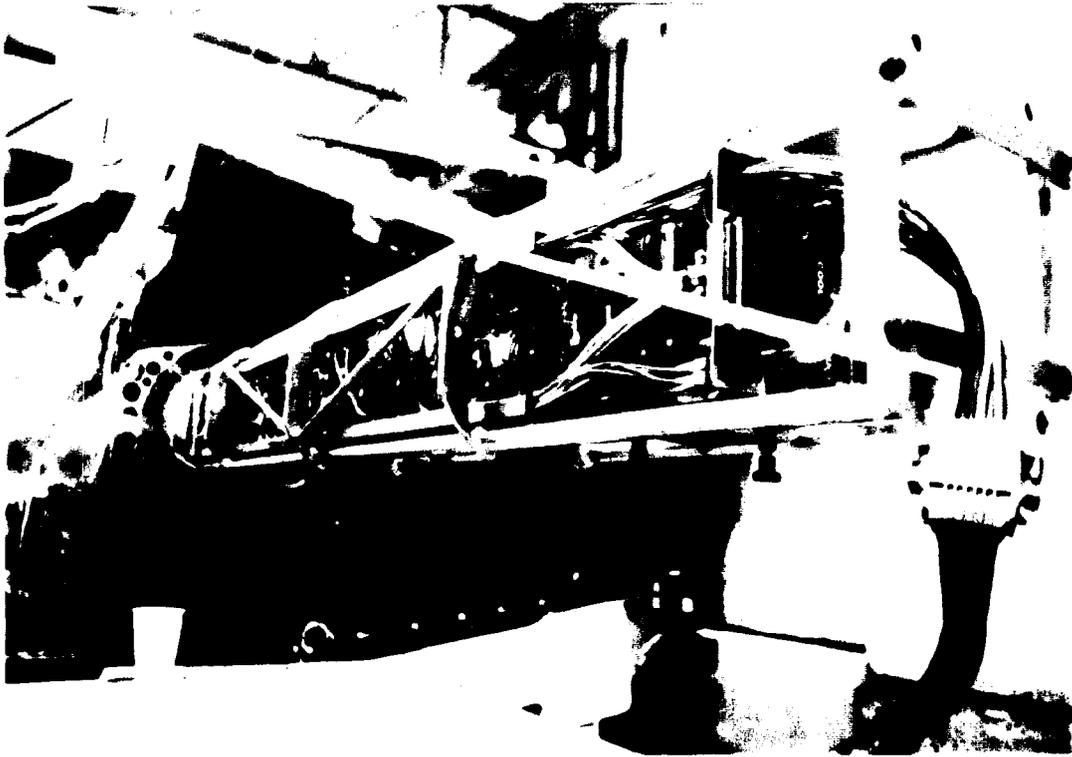


Figura 6.5 – Gaveta eletrônica do detector pronta para ser inserida em um módulo de produção do Telhas. A gaveta encontra-se no interior da ferramenta usada para inserção estrutural metálica que se estende do canto direito ao esquerdo. Para inserção a gaveta deve ser deslizada pela estrutura metálica até que toda ela esteja dentro do módulo. Quando a ferramenta é desacoplada, os cabos externos são conectados e a entrada para a gaveta no módulo é fechada.

em duas partes, uma interna e outra externa, que se encontram conectadas nos testes de controle de qualidade da gaveta e quando ela é inserida em um módulo. Na Figura 6.5 vemos uma gaveta do detector pronta para ser inserida em um dos módulos de produção que está sendo preparado para calibração com feixe. A gaveta e a estrutura retangular localizada no interior da ferramenta usada para sua inserção no módulo, estrutura metálica que se estende do canto direito ao esquerdo da figura. Na Figura 6.6, pode-se ver o trabalho de conexão entre a parte interna e externa da gaveta, com detalhe para o conector e cabos do somador, sendo segurado pela mão no canto esquerdo da figura. Depois de conectados todos os cabos da interconexão (Figura 6.7) a gaveta está pronta para ser inserida no módulo.

Na Figura 6.8 vemos a configuração utilizada nos testes de calibração do detector em feixe de partículas, com dois módulos do barril empilhados na mesa de

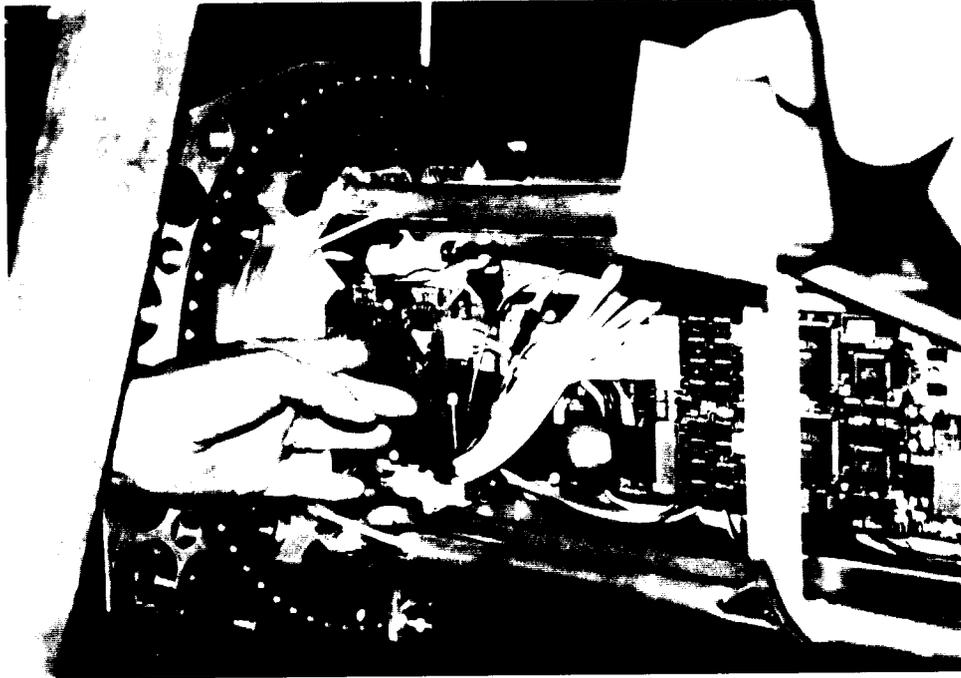


Figura 66 – Detalhe do trabalho de interconexão entre as partes interna e externa da gaveta que deve ser realizada antes da inserção do módulo. Em destaque, os conectores e cabos de somador sendo apoiados por uma mão no canto esquerdo. A parte interna da gaveta já está no interior do módulo, enquanto que a parte externa fica no interior da ferramenta de inserção.

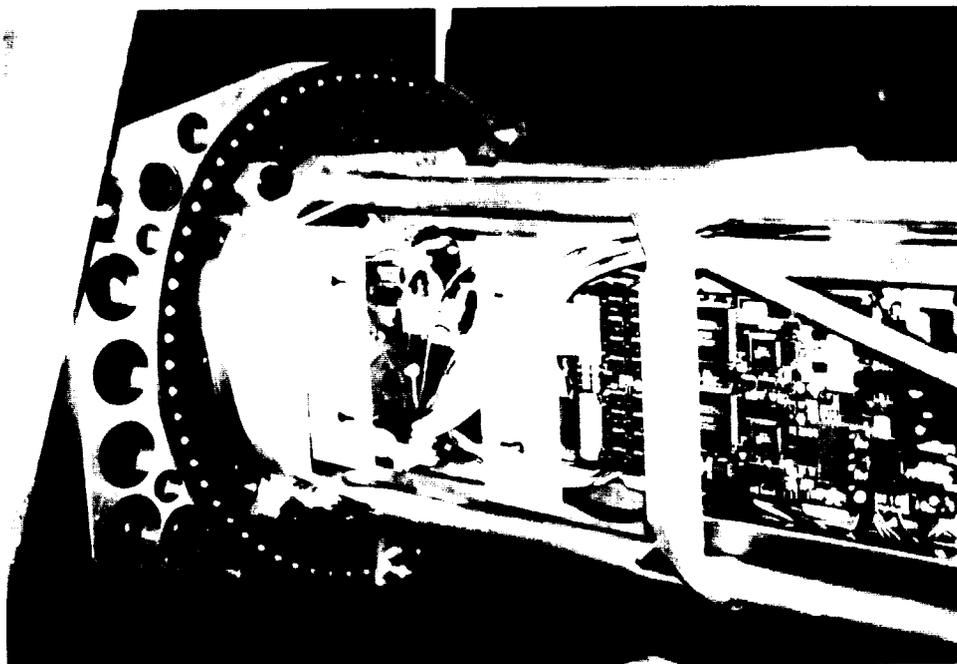


Figura 67 – Detalhe da interconexão da gaveta já realizada. Esta gaveta está pronta para ser inserida no módulo.

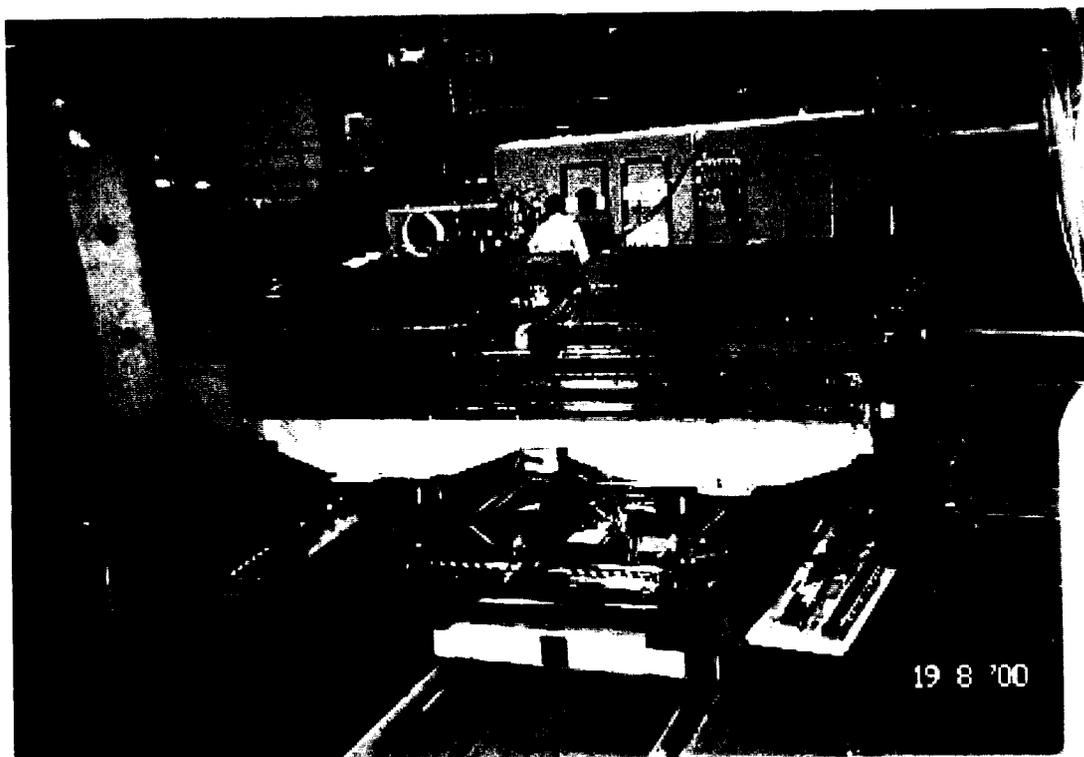


Figura 6.8: Configuração usada para os testes de calibração dos módulos de produção do Telhas em feixe de partículas. Vemos dois módulos do barril empilhados logo acima na mesa de testes do detector (amarelo) e dois módulos do barril estendido colocados acima do segundo módulo do barril.

teste e, sobre estes, dois módulos do barril estendido são colocados. Nestes testes, por período de feixe são calibrados um módulo do barril e dois do barril estendido. O módulo do barril localizado abaixo de todos os outros fica fixo, sendo usado como referência para os diferentes períodos de calibração.

## 6.2 Integração do Somador com o Primeiro Nível de Validação

O sinal das torres de validação de eventos e de validação de múons, fornecidos pelas saídas dos somadores, devem ser transmitidos para o primeiro nível de validação de eventos por cabos e de alguma forma serão pré-processados, antes que o primeiro nível os utilize. Estes sinais estão disponíveis no painel de interface da gaveta de cada módulo do Telhas por meio de dois conectores: um para os sinais

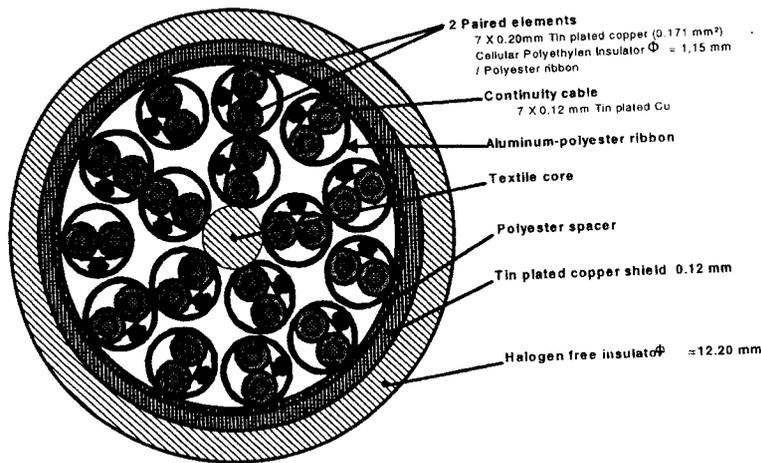
das torres de validação e outro para os sinais de validação de múons.

### 6.2.1 Transmissão

A transmissão é feita por meio de cabos especiais de 70 metros, devido a distância entre as gavetas do detector e o *rack* do primeiro nível de validação. Esses cabos devem ser constituídos de pares trançados com  $100 \Omega$  de impedância característica, rápidos o suficiente para satisfazer o tempo de latência do sistema de validação, e apresentarem boa transmissão para sinais com banda de 10 MHz.

As especificações para os cabos do primeiro nível de validação são:

- Descrição: cabo multi-condutor com 10 pares (135 cabos) trançados e 7 pares (404 cabos) trançados. Cada par trançado deve ser blindado e possuir um fio ligado a blindagem.
- Comprimento: 70 metros.
- Impedância característica:  $100 \Omega \pm 10\%$ , com apenas 5% de dispersão para toda produção.
- Atenuação menor do que 0,07 dB/m em 10 MHz com dispersão de 1,5%.
- Resposta em frequência: Após os 70 m o tempo de subida do sinal não pode se deteriorar em mais do que 30%.
- Crosstalk: menor do que 0,2% para 70 m.
- Diâmetro externo: menor do que 12 mm.
- Raio de curvatura: menor do que 10 cm.
- Condutor: 7x0,2 mm (24 AWG) ou 7x0,25mm (22 AWG).
- Continuidade: fio ligado a blindagem de 7x0,12 mm.
- O cabo não deve ter componentes que possuam halogênio [33].
- Cada par trançado deve ser identificado por diferentes cores (ou números) e os condutores de um mesmo par trançado também deve ser identificados com cores diferentes.



AN EXAMPLE OF 16 PAIRS TWISTED CABLE (FILOTEX)

Figura 6.9: Esquema do cabo usado para transmitir os sinais dos módulos do Telhas até o *rack* do primeiro nível de validação de eventos.

Além de todas as especificações já citadas, estes cabos devem atender severas normas de segurança do CERN [33], que dizem respeito, principalmente, a incêndio e a resistência a radiação.

Na Figura 6.9, vemos um esquema do cabo para 16 pares trançados internos.

### 6.2.2 Pré-processamento

O sinal das torres de validação deve ser pré-processado por circuitos receptores que convertam o sinal diferencial em um sinal referenciado a terra, com baixo ruído e ajustando a amplitude máxima do sinal para 5 V, de forma a se aproveitar toda a faixa dinâmica do ADC que processa o sinal em seguida. Após o circuito receptor, esses sinais são digitalizados por ADCs de 40 MHz e 12-bits de resolução, e a energia transversa de cada torre é calculada pela fórmula  $E_T = E \sin \theta$  aonde  $E$  é a energia do sinal de saída do somador e  $\theta$  é o ângulo de incidência da partícula no detector, sendo esta energia usada pelos algoritmos do primeiro nível.

Já o sinal para validação de múons deve ser processado diferentemente. Como este sinal será usado apenas para a detecção de múons, deve-se projetar um detector para o sinal analógico capaz de identificar sinais de múons em presença de ruído. Como o sinal para eventos de múons é muito pequeno, esta é uma tarefa que não é muito simples.

O detector mais simples possível seria o de amplitude, ou seja, ajusta-se um discriminador em determinada amplitude e os sinais que apresentarem excursão acima do patamar de amplitude determinado seriam considerados resultantes da presença de múons (classe de detecção), enquanto que os abaixo, seriam identificados como ruído. O único dado que seria digitalizado e usado pelo primeiro nível seria a saída deste discriminador.

Sistemas mais elaborados poderiam ser usados, contanto que eles sejam velozes o suficiente para a aplicação. A soma de dois sinais pertencentes a mesma célula da terceira camada do detector pode ser realizada para melhorar a relação sinal-ruído (veja o Capítulo 8) e um detector baseado em filtro casado [34] também poderia obter uma melhor performance do que a simples detecção por amplitude. Porém, estes enfoques exigiriam mais recursos para implementação e tempo para o desenvolvimento, estando ainda em discussão.

# Capítulo 7

## Performance do Circuito

Para verificação da performance da última versão do somador apresentada no Capítulo 5, foram realizados testes em laboratório, com toda a eletrônica do calorímetro de Telhas necessária para geração dos sinais de entrada para o circuito. Foram também realizados testes com feixes de partículas em módulos de produção do calorímetro totalmente equipados, onde verificamos a performance de todo o sistema para condições muito próximas às de funcionamento no LHC. Neste capítulo, estes testes são descritos e os resultados mais importantes são apresentados.

### 7.1 Testes em Laboratório

Vários testes em laboratório foram realizados durante a fase de projeto do circuito, não só como verificação da performance do circuito, mas também para ajustar o projeto às interfaces de entrada e saída do somador e aos avanços nos requisitos da física de interesse no LHC.

Os principais testes de laboratório foram realizados em Chicago, onde um sistema de injeção de carga encontra-se disponível, e protótipos atualizados do sistema conformador (circuito 3-em-1) podiam ser utilizados como entrada do circuito somador em teste. Desta maneira, o arranjo experimental utilizado para estes testes incluía toda a cadeia eletrônica do Telhas até a chegada do sinal nos nós de entrada do somador, com um bastidor (*crate*) VME para controle, uma placa mãe utilizada no calorímetro de Telhas, cinco circuitos 3-em-1, somadores e um osciloscópio

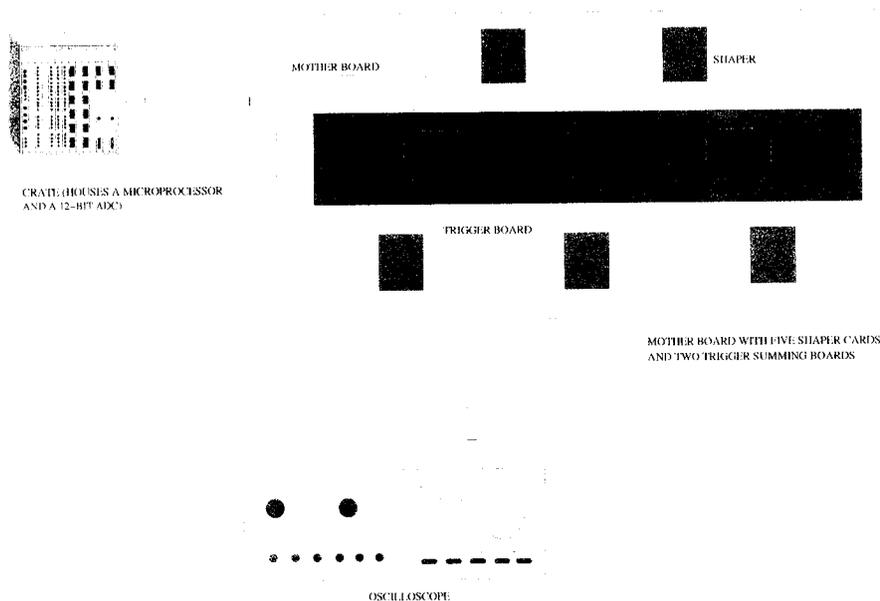


Figura 7.1: Arranjo experimental para os testes de laboratório.

digital<sup>1</sup>. Um programa rodava em um processador hospedado no *crate* VME para injeção de carga nos circuitos 3-em-1, que foram conectados à placa mãe do detector, em conjunto com os somadores (ver Figura 7.1). Até cinco circuitos 3-em-1 foram conectados nas entradas do somador durante os testes.

Por meio de *software* era possível selecionar qual circuito 3-em-1 teria sua saída habilitada e qual o valor de carga seria injetada, além de se controlar um ADC de 12-bits [25], usado para aquisição dos sinais, e disponibilizar algumas facilidades adicionais<sup>2</sup> para análise de dados.

Os principais parâmetros medidos foram:

- Consumo de potência: 2,3 W.
- Ganho:  $8,00 \pm 0,24$  para a saída da soma e  $225 \pm 11$  para a saída de múons.
- Não-linearidade  $< 1\%$  para as duas saídas.
- Calibração:  $10,0 \pm 0,3$  mV/pC para a saída da soma e  $280 \pm 14$  mV/pC para a saída de múons.

<sup>1</sup>Tektronix TDS644A.

<sup>2</sup>O programa calculava, com base nas amostras do sinal de saída do circuito, a não-linearidade, o nível de ruído para uma janela de aquisição de 400 ns, e a calibração do circuito.

