



Estudo comparativo de fontes de alta-tensão para o detector central do Projeto Neutrinos Angra

G. P. Guedes, P. C. M. A. Farias*

Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS

A. F. Barbosa

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CBPF

Resumo

Este documento apresenta um estudo sobre as fontes de alta-tensão candidatas à utilização no detector central do Projeto Neutrinos Angra. São mostrados os resultados experimentais da medida de *ripple* de duas fontes modulares, além de uma comparação das características técnicas e operacionais de alguns sistemas de alta-tensão.

*Corresponding author, e-mail: pcmaf@uefs.br

1 Introdução

Detectores de neutrinos normalmente demandam uma quantidade significativa de tubos fotomultiplicadores (*Photomultiplier Tube* - PMT) para melhor coleta dos fótons resultantes da interação da partícula com o alvo. Como consequência, torna-se necessário dispor de fontes de alta-tensão estáveis e em quantidade suficiente para polarizar estes dispositivos.

Existem atualmente muitas opções de fontes de alta-tensão disponíveis para uso com PMTs. Os mais usados são, em geral, módulos de eletrônica nuclear oferecidos em diversos modelos pelos fabricantes para bastidores NIM (Ortec, LeCroy, Caen), ou que usam bastidores próprios, como o modelo A1535S da Caen [1], que necessita do bastidor SY1527 (ou SY1527LC). Outro exemplo é a série VISyN da Universal Voltronics, cujos módulos de alta-tensão são conectados à sua própria interface de controle [2].

Os módulos para os bastidores NIM são flexíveis, mas em geral possuem poucos canais, e não permitem o controle e monitoramento centralizado das linhas de alta-tensão. Esta característica introduz um esforço adicional de cabos, conectores, interfaces para conversão analógico-digital (A/D) e programação, que demandam tempo e dinheiro. Outra desvantagem é que a quantidade máxima de linhas de alta-tensão por bastidor NIM fica limitada a um número relativamente reduzido de canais (máximo de aproximadamente 50), considerando que os experimentos em altas energias em geral demandam centenas de canais independentes.

Por outro lado, as fontes de alta-tensão com bastidores dedicados podem suportar algumas centenas de módulos com comando e monitoramento centralizados por um processador embarcado. Estes bastidores se comunicam com um computador externo via uma linha de comunicação padronizada (RS232, USB, Ethernet, CAN) através da qual trocam informações sobre as voltagens ajustadas, correntes de consumo em tempo real, bem como os seus valores máximos permitidos. Tudo isso sem necessitar nenhum dispositivo externo (ADCs, DACs, cabos de sinais, etc). Esta solução integrada tem como maior desvantagem o custo.

A proposta inicial do Projeto Neutrinos Angra para o sistema da alta-tensão integra as duas abordagens, com desenvolvimento de um módulo padrão NIM equipado com até quatro unidades de alta-tensão, um microcontrolador embarcado para ajuste e monitoramento da tensão de saída e da corrente em cada instante e conexão em rede CAN com os demais módulos, comandados por um sistema supervisor [3]. Este trabalho mostra alguns resultados experimentais que podem contribuir com o desenvolvimento da proposta original, além de expandir o leque de soluções, apresentando um estudo comparativo com outras opções disponíveis comercialmente.

2 Materiais e métodos

Neste estudo foram avaliados os seguintes modelos de fonte de alta-tensão:

1. O módulo positivo de alta-tensão CCP12202101C2C, fabricado pela empresa francesa SDS [4];
2. A fonte positiva desenvolvida no CBPF [5].

O parâmetro usado para avaliar a qualidade do módulo foi a oscilação (*ripple*) na tensão de saída, medida com um circuito desacoplador que disponibiliza para leitura o sinal AC em torno da alta-tensão (Figura 1). O capacitor de 2,2nF permite a passagem apenas do sinal alternado e os diodos cruzados (diodos de sinal 1N4148) têm a função de limitar a amplitude do sinal de saída, principalmente para picos espúrios. Este circuito foi ligado diretamente às saídas dos canais de alta-voltagem

dos módulos avaliados e os sinais de *ripple* foram medidos com um osciloscópio de 100MHz de banda passante, onde se pôde registrar a amplitude e estrutura temporal deste ruído.

