

Fonte de Alta Tensão Negativa para Fotomultiplicadoras

Gabriel Luis Azzi* e Mário Vaz†

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF, Rua Dr. Xavier Sigaud, 150, 22290-180 – Rio de Janeiro, RJ

Este documento descreve um protótipo de fonte chaveada de altas tensões negativas, desenvolvida para alimentar tubos fotomultiplicadores de múltiplos anodos (MAPMT) como o H7546 da Hamamatsu, usado no protótipo do Sistema de Veto de Múons do Projeto Neutrinos Angra.

Abstract

This document presents a prototype of a negative voltage switching power supply, developed to bias multiple anode photomultiplier tubes (MAPMT) as the Hamamatsu H7546, to be used in the Muon Veto System of the Angra Neutrino Project.

Sumário

1. Introdução	1
2. Considerações de projeto	1
3. Especificações de projeto	2
4. Projeto e Implementação	2
4.1. Controlador por largura de pulso	2
4.2. Multiplicador de tensão	2
4.3. Amostragem e Amplificação	2
4.4. Transformador	2
4.5. Resultados de Simulação com o Software PSpice.	3
5. Protótipo desenvolvido	3
5.1. Ensaios em Bancada	3
5.1.1. Ensaio com Carga Resistiva	4
5.1.2. Estabilidade ao Longo do Tempo	5
5.1.3. Efeito da Fonte Protótipo nos Espectros de Energia	7
5.1.4. Autonomia	8
6. Conclusão	8
Referências	9

1. INTRODUÇÃO

Desenvolveu-se um protótipo de fonte chaveada de alta tensão negativa para alimentar tubos fotomultiplicadores de múltiplos anodos (MAPMT), como o H7546 da Hamamatsu [1], para o Sistema de Veto de Múons do Detector Neutrinos Angra [2]. O presente projeto baseou-se em uma fonte de altas tensões positivas desenvolvido anteriormente [3], aqui modificado para fornecer de -500 a $-1000V$ e corrente máxima de $500\mu A$. Seu diagrama em blocos é mostrado na figura 1. A topologia é “push-pull”[4] e utiliza transistores comutados em alta frequência sobre um transformador de alta frequência e alta tensão, que alimenta retificadores a diodos com filtros capacitivos em estruturas multiplicadoras de tensão [5]. Utiliza-se um amplificador de erro de alto ganho e referência de tensão de alta estabilidade para realizar a realimentação negativa que fixa e estabiliza, por longo período de tempo, o valor médio da tensão de saída. O conversor usa como fonte de energia uma bateria ou fonte regulada de 12 Volts.

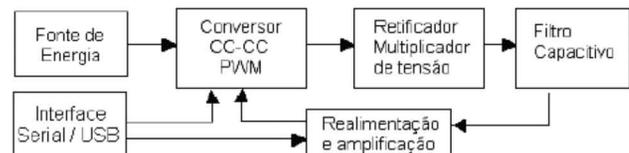


Figura 1: Diagrama em bloco da fonte de alta tensão.

2. CONSIDERAÇÕES DE PROJETO

O projeto é adaptável a diferentes aplicações, ajustando-se a diferentes níveis de corrente e tensão. Basicamente, consta dos seguintes módulos, como mostrado na figura 1:

1. Conversor CC-CC [6] em Push-Pull e controle PWM (Pulse Width Modulation) [7,8];
2. Transformador para alta frequência [9];
3. Circuito duplicador de tensão responsável pela geração da alta tensão de saída [10];
4. Circuito amostrador de tensão de saída e amplificador de erro [7];

*Electronic address: gabriel@cbpf.br

†Electronic address: mario@cbpf.br

5. Fonte de energia selecionável entre uma bateria de 12 Volts ou rede elétrica monofásica;

O conversor CC/CC, em push-pull, opera com retificação de onda completa, com transformadores de dimensões reduzidas e retificadores / filtros compactos, funcionando com tensões de entrada bem reduzidas. Escolheu-se o valor de 12 Volts para permitir o uso de baterias e reduzir a relação de espiras do transformador. A escolha da frequência de chaveamento entre 10 e 20 kHz permite a construção do transformador no mercado nacional, com boa compatibilidade eletromagnética para uso com detectores sensíveis à campos magnéticos, como o PMT [11].

3. ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO

As características básicas do protótipo da fonte de alta tensão desenvolvida são as seguintes:

- Tensão de alimentação: 11,5V até 13,5V, +12V típico
- Tensão de saída ajustável de -500V a -1000V, com corrente máxima de 500 uA
- Máxima potência: 500 mW
- Tensão de ondulação na saída menor que 55 mV (com carga e tensão máximas)
- Estabilidade: maior do que 0,1%.
- Faixa de temperatura de operação entre -15°C e $+35^{\circ}\text{C}$
- Blindagem para reduzir a interferência eletromagnética

4. PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO

4.1. Controlador por largura de pulso

O circuito integrado escolhido como controlador é o UC3525 [12], da Fairchild Semiconductors, Texas Instruments ou UNITRODE, sendo o mesmo utilizado no protótipo da fonte positiva. Tal circuito integrado, cujo esquema elétrico é mostrado na figura 2, permite uma compactação e redução da complexidade do circuito, com diminuição do custo e aumento da confiabilidade.

4.2. Multiplicador de tensão

O circuito básico do multiplicador de tensão, do ponto de vista operacional, é mostrado na figura 3.