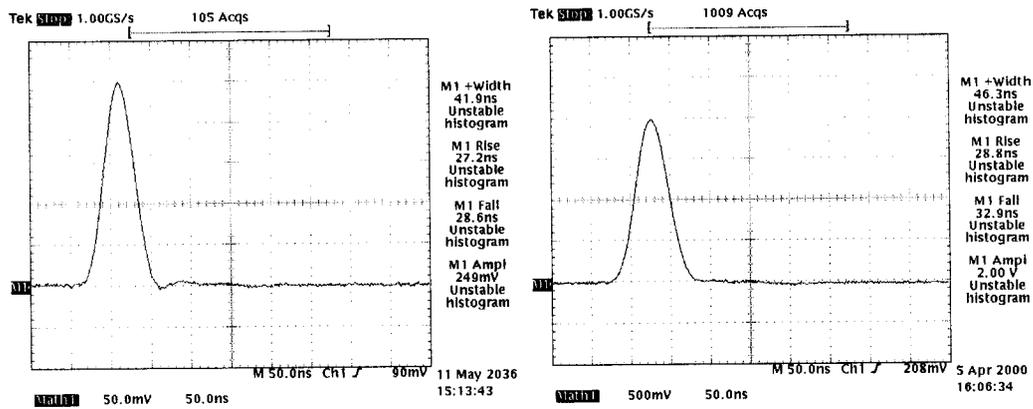


Figura 7.2: Saída do circuito 3-em-1 (esquerda) e a correspondente saída soma do somador (direita), para 180 pC de carga injetada, quando excitado pelo sinal do conformador.

- Saturação: 4 V para as duas saídas; 400 pC para a saída da soma e 14 pC para a saída de múons.
- Nível de ruído para a saída da soma:  $4,7 \pm 0,8$  mVrms (cinco entradas conectadas).
- Nível de ruído para a saída da múons:  $40 \pm 5$  mVrms (3-em-1 conectado).
- Recuperação à saturação para 800 pC: 24,2 ns para a saída da soma.

Na Figura 7.2, podemos observar o sinal do circuito 3-em-1 quando, 180 pC de carga são injetados e a saída correspondente do circuito somador (saída da soma), quando apenas um 3-em-1 estava conectado à sua entrada. Pode-se concluir que o somador mantém as características essenciais do sinal do conformador, confirmando a boa performance do circuito desenvolvido.

Na Figura 7.3, podemos ver a saída de múons do somador, juntamente com a parte positiva do sinal diferencial da saída de *high-gain* do circuito 3-em-1 (o sinal menor na figura), para 4,1 pC de carga injetada. Podemos observar como o sinal da saída de múons fica mais lento pelos valores do tempo de subida (34 ns), da largura (61 ns) e do tempo de descida (58 ns).

Um estudo especial do ruído do sistema, para a saída da soma, foi feito para verificar a performance de cada circuito (3-em-1 e somador), individualmente e conjuntamente. O ruído do somador foi medido a partir do ADC, considerando-se cinco circuitos 3-em-1 conectados às entradas do somador e, posteriormente, com

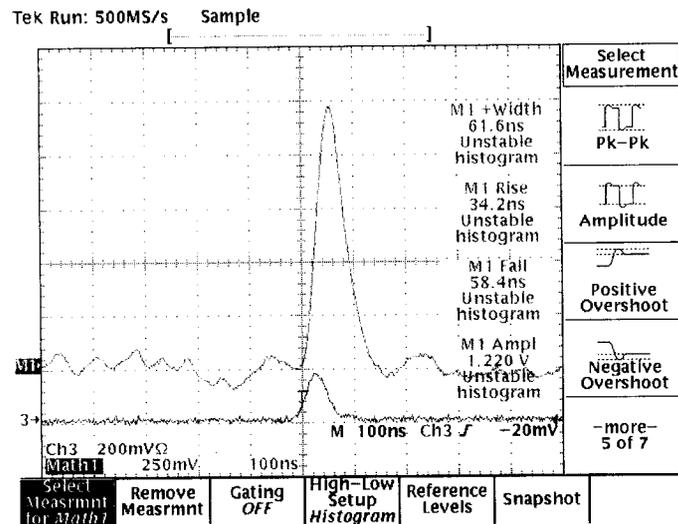


Figura 7.3: Saída de múons do somador (sinal maior) juntamente com a saída *high-gain* do circuito 3-em-1, para 4,1 pC de carga injetada.

apenas um circuito 3-em-1 conectado. Usando esta informação foi estimado o ruído do somador e do circuito 3-em-1. O ruído da saída do 3-em-1 e do somador não puderam ser medidos independentemente, devido à insuficiente sensibilidade do ADC para realizar tal medida. O ruído foi também medido por meio do osciloscópio, para verificação dos resultados obtidos com o ADC. Os resultados podem ser vistos na Tabela 7.1. Vemos que o somador atende as especificações de ruído, mas quando conectamos o circuito 3-em-1, o ruído resultante é maior do que o especificado. Outro resultado significativo, relaciona-se à estimativa de ruído do circuito 3-em-1, sendo mais ruidoso do que o somador.

O ruído foi estimado a partir da propriedade da soma do valor *rms* de duas fontes de ruído independentes, e que pode ser revista na Equação 5.9.

## 7.2 Testes com Feixe de Partículas

Ao longo dos anos, o circuito foi testado por diversas vezes em feixe de partículas no CERN, onde alguns módulos de desenvolvimento do calorímetro foram equipados com sua eletrônica e partículas incididas sobre o detector. Estes testes tiveram como principal finalidade verificar a performance do detector e de sua eletrônica de leitura, quando da presença de partículas.

A partir do ano de 2001, estes testes passaram a ter como principal finalidade a calibração dos módulos de produção do detector, que estão prontos para montagem

Configuração	Resultados	
	ADC	Osciloscópio TDS644A
5 (3-em-1) conectados	$0,34 \text{ pC} \pm 0,08 \text{ pC}$	$4,7 \pm 0,2 \text{ mVrms}$
1 (3-em-1) conectado	$0,17 \text{ pC} \pm 0,04 \text{ pC}$	$1,9 \pm 0,1 \text{ mVrms}$
nenhum (3-em-1) conectado	$0,09 \text{ pC}$ estimativa	$0,9 \pm 0,05 \text{ mVrms}$
ruído (3-em-1)	$0,15 \text{ pC}$ estimativa	$0,2 \text{ mVrms}$ estimativa

Tabela 7.1: Estudo do ruído do sistema de leitura (3-em-1 + somador).

final, equipados com todos os componentes, desde o material ótico (cintiladores e fibras), até a cadeia completa para a leitura eletrônica do sinal gerado. A estratégia é calibrar uma fração reduzida (20%) dos módulos em feixe de partículas, e utilizar uma fonte de césio para calibrar os demais módulos, haja vista a limitação para o uso do feixe experimental. Os módulos calibrados são então montados na estrutura final do detector ATLAS.

A configuração do detector para os testes realizados pode ser vista na Figura 7.4. Dois módulos do barril foram empilhados e acima deles foram colocados dois módulos do barril estendido. Nos módulos do barril, temos 18 torres de validação de eventos e nos módulos do barril estendido 6 torres, conforme pode ser visto na Tabela 2.1.

Dependendo do ano em que o teste foi realizado, o sistema de aquisição utilizou cabos de até 15 metros para transmitir os sinais das saídas do somador até os ADCs de 40 MHz e 12-bits de resolução (configuração 1), ou cabos de 50 metros e ADCs de carga de 40 MHz e 10-bits de resolução (configuração 2). Ao longo da apresentação dos resultados, especificaremos qual a configuração utilizada, quando se mostrar necessário.

A performance do circuito foi medida usando-se feixes de píons e elétrons, eventos de laser e do sistema injeção de carga. Para feixes de píons e elétrons, foram feitas correlações entre a saída do somador e a soma *software* das respectivas células do calorímetro, e medida a linearidade do circuito usando feixes de diferentes energias atingindo a mesma torre.

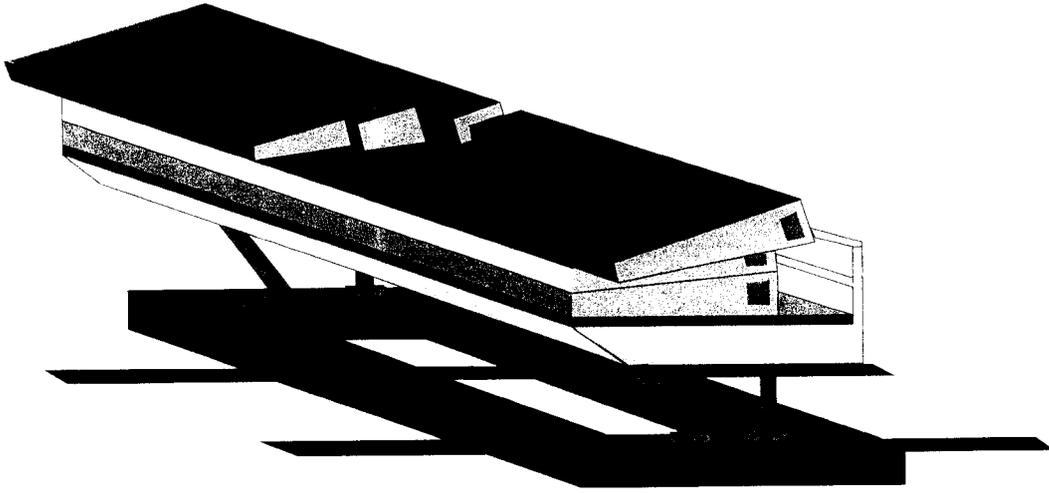


Figura 7.4: Configuração do detector para os testes com feixe de partículas. Vemos dois módulos do barril empilhados e dois módulos do barril estendido acima deles.

Na Figura 7.5, pode-se ver a distribuição de energia para o sinal da torre de validação do detector (soma *hardware*) produzida pelo circuito somador para píons de 180 GeV atingindo um módulo do barril com  $\eta = -0,45$ , juntamente com a distribuição de energia para a soma *software*, que soma individualmente o sinal de cada célula do calorímetro que pertença à torre de validação, e a correlação entre as duas distribuições. Como tanto o sinal do calorímetro quanto o do somador estão na faixa linear de resposta, a correlação entre os dois deve tender a uma reta, como mostra o resultado obtido. Cada histograma possui 6783 medidas da energia depositada pelos eventos de píons, por isso a figura da correlação é uma nuvem estreita de eventos que segue um comportamento linear e o coeficiente de correlação é 99%.

A linearidade do sistema foi medida usando píons de 20, 50, 80, 100, 180 e 300 GeV, podendo ser vista na Figura 7.6. Como a linearidade foi calculada a partir das médias dos histogramas da saída do somador com mais de 5000 eventos, o erro estatístico associado a cada média é muito pequeno. Portanto, usamos no gráfico o valor *rms* do histograma como barra de erro para indicar a flutuação da energia depositada na torre. A não-linearidade máxima obtida foi de 1,4%, que é um resultado bastante expressivo, já que não só o circuito somador afeta esta medida, mas também o circuito 3-em-1, a foto-multiplicadora, além de poder acontecer o vazamento de energia para os feixes de maior energia, pelas dimensões reduzidas do

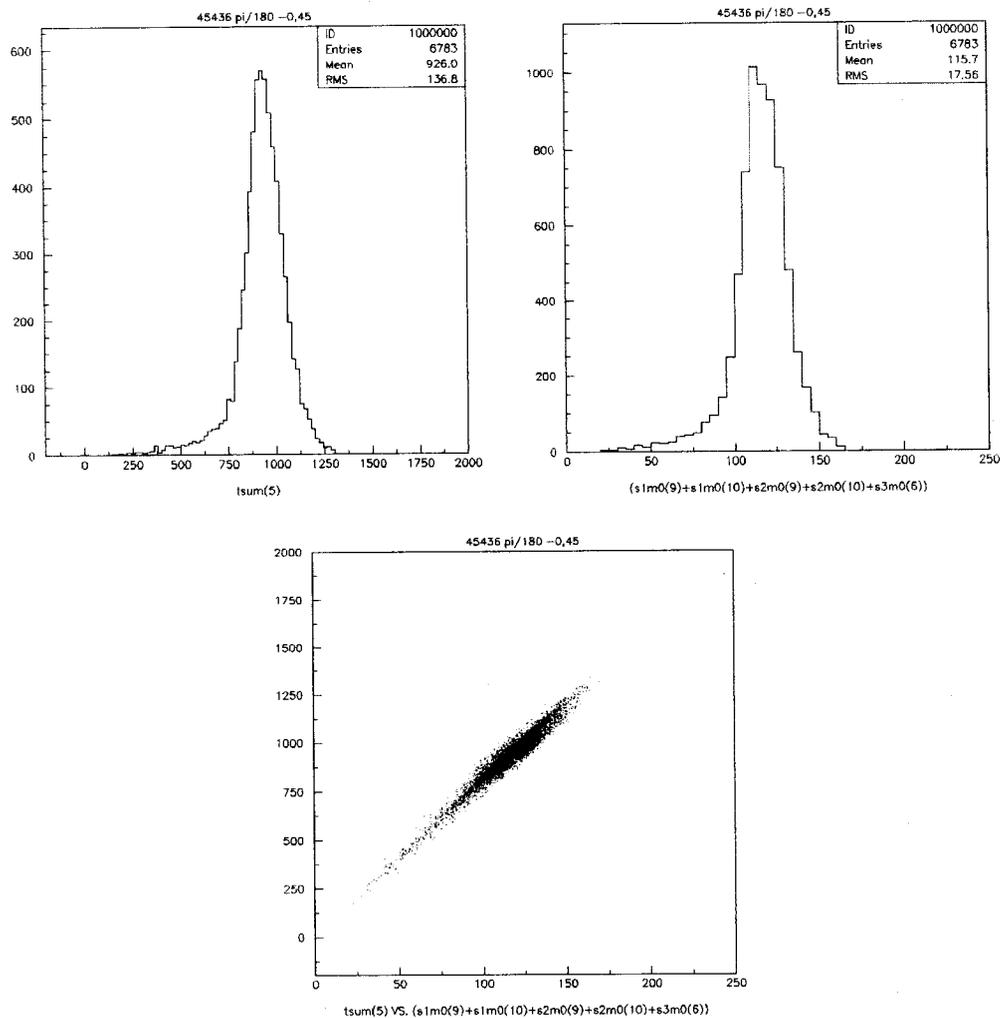


Figura 7.5: A saída do somador (esquerda), a respectiva soma *software* (direita) e a correlação entre eles (abaixo), para píons de 180 GeV incidindo na torre  $0,4 < \eta < 0,5$ .

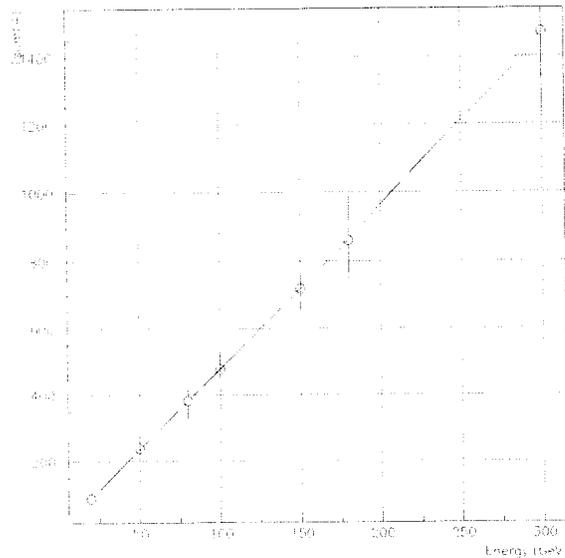


Figura 7.6: Linearidade do somador para feixe de píons. Resultado bastante expressivo (não-linearidade  $< 1,5\%$ ), pois mostra a linearidade de todo o sistema que envolve a formação do sinal da torre de validação.

sistema de calorimetria sob teste.

O Telhas possui um sistema de injeção de carga concebido para que fosse possível testar a performance da eletrônica do detector independentemente da parte ótica e mecânica. Portanto, com eventos de injeção de carga pode-se verificar, para cada somador instalado no detector, a linearidade, a saturação, a calibração do circuito, fazer correlações entre a saída do somador e a carga injetada, e também reconstruir o pulso de saída do somador, pois, durante a injeção de carga, a fase do sinal varia em passos de 1 ns. Desta forma, é possível reconstruir o sinal digitalizado com uma taxa de amostragem de 1 ns, mesmo usando um ADC com uma taxa de amostragem de 25 ns.

A correlação entre a saída do somador e a carga injetada pode ser vista na Figura 7.7. O resultado mostra a linearidade do somador para eventos de injeção de carga, aonde boa parte de sua faixa dinâmica foi explorada. Podemos também comparar a resolução da resposta da soma *software* com a do somador, aonde vemos que para pouca energia a soma *software* tem melhor resolução enquanto que para energias maiores o somador tem melhor resolução. Isto ocorre porque em baixa energia o sinal do detector é formado pela saída de *high-gain* do circuito 3-em-1 (que possui uma boa relação sinal-ruído), enquanto que, para cargas acima de

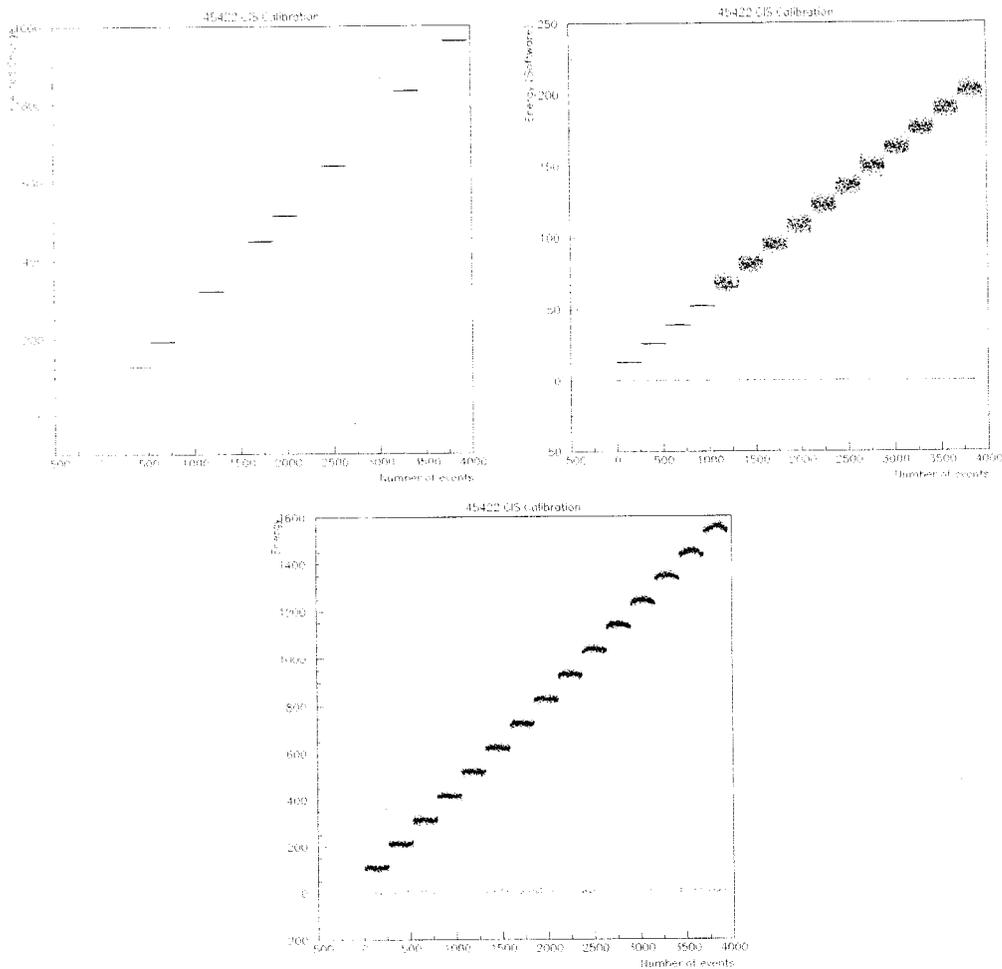


Figura 7.7: A carga injetada em cada 3-em-1 (esquerda), a energia da soma *software* (direita) e a energia na saída do somador (abaixo). Para todos os três gráficos, o eixo horizontal representa o número do evento, enquanto que o eixo vertical representa o valor da carga injetada. No gráfico da esquerda, a unidade está em contagem (0-1023), o da direita em GeV e o abaixo em unidades de ADC.

13 pC, usa-se o sinal de *low-gain* do circuito 3-em-1, já que o sinal de *high-gain* já está saturado.

A linearidade do circuito também foi medida usando eventos de injeção de carga, aonde obtivemos uma não-linearidade menor do que 1%. A Figura 7.8 nos mostra este resultado, sendo que no eixo vertical, temos a energia da saída do somador em contagens de ADC e no horizontal, a carga injetada no somador em valores de dac. A conversão entre valores de dac e a carga em pC pode ser feita pela Equação 7.1, aonde  $C_{valor}$  é o valor do capacitor selecionado que pode ser 100 pF ou 5 pF, dependendo da faixa de carga em consideração.

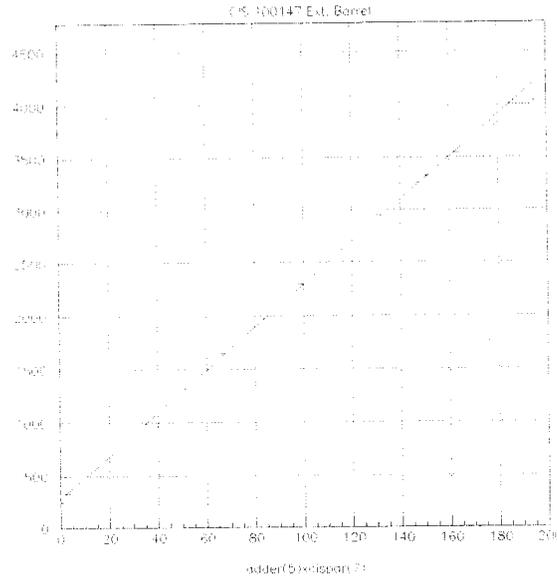


Figura 7.8: *Fitting* linear da resposta do somador para eventos de injeção de carga. No eixo vertical, temos a energia do somador em unidades de ADC e, no horizontal, a carga injetada em um circuito 3-em-1, em termos de contagem.

$$C_{cis} = 8,192(C_{valor} + 0,2) \frac{dac_{valor}}{1024} \quad (7.1)$$

Através da Figura 7.8, podemos também calcular o valor da carga para a qual a saída do circuito começa a saturar. O valor de contagem para o qual os dados experimentais começam a se desviar do *fitting* linear é 180. Assim, usando a Equação 7.1, podemos calcular o valor da carga em pC injetada em um circuito 3-em-1, sabendo que o capacitor usado foi de 100 pF. Para a torre do calorímetro analisada, o somador realiza a soma de quatro sinais, portanto, devemos multiplicar a carga em pC por 4 para chegar ao valor de carga na saída do circuito somador, o que resulta em 577 pC para o começo da saturação. Este resultado foi bem melhor do que o resultado em laboratório (400 pC), porque, em laboratório, medimos a saturação pela amplitude do sinal, enquanto que no teste com feixe de partículas olhamos para a integral do sinal.

