



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



# **DESENVOLVIMENTO DE TRANSFORMADORES DE PULSO USANDO NUCLEOS DE METGLAS PARA APLICAÇÕES ESPACIAIS**

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

**Regiane Donizeti de Souza Martinez (UNITAU, Bolsista PIBIC/CNPq)  
E-mail: [regiane.martinez@unitau.com.br](mailto:regiane.martinez@unitau.com.br)**

**José Osvaldo Rossi (LAC/CTE/INPE, Orientador)  
E-mail: [rossi@plasma.inpe.br](mailto:rossi@plasma.inpe.br)**

**Julho de 2013**

Publicado por:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Gabinete do Diretor – (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 – CEP 12.245-970

São José dos Campos – SP – Brasil

Tel.: (012) 3945-6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: [pubtc@sid.inpe.br](mailto:pubtc@sid.inpe.br)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



# **DESENVOLVIMENTO DE TRANSFORMADORES DE PULSO USANDO NUCLEOS DE METGLAS PARA APLICAÇÕES ESPACIAIS**

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

**Regiane Donizeti de Souza Martinez (UNITAU, Bolsista PIBIC/CNPq)  
E-mail: [regiane.martinez@unitau.com.br](mailto:regiane.martinez@unitau.com.br)**

**José Osvaldo Rossi (LAC/CTE/INPE, Orientador)  
E-mail: [rossi@plasma.inpe.br](mailto:rossi@plasma.inpe.br)**

**Julho de 2013**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

MARTINEZ, R. D. S.

Desenvolvimento de transformadores de pulso usando núcleos de Metglas para aplicações espaciais,  
São José dos Campos: INPE 2013

Relatório (Iniciação científica em Engenharia elétrica) -  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.  
Orientador: José Osvaldo Rossi

1. Pulsador compacto 2. Tratamento de materiais aeroespaciais 3. implantação PIII

CDU

---

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**CONFECCIONADA PELO SPG E INCLUÍDA PELO SID.**



“Ele não sabia que era impossível. Foi lá e fez”.

## **Agradecimentos**

Ao meu orientador Dr. José Osvaldo Rossi, pela atenção e conhecimento transmitido, pela oportunidade que junto com o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) foi possível acontecer. Ao Laboratório Associado de Plasma (LAP) do CTE/INPE pela infra-estrutura.

Aos meus familiares, e amigos por sempre estarem ao meu lado.

Ao Matheus Moraes e Francisco Costa pela atenção e ajuda, e aos meus colegas do LAP.



## **Resumo**

O projeto descreve um modulador compacto, visando o tratamento de materiais aeroespaciais para aumentar resistência à corrosão e dureza, utilizando a técnica IIP (Implantação iônica por imersão em plasma), o qual utiliza um pulsador que pode atingir 10 kV por meio de um transformador de pulso com um núcleo de liga metálica Metglas, de menor número de espiras possível para diminuição da indutância de dispersão e conseqüentemente, manter o tempo de subida de pulso abaixo de 1 $\mu$ s.

## **DEVELOPMENT OF PULSE TRANSFORMERS USING METGLAS CORES FOR SPACE APPLICATIONS**

### **Abstract**

The project describes a compact modulator with a pulse transformer that can reach 10 kV using a core alloy Metglas with fewer turns possible to decrease the leakage inductance and, consequently, the output pulse rise time below 1  $\mu$ s for the treatment of aerospace materials to increase corrosion resistance and hardness by means of the technique PIII (Plasma Immersion Ion Implantation)..

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	12
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	13
LISTA DE SÍMBOLOS	14
1. INTRODUÇÃO.....	15
2. PROJETO DO MODULADOR COMPACTO.....	15
3. CIRCUITO.....	18
4. TESTES.....	19
5. CONCLUSÃO.....	22

