

**CBPF - CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS**  
**Rio de Janeiro**

**Notas Técnicas**

**CBPF-NT-004/10**  
**dezembro 2010**

**Fonte de Alta Tensão Positiva para Fotomultiplicadoras**

Gabriel Luis Azzi & Mário Vaz

## ***Fonte de Alta Tensão Positiva para Fotomultiplicadoras***

**Gabriel Luis Azzi**      **gabriel@cbpf.br**

**Mário Vaz**              **mario@cbpf.br**

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

### **Resumo**

Este documento apresenta o projeto e o teste de um protótipo de fonte chaveada de alta tensão e alta frequência, de alta estabilidade e eficiência, desenvolvida para alimentar tubos fotomultiplicadores de alimentação positiva. A fonte é composta de transistores de chaveamento DMOS, um transformador de alta frequência e alta tensão, diodos rápidos de alta tensão, filtros RC e um controlador por modulação de largura de pulso - PWM. As características marcantes desta fonte são alta estabilidade ao longo do tempo em uma larga faixa de temperatura de operação, baixo ruído e flexibilidade de modificação em função da aplicação.

### **Abstract**

This document presents the design and test of a prototype for a switch mode high voltage power supply, operating in high frequency with high stability and efficiency, to bias photomultiplier tubes with positive cathode voltage. The power supply is build with DMOS transistors, high frequency and high voltage transformer, fast high voltage diodes, RC filters a pulse width modulation controller - PWM. It present high long term stability over a large temperature domain, low noise, being suitable for a large spectrum of applications.

**Setembro 2010**

## ÍNDICE

1. Introdução	3
2. Considerações de Projeto	3
3. Especificações de Projeto	4
4. Projeto e Implementação	4
4.1 Controlador por Largura de Pulso	4
4.2 Transformador	5
4.3 Multiplicador de Tensão	6
4.4 Transistores de Chaveamento	7
4.5 Amostragem e Amplificação	7
5. O Protótipo Desenvolvido	8
5.1 Ajustes Internos	9
5.2 Ensaio em Bancada	9
5.2.1 Ensaio com Carga Resistiva	10
5.2.2 Ensaio com a Base da Fotomultiplicadora	12
5.2.3 Estabilidade ao Longo do Tempo	13
5.2.4 Autonomia	14
6. Conclusão	14
7. Referências Bibliográficas	15

## 1. Introdução

Desenvolveu-se no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas uma fonte de alimentação de alta tensão utilizando transistores comutados em alta frequência sobre transformadores de alta frequência e alta tensão, que por sua vez alimentam retificadores a diodos com filtros capacitivos em estruturas multiplicadoras de tensão [1]. 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 por longo período de tempo. Esta fonte tem uma topologia em "push-pull" [2], e apresentou um bom rendimento, pequeno volume e peso, e pode ser alimentada por baterias, para portabilidade do equipamento.

A fonte de alta tensão pode ser implementada de três formas, dependendo dos componentes utilizados:

- Montadas diretamente no fotodetector;
- Modulares;
- De bancada.

O protótipo desenvolvido é do tipo modular, e fornece uma tensão constante entre 1500 a 2500V com corrente máxima de 3mA, sendo capaz de alimentar, por exemplo, até 20 tubos fotomultiplicadores R5912 da Hamamatsu [3], retirando cerca de 9 watts de energia de uma bateria ou fonte regulada de 12 Volts, como indicado na figura 1.

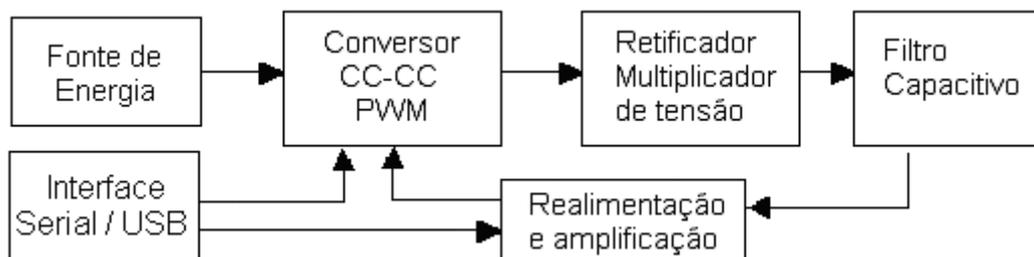


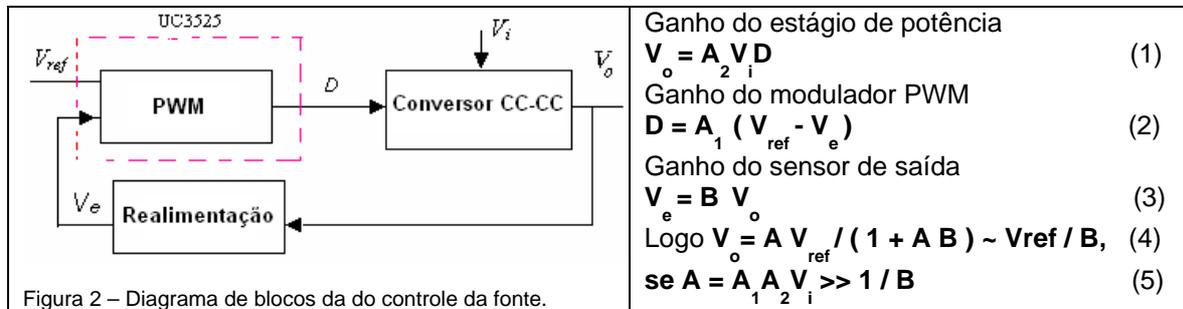
Figura 1 – Diagrama em blocos da fonte de alta tensão.