A reconstrução do sinal de saída do somador pode ser vista na Figura 7.9. Isto foi possível porque, durante estes testes, o sinal do somador foi adquirido por um ADC de 40 MHz com 12-bits de resolução e não pelo ADC de carga. Vemos que o sinal apresenta tempos de subida e descida iguais a 33 ns e 50 ns respectivamente e sua largura é de 53 ns. O longo tempo de descida pode ser explicado pelos cabos de

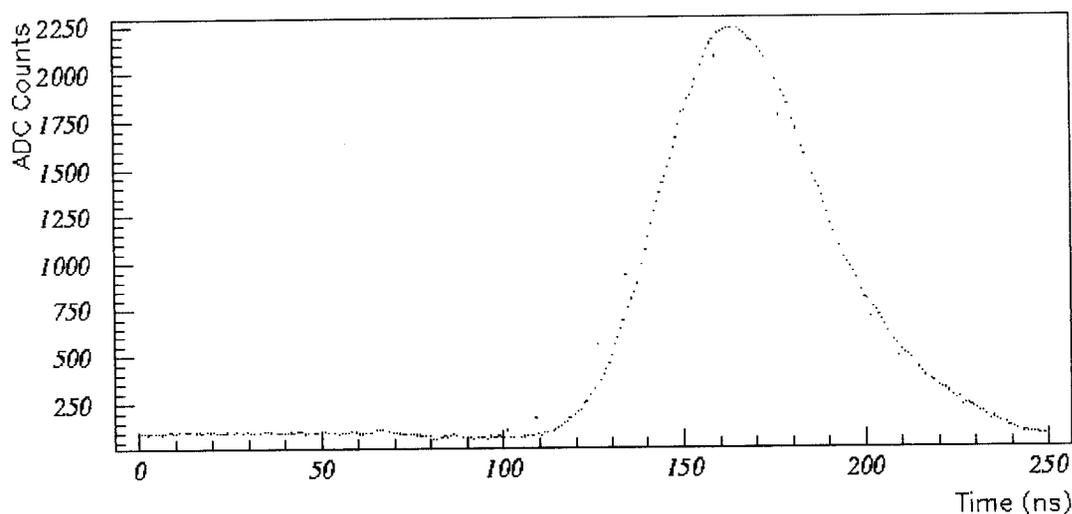


Figura 7.9: Pulso de saída do somador para eventos de injeção de carga, reconstruídos com uma taxa de amostragem de 1 ns.

aproximadamente 15 metros, usados para transmitir os sinais da saída do somador até os ADCs do sistema de aquisição.

Nos testes com feixe de partículas, foi possível calcular também o nível de ruído na saída dos somadores. Duas versões do circuito foram avaliadas. A primeira versão utilizou amplificadores operacionais que não possuía o filtro  $RC$  para redução do ruído elevado proveniente dos circuitos 3-em-1 de entrada do somador. A segunda versão é aquela final, apresentada em detalhes no Capítulo 5, e que estará em operação no LHC. Nos testes da primeira versão, foi utilizada a configuração 1 para o sistema de aquisição, enquanto que na versão final utilizamos a configuração 2.

Das nove placas analisadas para a primeira versão, tivemos resultados para o ruído que variaram de 180 MeV a 230 MeV, quando os circuitos 3-em-1 estavam desabilitados e 600 MeV a 900 MeV para os circuitos 3-em-1 habilitados. Para a versão final, as cinco placas verificadas ficaram com níveis de ruído entre 170 MeV a 210 MeV e entre 380 MeV a 500 MeV respectivamente para os circuitos 3-em-1 desabilitados e habilitados. A Tabela 7.2 resume os resultados acima descritos.

<b>Somador</b>	<b>Ruído (3-em-1 <i>OFF</i>)</b>	<b>Ruído (3-em-1 <i>ON</i>)</b>
<b>sem filtro</b>	180 a 230 MeV	600 a 900 MeV
<b>final</b>	170 a 210 MeV	380 a 500 MeV

Tabela 7.2: Ruído na saída da soma do somador medido durante os testes com feixe de partículas.

# Capítulo 8

## Performance Para o Sinal de Múons

O sinal de múons será usado no primeiro nível de validação de eventos para reduzir a taxa de falso alarme [35] devido a partículas com pouca energia. Esta tarefa é dificultada pela pouca energia depositada pelos múons no calorímetro, resultando numa relação sinal-ruído bastante pobre.

Conforme descrito no Capítulo 3, o sinal do calorímetro é composto pela combinação de dois sinais do circuito conformador, o sinal de *low-gain* (ganho 1/2) com o de *high-gain* (ganho 32). Para partículas que deixam pouca energia no calorímetro, utiliza-se o sinal de *high-gain* devido a sua melhor relação sinal-ruído e, após a sua saturação (13 pC), passa-se a utilizar o sinal de *low-gain*.

No somador, são utilizados apenas os sinais de *low-gain* do circuito conformador, tornando a identificação de eventos de múons bastante difícil, já que o sinal de entrada apresenta uma relação sinal-ruído baixa. Para facilitar a transmissão e a detecção do sinal por um simples discriminador de amplitude, o ganho do circuito foi aumentado de 8 para 225. A amplitude do sinal mais provável para eventos de múons passaria, então, de 3 mV para 85 mV.

O aumento do ganho ainda deve contribuir com a melhora da performance do sistema, pois o nível de ruído introduzido pelo sistema de aquisição passa a ser desprezível em relação ao ruído do sinal.

Neste capítulo, apresentamos os resultados de testes com feixes de partículas, onde, inicialmente, uma exaustiva análise da performance do circuito com ganho 8

é realizada, para em seguida apresentar os últimos resultados obtidos com o circuito final (ganho 225).

## 8.1 Testes com Feixe de Partículas

Nestes testes, os sinais de saída do somador foram transmitidos da gaveta do detector até a sala de controle por cabos especiais, sendo então processados da seguinte forma:

- Os sinais diferenciais eram recebidos por um circuito receptor, que convertia o sinal diferencial para um sinal referenciado a terra.
- Atenuadores foram usados para que os sinais das torres de validação não excedessem a capacidade do ADC do sistema de aquisição. A atenuação foi de 12,1 dB.
- O sinal foi digitalizado por um ADC de carga de 12-bits. A janela de integração do ADC foi ajustada para 175 ns, que era grande o suficiente para conter todo o sinal.

O cabo usado para transmissão dos sinais tem 31 pares trançados sem blindagem com  $120 \Omega$  de impedância característica, 50 metros de comprimento aproximadamente e condutores com uma seção transversal de 28 AWG<sup>1</sup>. Através do sistema de injeção de carga do detector e pelo uso de um osciloscópio digital, foi verificado que a amplitude do sinal de saída do somador é atenuada em aproximadamente 35% como efeito do longo cabo.

### 8.1.1 Sinal de Múon versus Ruído

Usando o arranjo experimental descrito acima, foi possível calcular a curva característica para a detecção de eventos de múon contra ruído (soma dos dois sinais relativos a célula da terceira camada excitada), para partículas<sup>2</sup> em uma torre do

---

<sup>1</sup>Este cabo foi usado por ser o melhor cabo disponível em tempo hábil para realização do teste

<sup>2</sup>Os resultados apresentados neste capítulo foram obtidos utilizando-se feixes de múons com 180 GeV.

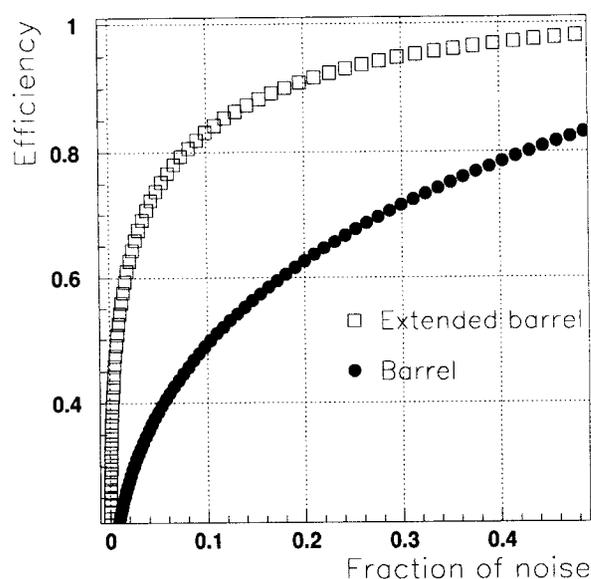


Figura 8.1: Eficiência na detecção de múons (soma de duas saídas do somador). Na vertical, temos a probabilidade de detecção e na horizontal, a probabilidade de falso alarme. A diferença entre o barril ( $\eta = 0,25$ ) e o barril estendido ( $\eta = 1,05$ ) é devida ao comprimento do caminho das partículas.

barril ( $\eta = 0,25$ ) e para uma do barril estendido ( $\eta = 1,05$ ), conforme a Figura 8.1. Pode-se ver que para o barril consegue-se menos de 50% de detecção para 10% de falso alarme, enquanto que para o barril estendido foi obtido mais de 80% de probabilidade de detecção para o mesmo percentual de falso alarme.

O sinal de múon no barril é menor que o sinal de múon no barril estendido, devido a diferença na trajetória da partícula: a terceira camada do barril tem células menores do que no barril estendido e os ângulos de impactos maiores no barril estendido também contribuem para que a partícula atravesse mais matéria. Isto faz com que a performance de detecção no barril estendido seja melhor do que no barril.

A separação sinal-ruído foi feita através de patamares aplicados aos histogramas das energias do sinal de saída do somador, para eventos de múons e para eventos de pedestal (nenhum sinal era injetado as entradas do somador).

### Influência dos Atenuadores

Como o sinal da saída de múons do somador é pequeno em comparação com os das torres, os atenuadores são desnecessários para os sinais de múons. Inclusive,

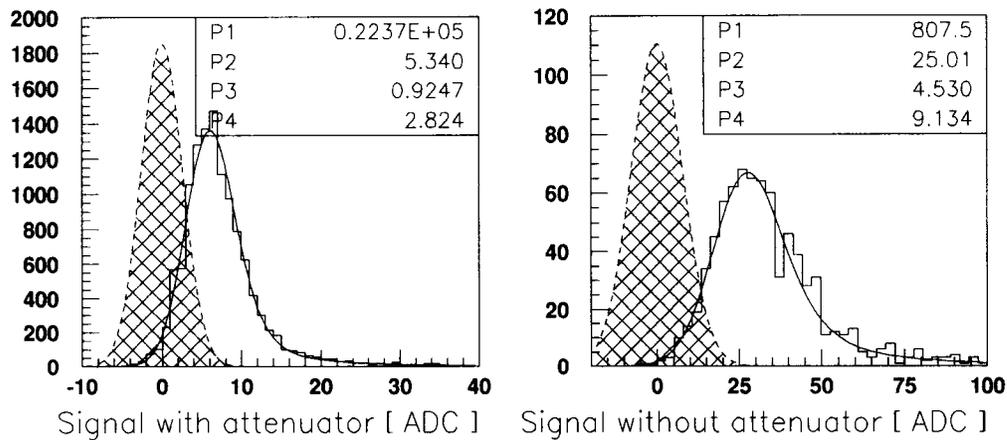


Figura 8.2: Energia na saída de múons do somador obtida para eventos de múon com 180 GeV incidindo em  $\eta = 1,05$  e o respectivo ruído (histograma tracejado). Os histogramas estão em contagens do ADC, incluindo (direita) ou não (esquerda) o atenuador.

eles podem introduzir ruído adicional. Portanto, a eficiência na detecção do sinal de múon deve melhorar com a retirada dos atenuadores. É importante lembrar, que no LHC eles não serão utilizados.

Para comparar a performance do sistema na separação de múons para diferentes condições experimentais, a relação sinal-ruído  $S/N$  (valor mais provável do sinal sobre o  $\sigma$  do ruído) é uma quantidade apropriada.

Quando comparamos o mesmo canal com e sem atenuador, a relação sinal-ruído mostrou-se sistematicamente melhor quando os atenuadores foram removidos. Na Figura 8.2, vemos os histogramas para o sinal de múon e para o ruído, com e sem atenuador. A relação sinal-ruído com atenuador (esquerda) exibiu  $S/N = 2,5 \pm 0,1$ , e sem atenuador (direita)  $S/N = 3,5 \pm 0,3$ .

### Ajustando a Janela de Aquisição do ADC

Como a saída de múons será usada somente para separação do sinal de múon do ruído de fundo, não é necessária a integração de todo o pulso. Assim, pode-se diminuir o tamanho da janela de aquisição do ADC e, conseqüentemente, integrar menos ruído (na região em torno do pico do sinal). Embora parte do sinal seja perdida, a relação sinal-ruído melhora.

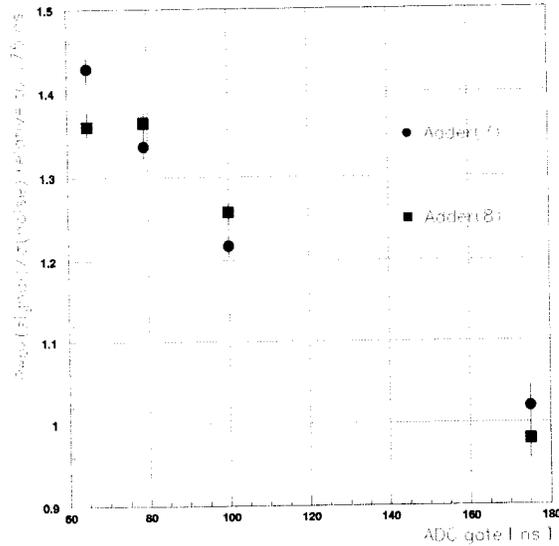


Figura 8.3: Relação sinal-ruído para múons de 180 GeV incidindo em  $\eta = 1,05$ , em função da largura da janela de integração do ADC. As duas saídas de múon dos somadores, relativas a célula excitada do calorímetro, são mostradas. A razão foi normalizada em função do valor original correspondente à janela de 175 ns.

A resposta para múons, incidindo no barril estendido em  $\eta = -1,05$ , foi investigada para diferentes janelas de integração do ADC e sem o uso de atenuadores. A relação sinal-ruído resultante é mostrada na Figura 8.3, relativamente ao valor original obtido com a janela de 175 ns. Pode-se notar que a razão melhora com a diminuição da janela. Vemos que para a menor janela de aquisição utilizada, a relação sinal-ruído melhorou aproximadamente 40%.

### Influência do Ganho da Foto-multiplicadora

O ganho da foto-multiplicadora tem pouca influencia no ruído da saída do somador, uma vez que este ruído é principalmente proveniente do amplificador de saída do circuito conformador<sup>3</sup>. Portanto, o aumento do ganho da foto-multiplicadora deve melhorar ainda mais a relação sinal-ruído.

Novamente, esta dependência foi verificada para múons, incidindo o feixe no barril estendido em  $\eta = 1,05$ . O ganho da foto-multiplicadora foi modificado, ajustando a respectiva alta-tensão (HV).

<sup>3</sup>Ver estudo do ruído realizado no Capítulo 7

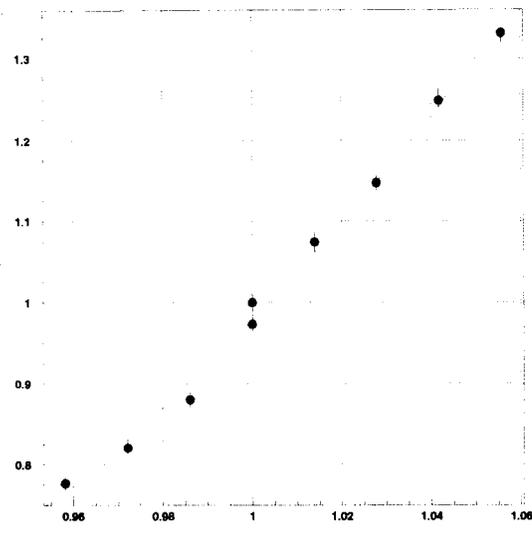


Figura 8.4: Relação sinal-ruído para a saída do somador como função da HV da fotomultiplicadora (relativamente ao valor original da HV, chamada de HV equalizada), medida para múons de 180 GeV incidindo em  $\eta = 1,05$ . A razão é normalizada relativamente ao valor original da HV. Como o ruído é independente da HV, a relação sinal-ruído escala com a HV da mesma forma que o ganho  $G = \alpha V^\beta$ .

Os resultados podem ser vistos na Figura 8.4. Tanto a alta-tensão como a relação sinal-ruído são dadas relativamente às configurações originais. A razão melhora com o aumento da HV da PMT, como esperado.

Na Tabela 8.1, resumimos a melhora obtida na relação sinal-ruído para a saída de múons do somador, relativamente ao  $\eta = 1,05$  no barril estendido. Levando em consideração a melhor performance obtida, a eficiência na detecção do sinal é mostrada na Figura 8.5. Os resultados para o barril estendido foram obtidos diretamente das medidas experimentais. As curvas para o barril ( $\eta = 0,25$ ) são derivadas daquela obtidas para o barril estendido, levando em consideração a escala do sinal múons. Portanto, os resultados para a região do barril representam a performance estimada. A soma *software* de duas saídas de múons, referentes a mesma célula do detector, foi realizada, o que também melhora a separação sinal-ruído, já que o sinal é aproximadamente multiplicado por dois, enquanto que o valor *rms* do ruído aumenta de  $\sqrt{2}$  (considerando as fontes de ruído independentes e *Gaussianas*).

Configuração	$S/N( \eta  = 1.05)$	Fator de melhora
inicial	2.5	
sem atenuador	3.5	1.4
janela do ADC (65 ns)	4.9	1.4
aumento do ganho da PMT (de 20%)	5.7	1.15

Tabela 8.1: Melhora na relação sinal-ruído, medido para a saída de múons do somador no barril estendido  $\eta = 1,05$ .

Vemos também, na Figura 8.5, o efeito do aumento do ganho da foto-multiplicadora (em relação ao valor equalizado). Enquanto que no barril estendido não vemos efeito significativo, na região do barril, a performance é bastante melhorada, chegando-se a uma eficiência de detecção de 87% para somente 10% de falso alarme.

Ainda é possível obter resultados melhores reduzindo-se o ruído introduzido pelo sistema de leitura, principalmente pelo circuito receptor e pelos cabos utilizados para transmissão dos sinais.

Todas estas análises resultaram na proposta de aumento do ganho para a saída de múons do somador (de 8 para 225) e também no aumento do ganho da foto-multiplicadora em 20%, ambas com o objetivo de melhorar a performance para detecção de múons.

### 8.1.2 Análise do Circuito Final (ganho 225)

Com o aumento do ganho da saída de múons do circuito somador, espera-se obter uma melhora na performance na detecção de múons contra ruído, pelas seguintes razões:

- Facilitar a recepção e transmissão do sinal.
- Melhorar um pouco a relação sinal-ruído do sinal, na medida em que a banda em frequência do circuito foi reduzida como consequência do aumento do ganho.

Além disso, o ganho da foto-multiplicadora foi aumentado em 20%, o que contribui também, para uma melhor detecção de múons, conforme mostrado na

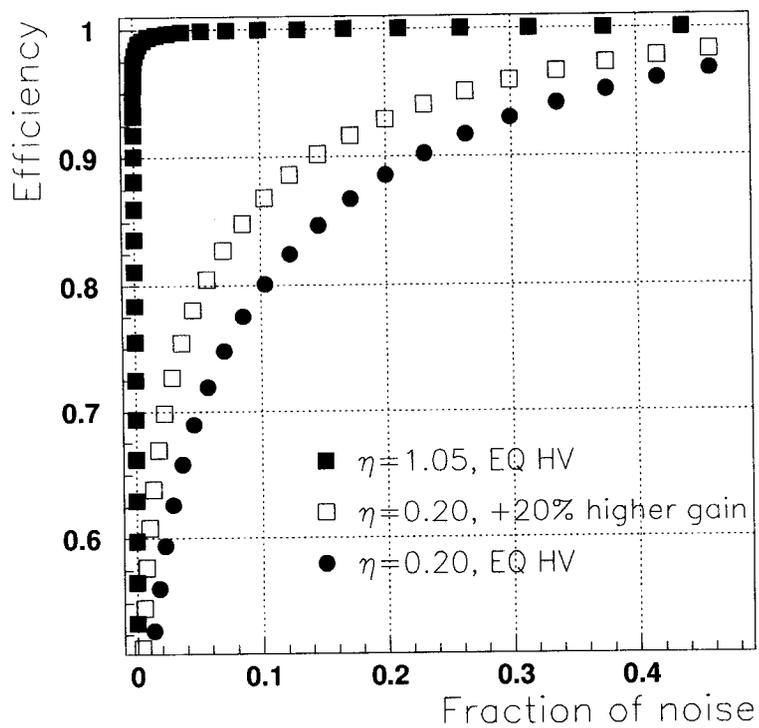


Figura 8.5: Separação entre o sinal de múon e o ruído, levando em consideração as melhoras obtidas na configuração de leitura dos sinais e a soma dos dois sinais de múons relativos a uma célula do detector. Os símbolos cheios correspondem a HV original. Os quadrados vazios, mostram a melhora da performance na região do barril ( $\eta = 0, 25$ ), quando aumentamos o ganho da foto-multiplicadora em 20%.

seção anterior. Portanto, esperamos obter uma performance melhor ou equivalente a da Figura 8.5.

