



Fonte de Alta Tensão Positiva para PMTs do Detector Neutrino Angra

Gabriel Luis Azzi

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

gabriel@cbpf.br

Mário Vaz

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

mariovaz@cbpf.br

Resumo

Este documento apresenta uma fonte chaveada de alta tensão, de alta estabilidade e eficiência, desenvolvida para alimentar tubos fotomultiplicadores de alimentação positiva como a R5912 da Hamamatsu.

1 Introdução

As fontes de alimentação de alta tensão aqui propostas utilizam transistores comutados em alta frequência sobre transformadores de alta frequência e alta tensão, que por sua vez alimentam retificadores a diodo com filtros capacitivos em estruturas multiplicadoras de tensão. Usa-se realimentação negativa de tensão por amplificadores de erro de alto ganho e referências de tensão de alta estabilidade, para reduzir as variações no valor médio da tensão de saída. Estas fontes têm alto rendimento, pequeno volume e peso, e podem ser alimentadas por baterias, para portabilidade do equipamento. A fonte de alta tensão pode ser implementada de três formas, dependendo dos componentes utilizados:

1. Montadas diretamente no fotodetector;
2. Modulares;
3. De bancada.

O protótipo aqui documentado é do tipo modular, fornece uma tensão constante entre 1500 a 2500V com corrente máxima de 3mA, sendo capaz de alimentar até 20 R5912, retirando cerca de 9 watts de energia de uma bateria ou fonte regulada de 12Volts, como indicado na figura 1. Dispõe de uma interface Serial / USB para computadores pessoais, para controle e monitoramento remotos.

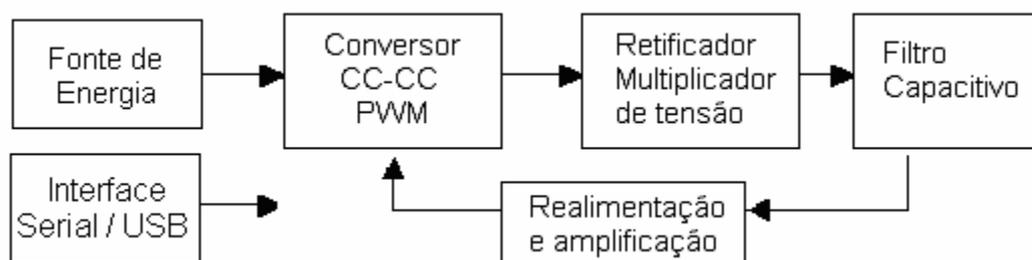


Figura 1 – Diagrama em bloco da fonte de alta tensão.

2 Considerações de projeto

O projeto é modular, adaptável a diferentes aplicações, e pode ter diversas aplicações com diferentes níveis de corrente e tensão. Basicamente consta dos seguintes elementos, como mostrado na figura 1: 1 - Conversor CC-CC em *Push-Pull* e controle PWM (*Pulse Width Modulation*); 2 - Transformador para alta frequência; 3 - Circuito duplicador de tensão responsável pela geração da alta tensão de saída; 4 - Circuito amostrador de tensão de saída e amplificador de erro; 5 - Fonte de energia selecionável entre uma bateria de 12 Volts ou rede elétrica monofásica; 6 - Interface de comunicação com computador, via RS232 ou USB. O conversor CC/CC provê uma alta tensão de saída continuamente regulada, a partir de uma tensão contínua baixa e não regulada, que é convertida em alta tensão alternada e retificada para alta tensão contínua. O controle da tensão de saída é feito por modulação da largura de pulso (PWM) de acionamento dos transistores, gerando pulsos de período constante e largura variável. A escolha do modo chaveado ao invés do modo linear operando na frequência da rede, 60 Hz, permite uma redução, proporcional ao aumento da frequência, do volume, custo, perdas e consumo, para a mesma potência de saída. A portabilidade resultante facilita diversas atividades experimentais. A topologia escolhida para o conversor CC/CC foi a *Push-Pull*, que se utiliza de retificação de onda completa com transformadores com dimensões reduzidas e retificadores / filtros

mais compactos, pode operar com tensões de entrada bem reduzidas, no caso 12 Volts para permitir o uso de baterias. 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 em detectores sensíveis a campos magnéticos como PMT. Usam-se multiplicadores de tensão para atingir níveis mais altos de tensão.

3 Especificações de projeto

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

1. Tensão de alimentação: 11,5V até 13,5V, +12V típico
2. Tensão de saída ajustável de +1500V até 2500V a até 3mA
3. Máxima potência: 9 W
4. Tensão de ondulação na saída menor que 25 mV a carga e tensão máximas
5. Estabilidade: melhor que 0,2%
6. Alta eficiência: rendimento melhor que 70%
7. Faixa de temperatura: -15°C até + 35°C
8. Compatibilidade magnética: blindagem para reduzir a interferência eletromagnética

4 Projeto e Implementação

4.1 PWM com o circuito integrado monolítico UC3525

A escolha do circuito integrado UC3525, de fabricação UNITRODE, mostrado na figura 2, permite uma compactação e redução da complexidade do circuito, diminuição do custo e aumento da confiabilidade. Este CI não é de última geração, tendo sido escolhido dentre vários outros por reunir as seguintes características:

1. Fácil aquisição no mercado e baixo custo; Possui duas saídas complementares para MOSFETs em *Push-Pull*;
2. Possui uma tensão de referência interna precisa de 5,1V (0,75%) e Amplificador de erro integrado;
3. Controle do tempo morto auto-ajustável para garantir que os dispositivos de chaveamento não conduzam ao mesmo tempo, levando a queima dos mesmos;
4. Opera em ampla faixa de frequências de trabalho, de 100 Hz até 500 kHz;
5. Possui pinagem para proteção e limitação da corrente máxima;
6. Consumo na faixa de 15mA, e tensão de trabalho entre 8V e 35V;

7. Flexível a todas as configurações (Push-pull, Fly-back, Forward);

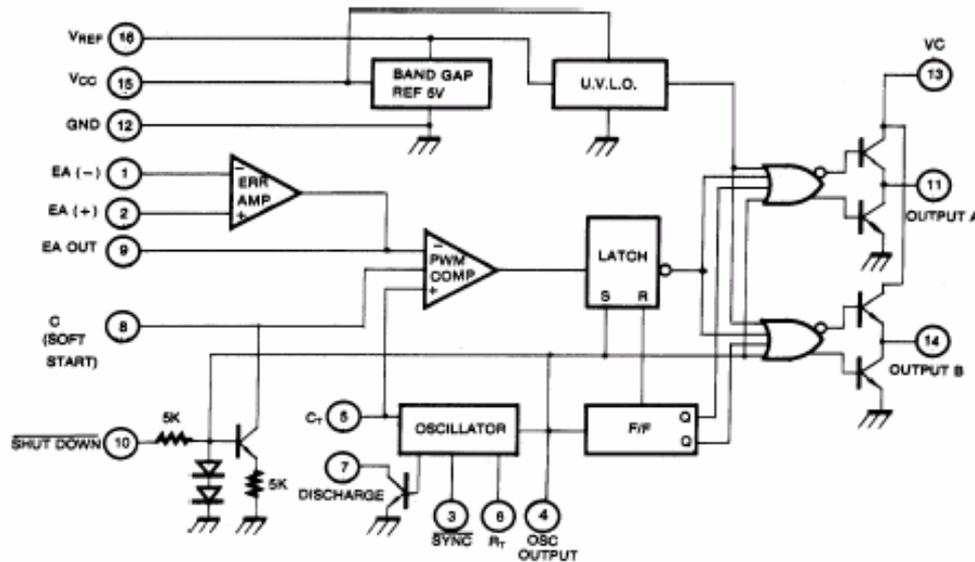


Figura 2 - Diagrama em blocos do UC3525

4.2 O Projeto do Transformador

O dimensionamento do número de espiras dos enrolamentos para fontes se inicia calculando o número de espiras do primário e do secundário pelas fórmulas 1 a 5.

$$E_{pri} = 4 \cdot B \cdot N_{pri} \cdot F \cdot AC \cdot 10^{-8} \quad (\text{onda quadrada}) \quad (1)$$

$$E_{pri} = 4,44 \cdot B \cdot N_{pri} \cdot F \cdot AC \cdot 10^{-8} (\text{onda senoidal}) \quad (2)$$

$$N_{sec} = (E_{sec}/E_{pri}) \cdot N_{pri} \quad (3)$$

$$I_{pri} = P_{pri}/E_{pri} \quad (4)$$

$$I_{sec} = P_{sec}/E_{sec} \quad (5)$$

Onde

E_{pri} = Tensão aplicada no primário (Volts)

E_{sec} = Tensão no secundário (Volts)

B = Densidade de fluxo no núcleo (Gauss)

F = Frequência (Hz)

AC = Área efetiva do núcleo (cm^2)

P_{pri} = Potência no primário

P_{sec} = Potência no secundário

N_{pri} = número de espiras no primário

N_{sec} = número de espiras no secundário

I_{pri} = corrente no primário

I_{sec} = corrente no secundário

Dimensiona-se o núcleo do transformador pelo produto da área da janela pela área do núcleo, $W_A \cdot A_C$, determinado em função da potência fornecida na saída do transformador, pelas equações 6 e 7.

$$W_{A \cdot A_C} = \frac{K' \cdot P_{sec} \cdot 10^8}{B \cdot f_{sw}} \quad (6)$$

onde $K' = C / \cdot e \cdot K$

sendo:

P_{sec} = Potência de saída

e = Eficiência do transformador

B = Densidade de fluxo magnético

f_{sw} = Frequência de operação

C = Capacidade de corrente em cm^2/amp

Assumem-se neste caso as seguintes condições operacionais:

$C = 5,07 \cdot 10^{-3} cm^2/Amp$ (onda quadrada)

$e = 90\%$ para transformadores (incluindo as perdas no circuito)

$K = 0,3$ (valor típico para núcleos “pot cores”, dado de catálogo)

$K' = 0,00528$ (valor típico para núcleos pot cores, dado de catálogo)

Calculando o valor para $W_A \cdot A_C$ pela equação (6) e fazendo uso de *datasheets* apropriados, fizemos a escolha apropriada do núcleo de ferrite a ser utilizado em uma tabela de núcleos. Como o enrolamento de um transformador de alta tensão envolve alguns cuidados especiais como, por exemplo, o ótimo isolamento entre as camadas, confiamos à empresa Technotrafo Ind. e Com. Ltda. a tarefa do enrolamento do transformador (após consulta em que foi feita a verificação dos cálculos em relação às especificações do projeto do transformador).