## 2. Considerações de projeto

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

- 1 - Conversor CC-CC [4] em Push-Pull e controle PWM (Pulse Width Modulation) [5,6];
- 2 - Transformador para alta frequência [7] ;
- 3 - Circuito duplicador de tensão responsável pela geração da alta tensão de saída [8];
- 4 - Circuito amostrador de tensão de saída e amplificador de erro [5];
- 5 - Fonte de energia selecionável entre uma bateria de 12 Volts ou rede elétrica monofásica;

Como mostra a figura 2 o conversor CC/CC provê, a partir de uma tensão contínua baixa e não regulada  $V_i$ , uma alta tensão de saída  $V_o$ , por conversão da tensão de alimentação em alta tensão alternada e retificada para alta tensão contínua. O controle da tensão de saída é feito por realimentação negativa da saída amostrada  $V_e$ , referida a uma tensão de controle  $V_{ref}$ , amostrando a saída para modular a largura de pulso (PWM) de acionamento dos transistores, gerando pulsos de período constante e largura variável  $D$ .



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 é desejável nas aplicações experimentais em campo, sem rede elétrica, como por exemplo nas estações detectoras do Projeto Auger [9] ou ainda onde a rede elétrica apresenta alto nível de ruído e flutuação de valor, problemas estes facilmente eliminados com o uso de baterias.

A topologia escolhida para o conversor CC/CC foi a Push-Pull, operando com retificação de onda completa, com transformadores com dimensões reduzidas e retificadores / filtros mais compactos, funciona com tensões de entrada bem reduzidas; porém 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 em detectores sensíveis à campos magnéticos como PMT [3].

### 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 +1500V até 2500V a até 3mA
- Máxima potência: 9 W
- Tensão de ondulação na saída menor que 25 mV à carga e tensão máximas
- Estabilidade melhor do que 0,2%
- Eficiência melhor do que 70%
- Faixa de temperatura de operação entre -15°C e + 35°C
- Blindagem para reduzir a interferência eletromagnética

### 4. Projeto e Implementação

#### 4.1 Controlador por largura de pulso

A escolha do circuito integrado UC3525 [10], da Fairchild Semiconductors, Texas Instrument ou UNITRODE, cujo esquema elétrico é mostrado na figura 3, 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:

- Fácil aquisição no mercado, com múltiplas fontes e fabricantes, e de baixo custo; Possui duas saídas complementares para MOSFETs em Push-Pull;
- Possui uma tensão de referência interna precisa de 5,1V (0,75%) e amplificador de erro integrado;

- Controle do tempo morto auto-ajustável para garantir condução complementar dos dispositivos de chaveamento, evitando destruição por auto-aquecimento;
- Ampla faixa de frequências de trabalho, de 100 Hz até 500 kHz;
- Pinagem para desligamento de emergência, proteção automática de sub-tensão ou sobre-tensão e excesso de corrente;
- Consumo na faixa de 15mA, e tensão de trabalho entre 8V e 35V;
- Aplicável a todas as configurações (Push-pull, Fly-back, Forward) [11];