Para estes testes, usamos novamente os mesmos cabos para transmissão do sinal da gaveta do detector até a sala de controle, mas para um dos módulos foi usado um protótipo do cabo que deverá ser usado no LHC com 70 metros de comprimento. A recepção dos sinais foi feita da seguinte forma:

- Os sinais diferenciais eram convertidos para sinais referenciados a terra por transformadores de alta frequência [36], com uma relação de impedância de 2:1.
- O sinal foi digitalizado por um ADC de 40 MHz, 8-bits de resolução e calibração de 5 mV por contagem. Desta forma, temos acesso ao sinal digitalizado e não somente a carga do sinal.

O novo cabo utilizado possui 16 pares trançados blindados com 100  $\Omega$  de impedância entre condutores (o suficiente para transmissão dos sinais de uma gaveta do detector) e atenua o sinal em aproximadamente 40% para os seus 70 m [37]. Este cabo foi instalado em um módulo do barril, para termos uma idéia da performance final do sistema para o pior caso, já que o barril estendido possui uma boa performance na detecção de múons.

Utilizando o método mais simples de detecção (amostra de maior valor do sinal), foi calculada a curva característica de detecção para o barril ( $\eta = 0,25$ ) e para o barril estendido ( $\eta = 1,05$ ). Na Figura 8.6, temos a curva para sinais individuais do somador (acima) e para a soma dos dois sinais relativos a mesma célula da terceira camada<sup>4</sup> (abaixo).

Analisando a curva no canto esquerdo da Figura 8.6 e comparando com a Figura 8.5, verificamos que a performance obtida experimentalmente foi melhor do que a prevista. Isto pode ser explicado pelo aumento no ganho do circuito, que facilita a recepção do sinal, já que o ruído do circuito receptor e do ADC passam a ter um impacto menor na relação sinal-ruído do sistema.

---

<sup>4</sup>Cada sinal do calorímetro possui dupla leitura, portanto, a mesma célula da terceira camada de um módulo possui dois sinais elétricos

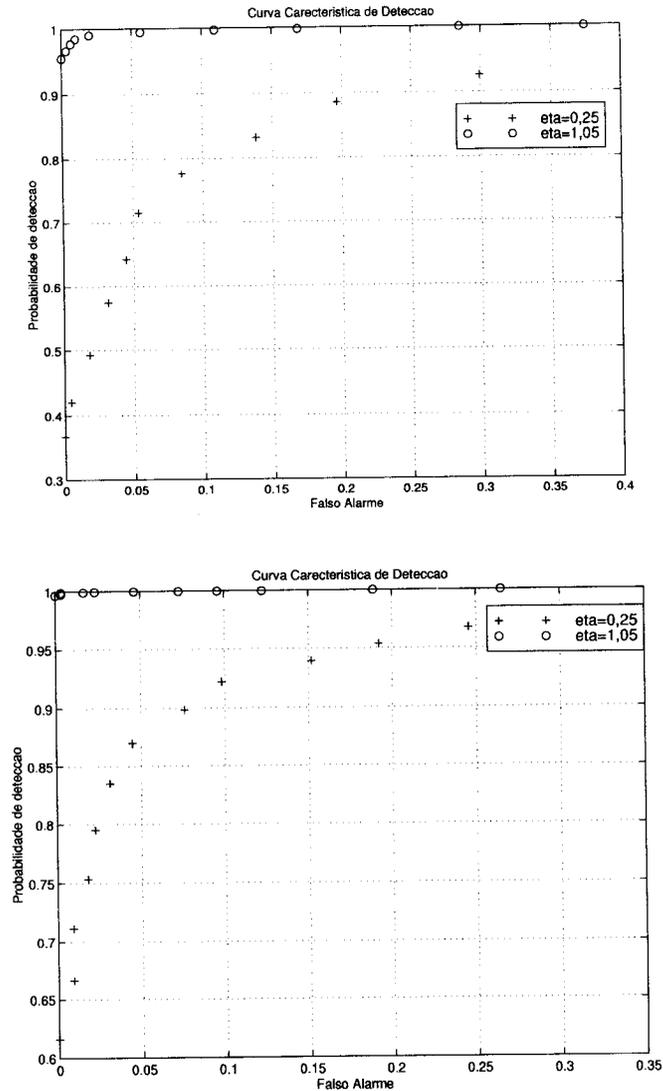


Figura 8.6: Separação entre o sinal de múon e o ruído da saída de múons do somador, para partículas incidindo em  $\eta = 0,25$  e  $\eta = 1,05$ . Na parte superior temos a curva para um simples canal, e na inferior para a soma dos dois sinais relativos a célula da terceira camada excitada. O ganho da saída do somador é de 225 e o ganho da foto-multiplicadora foi aumentado em 20 % em relação ao valor nominal no barril.

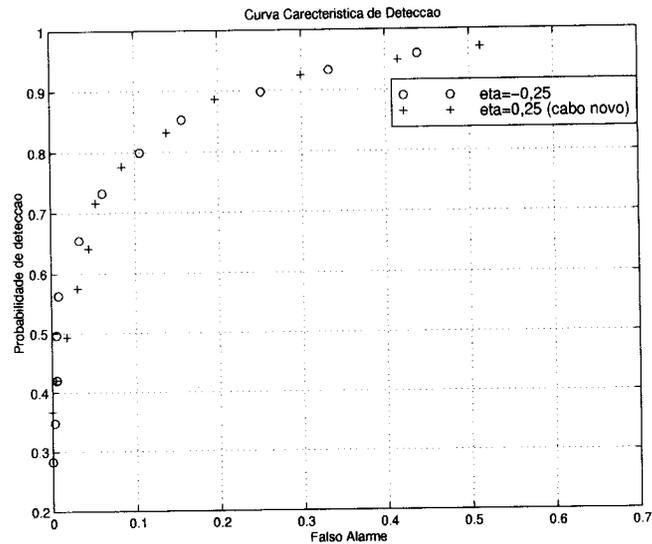


Figura 8.7: Separação entre o sinal de múon e o ruído da saída de múons do somador, para partículas incidindo em  $\eta = -0,25$  e  $\eta = 0,25$  (cabo novo). Vemos que os dois cabos utilizados possuem performance semelhantes.

Para obter uma performance satisfatória na detecção de múons no barril, é necessário que o sistema de detecção faça a soma analógica dos sinais da saída de múons do somador, que pertençam a mesma célula da terceira camada do calorímetro, caso contrário, a performance é bastante pobre. Isto acontece porque o ruído se soma de forma não coerente ( $\sqrt{2}$ ), enquanto que o sinal dobra sua amplitude.

A performance do sistema para o novo cabo foi avaliada e pode ser vista na Figura 8.7. Podemos comparar a curva de detecção para a resposta de uma saída de múons do somador, sendo transmitida pelo cabo novo ( $\eta = 0,25$ ) e pelo cabo antigo ( $\eta = -0,25$ ), para múons de 180 GeV incidindo nas respectivas torres. Apesar do cabo novo ser mais de 20 m mais longo que os cabos antigos, a performance na detecção de múons foi equivalente. Isto mostra que o cabo novo tem uma performance melhor do que a dos cabos antigos, o que pode ser explicado pela sua impedância característica de  $100 \Omega$ , evitando reflexões do sinal, e por atenuar menos o sinal por cada metro de cabo (40% de atenuação para 70 m de cabo, contra 35% de atenuação para 50 m dos cabos antigos), devido a seção do condutor ser maior (22 AWG).

# Capítulo 9

## Avaliação da Resistência à Radiação

Durante os 10 anos de funcionamento do LHC, todos os circuitos eletrônicos de leitura e processamento estarão expostos a altas doses de radiação, devido a alta energia das colisões e a geração de nêutrons e partículas ionizantes (notadamente gamas) como subprodutos. Para que os circuitos permaneçam operantes durante o experimento, testes rigorosos de resistência à irradiação devem ser realizados para todos os componentes eletrônicos que fazem parte do experimento.

Neste capítulo, começamos falando dos efeitos da radiação em componentes eletrônicos, para, em seguida, apresentarmos as condições de radiação para o calorímetro de Telhas, o desenvolvimento do arranjo experimental para a realização dos testes da pré-produção do somador, os resultados desses testes, e o planejamento para a validação da produção.

### 9.1 Efeito da Radiação em Componentes e Circuitos Eletrônicos

Os dispositivos eletrônicos são compostos por materiais sensíveis à radiação e, por este motivo, quando estes dispositivos são expostos a uma certa dose de radiação, eles podem vir a apresentar falhas em seu funcionamento. De uma forma geral, esses dispositivos são compostos de óxidos, semi-condutores (Si, Ge, GaAs, GalnAsP, ente outros), componentes metálicos (Al, Au, AlCu, AlSi, SnPb, TaSi<sub>2</sub>, Pt,

W, entre outros) e componentes orgânicos (baseados em C, H, O, N, entre outros). Dentre estes materiais, os mais sensíveis ao efeito da radiação são os óxidos, os semi-condutores e os elementos pesados das interconexões (W, Ta, Au, Pb, Pt, etc).

Os principais efeitos causados pela radiação nos materiais são a criação de pares elétron-buracos (ionização), a ruptura de ligações químicas e o deslocamento atômico [38].

### 9.1.1 Deposição de Energia nos Óxidos

A ionização cumulativa, também chamada de TID (*Total Ionizing Dose*), atua nos óxidos criando pares elétron-buraco, sendo que os elétrons deixam o óxido devido a sua alta mobilidade, deixando íons que ficam presos no óxido.

A ionização instantânea, também chamada de SEE (*Single Event Effect*), é causada pela passagem de uma partícula altamente ionizante, que forma uma alta densidade de pares elétrons-buracos ao longo de seu caminho, gerando uma polarização no óxido (corrente transitória através do óxido). Isto pode resultar na ruptura do óxido.

O deslocamento atômico não gera problema nos óxidos, pois eles já são amorfos.

### 9.1.2 Deposição de Energia no Silício

A criação de pares elétrons-buracos no silício pode ser causada por ionização direta ou indireta, podendo resultar em plasma ao longo do caminho percorrido pela partícula, injeção de corrente ou carga em nós sensíveis e efeitos SEE, como pulsos elétricos, mudança de bits, queima de junções, etc.

Os deslocamentos atômicos são causados por partículas que produzem NIEL (*Non Ionizing Energy Loss*), aonde colisões ocorrem em cascatas nos átomos dos semi-condutores, produzidas por partículas "pesadas" (p, n, íons) ou por partículas secundárias, resultantes de difusão elástica, reação nuclear e fissão. Os defeitos são produzidos ao longo do caminho de partículas secundárias e em regiões no final destes caminhos, resultando no aumento da resistividade do material e até mesmo

na inversão de tipo ( $N \rightarrow P$ )<sup>1</sup>.

## 9.2 Condições de Radiação para o Telhas

No ATLAS, foram desenvolvidos métodos para o teste de dispositivos eletrônicos derivados de métodos DOD ou ESA [39, 40, 41] para dispositivos CMOS e para dispositivos bipolares ou BiCMOS [42], com várias adaptações que levam em consideração características específicas do ambiente de radiação do ATLAS. Desta forma, todos os dispositivos eletrônicos do ATLAS deverão passar por três testes [43]:

- O teste **NIEL** permite que os efeitos das partículas que produzem perda de energia não ionizante sejam medidos. Essas partículas produzem danos de deslocamento no silício, que degrada os parâmetros dos componentes eletrônicos. Este teste é baseado em irradiação com nêutron.
- O **TID** é baseado em irradiação com gama ou raio-X, e permite a análise dos danos causados pela radiação ionizante nos óxidos dos componentes eletrônicos.
- O teste **SEE** pode ser baseado em irradiação com prótons, mas pode também ser realizado com nêutrons (de alta energia). Este teste permite a verificação das taxas de problemas SEE esperadas no ambiente ATLAS.

Tomando por base os mapas de radiação do ATLAS, produzidos pelo simulador GEANT 3.21 [44] para as condições do LHC, os níveis de radiação ionizante, de nêutrons e de prótons para os métodos descritos acima foram calculados (ver Figura 9.1). Na Tabela 9.1, podemos ver esses níveis para o pior caso dentre os circuitos somadores instalados no Telhas, para os 10 anos de funcionamento que estão previstos para o LHC.

---

<sup>1</sup>Inversão de tipo é significativa em materiais de alta resistividade (detectores de silício) sob uma fluência alta de nêutrons. Não é, porém, significativa em dispositivos de silício usuais (transistores, diodos, etc).

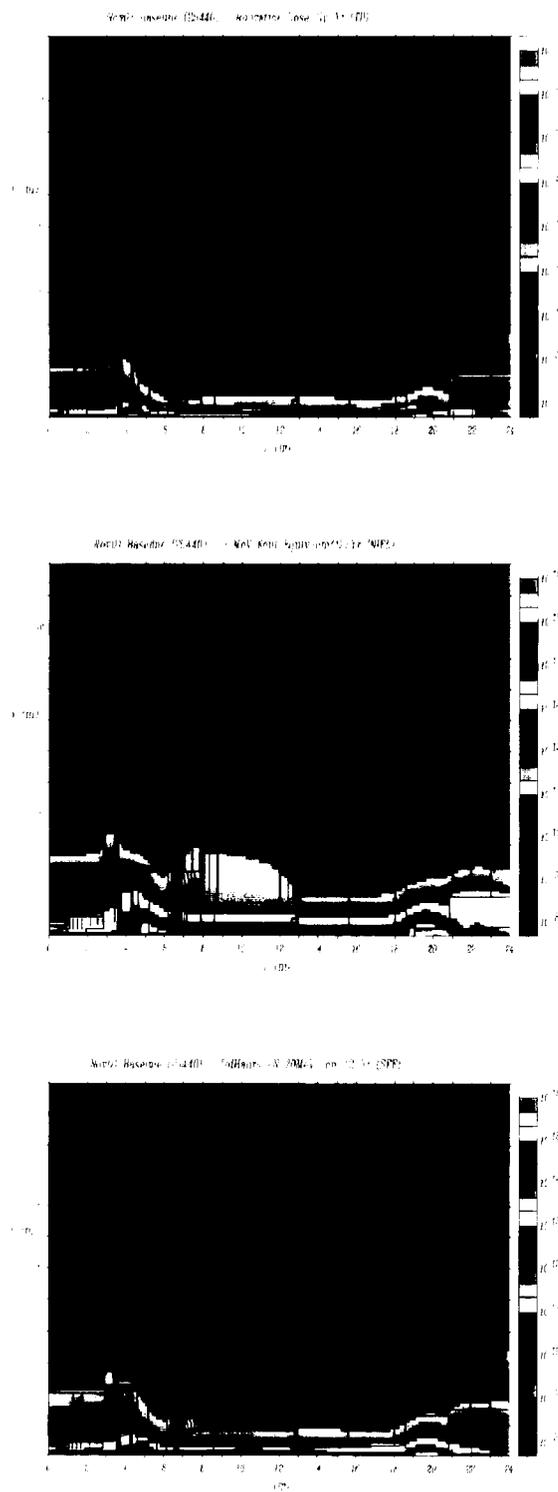


Figura 9.1 - Os mapas de radiação para o experimento ALIAS gerados pelo GEANT4. Acima vemos o mapa para radiação ionizante, no meio para nêutrons e abaixo para  $\gamma$  (protons). (SFF)

Placa	Níveis Simulados de Radiação		
	Ionizante	Nêutrons	Prótons
Somador	2,13E+00 Gy	1,56E+11 1 MeV n/cm <sup>2</sup>	2,47E+10 h/cm <sup>2</sup>

Tabela 9.1: Níveis de radiação simulados para o pior caso dentre os somadores, para os 10 anos de funcionamento previstos para o LHC.

### 9.3 Validação da Pré-Produção do somador

Para a validação da pré-produção do somador, foi necessária a realização de testes para radiação ionizante e nêutrons, sem a necessidade de testes SEE. Os níveis de radiação obtidos por simulação também são diferentes dos níveis apresentados anteriormente, pois as simulações correspondentes foram realizadas em 1999, sendo que a cada ano novas simulações são realizadas na tentativa de melhorar a estimativa da radiação gerada no experimento.

Considerando as simulações realizadas em 1999, o somador seria exposto a doses máximas de 2 Gy/ano (0,2 Krad/ano) para radiação ionizante e para nêutrons a doses de  $10^{11}$  nêutrons/cm<sup>2</sup>/ano (1-MeV-equivalente). O método ATLAS, para placas de pré-produção, requer testes de radiação para doses de 10 anos equivalentes, com um fator de segurança de 5 devido a incerteza na simulação. Como, durante o funcionamento do LHC, a taxa de dose é muito menor do que a taxa utilizada no teste, um fator adicional de 5 para radiação ionizante e de 1,5 para nêutrons deve ser utilizado. Combinando estes fatores, os circuitos deveriam ser testados para doses de **500 Gy** para radiação ionizante e  **$7,5 \cdot 10^{12}$  1-MeV-equivalente nêutrons/cm<sup>2</sup>** para nêutrons.

Decidimos que, durante os testes, os circuitos deveriam estar em funcionamento e serem monitorados, para permitir uma análise da performance do circuito ao longo de todo o procedimento, o que possibilitaria a identificação do momento aonde uma possível falha do circuito viesse a ocorrer.

Na próxima seção, descrevemos o arranjo experimental utilizado para estes testes e na seção seguinte os resultados são apresentados.

### 9.3.1 Configuração

Podemos dividir o sistema desenvolvido para os testes de radiação em duas partes, sendo uma responsável pela injeção de sinais no somador e outra pela monitoração e aquisição dos sinais e medidas de performance da saída do circuito. O sistema de injeção de sinais deve ser capaz de injetar sinais seqüencialmente em cada entrada do somador, ao longo da exposição do circuito à radiação, enquanto o sistema de aquisição e monitoração dos sinais de saída deve ser capaz de adquirir os sinais das saídas do somador, provenientes de cada entrada, para que seja possível uma análise da performance durante todo o tempo de exposição à radiação.

Para garantirmos o funcionamento seguro do sistema de injeção e aquisição de sinais ao longo de toda a duração do teste, este sistema não é exposto à radiação, ficando a uma distância segura da fonte radioativa. Na análise dos resultados serão desconsiderados quaisquer efeitos da radiação sobre este sistema.

O sistema de injeção de sinais pode ser subdividido em duas partes: uma digital, que habilita ou não a transmissão de sinal para um determinado canal e gera o sinal de controle para o pulso que sincroniza o sistema de aquisição, e a parte analógica, que torna diferencial o sinal de entrada, proveniente de um gerador de pulsos, e transmite-o para um dos canais de saída, quando este é habilitado pela parte digital do circuito.

A parte digital do circuito gera oito sinais: seis controlam o estado dos canais que fornecem os sinais de entrada para o somador, e os dois restantes controlam o sincronismo do sistema de aquisição.

#### 9.3.1.1 Seção Analógica

A parte analógica do circuito recebe um pulso do gerador de sinais<sup>2</sup> com 10 ns para ambos tempos de subida e descida e 47 ns de largura, tornando-o diferencial através do amplificador de transcondutância (MAX435). A corrente na saída do MAX435 é amostrada em tensão por dois resistores, formando o sinal diferencial de tensão. Estes resistores são ligados às entradas de oito *line-drivers* diferenciais (MAX4147) [45], que podem ser habilitados quando um zero lógico está presente no seu pino de habilitação, sendo que seis destes geram as entradas para o somador e

---

<sup>2</sup>HP8011A.

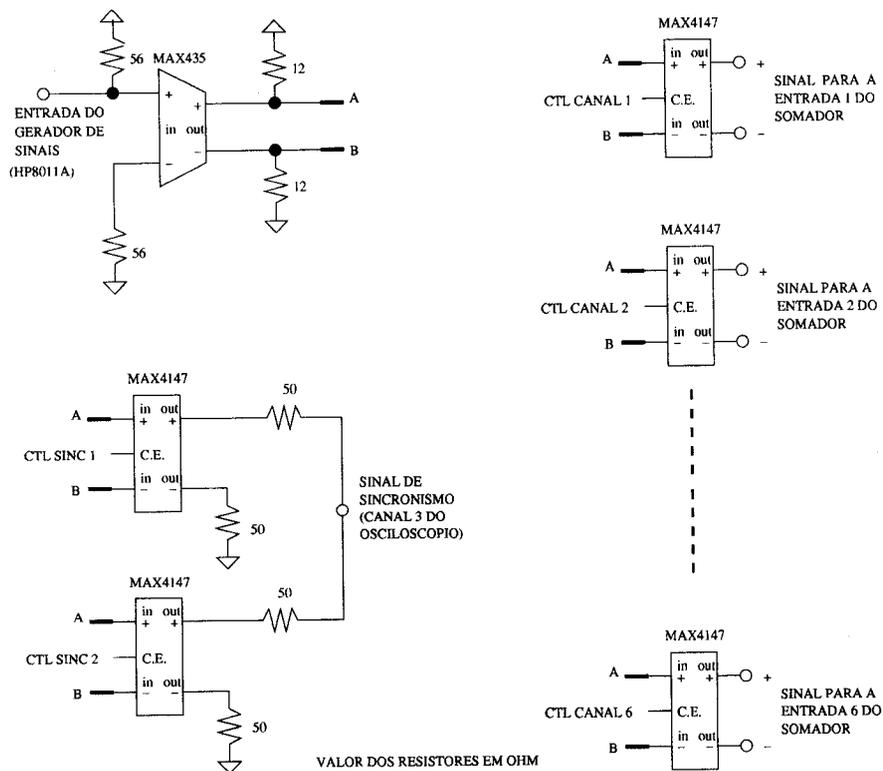


Figura 9.2: Diagrama em blocos da parte analógica do sistema de injeção de sinais.

dois são utilizados para compor o sinal de sincronismo do sistema. Na Figura 9.2, podemos ver o diagrama de blocos da parte analógica do circuito de injeção de sinais.

### 9.3.1.2 O Sistema de Aquisição

O sistema de aquisição tem como principais tarefas, permitir a um operador localizado em uma região protegida da radiação monitorar as saídas do somador e salvar, a cada aquisição, os dados para serem analisados posteriormente. Para isto, foram utilizados um osciloscópio digital<sup>3</sup>, um PC com uma placa de interface GPIB/ISA instalada em um de seus barramentos ISA, e o software LabVIEW [46].