4.3 Retificação e Multiplicação de Tensão

A conversão de tensão alternada da saída do transformador em tensão contínua é feita com retificadores com filtros capacitivos, que podem ser configurados como circuitos multiplicadores de tensão, que retificam e multiplicam o valor da tensão de pico no secundário do transformador. São utilizados quando se desejam tensões acima da tensão de pico máxima do transformador e baixas correntes. A queda na tensão de saída e a ondulação (*ripple*) da fonte podem ser estimados pelas equações 8 e 9:

$$\Delta U = \frac{I}{fC} \left(\frac{2}{3} n^3 + \frac{1}{3} n^2 - \frac{1}{6} \right) \quad (7)$$

$$E_{ripple} = [I_{carga} / (f \cdot C)] \cdot n \cdot [(n + 1) / 2] \quad (8)$$

onde ΔU = queda de tensão

I = corrente na carga

f = frequência

C = capacitância do estágio

Na escolha dos diodos levamos em consideração especificações como a capacidade de trabalhar em altas frequências, o tempo de recuperação reverso T_{rr} , a tensão reversa e a corrente de pico I_{rr} . O diodo escolhido após algumas pesquisas foi o Z25UF do fabricante Voltage Multipliers, Inc. O

filtro RC na saída do dobrador de tensão, mostrado na figura 3, 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 testado para diversas cargas, e se mostrou eficiente atendendo plenamente as especificações do projeto em relação ao *ripple* e ruído na saída desta fonte. Este circuito permite um ajuste adicional na tensão de saída, necessário quando são alimentadas múltiplas PMTs. 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.

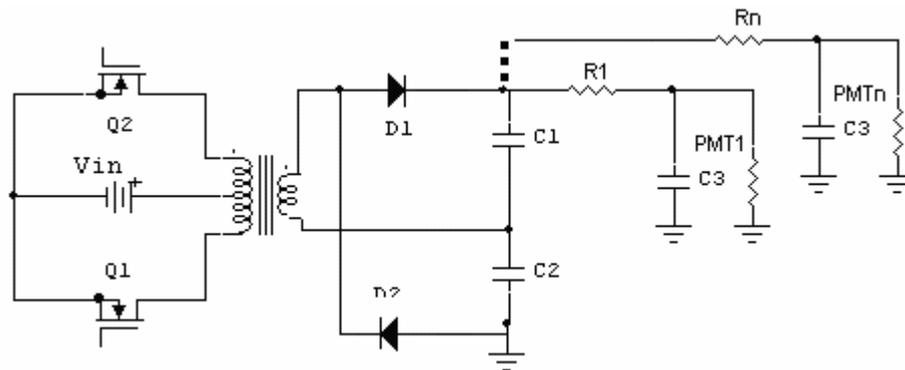


Figura 3 – Filtro RC na saída do dobrador com filtro capacitivo

4.4 MOSFETS

A escolha do transistor MOS baseou-se nos seguintes parâmetros: as características de saída, as capacitâncias parasitas, a capacitância da porta (*gate*) e a resistência de condução $R_{ds(on)}$. Foram testados diversos MOSFETs de fácil aquisição no mercado e o que melhor se adequou foi o IRFD110 que possui como características valores baixos de carga de acionamento (Q_G) e capacitância de porta (C_{iss}) pequena, para tornar o chaveamento mais rápido e dissipar menos potência. O valor da corrente de acionamento para o IRFD110 fica então na faixa dos 50mA, dada diretamente pelo UC3525.

4.5 Amostragem de tensão e erro

O C.I. UC3525 exige uma tensão positiva no pino 1 e como a saída da fonte de alta tensão é negativa, foi usado um inversor, conforme ilustra a figura 4. A rede divisora é composta de um conjunto 14 resistores de $10M\Omega$ em série perfazendo $140M\Omega$ e um *trimpot* de $1M\Omega$. O consumo desta rede para 1900 V é de $13,5\mu A$, o que representa 25,7mW.

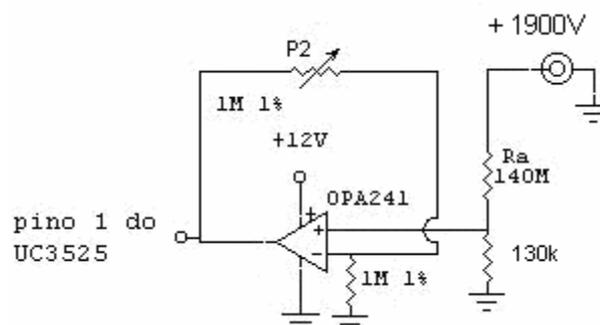


Figura 4 – Amplificador operacional e a rede divisora

O amplificador operacional escolhido foi o OPA241 por este possuir uma alta impedância de entrada, baixo consumo ($25\mu A$) e tem sido projetado para operar em circuitos alimentados por bateria.