O filtro RC na saída do dobrador de tensão, mostrado na figura 2, foi necessário para reduzir o ripple e o ruído. Para tensões na entrada muito acima da tensão nominal, a largura do pulso de excitação do conversor se estreita, exigindo uma filtragem mais eficiente, o que também ocorre quando a carga aumenta, solicitando mais corrente da fonte. Este filtro foi

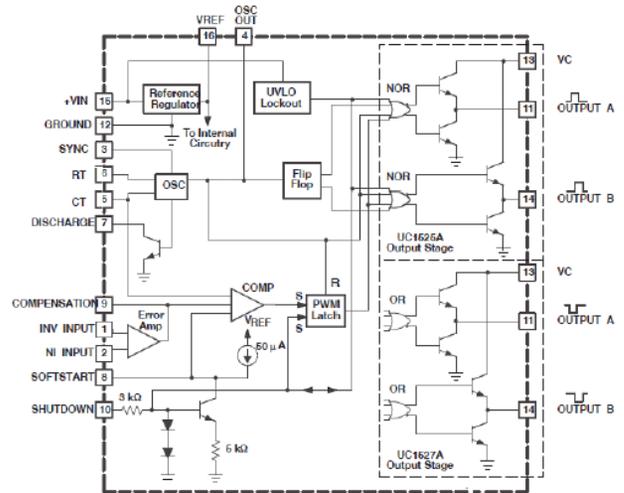


Figura 2: Diagrama em blocos interno do UC3525

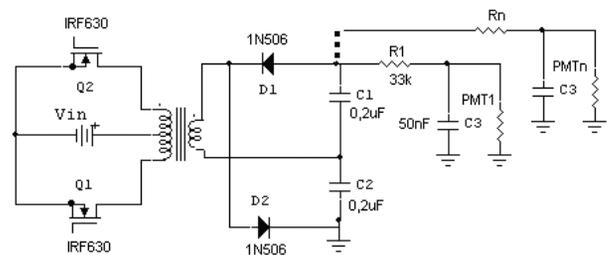


Figura 3: Filtro RC na saída do dobrador com filtro capacitivo

testado para diversas cargas, e se mostrou eficiente atendendo plenamente às especificações iniciais do projeto em relação ao ripple e ruído na saída. Este circuito permite um ajuste adicional na tensão de saída, necessário quando são alimentadas múltiplas PMT. Neste caso, no teste de avaliação de cada PMT deve ser especificado o valor de $R(i)$, $i = 1, \dots, n$, que uniformiza o ganho.

4.3. Amostragem e Amplificação

A amostragem de tensão [13] é feita por uma rede divisora composta por 14 resistores de $10\text{M}\Omega$ em série e um trimpot de $1\text{M}\Omega$, e um amplificador operacional OPA241, conforme mostra a figura 4.

O ajuste da tensão de saída é estabelecidos pelo trimpot P2.

4.4. Transformador

No dimensionamento do número de espiras dos enrolamentos para a fonte foram utilizadas as mesmas equações do protótipo para altas tensões positivas desenvolvido anteriormente [3].

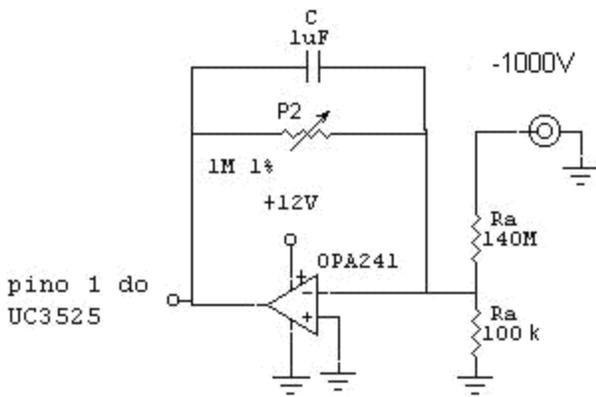


Figura 4: Amplificador operacional e a rede divisora.

Como o enrolamento de um transformador de alta tensão envolve alguns cuidados especiais como, por exemplo, o ótimo isolamento entre as camadas, contratou-se a empresa Technotrafo Ind. e Com. Ltda [9] para produzir o enrolamento do transformador (após consulta em que foi feita a verificação dos cálculos em relação as especificações do projeto do transformador).

4.5. Resultados de Simulação com o Software PSpice.

A seguir serão apresentados os resultados de simulação digital com o software **Pspice**, feita com o objetivo de verificar o funcionamento do controlador por largura de pulso do SG3525. A figura 5 ilustra o circuito empregado na simulação.

Apresentamos na figura 6 (a,b e c) as formas de onda obtidas quando fixamos a tensão de referência do SG3525 em 2,5V (pino2) e variamos a tensão de erro (pino1). Isto foi realizado para podermos verificar o funcionamento das saídas do C.I., com ciclos de trabalho diferentes.

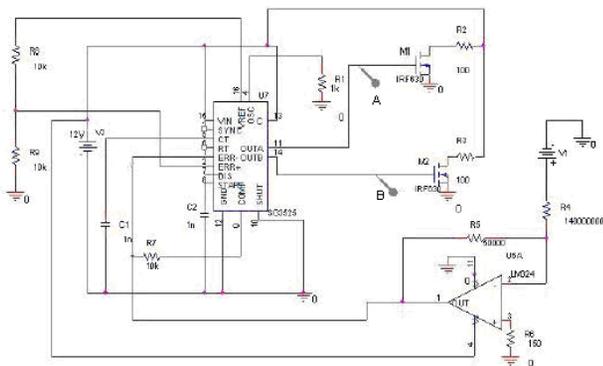


Figura 5: Esquema elétrico do circuito simulado.

