

INTEGRAÇÃO E MONTAGEM DE UMA FONTE MODULADORA DE PULSO DE 10KV/5 A/10 μ s A PARTIR DE UM PROTÓTIPO EXPERIMENTAL

**RELATÓRIO FINAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Elias Oliveira Paulo da Silva (UNIP, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: elias.oliveira37@gmail.com

José Osvaldo Rossi (LAC/CTE/INPE, Orientador)

E-mail: rossi931@hotmail.com

Julho de 2016

1– Introdução e Objetivos

Este relatório descreve as atividades desenvolvidas no programa de bolsas de Iniciação Científica “IC” no Laboratório Associado de Plasma “LAP” que teve início em Agosto de 2014 no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais “INPE”. Objetivo principal do projeto é desenvolver um pulsador compacto que possa atingir tensões de 10 kV ou mais (possivelmente até 20 kV), utilizando apenas um transformador de pulso de saída com núcleo de ferrita ou de metglas.

Uma técnica de tratamento de materiais aeroespaciais foi o motivo do início do projeto em 2006 para melhorar a resistência à corrosão e aumentar a dureza dos materiais. Chamada de 3IP, a *técnica Plasma Immersion Ion Implantation* tem como objetivo formar uma bainha de plasma ao redor da superfície, após aplicar um pulso negativo de alta tensão (AT), de maneira que os elétrons são repelidos de volta para o plasma e os íons são acelerados em direção à superfície do alvo. No Laboratório Associado de Plasma (LAP) está sendo utilizada uma fonte de 4 KV/2 A [1], no qual sua topologia atual consiste em três transformadores de pulso para elevar a tensão de saída em 4 kV aproximadamente, com primários ligados em paralelo e secundários em série, porém eleva o tempo de subida para mais de 1 μ s, causado pela respectiva ligação paralelo/série dos enrolamentos.

Então em 2010, foi projetado um modulador [2] com apenas um transformador de pulso (TP) na saída para a redução do tempo de subida do pulso (<1 μ s). Nos testes experimentais em carga resistiva de alto valor (100 K Ω) em baixa tensão (BT), foi observado que o pulsador opera com tempo de subida bem menor que 1 μ s, com oscilações e *overshoot*. Mas quando utiliza uma carga resistiva menor (2 k Ω) o *overshoot* e as oscilações são amortecidos fortemente, porém o tempo de subida de pulso observado aumenta em máxima tensão de saída (chegando em \approx 6 μ s). Então, concluiu-se que se poderia chegar a 9 kV, apenas com um TP se não fosse a dispersão de indutância do transformador. Por outro lado, os testes atuais demonstram que o tempo de subida do pulso também é influenciado pelo tempo de resposta do sistema de chaveamento do pulsador [3].

Um dos principais objetivos do projeto em 2011 foi o de desenvolver um modulador compacto composto basicamente de um conversor DC chaveado por uma chave semicondutora do tipo IGBT e em série com um transformador de pulso que pudesse alcançar 10 kV com tempo de subida menor que 1 μ s, baseado em uma fonte similar de 4 kV/2 A que se encontra em operação no LAP/INPE, com elevado tempos de subida de pulso ($\approx 3 \mu$ s) Entretanto, na nova topologia do transformador desenvolvido foram encontrados muitos problemas com o acoplamento dos enrolamentos, pois qualquer espaço entre os enrolamentos primário e secundário, ou entre as junções do núcleo, onde haja ar, pode comprometer o desempenho do TP quando em operação. Deste modo, o programa de Iniciação Científica iniciado em agosto/2015[4] tem como objetivo principal o aprimoramento do projeto, onde utilizaremos novamente apenas um TP com menor número de espiras no núcleo magnético para a diminuição da indutância de dispersão. Além do mais, será mostrado neste relatório que o tempo de resposta da chave afeta significativamente a máxima tensão de saída do pulsador.