O primeiro elemento do sistema de aquisição é o osciloscópio digital, que recebe, em seu canal 1, o sinal da saída da soma do somador, no canal 2, a saída de múons, no canal 3, o pulso de sincronismo para o sistema de aquisição, e no canal 4, o pulso de sincronismo para o osciloscópio. Este osciloscópio recebe sinais analógicos em sua entrada e os digitaliza a uma taxa máxima de 2 GAmostras/s, sendo que cada forma de onda digitalizada possui 500 amostras. O osciloscópio é

<sup>3</sup>TDS640 da Tektronix.

sincronizado pelo sinal de sincronismo do gerador, que provê também o sinal de entrada do somador. Desta forma, cada aquisição realizada pelo osciloscópio está sincronizada com os sinais de saída do somador.

O osciloscópio é ligado ao PC através de um cabo GPIB e da placa GPIB instalada no barramento ISA do PC. A comunicação entre a placa e o osciloscópio é controlada pelo LabVIEW. Um código em LabVIEW foi desenvolvido com o objetivo de possibilitar a monitoração do teste por um operador, através da visualização dos sinais de saída do somador e das medições realizadas. Uma análise posterior também é possível, uma vez que tanto as formas de onda quanto os parâmetro medidos são gravados continuamente no disco rígido do PC.

### 9.3.1.3 Funcionamento

Inicialmente, deve-se ligar o somador, o osciloscópio e o sistema de injeção de sinais. Ao realizar esta operação, não se sabe exatamente em que entrada do somador está sendo injetado o sinal de teste, porém, sabe-se que no canal 3 do osciloscópio há um sinal de sincronismo para o sistema de aquisição, e a partir deste sinal, podemos determinar em qual entrada do somador está sendo injetado o sinal de teste. O sinal do canal 3 é gerado a partir do pulso do gerador (HP8011A), que fornece os pulsos básicos de injeção para o somador. Pela análise do diagrama de tempos (Figura 9.3) dos sinais de controle do sistema de injeção de sinais, podem-se observar sete estados, com cada um deles apresentando uma duração de  $\approx 12$  s. Em determinado estado, que pode-se denominar de estado 1, nenhuma das entradas do somador receberá sinal. Neste estado, o canal 3 do osciloscópio receberá um pulso com amplitude maior que 60 mV durante 6 s e depois terá um sinal de amplitude maior que 20 mV e menor que 30 mV até o final dos 12 segundos. Nos próximos estados, no canal 3, um pulso de amplitude maior que 40 mV e menor que 60 mV aparecerá durante 6 segundos, ficando desabilitado nos seis segundos restantes. Isto acontecerá durante 6 estados, sendo que após o último estado, volta-se para o estado 1. Desta forma, criou-se um sistema capaz de identificar o instante em que a primeira entrada do somador recebe um sinal de excitação a cada ciclo, e também, o instante em que ocorrem as mudanças de injeção de sinal de uma entrada para outra, tendo por base a leitura do sinal de sincronismo, presente no canal 3 do osciloscópio.

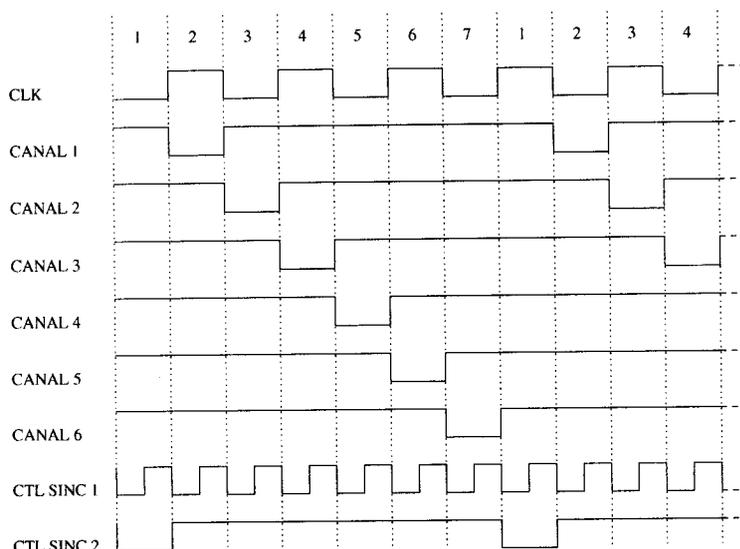


Figura 9.3: Diagrama de tempos do sinais de controle do sistema de injeção de sinais.

Foram criadas seis telas no ambiente de desenvolvimento do LabVIEW, que permitiam a monitoração do sinal de soma do somador, dependendo da entrada de injeção de sinal. Adicionalmente, foi também criada uma tela para monitorar o sinal da saída de múons, que só tem sinal presente quando a sexta entrada do somador recebe sinal. Além de permitir a visualização das formas de onda, o programa possui um alarme sonoro para o caso em que a amplitude da saída do somador, em algum instante, atinja um valor abaixo de um patamar determinado pelo operador. Este alarme tem a função de alertar o operador caso ocorra algum dano no circuito que resulte numa diminuição da amplitude do sinal de saída. O programa, também, realiza medidas sobre os pulsos mostrados e salvos no disco rígido. Estas medidas cobrem as principais especificações do somador, ou seja: tempo de subida, tempo de descida, largura a meia altura do pulso e amplitude. Tais medidas são salvas no disco rígido para análise posterior de sua evolução ao longo de todo o tempo de exposição do circuito à radiação. Na Figura 9.4, vemos a interface visual do sistema.

#### 9.3.1.4 Fontes de Radiação

Para o teste com radiação ionizante, foi usada uma bomba de cobalto<sup>4</sup>, que produziu uma taxa de dose de 0,151 krad/min para a distância escolhida entre a

<sup>4</sup>Pertencente ao Instituto de Ginecologia do hospital Moncorvo Filho da UFRJ.

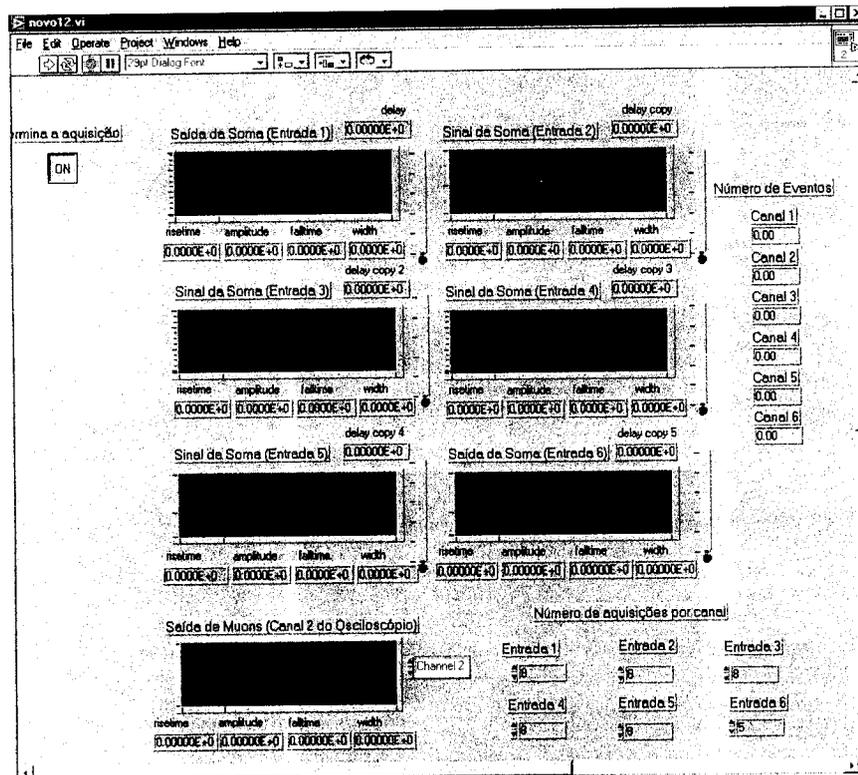


Figura 9.4: Interface gráfica do sistema de aquisição e monitoração desenvolvido para o teste de radiação da pré-produção do somador.

fonte e a placa. Portanto, para atingir a quantidade de 50 krad no circuito, seria necessário expor o circuito durante 5 horas e 30 minutos.

Para nêutrons, utilizamos uma fonte isotrópica de  $Cf_{252}$ <sup>5</sup>, com uma taxa de  $1,14 \cdot 10^8$  nêutrons/seg. Aqui, vale ressaltar, que a distribuição da energia dos nêutrons gerados pelo califórnio é bem próxima àquela requerida pelo padrão do ATLAS, sendo ideal para este tipo de procedimento. Colocando-se esta fonte sobre o circuito, seria necessário um tempo de exposição aproximado de 26 dias para que, em média, toda a placa recebesse os  $7,5 \cdot 10^{12}$  nêutrons/cm<sup>2</sup>. É importante frisar que no ponto de contato entre fonte e a placa, a quantidade de nêutrons será maior do que a necessária, mas nas regiões da placa mais distantes da fonte a quantidade será menor.

O arranjo experimental dos testes de radiação pode ser visto na Figura 9.5. A única diferença para o teste com nêutrons é que a fonte radioativa é isotrópica, enquanto que, para gama, temos um feixe colimado direcionado na placa.

<sup>5</sup>Os testes com nêutrons foram realizados no IRD (Instituto de Radioproteção de Dosimetria)

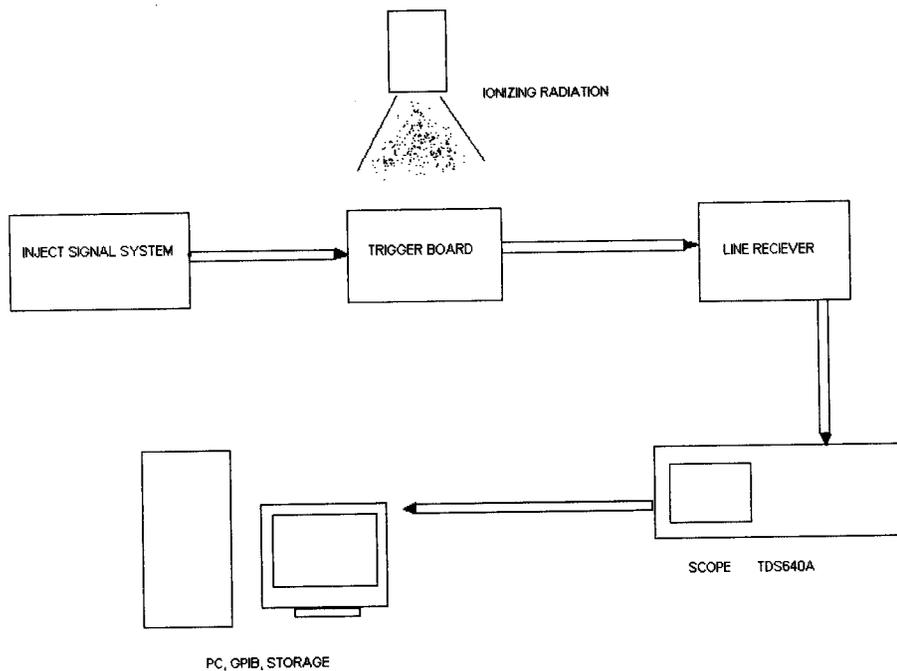


Figura 9.5: Arranjo experimental para os testes de resistência à radiação para validação da pré-produção do somador.

### 9.3.2 Resultados

Duas placas de pré-produção foram expostas à radiação ionizante e outras duas a nêutrons. Com relação ao teste com radiação ionizante, cada placa foi exposta durante um período de 6 horas, resultando em um total de 53,6 krad de dose total. No teste de nêutrons, uma das placas ficou exposta durante 5 dias e 6 horas, o que resultou numa dose acumulada de  $1,5 \cdot 10^{12}$  nêutrons/ $cm^2$ . A segunda placa ficou durante 6 dias, resultando numa dose de  $1,7 \cdot 10^{12}$  nêutrons/ $cm^2$ . Apesar da dose média de nêutrons em toda a placa ter sido menor do que a dose necessária, no circuito integrado de maior interesse para este teste (o amplificador de transcondutância MAX435), a dose total alcançou  $2 \cdot 10^{13}$  nêutrons/ $cm^2$ , acima portanto, da dose necessária. Este componente foi de maior interesse, porque os outros componentes do circuito, tanto os passivos quanto o OPA4650, são também utilizados no circuito 3-em-1, e já haviam sido aprovados em testes anteriores realizados em Chicago [47].

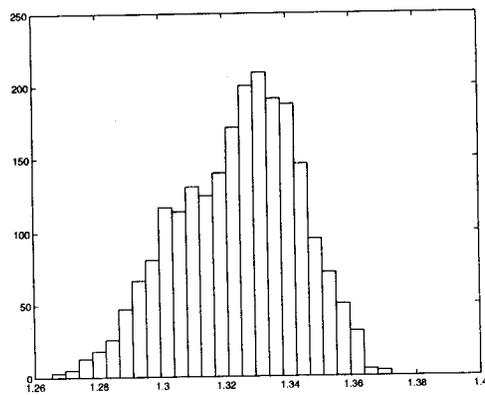


Figura 9.6: Histograma da amplitude da saída da soma do circuito somador para os eventos adquiridos ao longo da exposição a radiação gama. No eixo horizontal, temos o valor da amplitude em Volts e, no eixo vertical, a quantidade de medidas.

### Radiação Ionizante

Como anteriormente mencionado, o circuito somador permaneceu em funcionamento pleno durante todo o tempo de exposição à dose e, em média, foram adquiridos 42 eventos a cada minuto, sendo 7 eventos para cada uma das suas 6 entradas.

Devido à característica da radiação ionizante, que é absorvida por material pesado, e ao menor tempo de duração do teste, foi possível a monitoração de todo o teste por um operador humano. O operador monitorava o circuito através da tela do PC, localizada atrás de uma parede de chumbo, a qual impedia que a radiação chegasse a ele.

Durante as seis horas de duração do teste, nenhum problema foi detectado pelo operador. A análise posterior dos dados mostrou uma pequena flutuação nas medidas de amplitude e largura do pulso, a qual foi identificada experimentalmente como consequência da flutuação própria do gerador de sinais e não devido a efeitos da radiação. Na Figura 9.6, vemos o histograma com a medida dos valores de amplitude do pulso de saída do circuito, quando o sinal estava presente em um único canal, mostrando a pequena flutuação no valor da amplitude do sinal de saída do somador. Este histograma possui 2248 medidas, sendo que a média da amplitude do pulso de saída do somador, considerando estas medidas, foi de 1,32 V com um desvio padrão de 0,02 V.

Na Figura 9.7, vemos a variação da amplitude do sinal de saída do somador

Parâmetro	Antes da irradiação	Depois da irradiação
Ganho soma	$7,8 \pm 0,1$	$7,9 \pm 0,1$
Ganho saída 2	$8,5 \pm 0,1$	$8,5 \pm 0,1$
Ruído ( $\mu\text{Vrms}$ )	$600 \pm 98$	$630 \pm 102$
Excursão (V)	$4,0 \pm 0,1$	$3,9 \pm 0,1$
Consumo (W)	2,8	2,8

Tabela 9.2: Performance do somador antes e depois do teste de resistência à radiação gama.

ao longo de toda a duração do teste para uma das placas expostas. Temos 6 gráficos, pois cada gráfico mostra a amplitude da saída para o respectivo canal de entrada excitado. No eixo horizontal, temos o número do evento e no eixo vertical, a amplitude do sinal de saída em Volts. Pode-se ver que o ganho do circuito mantave-se constante. O número de eventos menor para o canal 6 deve-se à aquisição também da saída de múons do somador, portanto, o número de eventos neste gráfico é a metade dos outros. A saída de múons não foi mostrada, pois apresenta um comportamento semelhante ao dos gráficos já mostrados.

A avaliação da performance de cada placa, após sua irradiação, foi adicionalmente realizada pela análise de algumas de suas especificações mais cruciais, comparando o desempenho das placas ao final dos testes de irradiação com o conjunto de medidas, obtido para cada placa, antes da irradiação. A Tabela 9.2 mostra ambos resultados para as duas placas expostas à radiação, indicando que a performance se manteve praticamente inalterada com a irradiação. Para obtenção do ganho e do ruído do sistema somador foram realizadas 100 medidas. Portanto, para estes parâmetros de performance do circuito, são apresentados na tabela o valor médio e desvio padrão da medida.

### Fluxo de Nêutrons

Nos testes com fluxo de nêutrons, não foi possível a monitoração por um operador humano, uma vez que o tempo de exposição da placa foi de seis dias e,

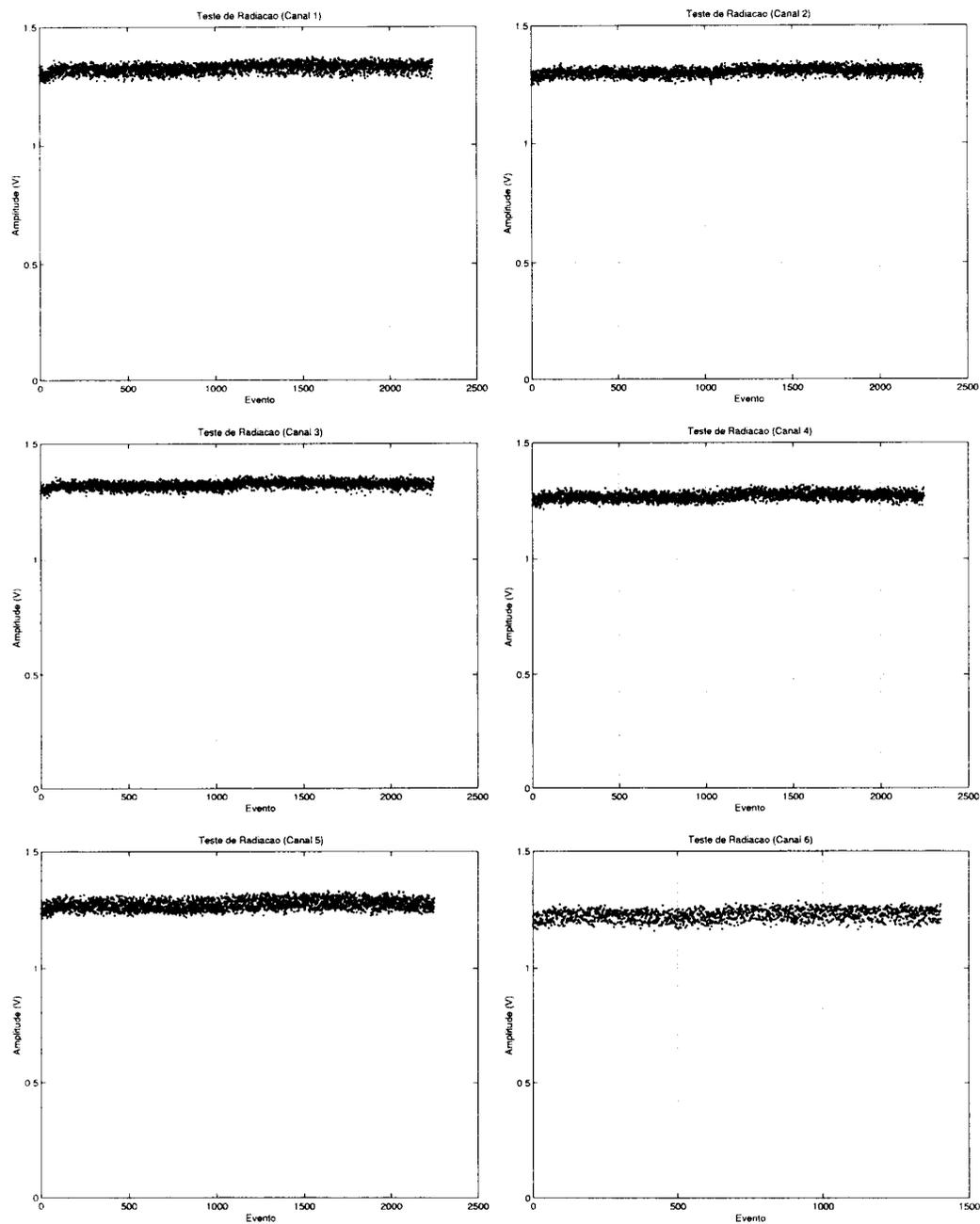


Figura 9.7: Evolução da amplitude do sinal de saída do somador ao longo de toda a duração do teste de radiação, para uma das placas testadas. No eixo horizontal, temos o número do evento e no eixo vertical, a amplitude do sinal em Volts. Os seis gráficos mostram a amplitude da saída quando há sinal na respectiva entrada do somador.

Parâmetro	Antes da irradiação	Depois da irradiação
Ganho soma	7,9 ± 0,1	7,8 ± 0,1
Ganho saída 2	8,4 ± 0,2	8,4 ± 0,2
Ruído ( $\mu$ Vrms)	650 ± 130	700 ± 150
Excursão (V)	3,9 ± 0,1	3,9 ± 0,1
Consumo (W)	2,8	2,8

Tabela 9.3: Performance do somador antes e depois da exposição do circuito somador ao fluxo de nêutrons.

além disso, o operador teria, por medida de segurança, que estar a uma distância suficientemente grande da fonte radioativa, o que não era possível com o sistema utilizado. Porém, para permitir uma monitoração da performance do somador, utilizou-se uma câmera de vídeo para filmar o monitor do PC, tornando possível a visualização da saída do somador.

Devido a maior duração dos testes e ao espaço limitado em disco, a cada minuto eram adquiridos apenas 14 eventos, sendo 2 eventos para cada entrada do circuito somador. Uma análise destes dados mostrou que, novamente, ocorreram pequenas flutuações nas medidas realizadas, consequência de flutuações inerentes ao sistema utilizado para injeção de carga, mostrando a boa performance da placa durante todo o teste.

Como feito no teste com radiação gama, as duas placas expostas ao fluxo de nêutrons foram testadas, após o final da exposição à radiação, para comparação com seu funcionamento padrão. A comparação mostrou-se novamente satisfatória como podemos ver na Tabela 9.3. O pequeno aumento observado no nível do ruído da placa (menos de 10%) não é relevante, uma vez que o ruído máximo especificado para a placa é de 1 mVrms, sem contar que esta variação no ruído ainda se encontra dentro da barra de erro da medida.