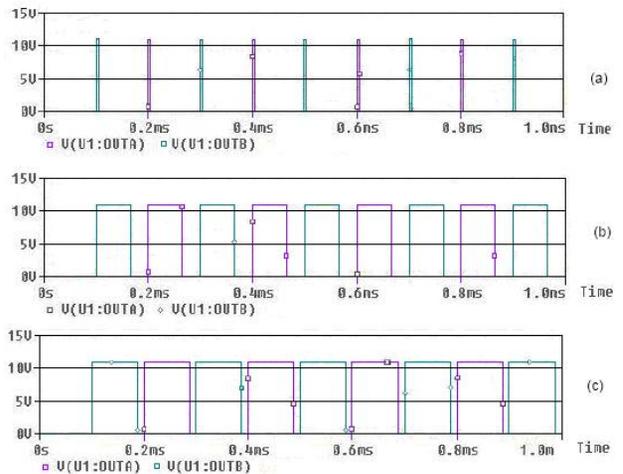


Figura 6: Formas de onda do oscilador e da tensão nas saídas do SG3525 para diferentes tensões de erro: a) Verro=1V;b) Verro=2V; c)Verro=2.5V.

5. PROTÓTIPO DESENVOLVIDO

Foi montado um protótipo em placa de circuito impresso, com componentes de baixo custo e facilmente encontráveis no mercado do Rio de Janeiro. Este protótipo teve como objetivo realizar ensaios de estabilidade e ruído, com diferentes cargas e tensões de entrada e observação da alta tensão produzida, bem como a tensão de alimentação da fonte e a temperatura ambiente.

A figura 7 apresenta o diagrama esquemático da fonte de alta tensão e a figura 8 fotografia do protótipo montado em laboratório. O circuito usa componentes comuns e de baixo custo.

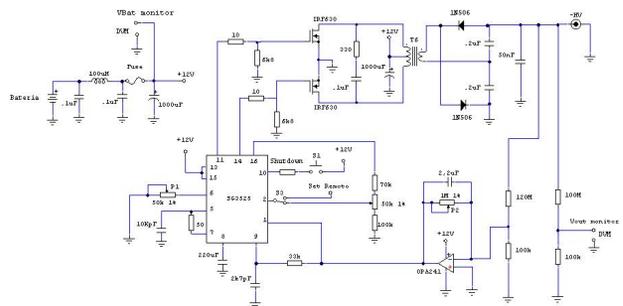


Figura 7: Diagrama esquemático da fonte de alta tensão negativa.

5.1. Ensaios em Bancada

Ensaios com a fonte de alta tensão foram realizados no Laboratório de Eletrônica do CBPF e no LAFEX. O sistema de testes, que visou à verificação de estabilidade, "ripple" e ruído, tem seu diagrama em blocos mostrado na figura 9. Fotos do mesmo sistema são mostradas na figura 10.



Figura 8: Foto do protótipo desenvolvido da fonte de alta tensão negativa.

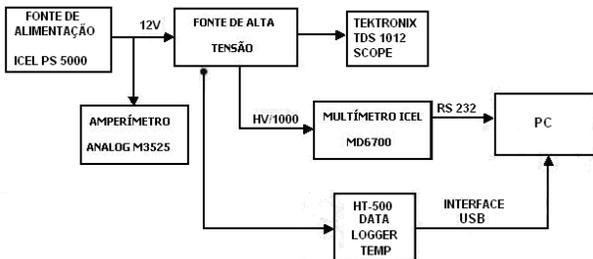


Figura 9: Diagrama de blocos da bancada de testes no Laboratório de Eletrônica.

Os equipamentos utilizados nas medidas foram os seguintes:

- Fonte estabilizada de bancada (ICEL, modelo PS 5000), que alimenta a fonte de alta tensão com 12 Volts, simulando a bateria;
- Multímetro Digital (ANALOG M3525), para medida da corrente consumida pela fonte de alimentação;
- Multímetro Digital (ICEL Escort , modelo MD6700) para medida da alta tensão de saída;
- Osciloscópio digital com duplo traço (TEK TDS1012 100Mhz) para medição do ripple;
- Data Logger de Temperatura e Umidade (Instrutherm, modelo HT-500) para medição de estabilidade;
- Osciloscópio Digital (AGILENT, modelo DSO90254A 2,5GHz).

O diagrama em blocos da bancada de testes do LAFEX é dado na figura 11, e fotos ilustrativas na figura 12. Estes testes foram feitos com a MAPMT H7546A, para verificar adequação da fonte à aplicação em vista, de detecção de



Figura 10: Bancada de testes no Laboratório de Eletrônica.

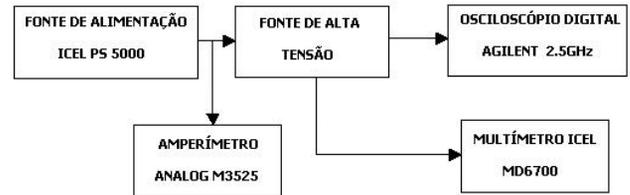


Figura 11: Diagrama de blocos da bancada de testes no LAFEX.



Figura 12: Bancada de testes do LAFEX.

múons no protótipo de Veto de Múons do projeto Neutrinos Angra, em termos de relação sinal/ruído, estabilidade da tensão de saída e consumo de corrente do protótipo da fonte.

Para medidas do ripple da tensão de saída utilizamos o esquema dado na figura 13, onde o osciloscópio permite visualizar o ripple; e um multímetro de alta impedância de entrada mede a alta tensão atenuada de 1000 vezes, indicado como *Vout monitor* no esquemático da fonte na figura 7.