5 Protótipo de +2500V e Resultados de Testes

Após terem sido concluídos testes preliminares nos protótipos, montados em placas de circuito impresso, fez-se a validação de todo o projeto realizado. Foram realizados diversos ensaios com diferentes cargas e tensões de entrada e são ainda apresentadas as principais formas de onda obtidas nos ensaios e a curva do rendimento. A figura 5 apresenta o diagrama esquemático da fonte de alta e a figura 6 a fotografia do protótipo montado em laboratório. O circuito usa componentes comuns e de baixo custo.

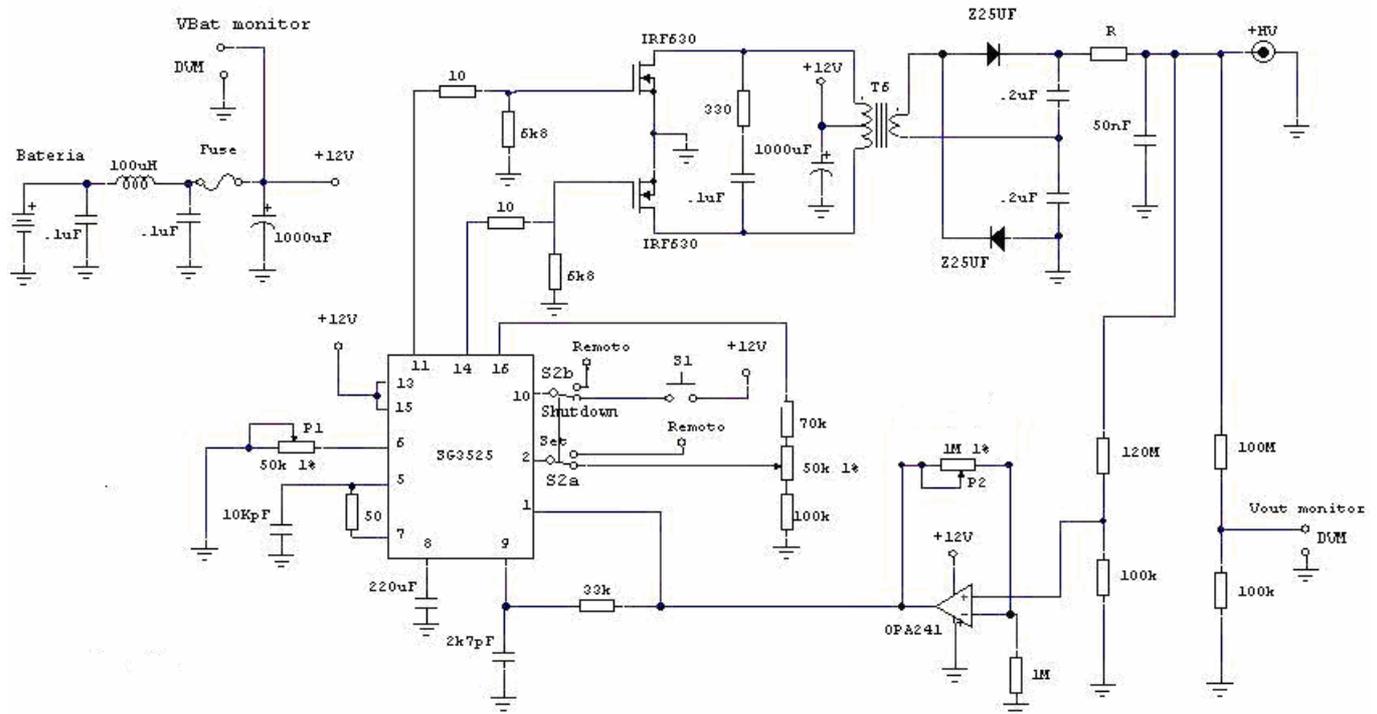


Figura 5 – Diagrama esquemático da fonte de alta tensão positiva.



Figura 6 – Foto do protótipo desenvolvido da fonte de alta tensão positiva.

Neste primeiro protótipo, os circuitos de proteção de sobrecorrente e sobretensão não foram implementados, devido à falta de alguns componentes no mercado. Também não houve uma preocupação maior com a otimização dos componentes podendo ser feito em um projeto futuro.

5.1 Ajustes Internos

O ajuste da tensão máxima de saída é feito através do *trimpot* da realimentação da tensão de saída P2 com o trimpot P1 ajustado no máximo, tal como se vê na figura 5. O controle da tensão de saída neste protótipo é feito através do potenciômetro do circuito P1.