Radiação	Fatores de Segurança			Dose Total
	SIM	LDR	LOT	
<b>Ionizante</b>	3,5	1	4	149,1 Gy
<b>Nêutrons</b>	5	1	4	3,1E+12 1 MeV n/cm <sup>2</sup>
<b>Prótons</b>	5	1	4	4,9E+11 h/cm <sup>2</sup>

Tabela 9.4: Fatores de segurança e níveis de radiação, a que uma pequena parte das placas da produção, deverão ser expostas.

## 9.4 Validação da Produção

Para validar a produção do somador, o CERN exige que novos testes de resistência à radiação sejam realizados em algumas placas produzidas, uma vez que os componentes utilizados não são do mesmo lote de fabricação que os dispositivos utilizados na pré-produção. Desta forma, 10 placas devem ser testadas para radiação ionizante, 10 para nêutrons e mais 10 para prótons.

Os níveis de radiação devem ser extraídos da Tabela 9.1, utilizando os fatores de segurança que podem ser vistos na Tabela 9.4, juntamente com o valor resultante da radiação a que as placas devem ser expostas. Os fatores de segurança dizem respeito à simulação (SIM), à taxa de dose (LDR) e ao processo de fabricação dos componentes (LOT).

A monitoração dos testes não é mais requerida para radiação ionizante e nêutrons, mas para os testes com prótons ela deve ser feita, aonde devemos utilizar o mesmo arranjo experimental usado nos testes realizados para a pré-produção das placas e que pode ser visto na Figura 9.5. Estes testes já encontram-se em andamento.

# Capítulo 10

## Produção

A produção dos mais de 2500 circuitos somadores para o calorímetro de Telhas deve seguir normas restritas de controle de qualidade, já que, uma vez montado o detector, o acesso para troca de componentes é raro e difícil, além do experimento ter uma duração prevista de 10 anos. Portanto, todas as placas produzidas devem ser cuidadosamente testadas e aprovadas para utilização no calorímetro de Telhas. Estas normas são seguidas por todos os sub-módulos que compõem o ATLAS e, neste capítulo, cada etapa da produção do circuito somador é descrita.

### 10.1 A Produção do Somador

A produção do somador segue o fluxograma que pode ser visto na Figura 10.1. Nele, vemos as etapas desde a produção das placas até a montagem final do detector realizada no CERN. Abaixo temos a descrição de cada etapa, sendo que as etapas estão numeradas conforme cada bloco do fluxograma:

1. Produção das Placas: as placas são produzidas na Griffus, empresa localizada em São Paulo, utilizando processos automáticos e modernos de fabricação.
2. Verificação das Placas 1: após serem produzidas, as placas são verificadas ohmicamente pela Griffus e, em caso de problemas, novas placas são produzidas para reposição.
3. Verificação das Placas 2: as placas são enviadas da Griffus para a Megaflex, empresa localizada também em São Paulo e que monta os componentes na

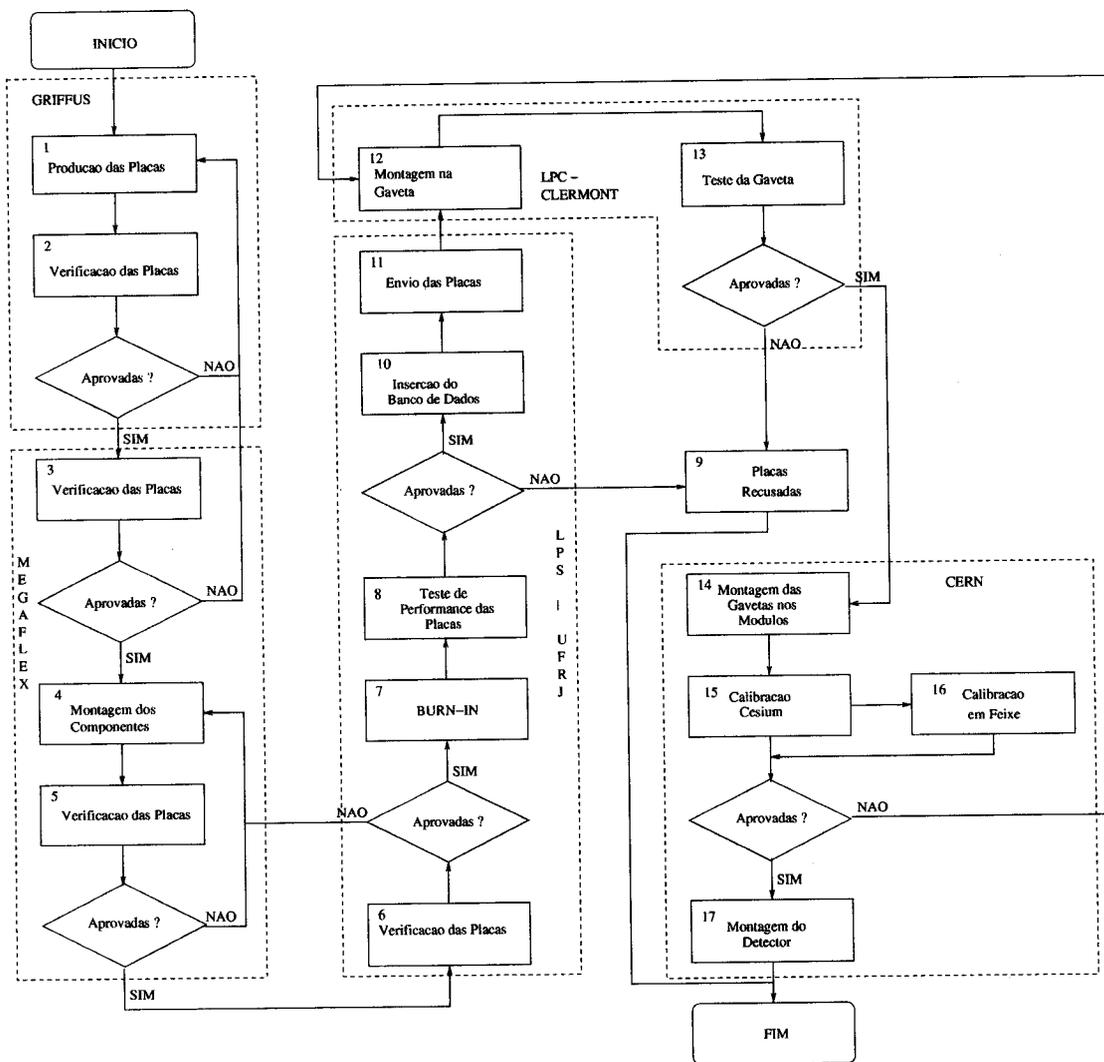


Figura 10.1: Fluxograma da produção do somador.

placa, onde elas são novamente inspecionadas para saber se não há problemas para montagem dos componentes. Em caso de identificação de um problema, as placas são retornadas a Griffus para retrabalho ou substituição.

4. Montagem dos Componentes: após as placas terem sido aprovadas, os componentes são montados automaticamente nas placas pela Megaflex.
5. Verificação das Placas 3: após a montagem, a Megaflex faz uma verificação de forma a certificar que os componentes foram corretamente montados na placa.
6. Verificação das Placas 4: ao chegar na UFRJ, as placas são verificadas visualmente e, em caso de problemas, elas são enviadas a Megaflex para reparo.
7. *Burn-in*: nas placas aprovadas, fazemos o *burn-in*, que é um processo muito utilizado na indústria para detectar e eliminar problemas prematuros no circuito, relativos ao mau funcionamento de algum componente eletrônico ou a problemas de montagem [48].
8. Teste de Performance das Placas: nesta etapa, todas as placas são testadas, sendo verificados os parâmetros de performance do circuito e somente as placas que atendem as especificações de projeto são aprovadas.
9. Placas Recusadas: as placas que não passam no teste de controle de qualidade são separadas.
10. Inserção no Banco de Dados: as folhas de controle de qualidade relativas aos testes de cada placa são armazenadas e organizadas em um banco de dados, que as disponibiliza na Web, para que a colaboração tenha acesso aos dados dos testes do somador.
11. Envio das Placas: finalmente, as placas são enviadas para o laboratório LPC (Laboratório de Física Corpuscular), localizado em Clermont-Ferrand, na França, para montagem da gaveta do detector. Esta é a última etapa realizada ainda na UFRJ.
12. Montagem da Gaveta: após a chegada de todos os componentes da gaveta do calorímetro de Telhas, ela é montada no LPC.

13. Teste da Gaveta: a gaveta é testada e, em caso de detecção de problema em algum de seus componentes, este é substituído por outro até que a gaveta seja certificada.
14. Montagem da Gaveta nos Módulos: as gavetas aprovadas em Clermont-Ferrand são enviadas ao CERN e inseridas nos módulos do Telhas.
15. Calibração com Cs: após a inserção da gaveta no módulo, este é calibrado usando-se uma fonte radioativa de Cs. Em caso de problema, a gaveta é enviada novamente a Clermont-Ferrand, para nova verificação.
16. Calibração em Feixe: 20% dos módulos devem ser também calibrados em feixe de partículas; nesta etapa, parte dos módulos são testados e calibrados em feixe de partículas.
17. Montagem no Detector: finalmente, chegamos a última etapa da produção de um módulo do detector que é sua pré-montagem na caverna do ATLAS.

É importante salientar que todas as etapas relativas à produção dos circuitos somadores são realizadas no Brasil, desde a produção das placas até o envio a Clermont-Ferrand. Desta forma, além de envolver a universidade e mais algumas instituições nacionais de pesquisa no projeto<sup>1</sup>, envolvemos a indústria nacional na produção e montagem das placas para um experimento de tal importância.

Aproveitaremos este capítulo para detalhar algumas etapas importantes da produção dos somadores, entre elas o *burn-in* e os testes de performance das placas.

## 10.2 *Burn-in*

O *burn-in* é um procedimento padrão, comumente utilizado na indústria, para evitar que falhas prematuras nos produtos possam surgir devido a problemas no processo de produção. Para evitar, ou pelo menos reduzir o número de falhas prematuras, os produtos são submetidos a uma temperatura acima da de operação

---

<sup>1</sup>IRD (Instituto de Radioproteção e Dosimetria), IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares), CTA (Centro Tecnológico da Aeronáutica) e IF/UFRJ (Intituto de Física da UFRJ).

nominal, durante um certo período de tempo. Este procedimento acelera o envelhecimento do produto em comparação com a operação na temperatura normal. A temperatura e o tempo de exposição devem ser escolhidos de tal forma que as falhas prematuras ocorram durante o teste, para evitar a ocorrência no futuro [48].

Este é um procedimento de fundamental importância para a eletrônica do ATLAS, porque não é desejável a ocorrência de falhas prematuras nos componentes do detector durante o funcionamento do experimento LHC. Portanto, todos os circuitos somadores produzidos para o ATLAS devem passar pelo processo de *burn-in*.

Usando informações das indústrias de eletrônicos e de nossos colegas da Universidade de Chicago, foi decidido que as placas seriam expostas a 65 °C durante sete dias. Isto representa o equivalente ao circuito funcionar a temperatura nominal (20 °C) por 1,9 anos.

Uma vez definidos os parâmetros principais para o teste, era necessário resolver como implementá-lo. Parâmetros como lugar, quantidade de placas, como elevar e controlar a temperatura, entre outros. Após vários testes, chegamos a uma configuração satisfatória para a realização do *burn-in*.

### **Quantidade de Placas**

Devido ao tamanho do lote de produção e às limitações de espaço físico e equipamentos do laboratório, 34 placas são submetidas ao procedimento de *burn-in* que dura sete dias. Este número poderá ser dobrado, pois pretendemos duplicar o arranjo experimental em uso.

### **Como Elevar a Temperatura do Ambiente**

Inicialmente, as placas alimentadas foram colocadas em uma estufa elétrica com controle de temperatura. A temperatura era verificada visualmente por meio de um termômetro colocado bem próximo as placas e o termostato da estufa era ajustado para que a temperatura fosse mantida em 65 °C.

Com o decorrer do teste, chegou-se a conclusão que não era necessário ligar a estufa para aquecê-la, pois somente a dissipação de calor das 34 placas era suficiente para elevar a temperatura da estufa até 65 °C, tendo, inclusive, a porta da estufa sido mantida entre-aberta para que a temperatura não ultrapassasse os 65 °C.

Este sistema mostrou-se ineficiente para controle de temperatura, pois, com a porta entre-aberta a temperatura exterior passou a influenciar em muito na temperatura da estufa, tornando o controle difícil e impreciso. Porém, esta experiência nos mostrou que não precisávamos usar nenhum dispositivo para elevar a temperatura de uma pequena estufa com 34 placas alimentadas, pois elas próprias geram o calor necessário. Decidimos, então, não mais usar uma estufa e sim uma caixa de isopor, para reter o calor gerado pelas placas, faltando apenas desenvolver o controle da temperatura, que na verdade iria resfriar o recipiente quando necessário.

### **Controle da Temperatura**

Para controlar a temperatura dentro do ambiente, bastava criar um sistema para resfriá-lo, quando a temperatura ultrapassasse os 65 °C e que este parasse de atuar quando a temperatura chegasse a um certo valor inferior à temperatura desejada. Portanto, para resfriar o ambiente, iríamos forçar a troca de ar entre o recipiente aonde as placas estavam (o isopor) e o exterior (temperatura média de 25 °C), usando um pequeno ventilador DC (do mesmo tipo usado em resfriadores de processadores para computadores pessoais), que empurrasse o ar para dentro do recipiente, associado a uma saída de ar. Desta forma, o ar frio iria entrar no recipiente enquanto o ar quente seria expulso através da saída de ar.

Depois de decidir como resfriar o sistema, procuramos um controlador de temperatura com histerese, que possuísse um sensor de temperatura para a faixa desejada, associado a um relé que pudesse acionar o ventilador.

Achado o controlador [49], o sistema estava então completo e foi colocado em funcionamento com uma capacidade de 34 placas por período de teste e mantendo a temperatura de operação automaticamente entre 64,8 °C e 65,3 °C, o que é bastante satisfatório para este tipo de procedimento.

## **10.3 Testes de Performance das Placas**

Esta talvez seja a etapa de maior importância no processo de produção dos somadores, pois, nela, todos os circuitos devem ter sua performance verificada e atender às rígidas especificações de projeto. Os circuitos que não atendem às especificações são rejeitados e separados da produção.

Dois pontos são de fundamental importância nos testes de performance das placas: a utilização de sinais de entrada válidos (similares ao do calorímetro) e a aquisição digital dos dados para análise e posterior consulta, se necessário.

Para obtenção da performance de cada circuito somador sob teste, um certo número de pulsos é injetado nas entradas do somador e valores médios são utilizados como estimativa para cada parâmetro desejado. Desta forma, são estimados o ganho, a linearidade, o ruído e a excursão máxima de saída de cada circuito, sendo aprovados apenas aqueles que apresentarem uma performance condizente com as especificações de projeto.

São utilizados, nestes testes, um gerador de pulsos (HP8011A), um filtro analógico, projetado e montado especificamente para sintetizar o pulso do calorímetro, um osciloscópio digital (TDS640 da Tektronix), para monitoração e digitalização dos dados, e um computador com uma placa de interface GPIB-ISA, rodando um programa LabVIEW, para aquisição dos dados digitalizados pelo osciloscópio.

Após a realização dos testes, os dados que foram armazenados no computador são processados e uma tabela é gerada com os parâmetros do circuito, sendo então avaliadas pelo operador, que deve informar se a placa foi aprovada ou rejeitada. Esta tabela é convertida para o formato XML e inserida em um banco de dados especialmente desenvolvido para o projeto, com acesso via Web, para que a colaboração possa consultar resultados dos testes de controle de qualidade do circuito.

### **10.3.1 Os Critérios para Aprovação**

Após a realização dos testes e a geração da tabela com os valores médios para cada parâmetro da placa, o operador deve verificar os valores obtidos para tomar a decisão a respeito da aprovação ou reprovação da placa. Para tal, o operador deve seguir restrições derivadas das especificações impostas pelo primeiro nível de validação de eventos e pelas características do circuito.

Na Figura 10.2, podemos ver a folha de controle de qualidade relativa a uma placa da produção já enviada ao CERN. Nela, vemos os valores médios e as variâncias referentes a cada parâmetro do circuito, sendo que na tabela de performance dos canais, temos os resultados da transmissão de um pulso para cada entrada do circuito, e na de performance global, vemos o nível de ruído, linearidade e excursão máxima

do circuito. Estas duas tabelas mais o consumo de potência do circuito resumem sua performance.

Uma placa para ser aprovada deve possuir as seguintes características:

- Consumo entre 2,2 e 2,4 Watts.
- Ganho para os canais, relativamente a saída da soma, de  $8 \pm 0,24$ .
- Ganho para a saída de múons de  $220 \pm 11,3$ .
- Ruído na saída da soma menor do que 1 mVrms.
- Ruído na saída de múons menor do que 3,5 mVrms.
- Não-Linearidade da soma menor do que 2%.
- Excursão para a saída da soma maior do que 3,9 V.
- Excursão para a saída de múons maior do que 3,8 V.

Os parâmetros de transmissão do pulso devem ser verificados apenas para que haja uma certificação de que o pulso foi corretamente transmitido pelo circuito, mas não há muita rigidez relativamente esses parâmetros, pois eles podem variar conforme mudanças feitas no filtro analógico, decorrentes da correção de algum problema. Outro ponto a ser observado pelo operador é que o sinal da saída de múons é mais lento do que o sinal da soma, devido ao ganho mais alto desta saída.

### 10.3.2 O Banco de Dados

Devido ao longo tempo de duração do projeto e da quantidade de pessoas de diferentes países envolvidas, um banco de dados, que pode ser acessado via Web foi desenvolvido para o Telhas, no qual as folhas de controle de qualidade podem ser armazenadas em diferentes formatos se desejado [50]. Na figura 10.3, vemos a página de entrada para visualização, alteração e inclusão de dados referentes ao projeto no banco de dados.

Para incluir as folhas no banco de dados, é necessário que a pessoa esteja cadastrada no sistema, sendo que apenas o chefe de projeto e os operadores podem realizar esta tarefa. Para visualização ou *download*, a pessoa também deve estar cadastrada, mas sem privilégio para alteração ou inclusão de dados.

## Quality Control Tests

Date:	10/05/2002
QC responsible	J. M. Seixas
Operator:	Augusto Cerqueira
Serial Number:	02001050100318

### Limits

Power consumption	2.3W
-------------------	------

### Channel Performance

	Risetime	Falltime	Amplitude	Pulse Width	Gain
Channel one	28.30 ± 0.64	58.42 ± 1.49	1.62 ± 0.01	57.77 ± 0.50	7.94 ± 0.01
Channel two	28.18 ± 0.60	58.17 ± 1.32	1.65 ± 0.01	56.95 ± 0.47	8.08 ± 0.01
Channel three	28.28 ± 0.67	57.91 ± 1.44	1.64 ± 0.01	57.27 ± 0.63	8.03 ± 0.01
Channel four	28.35 ± 0.66	57.99 ± 1.65	1.65 ± 0.01	57.35 ± 0.57	8.06 ± 0.01
Channel five	28.16 ± 0.58	58.42 ± 1.45	1.64 ± 0.01	57.26 ± 0.53	8.03 ± 0.01
Channel six	28.35 ± 0.63	58.48 ± 1.51	1.60 ± 0.01	57.74 ± 0.80	7.81 ± 0.01
Channel six - muon	29.33 ± 2.82	70.75 ± 15.21	2.90 ± 0.12	64.39 ± 4.36	224.80 ± 0.12

### Overall Performance

	Refer. (Sum Output)	Sum Output	Refer. (Muon Output)	Muon Output
Noise	660 nV	500 nV	3000nV	2600 nV
Linearity	< 2%	0.60%	X	X
Voltage swing	4.0V	4.09 ± 0.01	4.0V	4.01 ± 0.01

Figura 10.2: Folha de controle de qualidade para uma das placas já enviada ao CERN.

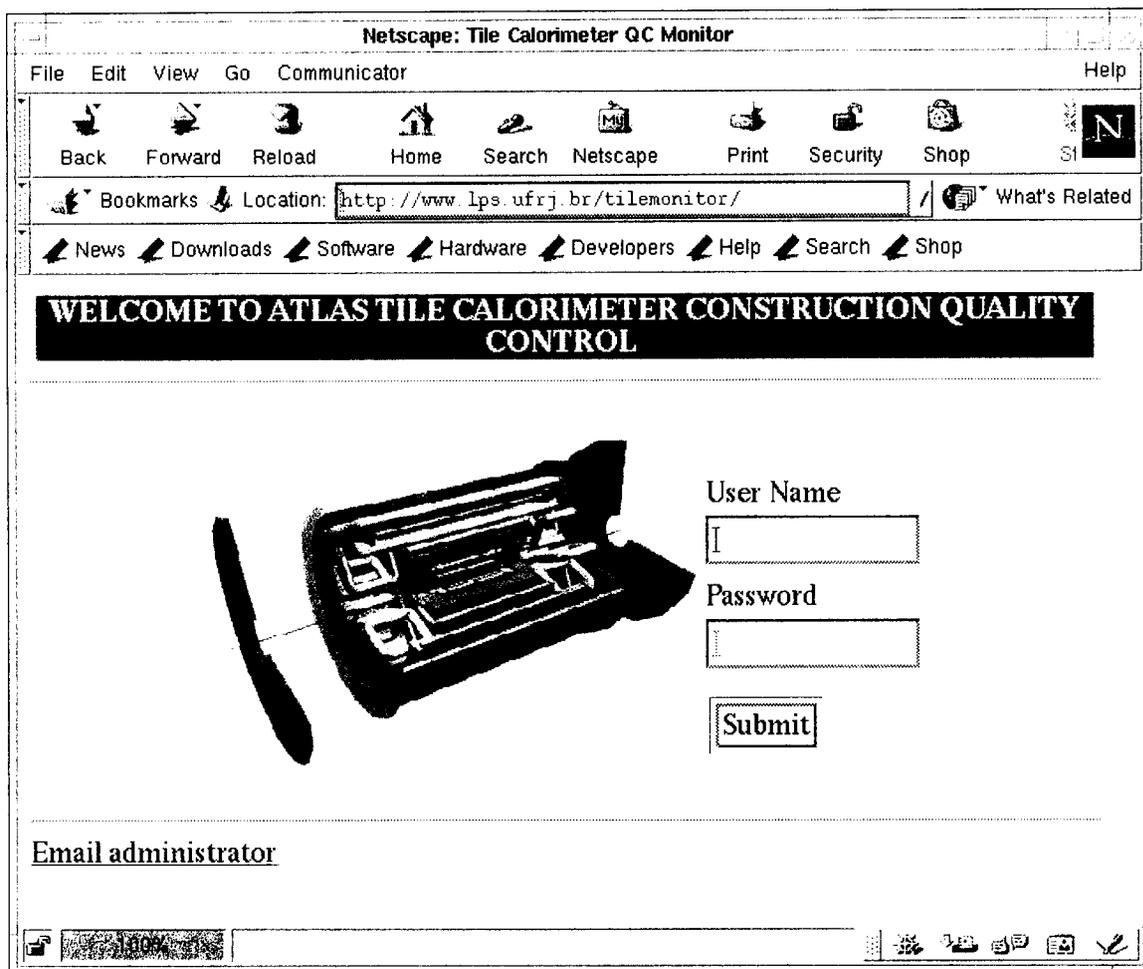


Figura 10.3: Página Web de entrada para o banco de dados, aonde as folhas de controle de qualidade de cada somador produzido é armazenada, podendo ser acessada por toda a colaboração.