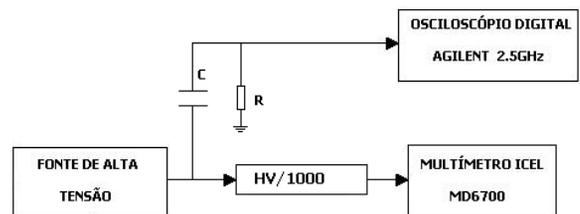


Figura 13: Esquema para medir o ripple e a tensão de saída.

5.1.1. Ensaio com Carga Resistiva

O objetivo deste ensaio, que foi realizado no Laboratório de Eletrônica, foi verificar a regulação da tensão de saída com a carga, assim como o consumo de corrente da fonte e

o ripple da tensão de saída operando a temperatura de 25°C. Foi então simulada uma carga resistiva através da associação resistores de 1 Watt com tolerância de 10% com resistores ligados diretamente na saída da fonte. A corrente para tal carga a -900 Volts foi de 380uA.

Testamos a regulação estática da linha, que é a medida da capacidade da fonte de alimentação em manter uma tensão de saída constante, quanto a variação da tensão da entrada. Utilizamos uma carga simulada de 380uA e fixamos a entrada em 12 Volts e a saída em -900 Volts. Em seguida, simulamos variações na tensão de entrada respeitando um intervalo de 30 minutos para cada leitura, após a variação da tensão de entrada, e observamos os resultados medidos no amperímetro, no monitor de tensão e no osciloscópio digital, como mostra a tabela 1. A fonte trabalha dentro da faixa de tensões de alimentação de 9,5V à 14,5V com uma regulação de linha em torno de +/- 0,12%, ou seja, no limite de precisão dos medidores utilizados.

Tabela 1: Características da fonte com carga de 380uA.

Tensão de Alimentação (V)	Corrente de Alimentação (mA)	Tensão de Saída (V)	Tensão de Ripple (mVpp)	Tensão de Ripple (mv)RMS	Fator de Ripple
9,5	115,1	899,4	37,2	7,88	$8,76 \times 10^{-6}$
10	115,3	899,6	40,2	6,82	$7,58 \times 10^{-6}$
10,5	115,5	899,8	38,2	9,98	$1,11 \times 10^{-5}$
11	115,7	899,9	38,8	12,2	$1,35 \times 10^{-5}$
11,5	115,9	900,0	44,2	12,6	$1,41 \times 10^{-5}$
12	116,3	900,0	46,4	13,2	$1,46 \times 10^{-5}$
12,5	116,5	900,1	48,4	16,2	$1,79 \times 10^{-5}$
13	116,5	900,2	50,2	16,4	$1,82 \times 10^{-5}$
13,5	116,8	900,4	51,6	16,8	$1,86 \times 10^{-5}$
14	116,9	900,5	50,8	15,6	$1,73 \times 10^{-5}$
14,5	117,0	900,5	50,4	9,65	$1,07 \times 10^{-5}$

As figura 14 e 15 mostram os gráficos da variação da tensão de saída e a variação da tensão de ripple, respectivamente, para variações da tensão de alimentação da fonte de 9,5 Volts até 14,5 Volts.

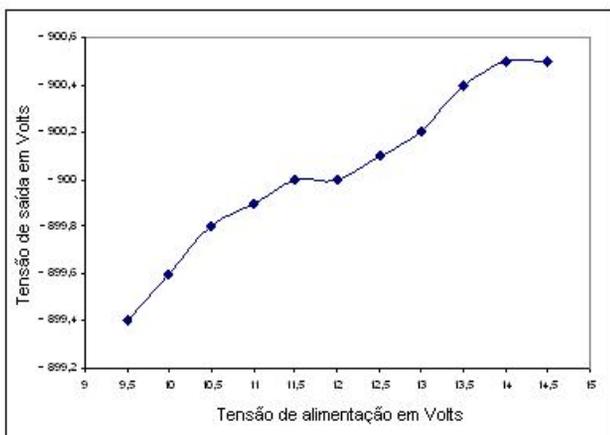


Figura 14: Comportamento da tensão de saída em função da tensão de alimentação.

A figura 16 ilustra a forma de onda típica do ruído de chaveamento superposto ao ruído ambiental, comportamento oscilatório típico da estrutura push-pull, devido aos compo-

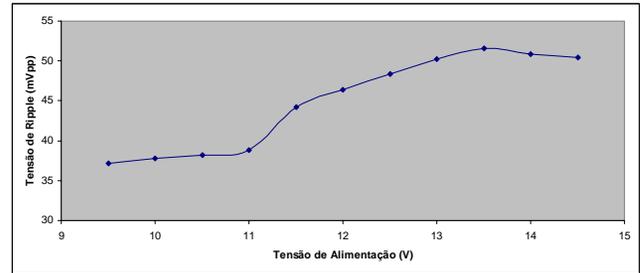


Figura 15: Comportamento do ripple em função da tensão de alimentação.

nentes parasitas do transformador e ao chaveamento de corrente nas indutâncias do primário. Estes ruídos se somam ao ripple da fonte.

A figura 17 mostra a forma de onda do ripple da fonte de alta tensão para uma carga simulada de 380uA, com uma tensão de entrada constante de 12 Volts e tensão de saída fixada em -900 Volts.