5.2 Ensaios em Bancada

Os ensaios com a fonte de alta tensão foram realizados no Laboratório de Eletrônica do CBPF e os equipamentos utilizados nas medidas para caracterização da fonte de alta tensão foram os seguintes:

1. Fonte estabilizada de bancada (DAWER FSCC-3005D) que alimenta a fonte de alta tensão com 12 Volts, simulando a bateria.
2. Multímetro Digital (ANALOG M3525), para medida da corrente consumida pela fonte de alimentação que simula a bateria e que fornece os 12 Volts para a fonte de alta tensão;
3. Multímetro Digital (DIATRON MC-27) para medida da alta tensão de saída;
4. Osciloscópio digital com duplo traço (TEK TDS1012 100Mhz) para medição do *ripple*;

A bancada de testes é mostrada na figura 7 e seu diagrama de blocos na figura 8.



Figura 7 – Protótipo na bancada de testes.

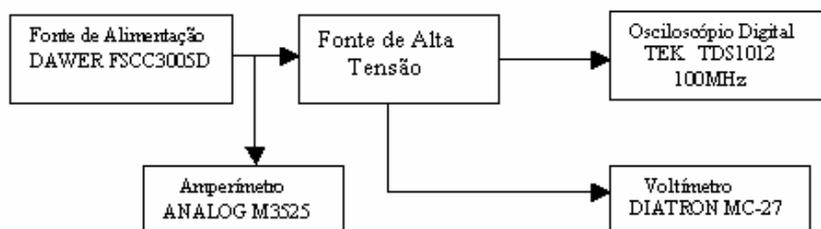


Figura 8 – Diagrama de blocos da bancada de testes.

Para as medidas de *ripple* e tensão de saída utilizamos o esquema da figura 9 em que foram adicionadas à fonte de alta tensão duas saídas: a primeira se destina a ligar o osciloscópio de modo a visualizar o *ripple*; e a outra saída serve para ler a alta tensão, com um valor 1000 vezes menor, utilizando para isso um divisor de tensão. O instrumento utilizado para medir a saída do divisor de tensão deve ter uma alta impedância para minimizar a possibilidade de introduzir erros nas medidas. O acréscimo deste circuito, fez com que a corrente de consumo aumentasse de $20\mu\text{A}$.

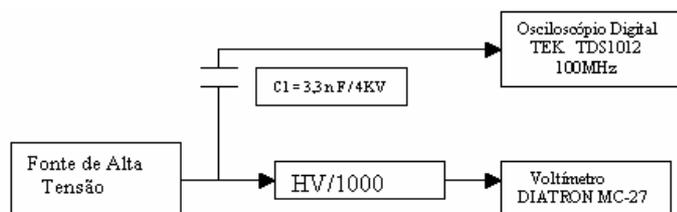


Figura 9 - Esquema para medir o ripple e a tensão de saída.

5.2.1 Ensaio com Carga Resistiva

O objetivo deste ensaio 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 . Estas medidas foram feitas com o tubo fotomultiplicador do tanque protótipo do Auger, que consome 2mA a 1900V e foram feitos estudos comparativos com a fonte de alta tensão local (Ortec, mod 556). Foram também feitas medidas com carga simulada por uma carga resistiva de $950\text{K}\Omega$ através da associação de resistores de 1Watt com tolerância de 10% . A regulação estática da linha, medida da capacidade da fonte de alimentação em manter uma tensão de saída constante quanto a variação da tensão da entrada foi testada com uma carga simulada de 2mA , fixadas a entrada em 12Volts e a saída em 1900Volts , e também em variações na tensão de entrada, respeitando um intervalo de 30minutos para cada leitura, após a mudança da tensão de entrada. Os resultados medidos no amperímetro, no monitor de tensão e no osciloscópio digital estão mostrados na tabela 1. Para tensões de alimentação de 11V à $13,5\text{V}$ o protótipo apresentou uma regulação de linha em torno de $0,1\%$, ou seja no limite da precisão dos medidores. Estes testes devem ser refeitos futuramente com medidores de maior precisão.

Alimentação (V)	Saída (V)	Corrente (mA)	Ripple (mVpp)	Ripple (mV)RMS	Fator de Ripple	Potência (W)
11	1898	480	11.6	4.1	$2,18 \times 10^{-6}$	5.28
11.5V	1899	452	13.6	5.5	$2,90 \times 10^{-6}$	5.17
12V	1900	376	23.6	2.7	$1,44 \times 10^{-6}$	4.51
13V	1902	340	24.0	4.1	$2,16 \times 10^{-6}$	4.42
13.5V	1903	340	27.2	3.0	$1,58 \times 10^{-6}$	4.59

Tabela 1 – Característica da fonte com a carga simulada para 2mA com variação da tensão de entrada.

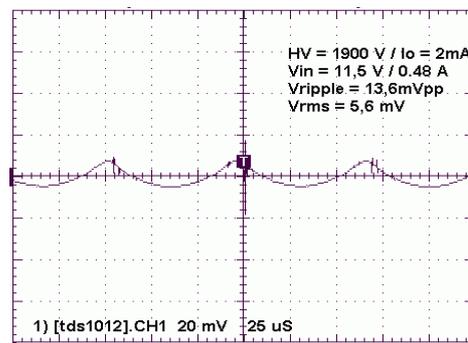


Figura 10 – Forma de onda do *ripple* para tensão de entrada de 11,5V e carga simulada de 2mA.