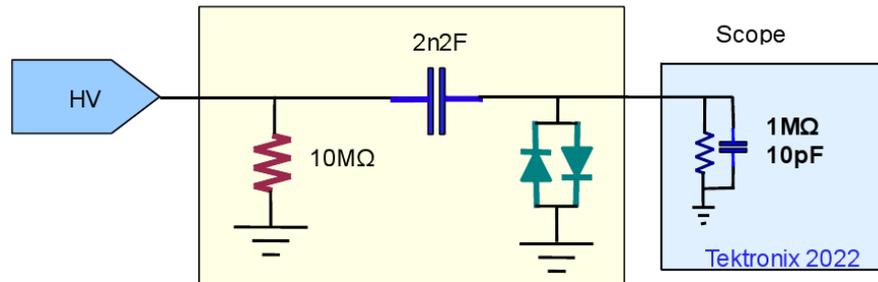


Figura 1: Circuito desacoplador para medidas de *ripple* das fontes de alta-tensão. O circuito da direita (*scope*) representa as características de entrada do osciloscópio.

Para facilitar os testes com o módulo da SDS, comercializado atualmente pela Ultravolt [4] sob o código 2D15-P4 (Figura 2), foi elaborada uma placa de circuito impresso para instalação de dois conectores: um DB9 (DB9F-90G) por onde pode-se alimentar o circuito (12V), controlar a alta-tensão (2.5V/2kV), monitorar a corrente (5V/100uA) e a tensão efetiva de saída (5V/100uA). No extremo oposto ao primeiro foi colocado um conector SHV, para a saída de alta-tensão.

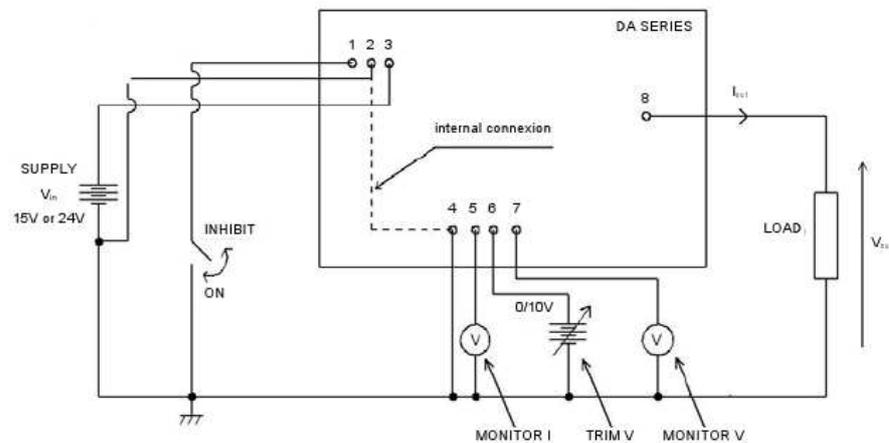


Figura 2: Módulo de alta-tensão da SDS com circuitos periféricos de alimentação, controle e monitoramento.

O circuito foi alimentado com 12V e a alta-tensão ajustada para 500V e para 1000V, quando foi medido o *ripple* para cada um dos ajustes. Embora o fabricante não especifique, foi adicionado para comparação um capacitor de 6,6nF em paralelo com o conector SHV, que funciona como um filtro na saída de alta-tensão. Foram registrados os sinais de *ripple* com e sem este filtro.

A fonte de alta-tensão do CBPF foi fornecida pelos seus desenvolvedores e detalhes de seu projeto podem ser encontrados na referênci [5]. Este módulo permite o ajuste da tensão de saída com um sinal analógico de entrada (0-10V/400-2000V) ou via um potenciômetro instalado no painel frontal de um módulo NIM usado para testes, de onde são retiradas as alimentações necessárias. No painel frontal também estão a chave liga-desliga, o conector SHV (saída da alta-tensão) e um seletor permite escolher qual entrada se deseja considerar no controle da tensão de saída: remoto (conector Lemo)

ou local (potenciômetro multivoltas com escala). Nestes testes não foram adicionados capacitores externos pois a fonte de alta-tensão já os tem incorporado no próprio circuito.

3 Resultados

3.1 Testes com o módulo de alta-tensão modelo CCP12202101C2C (SDS).

A Figura 3 mostra os registros do *ripple* sobre a alta-tensão do módulo SDS, operando em 500V, sozinho e com os capacitores de filtro. Sem o filtro, o ruído tem uma amplitude de aproximadamente 25mVpp, caindo para menos de 10mVpp após filtragem.

Uma estrutura temporal no ruído com período de $10,5\mu\text{s}$ é visível na Figura 4, onde o sinal é mostrado com uma base de tempo mais larga ($2,5\mu\text{s}/\text{div}$). Pode-se verificar, comparando os registros da Figura 4 (a) e da Figura 5 (a) que o período deste ruído não é alterado com o aumento da tensão de saída. O mesmo acontece com os valores máximos, com ou sem o filtro capacitivo.