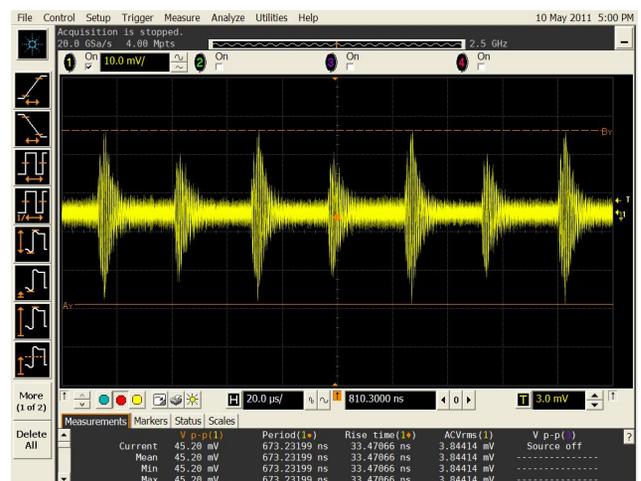


Figura 16: Forma de onda do ruído na saída da fonte para tensão de entrada = 12V; Vout = - 900V; Iout = 380uA, osciloscópio com 50 ohms de impedância de entrada.

Testamos a regulação estática da carga, que mede a alteração da tensão de saída em resposta a uma mudança na corrente média de saída da fonte. O teste foi feito mantendo a tensão nominal da entrada constante em 12 Volts. A saída foi medida com 50% e com 100% da corrente nominal, conforme ilustra o esquema da figura 18. A regulação de carga encontrada ficou em torno de +/- 0,03%.

5.1.2. Estabilidade ao Longo do Tempo

A estabilidade da fonte foi medida em diferentes ensaios. O primeiro foi realizado no Laboratório de Eletrônica da CAT, monitorando a tensão de saída por 18 horas. A fonte de alta tensão foi alimentada por uma fonte de bancada fornecendo tensão constante de 12 Volts, fixada a tensão de saída em -900V com uma carga de 2,3MΩ de modo a ter na saída uma corrente de 380uA, para emular um pior

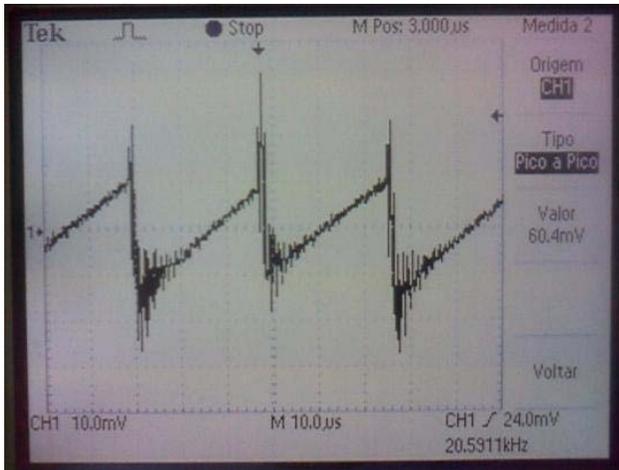


Figura 17: Forma de onda do ripple para tensão de entrada = 12V; $V_{out} = -900V$; $I_{out} = 380\mu A$, osciloscópio com 1 Mohm de impedância de entrada.

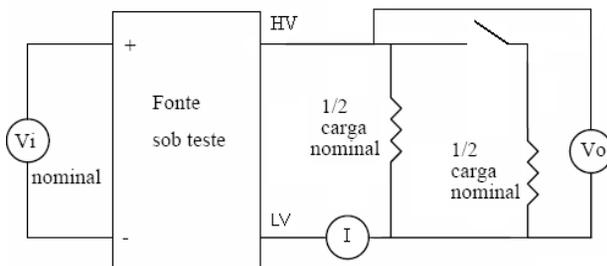


Figura 18: Teste de regulação de carga.

caso para o PMT H7546A. A tensão de saída foi monitorada com um multímetro digital, conectado a um computador via RS232. Monitorou-se a temperatura com um data logger conectado ao mesmo computador via interface USB, conforme ilustrado anteriormente na figura 9. Sincronizou-se as medidas para cada 5 minutos por 18 horas.

O resultado destas medidas, mostrado nas figuras 19 e 20, com os gráficos de temperatura e tensão de saída em função do tempo, mostram a estabilidade de 0,1% deste protótipo de fonte. A pequena ondulação ao longo da curva corresponde à variações de tensão a cada amostragem.

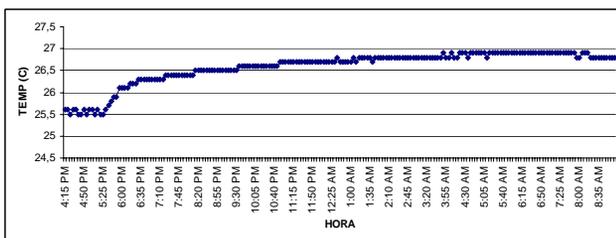


Figura 19: Variação da temperatura.

No segundo ensaio, realizado no LAFEX, a fonte de alta tensão foi monitorada durante a caracterização do MAPMT

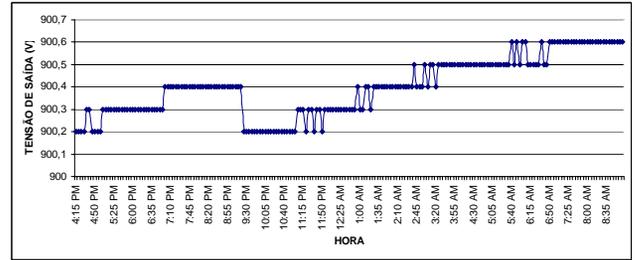


Figura 20: Variação da alta tensão na saída de $\pm 0,2V$ em torno da média de 900,4V.