A figura 10 mostra as formas de onda de *ripple*. Para especificar o *ripple* ou a ondulação na tensão de saída da fonte usamos as especificações da fonte do detetor de superfície do Auger, onde é utilizado o fator de ondulação r (fator de *ripple*) dado pela fórmula (9):

$$r = V_{rms}/V_{saída} \quad (9)$$

A figura 11 mostra a forma de onda da saída de um dos canais do PWM, quando a tensão de alimentação da fonte varia de 10 Volts até 13 Volts. A largura do pulso tende a aumentar à medida que a tensão de entrada diminui (bateria descarregando), como previsto no projeto. A figura 12 mostra as formas de onda do PWM para alimentação de 13 Volts. Nos canais 1 e 3 vêem-se as formas de onda das duas saídas do PWM e no canal 2 a forma de onda de tensão aplicada nos enrolamentos primários do transformador (drenos dos MOSFETs).

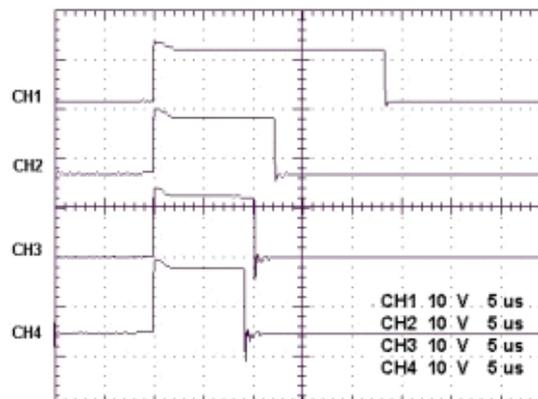


Figura 11: Entrada: 10V (ch1), 12V (ch2), 12,5V (ch3) e 13V (ch4)

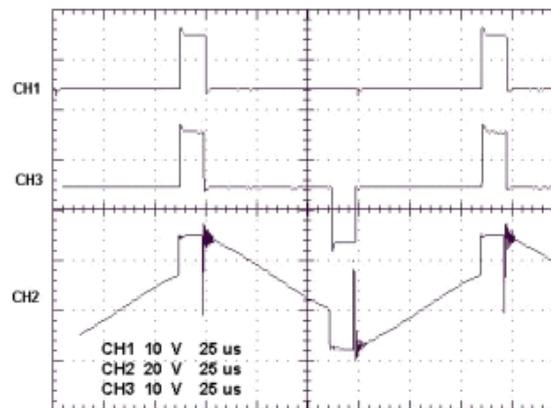


Figura 12: Entrada 13V, saída 1 (ch1), 2 (ch3) e primário do trafo (ch2).

A tabela 2 mostra o resultado dos testes de regulação estática para a variação de carga, mantendo a tensão da entrada constante em 12 V, ajustando a tensão na saída em 1900 V para uma corrente de carga de 2mA e medindo sua variação ao mudar a carga para 3,5mA. A figura 13 mostra a variação resultante da largura do pulso feita pelo PWM.

Corrente na Carga	Tensão de saída (V)
3,0mA	1896
2 mA	1900
1,5 mA	1904

Tabela 2 –Variação da alta tensão com a carga.

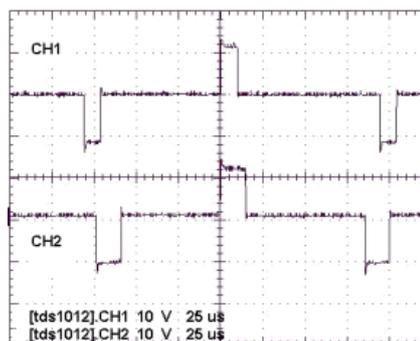


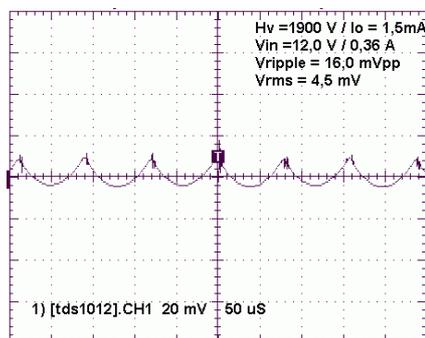
Figura 13 – Saída do PWM: para cargas de 1,5mA CH1) e CH2) 2mA.

5.2.2 Ensaio com a Base da Fotomultiplicadora

Neste ensaio utilizou-se uma base de fotomultiplicadora cuja corrente de consumo medido foi de 1,6 mA em 1900V. Os valores encontrados estão na tabela 3. A figura 14 ilustra o *ripple* da fonte.

Alimentação (V)	Saída (V)	Corrente (mA)	Ripple (mVpp)	Ripple (mV)RMS	Fator de Ripple	Potência (W)
11	1898	390	12,8	2.7	1.46×10^{-6}	4.29
11.5V	1899	370	13.6	3.8	2.01×10^{-6}	4.25
12V	1900	360	16.0	4.5	2.36×10^{-6}	4.32
13V	1902	350	26.0	9.8	5.12×10^{-6}	4.55
13.5V	1903	330	28.0	11.1	5.95×10^{-6}	4.45

Tabela 3 – Ensaio com a base da fotomultiplicadora.