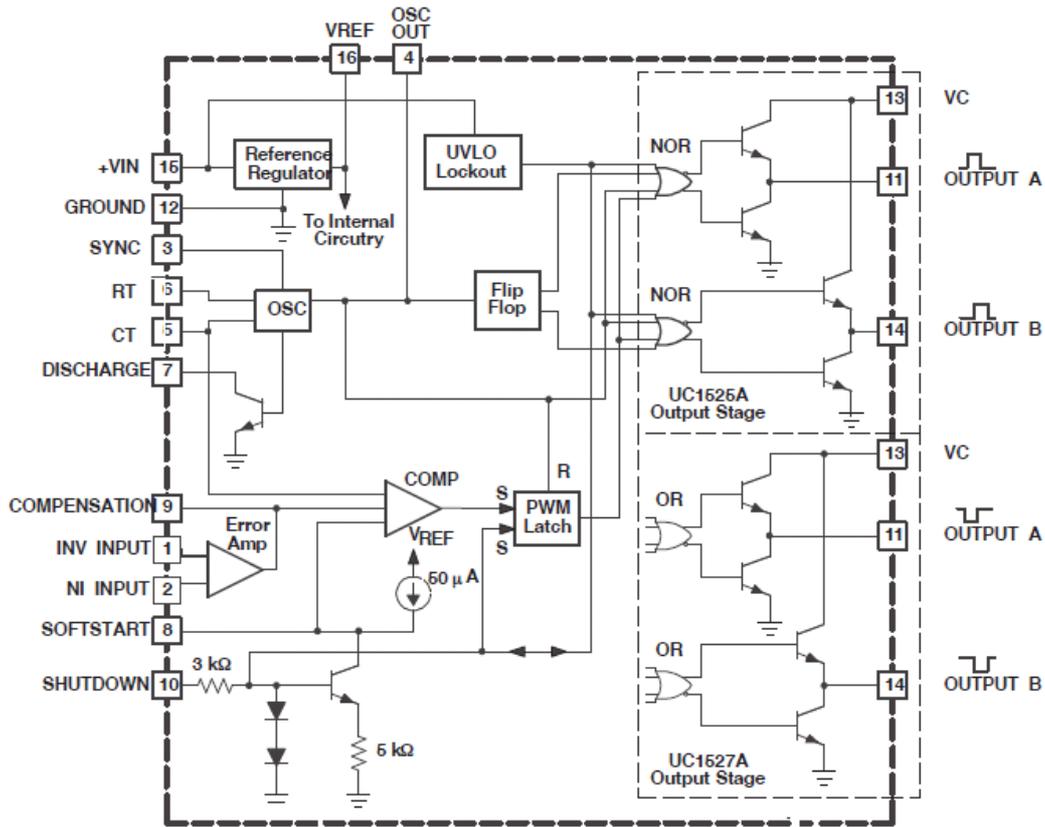


Figura 3 - Diagrama em blocos do UC3525

## 4.2 Transformador

O dimensionamento do número de espiras dos enrolamentos para fontes se inicia calculando o número de espiras do primário e do secundário pelas equações abaixo, da referência [12].

$$E_{pri} = 4 \cdot B \cdot N_{pri} \cdot F \cdot A_C \cdot 10^{-8} \text{ (onda quadrada)} \quad (6)$$

$$E_{pri} = 4,44 \cdot B \cdot N_{pri} \cdot F \cdot A_C \cdot 10^{-8} \text{ (onda senoidal)} \quad (7)$$

$$N_{sec} = (V_{sec} / V_{pri}) \cdot N_{pri} \quad (8)$$

$$I_{pri} = P_{pri} / E_{pri} \quad (9)$$

$$I_{sec} = P_{sec} / E_{sec} \quad (10)$$

Onde

- $E_{pri}$  = Tensão no primário aplicada (Volts)
- $B$  = Densidade de fluxo no núcleo (Gauss)
- $F$  = Frequência (Hz)
- $A_C$  = Área efetiva do núcleo (cm<sup>2</sup>)

$P_{pri}$  = 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 11 e 12 [12].

$$W_A \cdot A_C = \frac{K' \cdot P_{sec} \cdot 10^8}{B \cdot f_{sw}} \quad (11)$$

onde  $K' = C / 4 \cdot e \cdot K$  (12)

sendo :  $P_{sec}$  = Potência de saída

$e$  = Eficiência do transformador

$B$  = Densidade de fluxo magnético

$f_{sw}$  = Freqüência de operação

$C$  = Capacidade de corrente em  $\text{cm}^2 / \text{amp}$

Assume-se neste caso as seguintes condições operacionais:

$C = 5,07 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2 / \text{Amp}$  (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) aplicada em dados de fabricantes [7], pode-se definir o núcleo de ferrite a ser utilizado com base em catálogos de componentes [13].

Como o enrolamento de um transformador de alta tensão envolve alguns cuidados especiais como, por exemplo, o ótimo isolamento entre as camadas, confiamos a empresa Technotrafo Ind. e Com. Ltda [7] a tarefa do enrolamento do transformador (após consulta em que foi feita a verificação dos cálculos em relação as especificações do projeto do transformador).

### 4.3 Multiplicador de tensão

Os circuitos multiplicadores de tensão são basicamente constituídos por retificadores, que em função do número de estágios, conseguem retificar e multiplicar o valor da tensão de pico de entrada. São utilizados principalmente em circuitos em que se deseja altas tensões com baixas correntes. A queda na tensão de saída e a ondulação (ripple) da fonte podem ser estimados pelas equações 13 e 14 [14]:

$$\Delta U = \frac{I}{fC} \left( \frac{2}{3} n^3 + \frac{1}{3} n^2 - \frac{1}{6} \right) \quad (13)$$

$$E_{ripple} = [I_{carga} / (f \cdot C)] \cdot n \cdot [(n+1)/2] \quad (14)$$

onde  $\Delta U$  = queda de tensão

$I$  = corrente na carga

$f$  = frequência

$C$  = capacitância do estágio

$n$  = número de estágios

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 Multiplier [8].

O filtro RC na saída do dobrador de tensão, mostrado na figura 4, 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 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.