H7546A em medidas do tipo "Single Photoelectron" (SPE), segundo o diagrama em blocos da figura 21. O MAPMT foi alimentado pela fonte de alta tensão negativa, por sua vez alimentada por uma fonte de bancada ajustada em +12V. Mediu-se a temperatura ambiente por meio de sensores DS18S20 da MAXIM [14], que utilizam o protocolo 1-wire de comunicação. As tensões das fontes de baixa e de alta tensão foram monitoradas pelo multímetro multicanal Keithley 199. Os dados resultantes foram processados por um programa desenvolvido em LABVIEW, adaptado do programa utilizado no experimento com o PMT Hamamatsu R5912 [15].

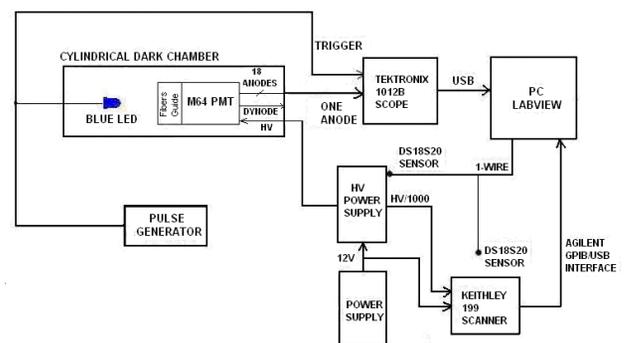


Figura 21: Diagram em blocos do setup de medidas com o MAPMT H7546A (Hamamatsu).

As medidas foram realizadas por um tempo médio de 2 dias, apresentando uma variação cíclica que acompanhou a variação de temperatura, provavelmente devido ao desligamento do equipamento de ar condicionado no fim do dia e sua posterior ligação dia seguinte. Os resultados mostram uma variação inferior a $\pm 3V$ em -850 V, o que representa menos do que $\pm 0,35\%$ do valor nominal, no intervalo entre 17°C e 25°C, como mostram as figuras 22A, B e C.

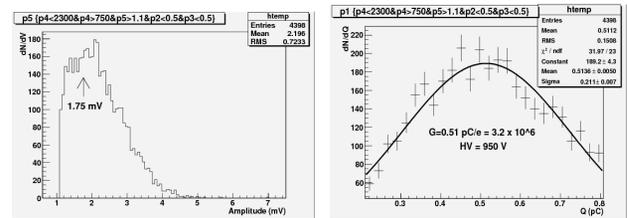
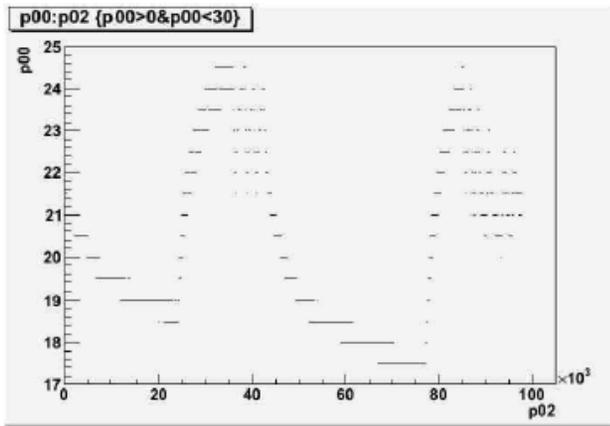


Figura 23: a) Distribuição da amplitude de pico de tensão para fóto-elétron único em H7546A, polarizada em $-950V$. b) Distribuição de carga, com *fitting* gaussiano, e cálculo do ganho para H7546A polarizada em $-950V$.

Fig. 22A Variação da temperatura ambiente, de $17^{\circ}C$ a $25^{\circ}C$, durante as medidas (0 a 100K eventos).

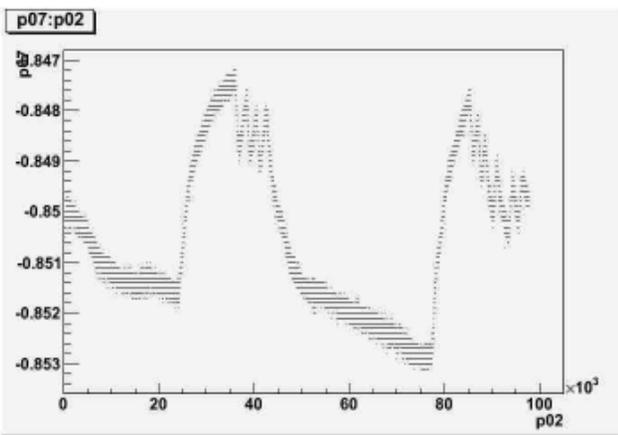


Fig. 22B Variação da saída da fonte de alta tensão, de -853 a -847 V. (0 a 100K eventos).

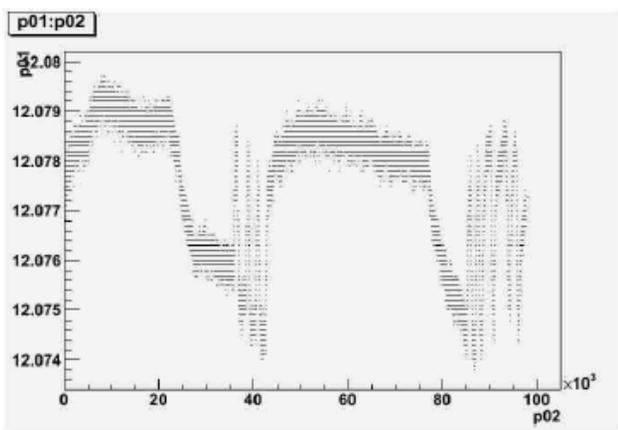


Fig. 22C Variação da fonte de baixa tensão, de $+12,074$ a $+12,080$ V, no tempo (0 a 100k eventos).