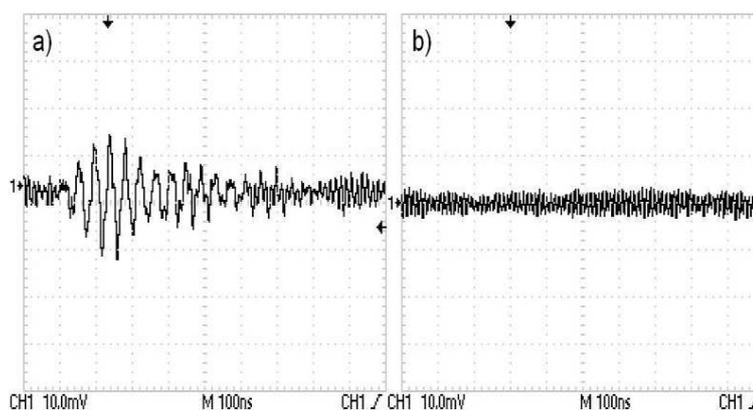


Figura 3: *Ripple* do módulo SDS ajustado para 500V; a) 25mVpp, sem o capacitor de filtro e b) $< 10\text{mVpp}$ com capacitor de filtragem de 6,6nF.

3.2 Testes com a fonte desenvolvida no CBPF.

Foram medidos e registrados o *ripple* para 500V, 1kV e 1,5kV e os resultados são mostrados nas figuras 6, 7 e 8. A amplitude do ruído aumenta com o aumento da tensão de saída, partindo de 300mVpp, quando operada em 500V, até um valor da ordem de 700mVpp, com 1kV, onde se mantém com pouca variação até 1,5kV. Claramente, a estrutura temporal do ruído também muda com a tensão de saída, o que deve estar associado aos mecanismos de chaveamentos internos da fonte, e varia de 1,2ms (500V) a 2,3ms (1,5kV).

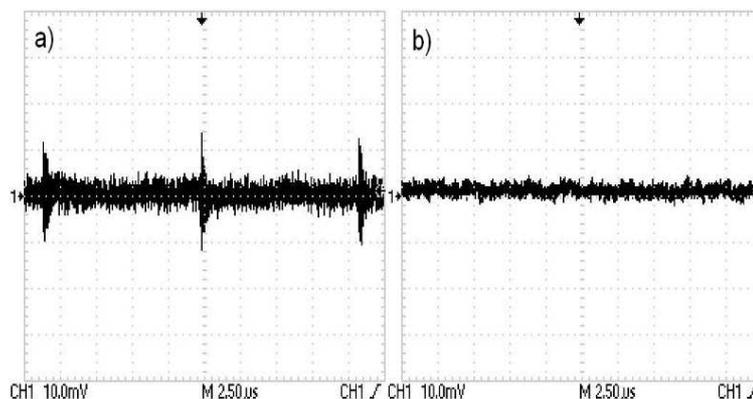


Figura 4: Ruído medido com o módulo SDS operando em 500V com base de tempo diferente (2,5us/div); a) sem o capacitor de filtro e b) com capacitor de filtragem de 6,6nF.

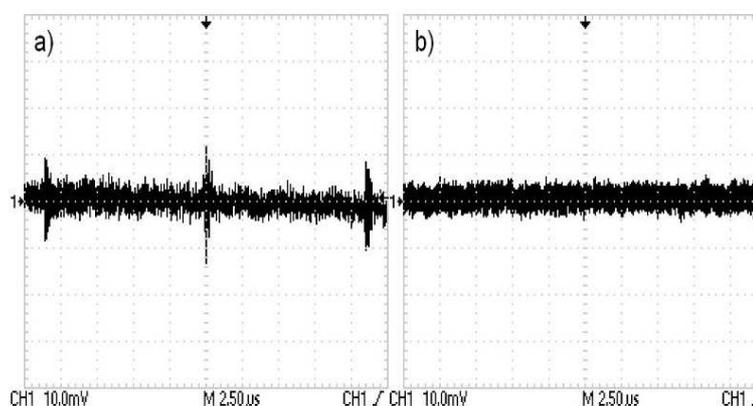


Figura 5: Ruído registrado com o módulo SDS operando em 1kV exibido com base de tempo de 2,5us/div mostrado sem filtro capacitivo (a) com filtro capacitivo (b).

4 Discussões

O valor de *ripple* previsto pelo fabricante do módulo SDS é de 0,002%, o que significa 10mVpp para 500V, ou 20mV para 1kV. O valor medido sem o filtro capacitivo, de 25mVpp para uma tensão nominal de 1kV, ficou um pouco acima do indicado. Entretanto, a inclusão do capacitor de 6,6nF reduziu este valor para menos de 10mVpp.