2 - Projeto do Modulador Compacto

Para o desenvolvimento do circuito do modulador compacto, foi empregado um capacitor da ordem de 50 μ F que se descarrega pelo primário do transformador de pulso através de um IGBT com tensão de bloqueio de 1,2 kV (modelo IRGP30B120KD-E). Uma fonte DC de alta tensão é utilizada para carregar o TP e o capacitor, do modulador da ordem de 1kV (ver Fig. 1). O modulador foi projetado para gerar pulsos com amplitude máxima de 10 kV, duração máxima de pulso de 5 μ s, tempo de subida $\sim 1 \mu$ s e frequência máxima de repetição de 2 kHz. Neste projeto o objetivo principal consiste no aprimoramento de uma nova topologia do modulador, usando apenas um transformador de pulso na saída para a redução do tempo de subida de pulso ($< 1 \mu$ s). O transformador de pulso (TP) foi construído com relação de espiras de 1:10 para operação com parâmetros V/1 especificados na saída da ordem de 10 kV/5 A. Dois tipos de TP foram construídos usando núcleos de ferrita ou metglas. O primeiro protótipo (ver Fig. 2) utilizou 4 núcleos toroidais de ferrita de 94 cm de diâmetro externo empilhados para formar apenas um núcleo

magnético com alta razão Volt-segundo da ordem 0,05 (isto é, 10 kV x 5 μ s) de acordo com a formulação abaixo:

$$Vxt = N_s B_{\max} A_c , \quad (1)$$

onde V é a tensão do secundário, t é a máxima duração do pulso, N_s é o número de espiras do secundário, B_{\max} é densidade máxima de fluxo magnético do núcleo e A_c é a seção transversal do núcleo. Para o núcleo de ferrite, B_{\max} é igual a 0,3 T.

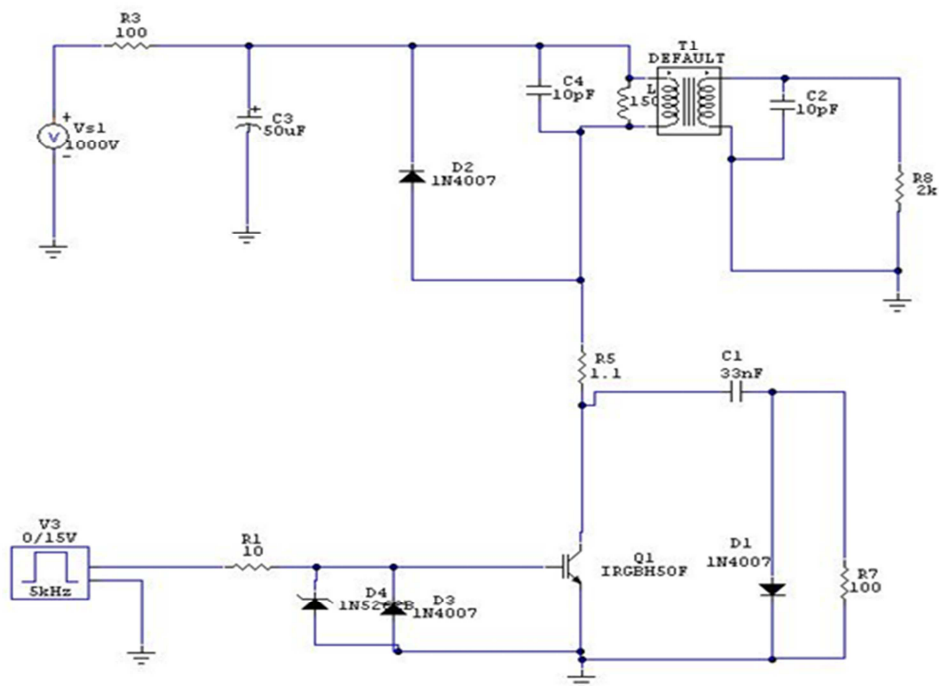


Fig. 1 – Circuito Esquemático do Pulsador.

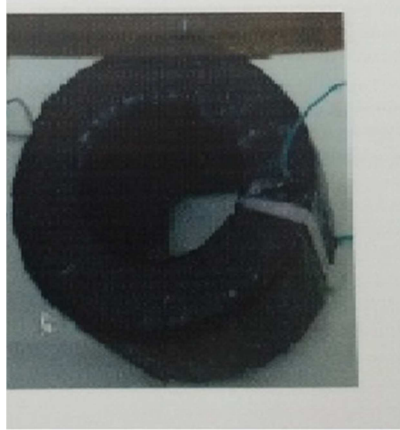


Fig. 2. Vista de topo do TP com núcleo de ferrita.

O segundo protótipo utilizou o Metglas AMCC100 para os primeiros testes, iniciamos o projeto com os cálculos de espiras do primário e secundário. Obteve-se praticamente $N_s \approx 100$ (número de espiras do secundário) a partir de (1) com tempo máximo de duração de pulso da ordem $t=10 \mu s$, tensão de saída máxima $V= 10 \text{ kV}$, seção transversal $A_c=5,90 \text{ cm}^2$ e máxima indução magnética $B_{\text{max}}= 1,6 \text{ T}$ para o núcleo do transformador.