5.1.3. Efeito da Fonte Protótipo nos Espectros de Energia

Nas medidas descritas anteriormente, verificou-se que os erros nos resultados estavam de acordo com o esperado [15,16]. Os resultados mais importantes de amplitude de tensão ou corrente e carga, correspondente à detecção de fóto-elétron único, são apresentados na figura 23.

Outra análise realizada foi a influência da fonte de alta

tensão nos espectros resultantes na detecção de múons. Utilizou-se o protótipo da fonte de alta tensão na alimentação de tubos fotomultiplicadores H7546A, para a realização de medidas de detecção de raios cósmicos, tal como na detecção de fóto-elétron único [16]. A figura 24 apresenta o circuito de polarização, fornecido pela Hamamatsu, para o tubo H7546 testado neste trabalho.

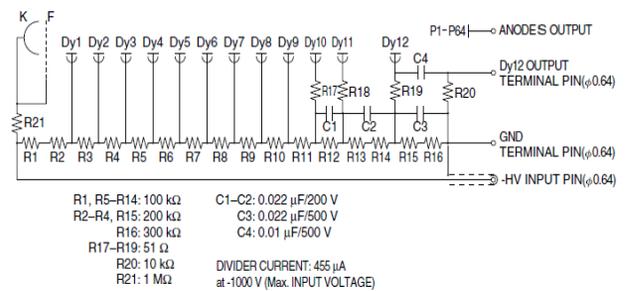


Figura 24: Circuito divisor de tensão da base do fototubo da Hamamatsu H7546.

Na detecção de múons, utilizou-se um conjunto formado por cintilador plástico, fibra óptica de 1,2 mm de diâmetro e MAPMT H7546A, polarizada com -900 V . Mediu-se a corrente de saída do anodo com osciloscópio digital sem amplificação adicional, sobre uma carga de 50 ohms, correspondente a pulsos com amplitude em torno de 40 mV, ou 0,8 miliamperes sobre 50 ohms, e carga de 10 pC, ou cerca de 20 fótoelétrons. O diagrama em blocos deste experimento de detecção de múons é mostrado na figura 25 e o resultado das medidas é apresentado na figura 26. Observa-se uma separação nítida nos picos de eventos de ruído, mais próximos de zero, e o de eventos de raios cósmicos, de 40mV de amplitude e 12pC de carga.

Conclui-se deste resultado que o ruído de fonte está bem abaixo do sinal correspondente ao evento observado, a fonte atende perfeitamente às exigências de estabilidade e ruído deste tipo de aplicação.

Estas medidas foram repetidas utilizando módulos analógicos amplificadores e discriminadores processando os sinais dos anodos do MAPMT em diversas condições. Inicialmente, com a fonte protótipo desligada, ou seja, sem alimentação para o MAPMT e depois com a fonte ligada para -900 Volts e com corrente de carga de $380\mu\text{A}$. As figuras 27, 28 e 29 ilustram os resultados encontrados em am-

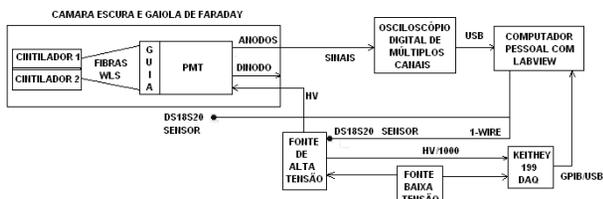


Figura 25: Diagrama em blocos do setup de teste da MAPMT para detecção de múons.

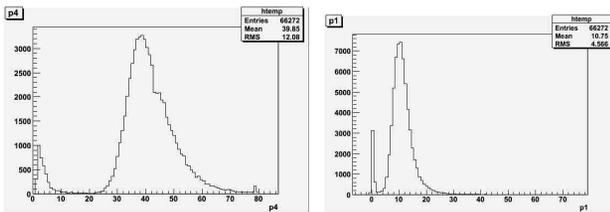


Figura 26: Amplitude de pulso em mV (p4) e carga em pC (p1) na detecção de múons com a MAPMT H7546A a -950V.

bas as situações. Podemos observar que os picos de alta frequência, gerados pelo rápido *rise time* e *fall time* dos pulsos associados aos componentes eletrônicos de chaveamento e retificação da fonte chaveada (ripple), não estão presentes nas saídas dos amplificadores, novamente apontando para a adequação da fonte desenvolvida para esta aplicação.

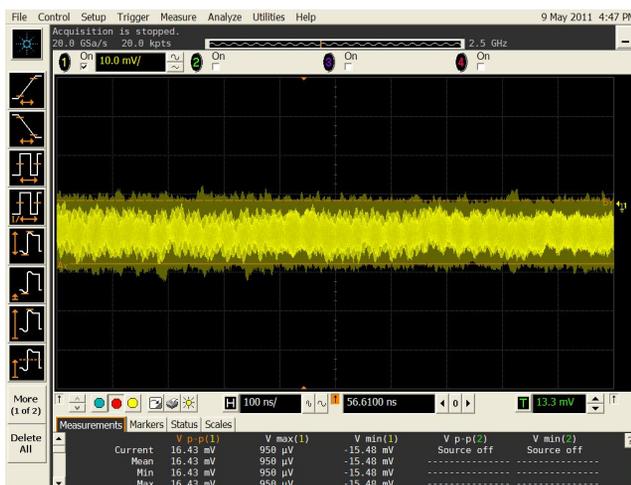


Figura 27: Saída do 1º Amplificador com a fonte protótipo desligada.