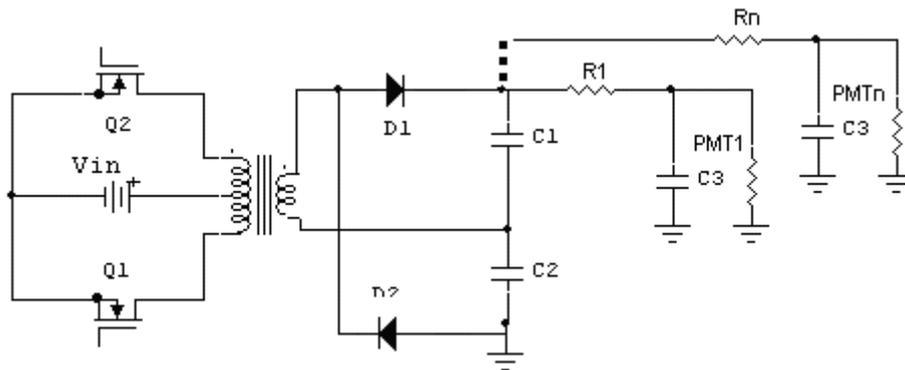


Figura 4 – Filtro RC na saída do dobrador com filtro capacitivo

### 4.4 Transistores de chaveamento

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  $R_{ds(on)}$  [15].

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 e amplificação

O C.I. UC3525 é controlado por uma tensão de erro positiva no pino 1. Como a tensão de saída da fonte de alta tensão é negativa, foi usado um amostrador amplificador inversor [16,17], conforme a figura 5. A rede divisora é composta de um conjunto 14 resistores de 10MΩ em série perfazendo 140MΩ e um trimpot de 1MΩ. O consumo desta rede para 1900 V é de 13,5μA, ou 25,7mW.

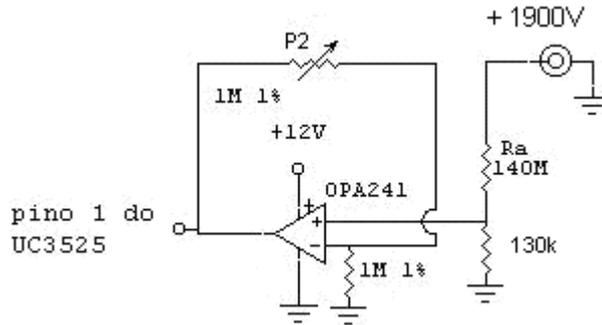


Figura 5 – Amplificador operacional e a rede divisora

O amplificador operacional escolhido foi o OPA241 por este possuir uma alta impedância de entrada, baixo consumo (25 $\mu$ A) e opera com alimentação simples, podendo ser alimentado com baterias.

## 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, voltado para ensaios de rendimento, estabilidade e ruído, com diferentes cargas e tensões de entrada, para observação da alta tensão produzida, bem como a tensão de alimentação da fonte e a temperatura ambiente.

As figuras 6 e 7 apresentam respectivamente o diagrama esquemático e uma fotografia do protótipo implementado para a fonte de alta tensão.