Para uma relação de transformação 1:20, calculou-se que $N_p= 5$ (número de espiras do primário). O núcleo foi isolado do enrolamento primário por uma forma feita de mylar e fita kapton enrolada, conforme mostra a Fig. 3. Ambos os enrolamentos foram previamente feitos de acordo com a relação de espiras 1:20, isto é, com $N_p= 5$ e $N_s= 100$, utilizando uma forma de PVC especialmente projetada como mostra a Fig. 4. Utilizando um fio de 0,25 mm (32 AWG) de diâmetro, 4 enrolamentos adjacentes com 5 espiras cada um foram ligados em paralelo para formar o primário, a fim de se conseguir um bom acoplamento com o enrolamento secundário. Para este enrolamento, 100 voltas foram enroladas em série por cima do primário isolado em outra forma de mylar também com fita kapton, utilizando mesmo o fio de 0,25 mm de diâmetro.



Fig. 3. Vista lateral do TP de núcleo de Metglas AMCC 100.

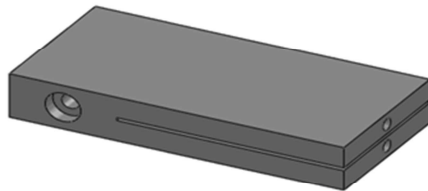


Fig. 4. Forma de PVC usada para construir o enrolamento primário envolto pelo secundário.

4- Resultados Experimentais e Discussão

Os dois transformadores de pulso (com núcleo de ferrita e metglas) foram testados em baixa e alta tensão (BT e AT). Primeiramente, a Fig. 5 mostra os testes em BT do pusador com o transformador de ferrita numa carga de 2 k Ω , onde se observa praticamente um ganho de 10 para um pulso de descarga de 50 V no primário do TP e platô do pulso de saída da ordem de 500 V aproximadamente e duração de 10 μ s. Neste caso o tempo de subida de pulso de saída foi da ordem de 2-3 μ s por causa da indutância de dispersão do TP e do tempo de resposta de chaveamento do IGBT.

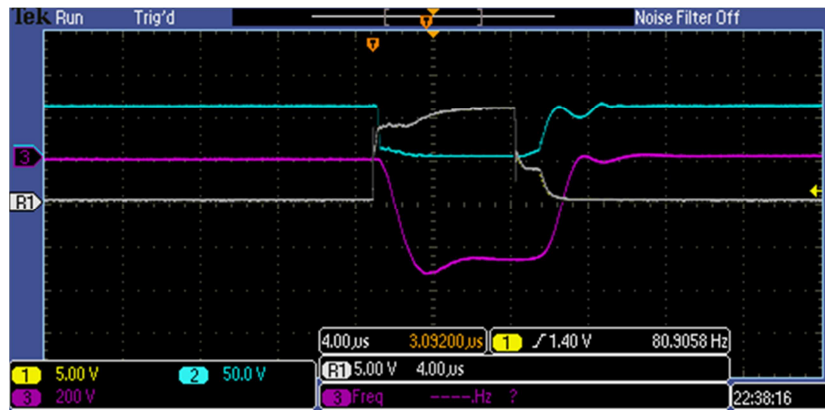


Fig. 5. Testes em BT/TP-ferrita: REF1-pulso de gatilho (5 V/div); CH2-pulso de descarga (50 V/div.); CH3-pulso de saída (200 V/div.) Esc. Horiz.: 4 μ s/div.

Por outro lado, os testes em AT com o TP de ferrita apresentou um ganho da ordem de 8 aproximadamente, visto que o banco foi carregado em 600 V para se obter uma tensão de saída no platô de 5 kV/ 10 μ s, conforme mostra a Fig. 5. Neste caso, houve uma perda do ganho do transformador da ordem de 20 % por causa das perdas no TP em alta corrente (aproximadamente 25 A no primário em comparação com apenas 2,5 A no caso dos testes em BT). Outro aspecto importante é que para os testes em AT o tempo de subida de pulso aumentou significativamente para a faixa de 7-8 μ s.