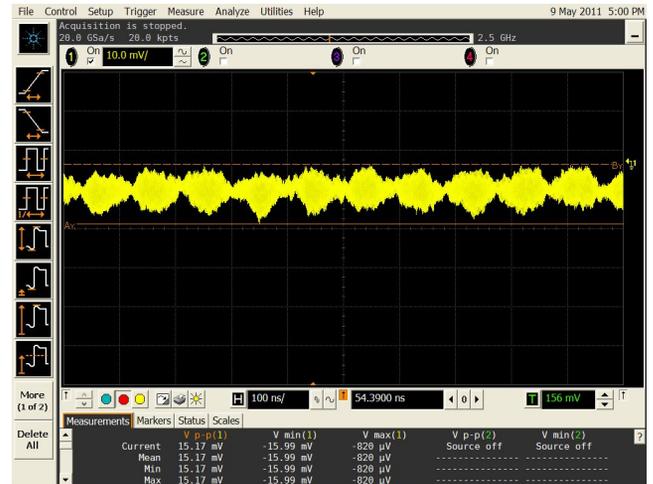


Figura 28: Saída do 1º Amplificador para $V_{out} = -900V$; $I_{out} = 380\mu A$; Valimentação = 12V.



Figura 29: Saída do 3º Amplificador; $V_{out} = -900V$; $I_{out} = 380\mu A$; Valimentação = 12V.

5.1.4. Autonomia

O cálculo do tempo de autonomia com bateria de 56 AMP*HR é feito com a fórmula convencional:

$$\text{Tempo} = \frac{(\text{AMP} * \text{HR})}{\text{Corrente máxima de alimentação da fonte}} \quad (1)$$

Pelos dados da tabela 1, página 5, o pior caso deste tempo é $56 \text{ AMP} * \text{HR} / 0,12 \text{ A} = 466,7 \text{ horas}$

6. CONCLUSÃO

Foi projetado e construído um protótipo de fonte de alta tensão. A fonte foi caracterizada experimentalmente e demonstrou atender às especificações de projeto para alimentar tubos fotomultiplicadores de múltiplos anodos (MAPMT). A portabilidade da fonte permite também a

aplicação em experimentos de campo (através do uso de bateria de 12 Volts).

As medidas realizadas com cargas simuladas e com a MAPMT mostraram que a fonte apresenta alta estabilidade, baixo consumo e excelente regulação.

A complexidade do circuito ficou restrita ao mínimo indispensável, onde utilizou-se em grande parte componentes de

fácil aquisição e baixo custo, sendo a manutenção do equipamento fácil e rápida.

Pode-se concluir que a fonte de alta tensão desenvolvida neste trabalho apresenta características satisfatórias, podendo ser utilizada tanto no âmbito da pesquisa fundamental, quanto didático em laboratórios de física experimental.

-
- [1] CityplaceHAMAMATSU PHOTONICS K.K., Electron Tube Division, Multianode Photomultiplier Tube Assembly H7546A/B, 2007. http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/parts_H/H7546A_H7546B_TPMH1240E12.pdf
- [2] Projeto Neutrinos Angra/CBPF <http://portal.cbpf.br/index.php?page=GruposPesquisa.Apresentacao&grupo=40>.
- [3] G. Azzi, M. Vaz. Fonte de Alta Tensão Positiva para Fotomultiplicadoras. Nota Técnica CBPF NT004/10, 2010.
- [4] Mohan, Underland and Hobbins. Power Electronics, Converters, Applications and Design. John Wiley and Sons, Inc. 2nd Edition (1995).
- [5] G. Azzi - Desenvolvimento de uma Fonte de Alta Tensão Chaveada para Tubos Fotomultiplicadores, tese de Mestrado em Instrumentação Científica no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro, 2006.
- [6] Design of Solid-State Power Supplies – Eugene R.Hnatek, Van Nostrand Reinhold Company, EUA, 1981.
- [7] Ralph E. Locher. Introduction to Power Supplies. National Semiconductor, Application Note 556, 1988.
- [8] J.A. Pomídio. Apostila de Fontes Chaveadas: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor>. (27/09/2010).
- [9] CityplaceTechnotrafo StateInd. e Com. Ltda. URL: www.tecnotrafo.com.br. (27/09/2010).
- [10] Voltage Multipliers, Inc, Visalia, CA. URL: www.voltagemultipliers.com. (27/09/2010).
- [11] CityplaceHamamatsu Photonics. Characteristics and Uses of Photomultipliers Tubes. Nota Técnica n0 79-57-03 (1982).
- [12] URL:<http://www.chipdocs.com/datasheets/datasheet-pdf/Fairchild-Semiconductor/UC3525.html> (27/09/2010).
- [13] Sedra/Smith. Microelectronic Circuits. PlaceNameplaceOxford PlaceTypeUniversity, 4th Edition, 1998
- [14] MAXIM / Dallas Semiconductor, DS18S20 High Precision 1 – Wire Digital thermometer, 2008.
- [15] M. Vaz, L. Villaseñor, W. Raposo, Test Setup to Measure Gains of the Angra Photomultipliers Using the Single Photoelectron Technique, Neutrinos Angra Note 003-2007.
- [16] Ferreira, Wallace Raposo, "Teste de componentes do sistema de veto de múons do detector Neutrinos Angra", tese de mestrado profissionalizante do CBPF, 8 de outubro de 2010.