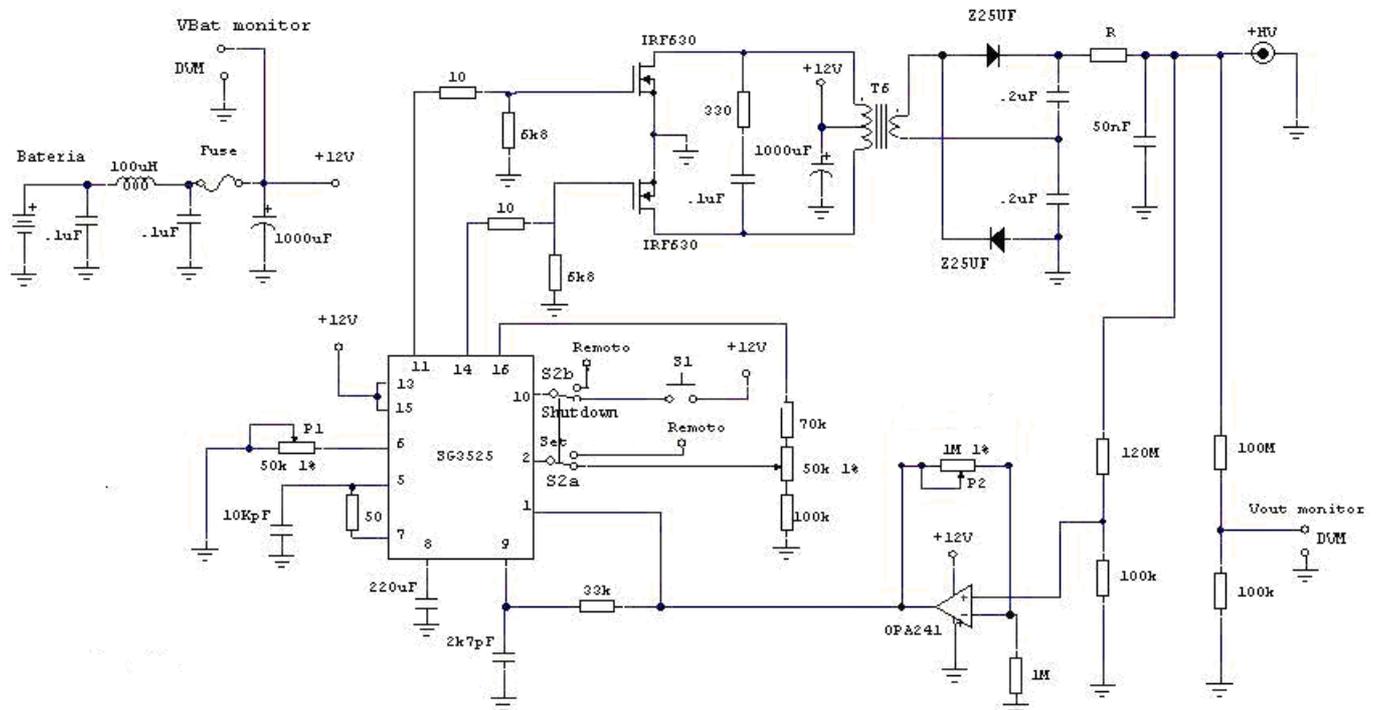


Figura 6 – Diagrama esquemático da fonte de alta tensão positiva.



Figura 7 – Foto do protótipo desenvolvido da fonte de alta tensão positiva.

Neste primeiro protótipo, não foram implementados os circuitos de proteção de sobrecorrente e sobretensão, assim como os circuitos de monitoração das tensões e correntes de entrada e de saída, por não serem necessários na fase inicial de teste.

## 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 6.

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:

- Fonte estabilizada de bancada ( DAWER FSCC-3005D) 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 que simula a bateria e que fornece os 12 Volts para a fonte de alta tensão;
- Multímetro Digital (DIATRON MC-27) de 4 ½ dígitos e 0,1% de precisão para medida da alta tensão de saída;
- Osciloscópio digital com duplo traço (TEK TDS1012 100MHz) para medição de ruído e ripple;

A bancada de testes é mostrada na figura 8 e seu diagrama de blocos na figura 9.

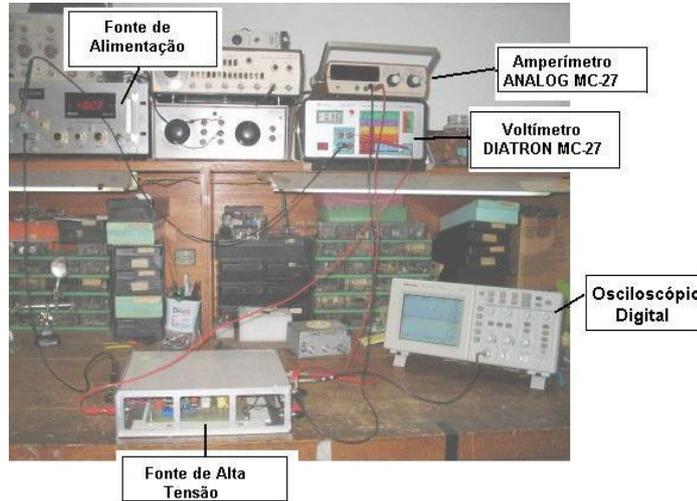


Figura 8 – Protótipo na bancada de testes.

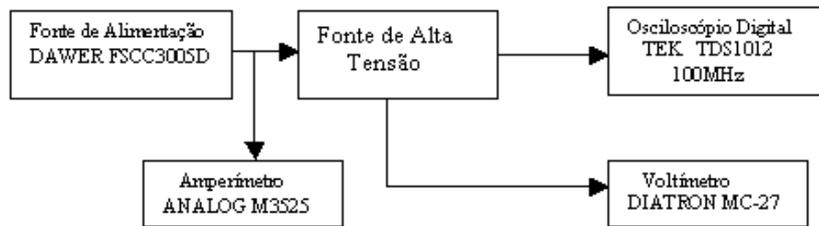


Figura 9 – Diagrama de blocos da bancada de testes

Para as medidas de ripple e tensão de saída utilizamos o esquema da figura 10 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  $20\mu\text{A}$  .

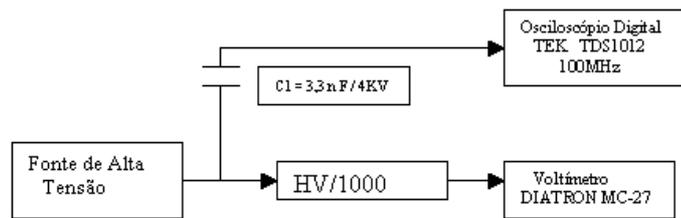


Figura 10 - Esquema para medir o ripple e a tensão de saída.

### 5.2.1 Ensaio com Carga Resistiva

Este ensaio verifica a regulação da tensão de saída para variações da carga, assim como rendimento da fonte pelo consumo de corrente de alimentação, e o ripple da tensão de saída, tudo na temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$ .