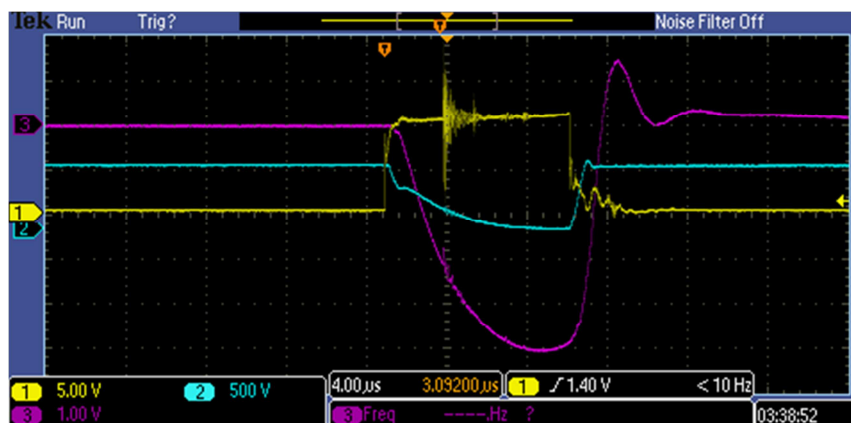


Fig. 6. Testes em AT/ TP- ferrita: CH1- pulso de gatilho (5V/div.); CH2 –pulso de descarga (500 V/div.); CH3 – Pulso de saída (1 kV/div.). Esc. horizontal: 4 μ s/div.

Com relação ao TP com núcleo de metglas, a Fig. 7 mostra os testes em BT para um pulso de descarga da ordem de 50 V com platô de amplitude do pulso de saída de aproximadamente de 800 V/ 8 μ s. Isto dá um ganho da ordem de 16, e não 20 como projetado, por causa das perdas no núcleo do TP. Neste caso, o tempo de subida de pulso não passa de 2 μ s como nos testes em BT do TP com núcleo de ferrita.

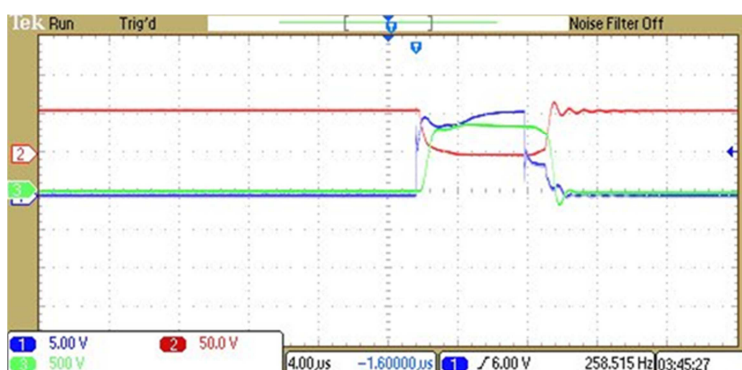


Fig. 7. Testes em BT do TP/metglas: CH1-pulso de gatilho (5 V/div.); CH2-pulso de descarga (50 V/div.) e CH3 – pulso de saída (500 V/div.). Esc. Horizontal - 4 μ s/div.

Mais uma vez, considerando os testes em AT do TP de metglas, conforme a Fig. 8, observa-se como no caso anterior com núcleo de ferrita, um aumento do tempo de subida de pulso na faixa de 4 μ s aproximadamente. De acordo com a figura, os testes foram em 4 kV (em verde) para uma tensão de carga da ordem de 260 V no primário em vermelho. A correspondente tensão de chaveamento de porta é mostrada mais uma vez pela curva em azul. Observe que para a tensão de saída a escala vertical em verde é na realidade de 2 kV/divisão devido ao uso de uma ponta de prova de AT da Agilent com relação de 1:1000, neste caso. Note também que a relação de transformação é da ordem de 14/15 como no caso anterior e que para tensões na faixa de 2-4 kV largura de pulso chega a 4 μ s. Note que anteriormente para a tensão de saída na faixa de 0,5-1 kV (ver Fig. 7) o tempo de subida de pulso era da ordem de 1 μ s, como esperado. Embora não mostrado aqui, observou-se na prática que a tensão satura em 5 kV com o tempo de subida atingindo basicamente toda a largura de pulso da ordem de 8 μ s, com a chave IGBT saindo do estado de

saturação. A partir deste ponto, uma vez que a tensão de carga era aumentada o valor da amplitude do pulso de saída ficava em 5 kV com a tensão coletor-emissor da chave IGBT absorvendo o restante da tensão excedente do pulso durante a descarga no primário do transformador devido ao aumento do tempo de corte (turn-off time) do transistor. Uma solução para isto parece ser o uso de um driver de corrente colocado entre a porta ou base do IGBT, uma vez que a resistência do gerador de 50 ohms mais o resistor de 10 ohms na base do IGBT estão incrementando o turn-off time do dispositivo em alta corrente [4].