Figura 14 – Forma de onda do *ripple* da fonte com a base do PMT alimentado.

Na figura 15 é apresentada a curva do rendimento da fonte de tensão para 4 correntes de carga diferentes e tensões de entrada e saída fixas em 12 Volts e 1900 Volts respectivamente. Observa-se que para a corrente de carga nominal de 2mA, o rendimento do conversor é de 84%. Na figura 16 é apresentado o gráfico do rendimento para diferentes tensões de entrada e tensão de saída constante de 1900 Volts. Observa-se que quando a tensão de entrada é mínima (11V), o rendimento da fonte cai com o aumento da potência, pois com o aumento da corrente há um aumento das perdas nos chaveadores, grampeadores e também nos enrolamentos do transformador.

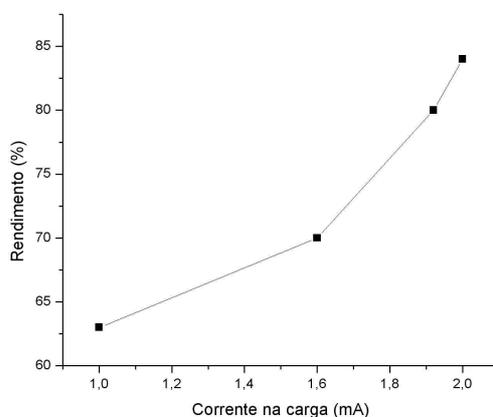


Figura 15 – Gráfico do rendimento para diferentes cargas.

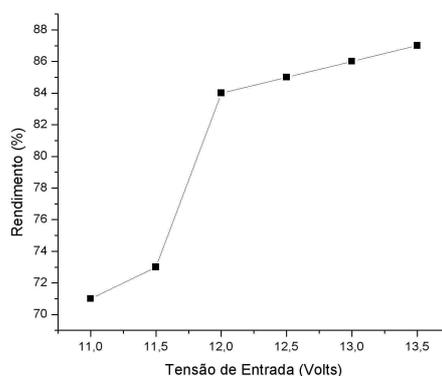


Figura 16 – Gráfico do rendimento para tensões de entrada diferentes.

5.2.3 Estabilidade ao Longo do Tempo

Para verificar a estabilidade da fonte, realizaram-se três medidas em diferentes laboratórios do CBPF. No primeiro ensaio, realizado no Laboratório de Sistemas de Detecção, alimentamos a fonte de alta com uma tensão constante de 12 Volts, proveniente da fonte de bancada e fixamos a tensão de saída em 1900V, que ficou conectada diretamente no PMT do tanque, nas condições reais de trabalho, pelo período de 96 horas. Observamos então, a resposta dinâmica da tensão de saída e a estabilidade da fonte, que se manteve em $\pm 0,1\%$ para uma temperatura constante de $25^{\circ}C$. A corrente de entrada foi monitorada e o consumo acompanhou a variação da fonte nos mesmos $\pm 0,1\%$. No segundo ensaio, agora no Laboratório de Eletrônica da CAT, observamos a regulação da corrente de saída. Neste ensaio, que teve duração de 28 horas, mantivemos a alimentação de entrada constante em 12 Volts, a tensão de saída em 1900 V e colocamos uma carga de $950K\Omega$ de modo a termos uma corrente de 2mA na saída, que foi monitorada por um amperímetro. A tensão de saída e a corrente de saída se mantiveram em $\pm 0,1\%$, a uma temperatura na faixa dos $21^{\circ}C$. Realizamos o terceiro teste de estabilidade no Laboratório de Instrumentação e Medidas, em que monitoramos a tensão de saída utilizando um multímetro digital, conectado ao microcomputador via interface GPIB e *software* LABVIEW, fazendo leitura a cada 10 segundos. A fonte permaneceu ligada por 14 horas e a tensão de saída se manteve em torno dos $\pm 0,1\%$. As figuras 17 e 18 ilustram os gráficos da tensão de saída em função do tempo para a primeira hora e ao longo das 14 horas de funcionamento respectivamente.

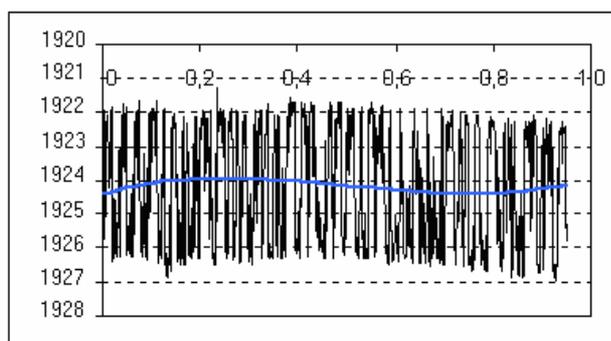


Figura 17 - Gráfico da estabilidade da fonte na primeira hora de funcionamento.