Estas medidas foram feitas alimentando-se com o protótipo um tubo fotomultiplicador que consome  $2\text{mA}$  a  $1900\text{V}$ , e com cargas resistivas até o limite inferior de  $950\text{K}\Omega$ , feitas com resistores de  $1\text{ Watt}$  com tolerância de  $10\%$ . Essas medidas foram feitas de modo comparativo com uma fonte de alta tensão comercial Ortec, modelo 556, operando em paralelo.

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, foi medida com uma carga de  $2\text{mA}$ , para uma tensão de alimentação de  $12\text{ Volts}$ , com a saída fixada em  $1900\text{ Volts}$ . Variou-se a tensão de alimentação de  $11\text{ a}$

13,5 volts, com intervalos de 30 minutos de espera para leitura. Os resultados das medidas estão mostrados na tabela 1, apresentando uma regulação de linha de 0,1%, ou seja no limite da precisão dos medidores utilizados.

<b>Tensão de alimentação ( V )</b>	<b>Corrente de alimentação ( mA )</b>	<b>Tensão de Saída ( V )</b>	<b>Tensão de Ripple (mV<sub>pp</sub>)</b>
11	480	1898	11.6
11.5	452	1899	13.6
12	376	1900	23.6
13	340	1902	24.0
13.5	340	1903	27.2

Tabela 1 – Característica da fonte com carga de 2mA.

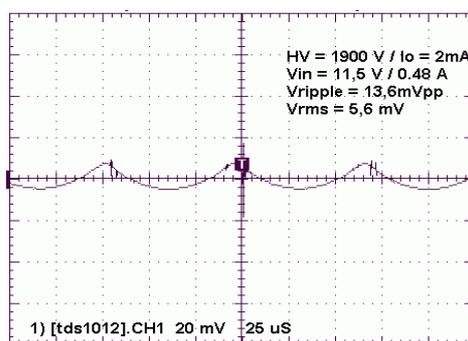


Figura 11 – Forma de onda do ripple para tensão de entrada de 11,5V e carga simulada de 2mA.

A figura 12 mostra a forma de onda de um dos canais do PWM, para a tensão de alimentação da fonte variando de 10 Volts até 13 Volts. A largura do pulso aumenta na medida que a tensão de entrada diminui (bateria descarregando), como previsto no projeto.

A figura 13 mostra as formas de onda do PWM para alimentação de 13 Volts. Nos canais 1 e 3 ve-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).

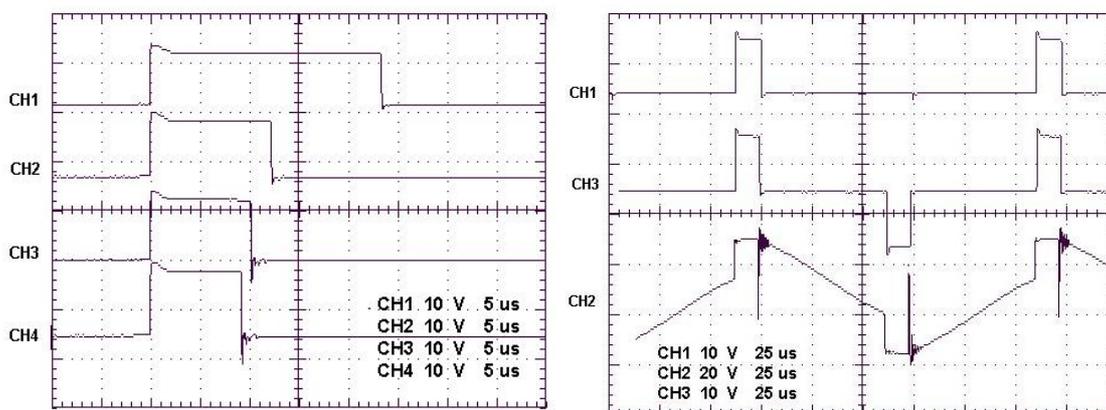


Figura 12:Entrada: 10V (ch1), 12V (ch2), 12,5V (ch3) e 13V (ch4) Figura 13: Entrada 13V, saída 1 (ch1), 2 (ch3) e primário do trafo (ch2).

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 3mA. A figura 14 mostra a variação resultante da largura do pulso feita pelo PWM, mostrando a operação deste dentro da faixa de operação normal.

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.

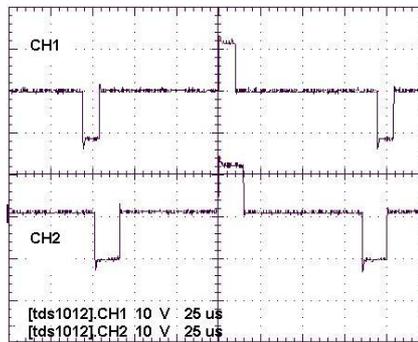


Figura 14 – Saída do PWM: para cargas de 1,5mA CH1) e CH2) 2mA.