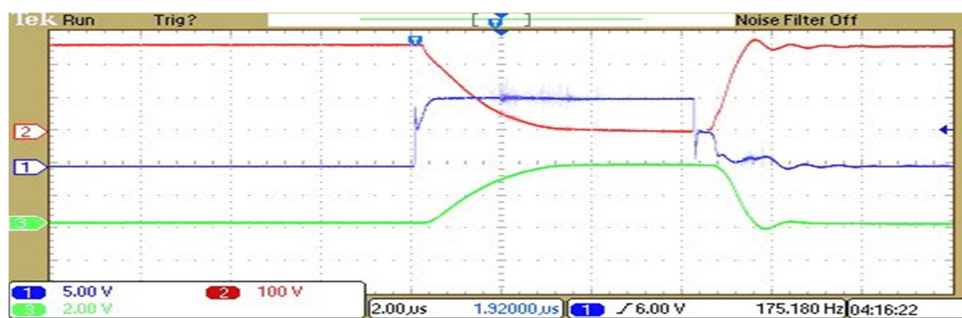


Fig. 8 – Testes de AT do TP/metglas: CH1- pulso de gatilho (5 V/div); CH2- pulso de descarga (100 V/div); CH3-pulso de saída (2 kV/div). Esc. Horiz.: 2 μ s/div;

Por exemplo, descarregando-se um banco de 0,75 μ F com tensão de carga da ordem 1 kV numa carga de 1 k Ω através do IGBT de 1,2 kV, conforme o circuito da Fig. 9, obtém-se um pulso negativo de saída com tempo de subida de pulso da ordem de 100 ns. Por outro, aumentando-se a corrente de carga na saída para 50 A com resistência de carga da ordem de 20 ohms, o que equivale a corrente de primário em nossa fonte pulsada, tem-se um pulso negativo de saída com tempo de subida de pulso aumentado para mais de 1 μ s, como ilustrado na Fig.10. Por outro lado, usando-se um driver UCC37321 da Texas para chaveamento de MOSFETs ou IGBTs com 30 A de capacidade de corrente neste mesmo circuito com carga de 20 ohms, consegue-se manter o tempo de subida de pulso em 100 ns, como mostrado na Fig.11. Portanto, o próximo passo para a continuidade do projeto será implementação deste driver

no circuito de porta do IGBT, entre o gerador de pulsos de BT e a chave. Desta maneira, o tempo de chaveamento em com alta corrente no primário é reduzido e a saturação é evitada para que se possa atingir tensões acima de 5 kV.

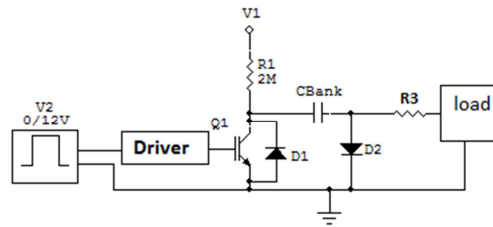


Fig. 9- Chaveamento IGBT para terra com driver.

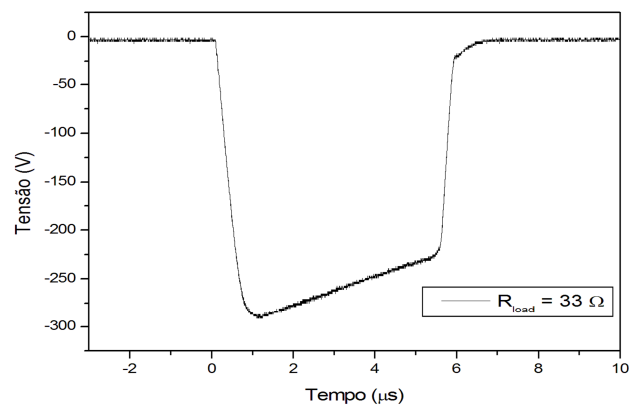


Fig.10- Curva para carga de 33 Ohms sem driver.