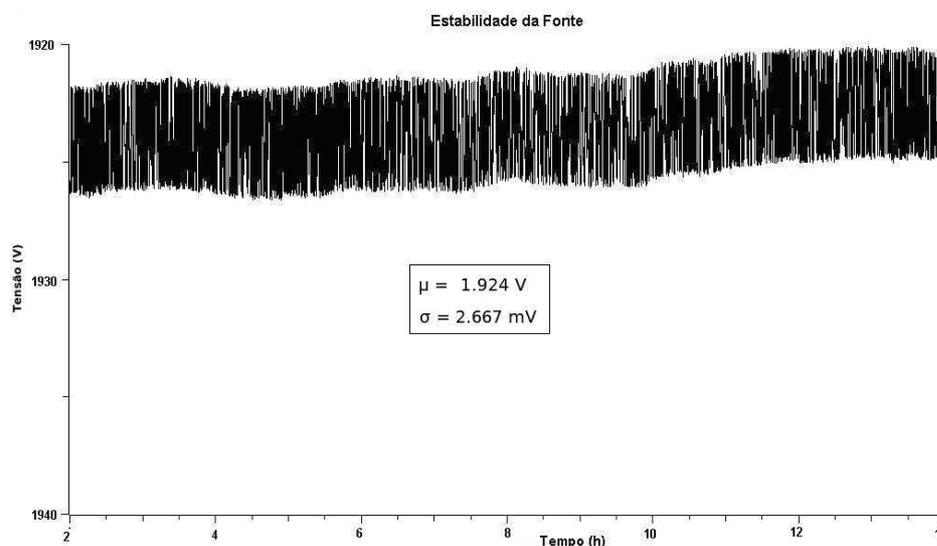


Figura 18 – Gráfico da estabilidade da fonte no período de 14 horas.

5.2.4 Autonomia

A equação abaixo, mostra como calcular o tempo de autonomia da bateria. Para o pior caso, que é quando a bateria estiver com 11 Volts (0,5A) de acordo com a tabela 1 e supondo que a bateria utilizada seja de 56 AMP*HR, temos então:

$$\begin{aligned} \text{Tempo} &= (AMP * HR) / \text{Corrente de Consumo da Fonte} & (10) \\ \text{Tempo} &= (56AMP * HR) / 0,5 A = 112 \text{ horas} \end{aligned}$$

6 Trabalhos em Andamento

A título de perspectiva, este projeto pode ser aprimorado com pequenas melhorias que podem ser feitas na fonte com o objetivo de explorar melhor as potencialidades do equipamento tornando-o mais versátil, como por exemplo: 1 - Criação da interface com o computador para o monitoramento das leituras das tensões e correntes de entrada e saída; 2 - Implementação digital de toda a lógica de modulação e controle, por meio de microcontroladores PIC e/ou DSP's. 3 - Optimização do *lay-out*, aperfeiçoando a imunidade a ruídos (EMI); 4 - Utilização de componentes em tecnologia SMD; 5 – Melhoria da estabilidade e do *ripple*.

7 Referências

- [1] The High Voltage Test Bench Characterization of Pre-Production Modules. M. Aglietta, W. Fulgione, F. Gomez, C.Morello,G. Navarra and C.Vigorito Nota interna Auger.GAP2003-021. <http://www.auger.org/reports/reports.html>, acessado em novembro de 2004.
- [2] Hamamatsu Photonics. Characteristics and Uses od Photomultipliers Tubes. Nota técnica no 79-57-03 (1982).
- [3] Philips Semiconductors. Switched Mode Power Supplies. Chapter 2, Power Semiconductor Applications application note Appchp2.pdf, <http://www.semiconductors.philips.com> , acessado em

Julho de 2004.

- [3] Design of Solid-State Power Supplies, 2nd edition – Eugene R.Hnatek; Van Nostrand Reinhold Company (1981).
- [4] Mohan, Underland and Hobbins. Power Electronics, Converters, Applications and Design. John Wiley and Sons, Inc. 2nd Edition (1995).
- [5] Ralph E. Locher. Introduction to Power Supplies. National Semiconductor, Application Note 556 (1988).
- [6] J. A. Pomídio. Apostila de Fontes Chaveadas. Universidade Estadual de Campinas. <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/>, acessado em Abril de 2004.
- [7] Switchmode Power Supply Reference Manual. ON Semiconductor Reference Manual. September (1999).
- [8] Lloyd H. Dixon, Jr. Switching Power Supply Topology Review, Unitrode- Application Notes. (2001), acessado no site de busca <http://www.google.com>. “slup067” em Julho, 2004.
- [9] Technotrafo Ind. e Com. Ltda. www.tecnotrafo.com.br
- [10] Jim Lux – High Voltage Experiments Handbook <http://home-earthlinl.net/~jimlux/hv/hvmain.htm>, acessado em Abril de 2004.
- [11] Voltage Multipliers, Inc, Visalia, CA. www.voltagemultipliers.com, acessado em Abril de 2004.
- [12] Spellman – High Voltage Electronics Corporation; Internet: www.spellmanhv.com.
- [13] Erickson, R. W. Fundamentals of Power Electronics. Chapman & Hall, N.Y., 1997.