Os valores medidos para a fonte da SDS são consideravelmente menores do que aqueles medidos com a fonte fabricada no CBPF, cuja amplitude medida foi de 300mVpp aos 500V, e 700mVpp quando operada a 1kV, resultando em um ripple médio de 0,065%. Este ruído propaga-se pelo fototubo e pode ser medido no sinal do anodo, como está representado na Figura 9, que mostra o sinal

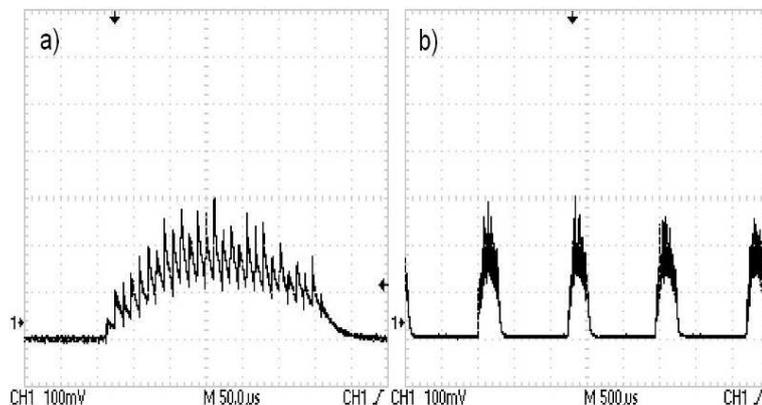


Figura 6: Registro do ruído com a fonte ajustada para 500V; (a) detalhe da estrutura principal, com amplitude de 320mVpp; (b) estrutura temporal do ruído com período de 1,2ms.

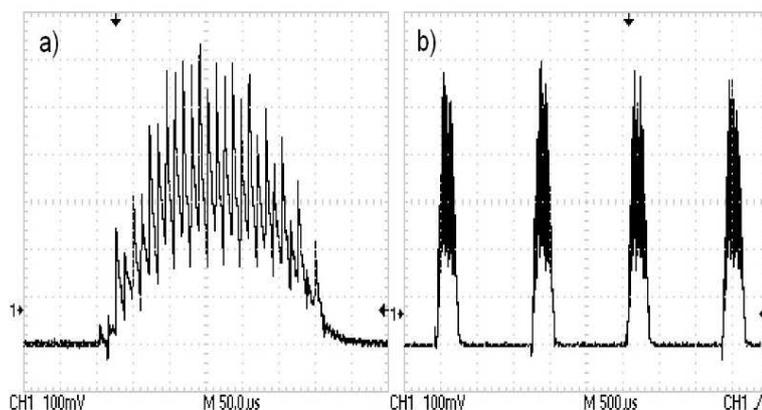


Figura 7: Registro do ruído com a fonte ajustada para 1000V; (a) detalhe da estrutura principal, com amplitude de 650mVpp; (b) estrutura temporal do ruído com período de 1,2ms..

possivelmente devido a um fotoelétron (*Single Photon Electron - SPE*) mascarado por um sinal de ruído de mesma ordem de grandeza.

O módulo da SDS possui todos os recursos desejáveis de monitoramento, baixo ruído e tamanho reduzido, no entanto o seu custo é elevado: USD 500,00 por unidade. A fonte desenvolvida no CBPF possui um custo dez vezes menor (estima-se USD 50,00 por canal), mas apresenta um nível alto de ruído, mesmo com filtragem, o que inviabiliza sua utilização no detector central. Em ambos os casos ainda seria necessário um investimento para a integração, agrupando os vários canais em um único módulo, mecanicamente projetado para ser acondicionado no bastidor NIM. Além disso, seria necessária a introdução de um microcontrolador embarcado, para controle, aquisição de dados e comunicação com o sistema supervisor. Estes elementos elevariam o seu custo e demandariam tempo

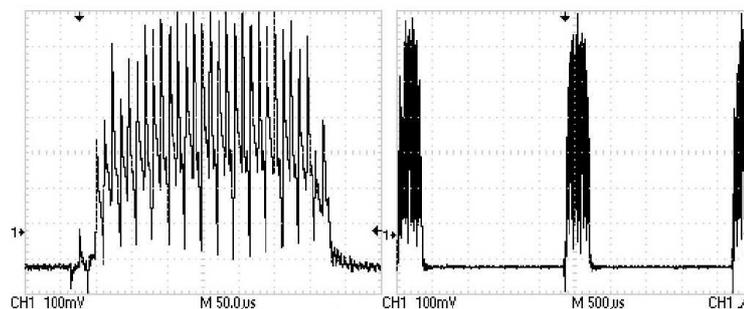


Figura 8: Registro do ruído com a fonte ajustada para 1500V; (a) detalhe da estrutura principal, com amplitude $> 700\text{mVpp}$; (b) estrutura temporal do ruído com período de 2,3ms.