### 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 15 ilustra o ripple da fonte, definido pelo fator:

$$r = V_{rms} / V_{saída} \tag{15}$$

Tensão de Alimentação (V)	Tensão de Saída (V)	Tensão de Ripple (mVpp)	Tensão de Ripple (mV)RMS	Fator de Ripple
11	1898	12,8	2.7	$1.46 \times 10^{-6}$
11.5V	1899	13.6	3.8	$2.01 \times 10^{-6}$
12V	1900	16.0	4.5	$2.36 \times 10^{-6}$
13V	1902	26.0	9.8	$5.12 \times 10^{-6}$
13.5V	1903	28.0	11.1	$5.95 \times 10^{-6}$

Tabela 3 – Ensaio com a base da fotomultiplicadora.

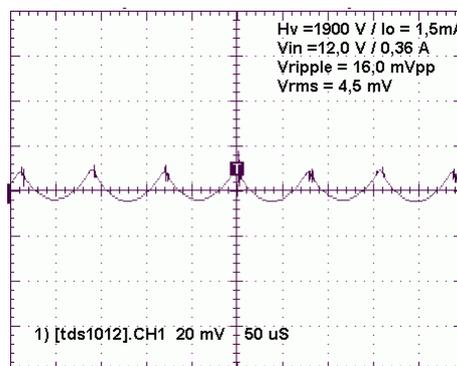
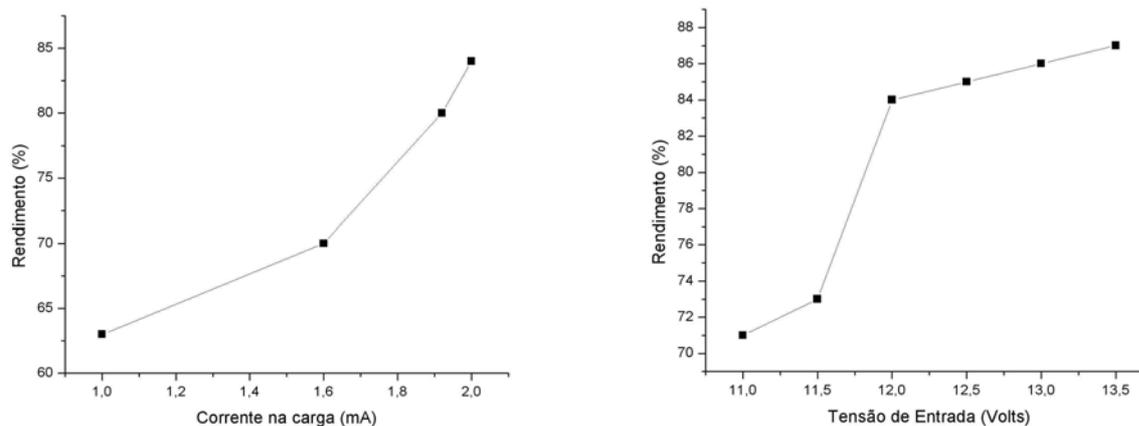


Figura 15 – Forma de onda do ripple da fonte com a base do PMT alimentado.

Na figura 16-a 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-b 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.



a) Carga variável, tensão de entrada fixada em 12V b) Tensão de entrada variável, carga fixada em 2 mA

Figura 16 – Rendimento em função da carga e da tensão de alimentação.

### 5.2.3 Estabilidade ao Longo do Tempo

Para verificar a estabilidade da fonte, realizou-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  $25^{\circ}\text{C}$ . 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  $950\text{K}\Omega$  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  $\pm 0,1\%$ , à uma temperatura na faixa dos  $21^{\circ}\text{C}$ .

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, com os gráficos da tensão de saída em função do tempo, respectivamente para a primeira hora e ao longo das 14 horas de funcionamento neste teste, mostram a estabilidade de  $0,1\%$  deste protótipo de fonte.

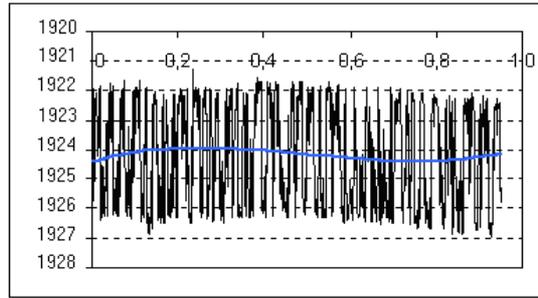


Figura 17 - Gráfico da estabilidade da fonte na primeira hora de funcionamento.