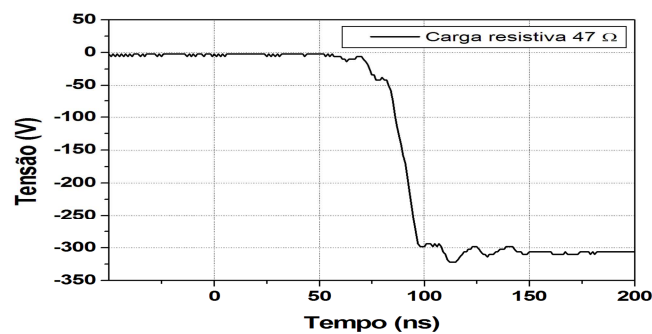


Fig.11- Curva para carga de 47 Ohms com driver.

5 – Testes do Transformador de Pulso com o Driver

O driver foi inserido entre o gerador de pulsos e o IGBT no esquema do pulsador da Fig. 1. O gerador de pulsos foi acionado na função complementar para gerar um pulso invertido de 15 V para 0 V para alimentar o driver desde ele se comporta como um inversor. A Fig. 12 mostra o pulso de saída no secundário do transformador de ferrita através do uso driver com uma carga no banco de capacitor da ordem de 60 V. O platô obtido de 480 V indica um ganho do transformador da ordem de 8 e um tempo de subida de pulso da ordem 2 μ s. Para efeito de comparação para o teste sem o driver, a Fig. 12 mostra a saída em 1200 V do transformador com uma carga do banco da ordem de 200 V, porém agora com um tempo de subida de pulso de mais de 3 μ s. Também pode-se observar nas Figuras 12 e 13 que o chaveamento do coletor foi reduzido de 1 μ s aproximadamente para a faixa de ns, mas que a redução do tempo de subida de pulso não foi tão efetiva na saída por causa da alta indutância de dispersão do primário do transformador.

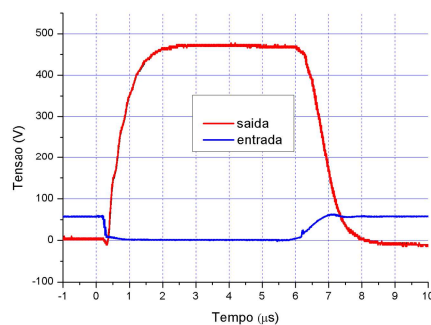


Fig. 12. Teste do transformador de pulso de ferrita com o driver em 500 V.

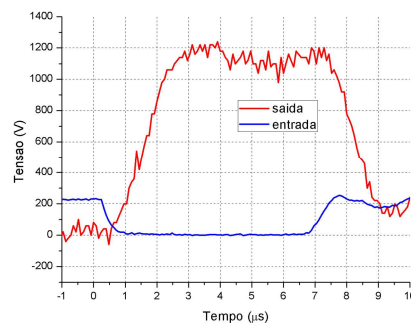


Fig. 13. Teste do transformador de ferrita sem o driver em 1200 V.

6 – Conclusões

Os testes do pulsador com o transformador de ferrita e de metglas sugerem que é necessário usar um driver de corrente para evitar a tensão de saturação em 5 kV. Embora, os testes não tenham chegado a este nível de tensão, os resultados obtidos com transformador de ferrita na faixa de 500 a 1000 V sugerem que o tempo de subida de pulso melhora com o emprego do driver, reduzindo-se aproximadamente em 1 μ s, caindo de 3 para 2 μ s, aproximadamente. Contudo, estes resultados indicam que a saturação em 5 kV, não será evitada, a menos que se projete e construa novamente os transformadores de pulso com indutância de dispersão do primário, bem abaixo da medida para ambos os casos da ordem de 20 μ H. Neste sentido, para a continuidade do projeto novos núcleos de ferrita e de metglas precisariam ser adquiridos com o intuito de se trabalhar com maiores áreas de seção transversal no circuito magnético.

Referências

[1] J.O. Rossi, M. Ueda, J.J. Barroso, and G. Silva, "A 4-kV, 2-A, 5-kHz, Compact Modulator for Plasma Nitrogen Plasma Implantation," IEEE Trans. on Plasma Science, vol. 34, no. 5, pp. 1757-1764, Oct. 2006.

[2] P. Rizzo Filho, "Desenvolvimento de um pulsador compacto de 10kV/5A para tratamento de materiais aeroespaciais," SICINPE, INPE, 2011, p. 69.

[3] M. Giesselmann, B. Palmer, A. Neuber, J. Donlon, "High Voltage Impulse Generator Using HV-IGBTs" in Proc. 2005 IEEE Pulse Power Conference, pp. 763-766.

[4] R. D. S. Martinez, "Desenvolvimento de transformadores de pulso usando núcleos de metglas para aplicações espaciais" SICINPE, INPE, 2013, p.92.