# Capítulo 11

## Conclusão

Neste trabalho, apresentamos todo o desenvolvimento e projeto do sistema responsável pela geração dos sinais das torres de validação de eventos do calorímetro de Telhas, como parte integrante do detector ATLAS, para o experimento LHC, que deve entrar em operação em 2007. Além do desenvolvimento de duas topologias para o circuito somador, uma baseada em transistores discretos e outra no uso de amplificadores de transcondutância, apresentamos diversos circuitos auxiliares que foram desenvolvidos para aquisição, processamento e análise dos sinais do calorímetro, e que foram utilizados durante as fases de projeto e testes do sistema.

Uma das características mais importantes para o sinal dos calorímetros, utilizados como detectores em colisionadores de partículas, é a sua velocidade. Devido à alta taxa de eventos gerada nesses experimentos, se o sinal for muito lento haverá empilhamento de eventos, o que não é desejado. Para medição *on-line* da velocidade do sinal do calorímetro de Telhas, utilizamos uma porta linear rápida. Bons resultados na obtenção da curva de carga do sinal foram obtidos, demonstrando a validade do método desenvolvido.

Após o estudo do sinal do Telhas, duas versões do somador foram apresentadas, sendo que ambas atenderam completamente as especificações para as quais eles foram projetados. A versão com transistores de banda-larga tem como principais qualidades, o baixo consumo (120 mW), a boa resposta em frequência, a faixa dinâmica maior do que 10-bits e a maior excursão de saída ( $\pm 2,5$  V). Já a versão com os amplificadores de transcondutância tem como melhores qualidades, a pequena dispersão do ganho entre os canais e placas ( $< 3\%$ ) e a linearidade em toda a

faixa dinâmica (não-linearidade inferior a 2%). É importante frisar que todas as qualidades citadas são relativas as especificações do projeto para o qual os circuitos foram desenvolvidos. Em ambas as versões, o sinal é mantido diferencial ao longo do processamento para evitar que um ruído em modo-comum induzido no circuito chegasse de forma diferencial à saída do circuito. A versão com amplificadores de transcondutância foi aprovada pelo CERN para integrar o detector. Diversos testes em laboratório e também com feixe de partículas foram realizados em ambas as versões do circuito somador, para verificação das especificações do circuito, mostrando que ambas as versões funcionaram conforme a previsão.

A complexidade da integração do somador com os demais componentes do detector foi abordada, com destaque para o projeto dos cabos de entrada e saída do somador. Pata tal, o instante de tempo em que os sinais chegam em cada foto-multiplicadora foi calculado, com base nas propriedades físicas e elétricas do detector. Desta forma, os sinais foram equalizados na entrada de cada somador, através de cabos de diferentes comprimentos. Apesar de todas as restrições elétricas e mecânicas de projeto, tanto os cabos de entrada como os de saída foram testados com sucesso e já se encontram em fase final de produção. Vários dos resultados de performance do somador apresentados ao longo da tese foram obtidos com a utilização destes cabos.

Um estudo extenso sobre a detecção de múons, utilizando o sinal de validação de múons do somador, foi realizado. Através destes estudos, chegou-se a conclusão de que o ganho desta saída do somador deveria ser aumentado (de 8 para 225) e que, no caso do barril, a soma dos dois sinais pertencentes a mesma célula da terceira camada deveria ser feita para se obter uma performance aceitável na detecção.

Testes de resistência à radiação, para partículas ionizantes e nêutrons, foram realizados com o intuito validar a pré-produção do somador para os valores de radiação calculados por meio de simulação. Nos testes realizados, o circuito demonstrou operar normalmente para quantidades de radiação equivalentes a 10 anos de funcionamento do experimento, incluindo ainda vários fatores de segurança. Para a realização destes testes, foi desenvolvido um circuito para injeção de sinais nas entradas do somador e um sistema para aquisição dos sinais para posterior análise do funcionamento do circuito ao longo do tempo. Para validação das placas de

produção, mais testes com partículas ionizantes e nêutrons devem ser realizados, acrescentando ainda testes com feixes de prótons, que podem gerar problemas momentâneos, reversíveis ou irreversíveis, no circuito. Estes testes devem ser realizados até o final de 2003.

A produção das placas está sendo realizada desde o início do ano, com um número reduzido de placas reprovadas (menos de 2%) nos rigorosos testes de controle de qualidade. É importante também salientar que todas as etapas da produção são realizadas no Brasil, envolvendo diferentes institutos de pesquisa e empresas nacionais. Até o momento mais de 1000 somadores já foram produzidos, sendo que 360 placas já foram enviadas ao CERN e estão sendo montadas na gaveta do detector, para a calibração do mesmo com Cs e feixe de partículas. Todas as placas testadas até o momento têm sua performance acessível via Web, pois todas as folhas do controle de qualidade são disponibilizadas através do banco de dados desenvolvido especialmente para o experimento.

Como seqüência natural do trabalho, temos a parte de transmissão e pré-processamento dos sinais no primeiro nível de validação. A transmissão do sinal é bastante complicada, devido ao ambiente radioativo, a distância entre o detector e o primeiro nível e sua geometria. Para o pré-processamento do sinal das torres de validação, um circuito receptor de baixo ruído deve ser projetado e, para o sinal de validação de múons, deve ser desenvolvido um sistema analógico de detecção de eventos de múons.

Finalmente, gostaria de ressaltar a importância do projeto para o nosso grupo de trabalho no CERN, pois esta foi a primeira vez que um grupo brasileiro se tornou responsável por todo o desenvolvimento, projeto e produção de um componente para um experimento que entrará em funcionamento, ainda mais em se tratando do LHC, que pode mudar a forma pela qual vemos a matéria.

# Referências Bibliográficas

- [1] “LHC the Large Hadron Collider Project”, URL=<http://www.cern.ch/LHC/>, 1999.
- [2] ARIZTIZABAL, F., et al, “Construction and Performance of an Iron-scintillator Hadron Calorimeter with Longitudunal Tile Configuration”, *Nuclear Instruments and Methods*, v. 349, pp. 384, 1994.
- [3] Tilecal Group, *Tile Calorimeter Technical Design Report*, Technical Report LHCC 96-42, CERN, 1996.
- [4] JANKOWSKI, D., STANEK, R., *Response of ATLAS injection Molded Scintillators*, Atlas Note ATL-TILECAL-94-010, CERN, 1994.
- [5] AJAULTOUNI, Z., et al, *The Tilecal 3-in-1 PMT base concept and the PMT block assembly*, Atlas Note ATL-TILECAL-94-041, CERN, 1994.
- [6] ATLAS Collaboration, *ATLAS Detector and Physics Performance*, Technical Design Report LHCC 99-14, CERN, 1999.
- [7] Trigger Group, *ATLAS - Level-1 Trigger Technical Design Report*, Technical Report LHCC 98-16, CERN, 1998.
- [8] Trigger Group, *DAQ, EF, LVL2 and DCS*, Technical progress report, CERN, 1998.
- [9] ANDERSON, K., et al, “Front-end Electronics for the ATLAS Tile Calorimeter”. In: *10th LHC Electronics Board Meeting*, CERN, Rome, Italy, November 1998.
- [10] KOWALSKI, *Nuclear Electronics*. Springer Verlag, 1970.

- [11] ANDERSON, K., et al, “A Low Noise, High Rate Shaper for the Tilecal Detector”. In: *First Workshop on electronics for LHC Experiments*, p. 261, CERN, Lisboa, Portugal, 1995.
- [12] BERLUNG, S., et al, “The ATLAS Tile Calorimeter Digitizer”. In: *4th Workshop on Electronics for LHC Experiments*, CERN, Rome, Italy, September 1998.
- [13] “TileCal Electronics”, URL=<http://hep.uchicago.edu/atlas/electr/electronics.html>, 2001.
- [14] FARTHOUAT, P., GALLNO, P., *TTC-VMEbus Interface*, Manual, CERN, 2000.
- [15] DI GIROLAMO, B., et al, *Data Acquisition for the ATLAS Read-out Driver Crate*, Atlas Note ATL-D-ES-0007, CERN, 2002.
- [16] MILLMAN, J., TAUB, H., *Pulse, Digital and Switching Waveforms*. McGraw-Hill, 1965.
- [17] NICHOLSON, P. W., *Nuclear Electronics*. John Wiley & Sons, Inc., 1974.
- [18] FUJIHARA, N. S., *Porta Linear Ativa Rápida*. Projeto final de curso, UFRJ, 1976.
- [19] KIELKOWSKI, R. M., *SPICE: Practical Device Modeling*. McGraw-Hill Professional, 1995.
- [20] LEO, W. R., *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. Springer-Verlag, 1987.
- [21] *The 2280 System*, Technical manual, Lecroy Corporation, 1982.
- [22] MARROQUIM, F., SEIXAS, J. M., *Charge Collection Time from Scope Data Acquisition*, Tilecal Note 61, CERN, 1995.
- [23] SEIXAS, J. M., CALÔBA, L. P., SOUZA, M. N. D., “A Fast Signal Adder for Applications with Calorimeter”, *Nuclear Instruments and Methods*, v. A350, pp. 300–304, 1994.

- [24] Product Specification BUS-12-067, URL=<http://www.bergelect.com>.
- [25] “The FERMI system”, URL=<http://atlasinfo.cern.ch/ATLAS/TP/NEW/HTML/tpqnew/node102.html>.
- [26] *MAX435/436 Wideband Transconductance Amplifiers*, Data sheet, MAXIM, URL=<http://www.maxim-ic.com>, 1993.
- [27] SEDRA, A. S., SMITH, K. C., *Microelectronic Circuits*. Oxford University Press, 1998.
- [28] *Wideband, Low Power, Quad Voltage Feedback Operational Amplifier*, Data sheet, Burr-Brown, URL=<http://www.burr-brown.com>, 1994.
- [29] LATHI, B. P., *Signals, Systems and Communication*. Krieger, 1991.
- [30] JOHNS, D., MARTIN, K., *Analog Integrated Circuit Design*. John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [31] LEITNER, R., “Tilecal LVL1 Trigger”, 1998.
- [32] CROUAU, F., et al, *Characterization of the 8-Stages Hamamatsu R5900 Photomultipliers for the Tile Calorimeter*, Tilecal Note ATL-TILECAL-97-129, CERN, 1997.
- [33] Material and Cables working Groups, *Criteria and Standard Test Methods for the Selection of Electric Cables, Wires and Insulated Parts with respect to Fire Safety and Radiation Resistance*, safety Instruction 23, CERN, 1984.
- [34] TREES, H. L. V., *Detection, Estimation, and Modulation Theory*. John Wiley & Sons, Inc., 1971.
- [35] NISSATI, A., *Fake LVL-1 Muons Trigger Rates in the ATLAS Experiment*, Atlas Note DAQ-98-123, CERN, 1998.
- [36] *Surface Mount Wideband RF Transformers (type TTWB A)*, Product Specification 194-1, URL=<http://www.coilcraft.com>.
- [37] PASCUAL, J., BORGEAUD, P., *ATLAS Calorimeter Level-1 Trigger Cables*, Production readiness review, CERN, 2000.

- [38] DENTAN, M., “Radiation Effects on Electronics Components and Circuits”, April 2000.
- [39] *Test Method 1017.2*, Report US-DOD-MIL-STD 883E, CERN, URL=<http://www.cern.ch/Atlas/GROUPS/FRONTEND/WWW/milstd1.pdf>, August 1995.
- [40] *ESA SCC Basic Specification*, Report 22900, CERN, URL=<http://www.cern.ch/Atlas/GROUPS/FRONTEND/WWW/22900.pdf>, April 1995.
- [41] *ESA SCC Basic Specification*, Report 25100, CERN, URL=<http://www.cern.ch/Atlas/GROUPS/FRONTEND/WWW/25100.pdf>, October 1995.
- [42] FLAMENT, O., et al, “Ionizing Dose Hardness assurance Methodology for Qualification of a BiCMOS Technology Dedicated to High Dose Level Applications”, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, v. 45, n. 3, June 1998.
- [43] DENTAN, M., *ATLAS Policy on Radiation Tolerant Electronics*, ATLAS note ATC-TE-CA-0001, CERN, July 2000.
- [44] *GEANT*, Tutorial, CERN, URL=[http://wwwinfo.cern.ch/asc/geant/tutorial/manual/tutorial\\_1.html](http://wwwinfo.cern.ch/asc/geant/tutorial/manual/tutorial_1.html), 1994.
- [45] *MAX4147 Wideband Differential Line Driver*, Data sheet, MAXIM, URL=<http://www.maxim-ic.com>, 1993.
- [46] *LabVIEW*, User manual, National Instruments Corporation, URL=<http://www.natinst.com>, 1998.
- [47] “Radiation Testing at Chicago”, URL=[http://hep.uchicago.edu/atlas/elect/Rad\\_testing/Rad\\_Testing.html](http://hep.uchicago.edu/atlas/elect/Rad_testing/Rad_Testing.html).
- [48] JENSEN, F., PETERSEN, N. E., *Burn-in: An Engineering Approach to the Design and Analysis of Burn-in Procedures*. Wiley, 1982.
- [49] *N320*, Manual de operação, Novus Produtos Eletrônicos, URL=<http://www.novus.com.br>.

- [50] SASAKI, L. J. G., *Monitoramento via Web da Produção e Controle de Qualidade de um Sistema de Detecção de Grande Complexidade*. Projeto final de curso, UFRJ, Novembro 2001.
- [51] Product Information 103948-2, URL=<http://www.amp.com>.

# Apêndice A

## Produção Científica

1. CERQUEIRA, A.S., DAVIDEK, T., USAI, G., *Tile Calorimeter Muon Trigger Signal*, Atlas Tilecal note ATL-TILECAL-2002-002, CERN, 2002.

### Resumo

The Tile Calorimeter contributes to the first level trigger with the fast analog signal coming from the trigger summing boards, so-called analog adder. The adders provide two kinds of output: the total energy sum in a trigger tower and the signal from the respective cell of the last radial calorimeter layer, which can be used for identifying muons, thus making the muon first level trigger more robust.

This note reviews the adder specifications and laboratory tests, whereas the main focus is put on the data analysis from the testbeam periods in 2001. Several improvements achieved by tuning the read-out are described. Using the testbeam results, the ability to identify muons in the last radial Tilecal layer is discussed. The experimental results obtained at the testbeams are completed with the Monte Carlo simulations.

2. CERQUEIRA, A.S., SEIXAS, J.M., CALÔBA, L.P., *A Fast Active Linear Gate for Experiments in Nuclear and Particle Physics*, XIV Congresso Brasileiro de Automática, Natal, Brasil, 2002.

### Resumo

This paper presents an active linear gate that is designed for experiments in nuclear and particle physics. The gate is able to transmit fast pulses with

minimum distortion, and exhibits switching times better than 3 nanoseconds, null pedestal and a feedthrough of 0.3%. In the field of high-energy physics, the gate is being successfully used for measuring the speed response of a fast calorimeter, a detector that measures the energy of the incoming particles.

3. CERQUEIRA, A.S., SEIXAS, J.M., CALÔBA, L.P., An Active Adder for Validating Events from a Collider Experiment in High-Energy Physics, Second IEEE South-American Workshop on Circuit and Systems, Rio de Janeiro, Brazil, 2001.

### **Resumo**

This paper presents a high performance analog adder designed to build a validation signal for high-energy events in a particle collider experiment under preparation. The validation (triggering) signal is formed from a calorimeter, a detector that measures the energy of the resulting subproducts of the collisions. The integration of this adder with the detector's readout electronics and the last results from experimental tests with beam particles are described.

4. CERQUEIRA, A.S., SEIXAS, J.M., HENRIQUES, A., *Delay Cables and Output Cables for the Tilecal's Trigger Summing Board*, Atlas Tilecal note ATL-TILECAL-2001-004, CERN, 2002.

### **Resumo**

This note describes the two types of cables used by the trigger summing board, located on the Tilecal's drawer, the delay cables used to connect the 3-in-1 card to the trigger board's inputs, and the output cables to send the trigger board's output signals to the drawer's patch panel. This boards aim to build the trigger tower signals for Tilecal detector. The procedure used to compute the cable lengths of the delay cables is described and the results are presented. The technical specifications of the cables and connectors used are also described.

5. CERQUEIRA, A.S, et al, Performance Tests of the Active Adder for the ATLAS Hadronic Calorimeter, XXII Encontro Nacional de Física de Partículas e Campos, São Lourenço, Brasil, 2001.

### **Resumo**

Para o calorímetro hadrônico do detector ATLAS, calorímetro de telhas cintilantes - Tilecal, um sistema somador ativo de alto desempenho vem sendo desenvolvido para combinar determinadas células das segmentações longitudinais do calorímetro, de forma a produzir o sinal de validação (*trigger*) enviado pelo calorímetro ao sistema *online* de validação do ATLAS. O sistema somador compõe até seis células do Tilecal, fornecendo uma saída adicional específica, para ser utilizada na identificação de múons. O sistema somador ativo vem sendo testado com sucesso em feixe experimental, como parte do processo de desenvolvimento de protótipos. No momento, em fase de produção, o somador vem sendo integrado no sistema de leitura eletrônica dos módulos do Tilecal. Testes de produção em laboratório, de envelhecimento (*burn-in*), de resistência à radiação e em feixe experimental de partículas têm comprovado o bom desempenho do sistema somador e a boa qualidade de produção da indústria nacional, responsável pela confecção da placa de circuito impresso e da montagem do somador. Assim, este projeto lança uma ponte importante de colaboração universidade-indústria, numa área de tecnologia de ponta. Neste trabalho, apresentamos o conjunto de testes realizados para a produção final do sistema somador, detalhando resultados para uma amostra parcial de cem placas produzidas, de um total esperado de 2.400 placas. O desempenho do sistema somador e a flutuação estatística dos seus parâmetros na produção são avaliados a partir de medidas de ganho, linearidade, nível de ruído, banda passante e excursão máxima de sinal.

6. CERQUEIRA, A.S., SEIXAS, J.M., CALÔBA, L.P., Analog Trigger Tower Adders for the Tilecal: Radiation Tolerance and Production Tests. IX Conference on Calorimetry in High-Energy Physics, Annecy, France, 2000.

### **Resumo**

A trigger tower signal for the hadronic calorimeter (Tilecal) in ATLAS is built by an active adder, which is designed to linearly combine up to six differential signals (50 nanoseconds width) over a wide dynamic range (10 bits). For final production, more than two thousand of such adders will be needed. This paper focuses on the late test results of the final design of this adder. The design is based on combining input differential signals by means of wideband

transconductance amplifiers and using an instrumentation amplifier stage for providing the required differential output voltage swing. Different successful tests were performed on prototypes, including lab tests for optimising the design and evaluating a pre-production of such adders, radiation resistance tests for neutrons and gammas, and beam tests using the complete electronic readout chain.

7. CERQUEIRA, A.S., et al, Avaliação da Resistência à Radiação de um Sistema Somador Ativo Rápido. XIII Congresso Brasileiro de Automática, Florianópolis, Brasil, 2000.

### **Resumo**

Testes de resistência à irradiação produzida por neutrons e partículas ionizantes são descritos para um sistema somador ativo rápido, que foi projetado para combinar linearmente sinais rápidos provenientes de um calorímetro em física experimental de altas energias. Os testes servem para validar a utilização deste sistema somador no ambiente experimental dos colisionadores de partículas de última geração, caracterizados por produzirem elevadas doses de radiação. Um sistema automático de injeção e aquisição de sinais, baseado num osciloscópio digital e no LabVIEW, é desenvolvido especificamente para realizar estes testes e permite monitorar detalhadamente a performance do sistema somador durante o transcorrer dos testes.

8. CERQUEIRA, A.S., et al, An Active Adder for Building the Trigger Signal of the Hadronic Calorimeter of ATLAS, XXI Encontro Nacional de Física de Partículas e Campos, São Lourenço, Brasil, 2000.

### **Resumo**

For the LHC environment, a high performance adder is being developed to build the trigger tower signal of the scintillating Tile Calorimeter, the hadronic calorimeter of the ATLAS detector. This article presents a set of tests performed on the adder boards from the pre-production phase, including quality control, radiation resistance for gammas and neutrons and particle beam tests.

9. SEIXAS, J.M, CERQUEIRA, A.S., CALÔBA L.P., A High Performance Active Adder, 5<sup>TH</sup> IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, Linbon, Portugal, 1998.

#### **Resumo**

An active adder design is presented. The adder handles up to five differential fast signals that have to be linearly combined over a 10-bit dynamic range. Experimental tests of the proposed circuit are successfully performed envisaging an application in the field of experimental high-energy particle physics.

10. CERQUEIRA, A.S, SEIXAS, J.M., CALÔBA, L.P., Curva de Carga do Calorímetro Cintilante de Telhas Usando uma Porta Linear Rápida, XIX Encontro Nacional de Física de Partículas e Campos, Caxambú, Brasil, 1998.