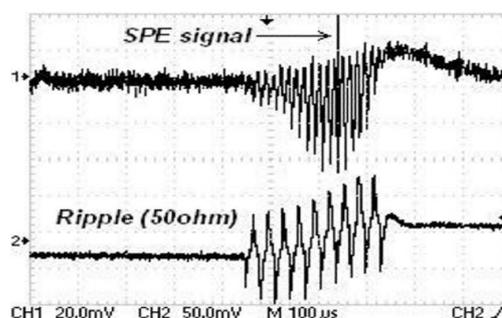


Figura 9: Registro dos sinais do osciloscópio. No canal 1 (superior) o sinal de anodo da PMT e, no canal 2 (inferior), o ruído medido no sinal do monitor de alta-tensão da fonte, ambos com terminação de 50Ω .

adicional de desenvolvimento.

Uma possibilidade alternativa seria a adoção de um sistema comercial, com bastidores dedicados que poderiam disponibilizar centenas de canais de alta-tensão, com processamento local para controle e monitoramento, gerenciamento remoto via um canal de comunicação (RS232, Arcnet, Ethernet ou CAN). Foram avaliados os sistemas fornecidos pela CAEN [1] (*Mainframe* SY1527LC e módulos A1535S) e pela série VISyN da Universal Voltronics [2] (*Mainframe* 1458 e módulos 1461P). A vantagem, neste caso, seria a pronta disponibilidade dos equipamentos e a possibilidade de uso de rotinas e procedimentos desenvolvidos para outros experimentos já em andamento, que utilizam estes módulos (Super-Kamiokande, KamLand, Double Chooz). Entretanto, como já foi descrito acima, os dois sistemas demandam a utilização de um bastidor próprio. Esta característica técnica dos produtos tem um impacto significativo no custo, que deve ser cuidadosamente avaliado.

O sistema da Universal Voltronics especificado para alimentar até 72 PMTs é composto pelo bastidor (*mainframe*) 1458, que custa USD 15.550,00 (considerando o modelo mais caro, de maior potência), e por 6 módulos, com 12 canais cada, a um custo unitário de USD 3.765,00. O custo total é de USD 38.140,00, que corresponde USD 529,72/canal. Cerca de 41% deste custo é representado pelo bastidor dedicado. A proposta da CAEN contemplava um bastidor SY1527LC (USD 8.374,00) e 3 módulos A1535SP, com 24 canais de alta-tensão cada, com o custo unitário de USD 7.100,00. O valor final ficou em USD 29.674,00 (USD 412,14/canal). Neste caso, o bastidor representou 28% do custo total. A Tabela 1 mostra as principais características dos sistemas de alta-tensão avaliados.

Tabela 1: Tabela comparativa.

Sistema	HV max	I_{out} max	Ripple	Monitor	Composição	Conectividade	Custo (USD/canal)
SDS	2kV	2mA	0,001%*	Vout, Iout	Módulos padrão NIM compostos por 4 canais de HV e 1 sistema microcontrolado (18 unidades)	CAN, RS232	> 500,00
CBPF	2kV	-	0,065%	-	Módulo + sistema microcontrolado	CAN, RS232	> 50,00
CAEN	3,5kV	3mA	30mV (0,0008%)	Vout, Iout	1 bastidor dedicado e 3 módulos com 24 canais de HV cada	RS232, Ethernet, CAN, HS-CAENET	412,14
Universal Voltronics	3kV	2,5mA	<100mV (0,003%)	Vout, Iout	1 bastidor dedicado e 6 módulos com 12 canais de HV cada	RS232, Arcnet, Ethernet	529,72

*Tabela 1 - Com capacitor de filtragem.

Referências

- [1] <http://www.caen.it/nuclear/syproduct.php?mod=SY1527LC>. Visited 27/09/2009.
- [2] http://www.voltronics.com/products/NEW_VISyN/index.php. Visited 27/09/2009.
- [3] P. C. M. A. Farias, G. P. Guedes, V. L. Filardi, I. M. Pepe, *Front-end electronics integration for the Angra Project central detector*, AngraNote **002-2009**, 2007.
- [4] <http://www.ultravolt.com>. Visited 27/09/2009.
- [5] G. L. Azzi, M. Vaz, *Fonte de Alta Tensão Positiva para PMTs*, AngraNote **011-2009**, 2009.