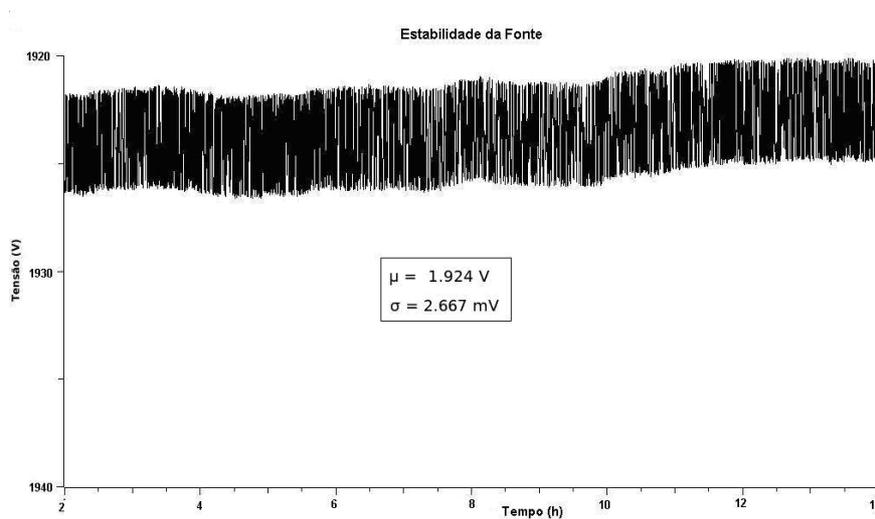


Figura 18 – Gráfico da estabilidade da fonte no período de 14 horas.

### 5.2.4 Autonomia

A equação para calcular o tempo de autonomia com bateria de 56 AMP\*HR é convencional :

$$\text{Tempo} = (\text{AMP*HR}) / \text{Corrente de Consumo da Fonte} \tag{16}$$

$$\text{Tempo} = (56 \text{ AMP*HR}) / 0,5 \text{ A} = 112 \text{ horas}$$

## 6. Conclusão

Foram apresentados os estudos, o desenvolvimento, a construção e os resultados preliminares de uma fonte de alta tensão desenvolvida no Laboratório de Eletrônica do CBPF e que alcançou plenamente seus objetivos.

Foi projetado e construído um protótipo, cujas medidas de caracterização foram apresentadas juntamente com os resultados experimentais, que mostram que a fonte atende as especificações de projeto e está perfeitamente qualificada para alimentar tubos fotomultiplicadores.

As medidas de caracterização realizadas com cargas simuladas e com a base do tubo fotomultiplicador permitiram determinar as características principais do conversor: baixo ruído, alta estabilidade, baixo consumo, excelente regulação e um rendimento global de cerca de  $\approx 84\%$ . Contribuiu muito para isso, o uso do C.I. dedicado para conversores. Além disso, a portabilidade da fonte garante a aplicação em experimentos de campo.

A complexidade do circuito ficou restrita ao mínimo indispensável, onde utilizou-se a maioria dos componentes populares e de baixo custo, de modo que a manutenção do equipamento seja também 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.

## 7. Referências Bibliográficas

- [1] 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.
- [2] Mohan, Underland and Hobbins. Power Electronics, Converters, Applications and Design. John Wiley and Sons, Inc. 2<sup>nd</sup> Edition (1995).
- [3] Hamamatsu Photonics. Characteristics and Uses of Photomultiplier Tubes. Nota técnica n° 79-57-03 (1982).
- [4] Design of Solid-State Power Supplies, 2<sup>nd</sup> edition – Eugene R.Hnatek; Van Nostrand Reinhold Company (1981)
- [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.  
URL: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor>. Visualizado em 27/09/2010.
- [7] Technotrafo Ind. e Com. Ltda. URL: [www.tecnotrafo.com.br](http://www.tecnotrafo.com.br). Visualizado em 27/09/2010.
- [8] Voltage Multipliers, Inc, Visalia, CA. URL: [www.voltagemultipliers.com](http://www.voltagemultipliers.com). Visualizado em 27/09/2010.
- [9] Pierre Auger Design Report, Fermilab (1997), URL: [www.auger.org/admin/DesignReport](http://www.auger.org/admin/DesignReport). Visualizado em 27/09/2010
- [10] URL:<http://www.chipdocs.com/datasheets/datasheet-pdf/Fairchild-Semiconductor/UC3525.html>, acesso 27/09/2010
- [11] Switchmode Power Supply Reference Manual - ON Semiconductor Reference Manual. September (1999)
- [12] McLyman, Colonel W.T. Transformer and Inductor Design Handbook. Dekker. N.Y, (1978). Supplies, (2000).
- [13] Magnetics Inc. Inverter Transformer Core Design and Material Selection, (1999), URL: [www.mag-inc.com/pdf/twc-s3.pdf](http://www.mag-inc.com/pdf/twc-s3.pdf). Visualizado em 27/03/2008.
- [14] Jim Lux – High Voltage Experiments Handbook. URL: [Http://home-earthlink.net/~jimlux/hv/hvmain.htm](http://home-earthlink.net/~jimlux/hv/hvmain.htm). Visualizado em 27/09/2010.

[15] Alan Elbanhawy. A Simple Guide to Select Power MOSFETs. Revista Eletrônica EDN November 22, 2001.

URL: <http://www.edn.com/article/CA181947.html> , visualizado em 27/09/2010.

[16] Sedra/Smith. Microelectronic Circuits. Oxford University, 4th Edition (1998).

[17] Millman-Halkias. Integrated Electronics – Mc Graw-Hill (1972).