#### **Resumo**

Uma das características importantes do calorímetro hadrônico de telhas cintilantes (Tilecal) é a velocidade da sua resposta. Medidas experimentais, utilizando um osciloscópio digital de alta taxa de amostragem (500 MSa/s), mostraram uma largura a meia altura de 50 nanosegundos. Esta característica de velocidade do sinal é bastante importante para o ambiente de alta taxa de eventos do LHC, para o qual o detector vem sendo construído no CERN. A resposta do calorímetro deve ser rápida neste ambiente para que se possam evitar os efeitos do empilhamento de sinais no LHC, que deterioram a resolução dos detectores e a capacidade de reconhecimento de eventos físicos de interesse na experiência por meio do sistema de validação (trigger).

Para se ter uma medida precisa da velocidade de resposta do Tilecal, é interessante obter-se experimentalmente a curva de carga do detector, ou seja, o tempo necessário para que se possa adquirir uma dada fração da energia total absorvida pelo calorímetro. Uma possibilidade, para se obter tal curva, é dispormos de uma porta linear rápida que possa transmitir, sem distorção, o sinal do calorímetro durante uma dada janela de tempo e que possa ceifar o sinal que se encontre fora desta janela com precisão, de modo a termos acesso apenas à fatia do sinal desejado.

Com este objetivo, uma porta linear de larga banda passante foi projetada. Resultados de simulação de circuito e obtidos também experimentalmente, a partir dos pulsos do detector adquiridos por um osciloscópio de alta taxa de amostragem mostram que a porta é capaz de transmitir os sinais do Tilecal, segundo uma janela de tempo maior ou igual a 15 nanosegundos. Esta porta linear representa, assim, uma forma eficaz de ser realizar a medição da curva de carga do detector, necessitando (para uma boa estimativa desta) que se combinem os sinais da parte central do detector (o que forma a entrada de sinal da porta) e que o seu sinal de saída seja lido por meio de um conversor analógico/digital de carga de precisão (12 bits). Para esta combinação dos sinais das células do Tilecal, somadores ativos de alto desempenho estão sendo projetados e esta configuração experimental está para ser testada em feixe de partículas para diferentes energias.

11. CERQUEIRA, A.S, SEIXAS, J.M., CALÔBA, L.P., Um Somador Ativo de Alto Desempenho para o Calorímetro Cintilante de Telhas, XIX Encontro Nacional de Física de Partículas e Campos, Caxambú, Brasil, 1998.

### **Resumo**

O LHC irá produzir uma quantidade enorme de dados, apesar do interesse da experiência se concentrar em torno de raríssimos eventos que têm que ser identificados sob a imensa montanha formada pelo ruído de fundo da experiência. Para que esta identificação seja possível, um sistema de validação *online* de eventos (sistema de *trigger*) está sendo projetado. Este sistema, no seu primeiro nível de análise, baseia-se primordialmente no sistema de calorimetria do experimento.

No âmbito da colaboração ATLAS, as técnicas de calorimetria estão definidas: a parte eletromagnética utiliza um calorímetro de argônio líquido, e a parte hadrônica utiliza um calorímetro de telhas cintilantes. Para este calorímetro hadrônico (Tilecal), a informação que é repassada para o primeiro nível do sistema de *trigger* se encontra na forma de torres de *trigger*, formadas pela composição linear das células do detector que definem um dado cone em  $\eta$ . Para se ter uma idéia do número de torres repassados para o sistema de *trigger*,

basta mencionar que, para a seção central (barril), cada um dos 64 módulos que a compõem transmite 18 sinais de *trigger*. A informação hadrônica de *trigger* se completa com os sinais produzidos pelas seções do barril estendido.

Para compor o sinal de *trigger* do Tilecal, um somador analógico ativo de alto desempenho vem sendo projetado. Baseado em uma estrutura diferencial de entrada, operando numa forma semelhante à classe AB, seis entradas diferenciais podem ser combinadas por cada unidade somadora, que produz também um sinal diferencial de saída. Dentre as principais características de desempenho destes somadores, podemos citar a sua faixa dinâmica (10 bits), a sua linearidade (melhor do que 2%, para toda a faixa de sinal), seu baixo ruído (algumas centenas de microvolts) e baixa distorção para a transmissão do sinal rápido do detector (50 nanosegundos de largura a meia-altura).

Este trabalho descreve o somador analógico em questão e a sua performance em testes de laboratório com 20 unidades somadoras. Uma versão similar (com 5 entradas de sinal) já foi testada em feixe de partículas no ano passado, e esta nova versão, que apresenta uma redução significativa de consumo, apesar da adição de mais uma entrada de sinal, estará sendo levada aos testes em feixe de partículas ao longo deste ano.

12. SEIXAS, J.M., CALÔBA, L.P., CERQUEIRA, A.S., Analogue Summation for the Scintillating Tile Calorimeter, Third International Workshop on Electronics for LHC Experiments, London, England, 1997.

### **Resumo**

An active adder for the scintillating tile calorimeter is described. It aims at building the trigger tower signals required by the first-level trigger system. The adder is designed to handle fast signals (50 ns width) that have to be linearly combined over a wide dynamic range (10 bits). Five differential signals coming from the three sampling layers of the calorimeter can be combined and the adder's output is also differential. Successful tests of the proposed circuit interfacing with shaper boards currently being used for testbeam purposes are also reported.

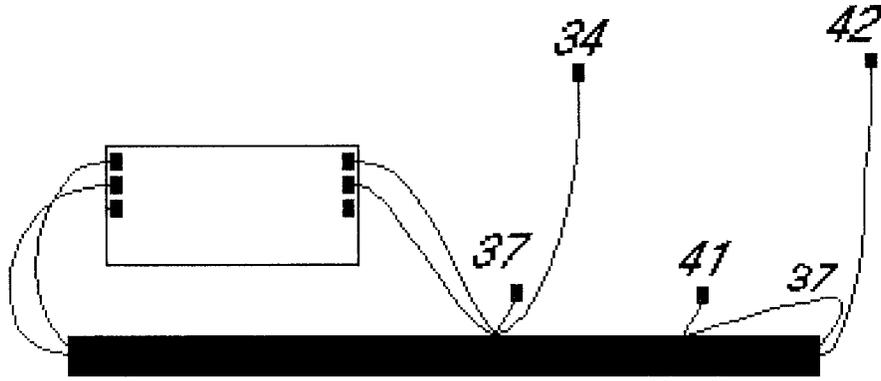


Figura B.1: Proposta de como agrupar os cabos de entrada do somador, de forma a facilitar a montagem. Os cabos partem das posições em que devem se conectar a saída do circuito 3-em-1. Apenas quatro sinais são somados nesta torre ( $0,7 < \eta < 0,8$ ).

cabo é associado, e o agrupamento é numerado de acordo com a posição do somador, ao qual se destina na gaveta.

## B.2 Cabos de Saída do Somador

Como os somadores são colocados ao longo da gaveta, os cabos devem ter diferentes tamanhos. Medindo a distância entre o painel de interface a cada somador, o comprimento dos cabos foi definido. Um esquema para os cabos de saída do somador, para o barril, pode ser visto na Figura B.3, enquanto que, na Figura B.4, vemos o esquema para o barril estendido. O comprimento dos cabos pode ser visto nos esquemas.

Entre as gavetas interna e externa, um conector é colocado no meio dos cabos, pois elas devem ser desacopladas, mecânica e eletricamente, uma da outra, para montagem dos diversos componentes.

Os conectores usados nos cabos de saída do somador são:

- O conector BERG 78211-003 (quantidade 4000) com contatos 47565-002 (quantidade 12000) para conectar as saídas do somador.
- O conector Cannon 2D fêmea DB-52 S-FO com 52 posições (quantidade 300),

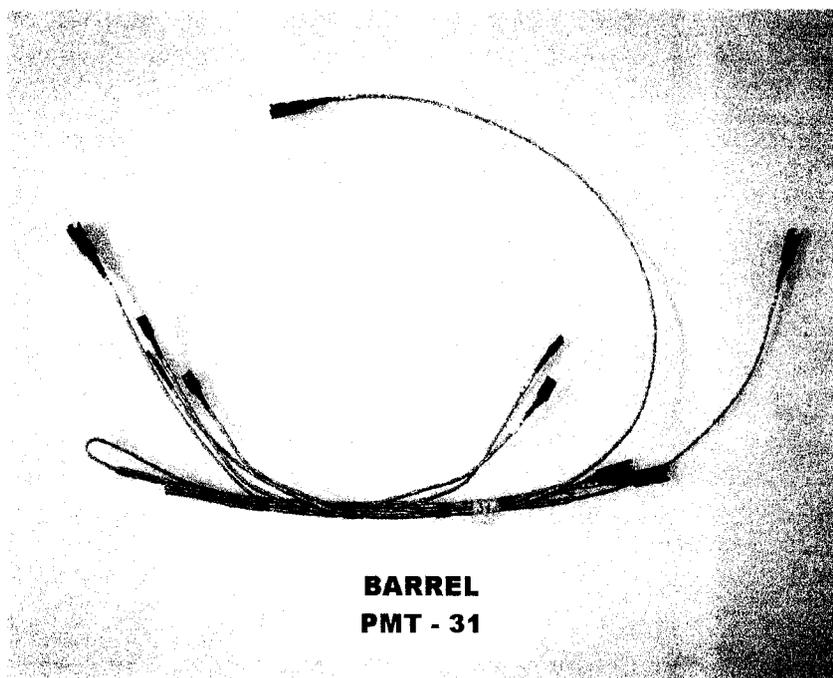
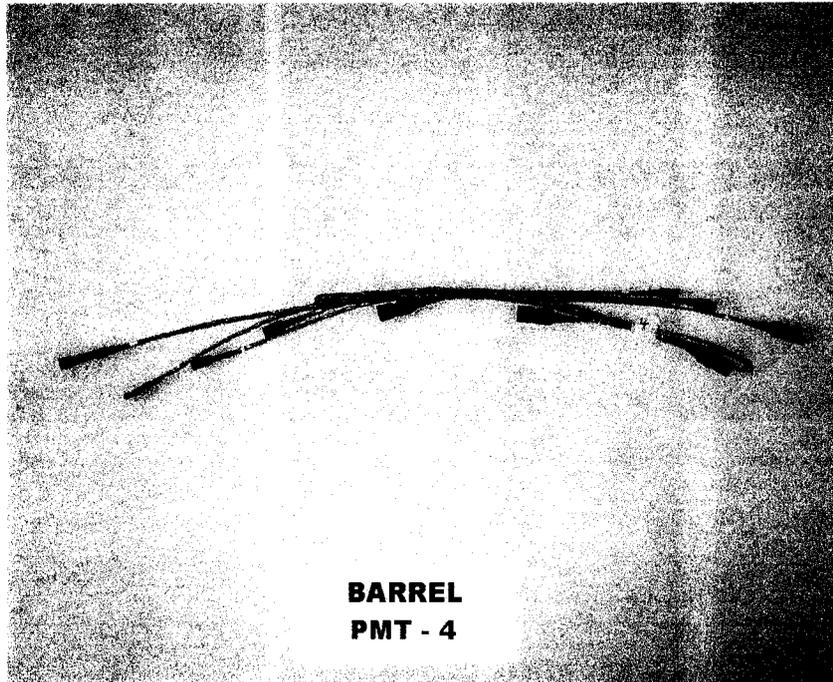


Figura B.2: Cabos de entrada do somador. Além de transmitir os sinais dos circuitos 3-em-1 ao somador, eles alinham os sinais no tempo na entrada do somador. Acima vemos o agrupamento de cabos para o somador da torre  $\eta = 0,05$  e abaixo para a torre  $\eta = 0,65$ .

### Barrel Cabling

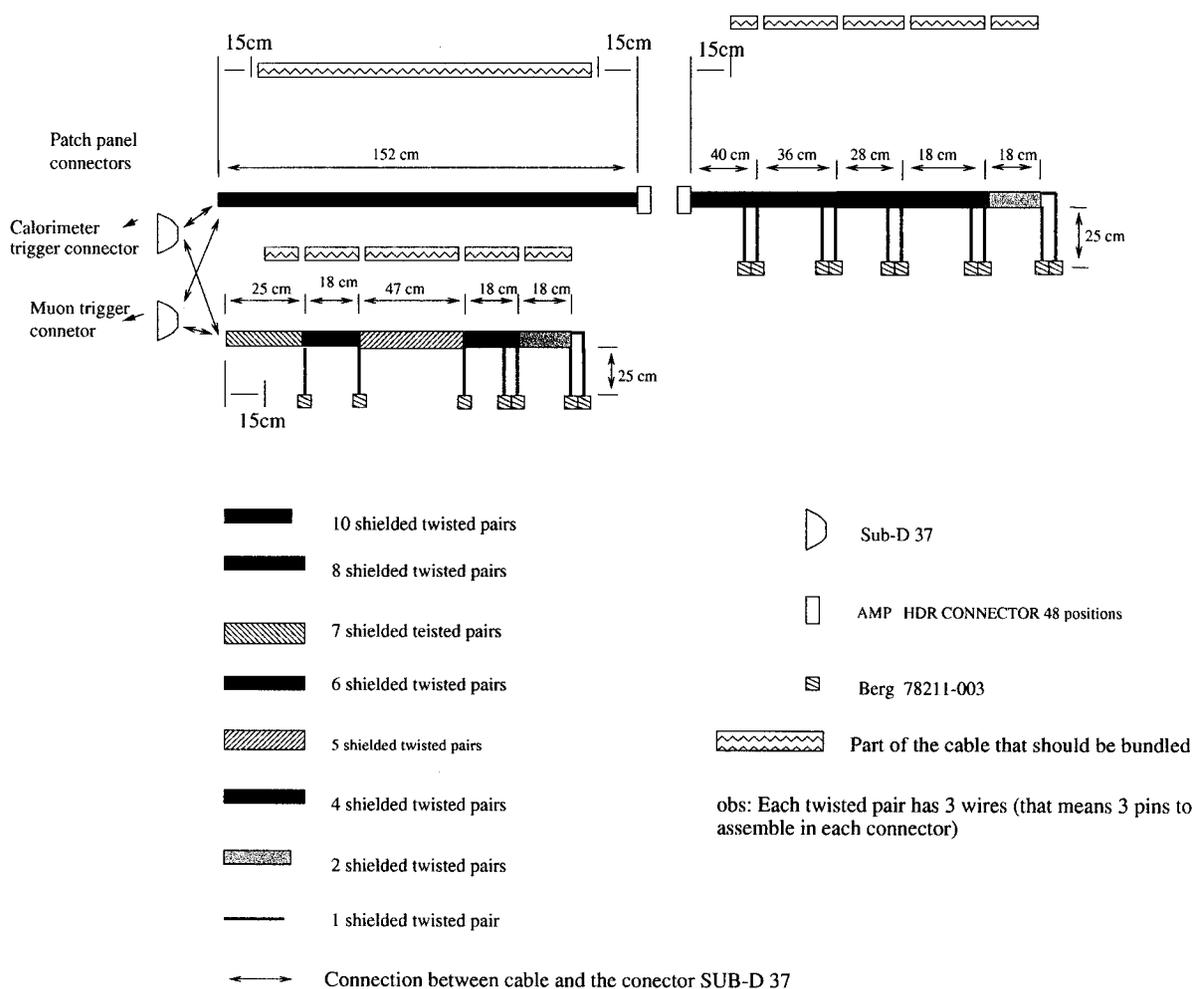


Figura B.3: Esquema dos cabos de saída do somador para o barril. Estes cabos transmitem o sinal das saídas do somador até o painel de interface localizado na extremidade da gaveta do detector.

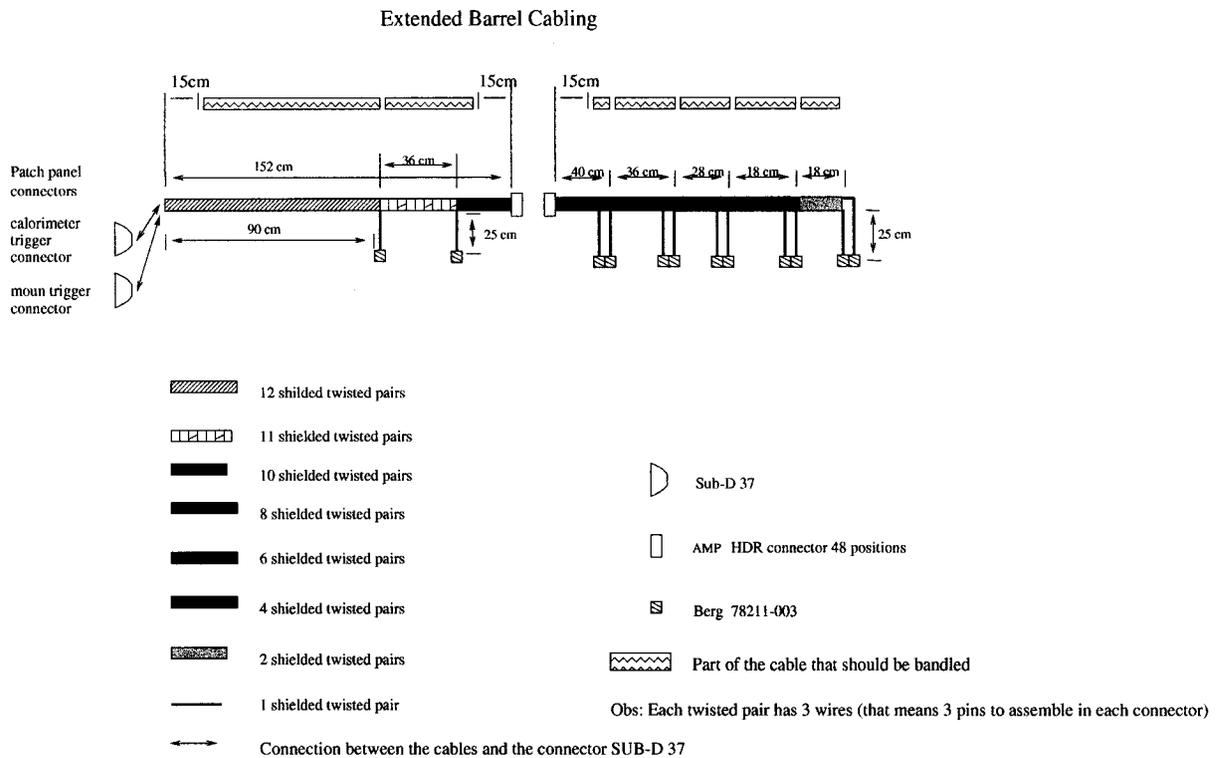


Figura B.4: Esquema dos cabos de saída do somador para o barril estendido.

macho 2DB-52 P-FO também de 52 posições (quantidade 300), com contatos 030-9542-001 (quantidade 12000) e 031-9540-000 (quantidade 12000) respectivamente, e com coberturas plásticas DB 51212-1 (quantidade 600) e sistema de travamento. Estes conectores são usados entre a gaveta interna e externa.

- O conector BERG sub-D DC37S064T com 37 pinos (quantidade 540) com proteção metálica DCJS19678-3 (quantidade 540) para o painel de interface. No painel de interface, usamos 2 conectores sub-D: um para os sinais de validação das torres e um para os sinais de validação de múons.

Na figura B.5, vemos os cabos de saída produzidos para o barril e para o barril estendido (abaixo). Os cabos são divididos em dois, devido a separação entre as gavetas interna e externa, que deve ocorrer para montagem dos diversos componentes na gaveta.

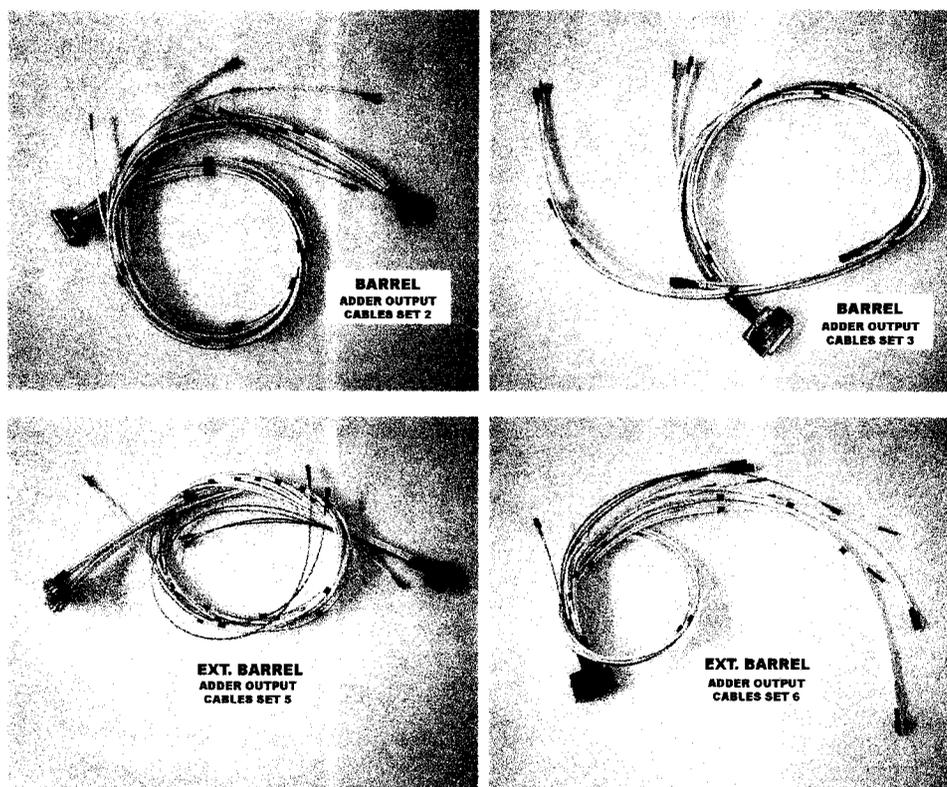


Figura B.5: Foto dos cabos de saída utilizados para transmitir os sinais das saídas dos somadores até o painel de interface da gaveta do detector. Acima vemos os cabos para o barril e abaixo para o barril estendido.