## Lista de figuras

	<u>Pág.</u>
2.1 – Núcleo Magnético Metglas AMCC 100 sem enrolamentos.....	16
2.2– Enrolamento secundário mostrado sobre o primário no núcleo de Metglass (AMCC100).....	17
2.3 – Layout da forma de PVC usada no núcleo AMCC 100.....	18
3.1 – Esquema do Circuito do Modulador Compacto com um Transformador de Pulso na saída.....	18
4.1 – Montagem experimental do TP.....	19
4.2 – Pulsos de entrada de porta( CH1-azul) , primário (Ch2-vermelho) e secundário (CH3-verde) do TP mostrada na tela do osciloscópio.Escala horizontal- 4 $\mu$ s; escala vertical- CH1: 5 V/div; CH2: 50 V/div e CH3:500V/div.....	20
4.3 – Tensão na porta do IGBT.....	20
4.4 – Tensão no coletor do IGBT.....	21
4.5 – Tensão na carga (ou no secundário) do TP.....	20
4.6 – Testes do núcleo AMCC100 em 4 kV mostrando os pulsos de tensão. Escala horizontal: 2 $\mu$ s/div; escala vertical: CH1 (gate do IGBT em azul) – 5 V/div; CH2 (no coletor do IGBT ou no primário do TP em vermelho )- 100 V/div; CH3 (na carga em verde)- 2 kV/div.....	20

## **Lista de Siglas e Abreviaturas**

INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IC	Iniciação Científica
LAP	Laboratório Associado de Plasma
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
TP	Transformador de Pulso
CNPQ	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
3IP	Implantação iônica por imersão em plasma
IBI	Íon Beam Implantation
IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada
HT	Tubo rígido
RCD	Resistor-Capacitor-Diodo
PVC	Policloreto de Polivinila

## Listas de Símbolos

$\mu\text{s}$	Microsegundos
$\Omega$	Ohms
kV	Unidade SI de tensão elétrica
A	Ampere
Ns	Nanosegundos

## 1.

## Introdução

A necessidade de ter materiais de alta resistência e com longa duração não é de hoje. Desde tempos remotos sabe-se que os ciclos de aquecimento e resfriamento podem modificar as propriedades do material e que o tempo do ciclo também pode diferenciar o tratamento a ser empregado. Existem inúmeros tratamentos térmicos, e o nosso projeto tem como objetivo de modificar a propriedade da camada superficial da peça a ser tratada por meio da implantação de íons de nitrogênio. Esta técnica em linhas gerais é chamada de nitretação quando se usa o gás de nitrogênio. Existem vários tipos de nitretação: gasosa, por plasma (ou 3IP) e iônica entre outras. Mas as vantagens por plasma são inúmeras como: menor tempo de tratamento, completo controle sobre a camada de compostos depositada, superfícies passivas nitretadas de maneira semelhante a do aço inoxidável [1].

A técnica de nitretação usando 3IP é utilizada para várias melhorias nas propriedades físicas da superfície do material como a dureza, resistência ao desgaste e a corrosão, com a finalidade de aumentar a vida útil do material. O princípio de funcionamento do tratamento 3IP consiste na imersão de uma amostra em um gás ionizado, seguida pela aplicação de um pulso negativo de alta tensão para formar uma bainha de plasma em volta da superfície, onde os elétrons são repelidos e os íons acelerados em direção ao alvo. Quando o gás é nitrogênio esta técnica é comumente denominada de nitretação por plasma. Comparando com outras implantações convencionais, como o IBI (Íon Beam Implantation), o 3IP tem muitas vantagens, visto que não é necessária a manipulação do alvo, possuindo a capacidade de implantar íons em objetos de formas complexas e de contorno irregular, o que é muito mais complicado no caso da técnica IBI [1].

Assim, o programa de IC no INPE consiste basicamente no estudo e o desenvolvimento de um modulador compacto de AT, utilizando um TP com núcleo de Metglas [2], para implantação de íons de nitrogênio em superfícies de materiais aeroespaciais.

## 2. Projeto do Modulador Compacto

Primeiramente, o estudo sobre projetos anteriores foi focado nos problemas que ocorreram durante o processo de montagem e testes do TP [3,4], analisando os pontos

principais a serem mudados no projeto do dispositivo. Um dos problemas cruciais é a baixa indução magnética do núcleo de ferrite do TP que foi verificada na prática de ser apenas da ordem de 0,25T (baixa densidade de fluxo magnético) combinada com as altas perdas causadas pela indutância de dispersão devido ao elevado número de espiras. Então a escolha do núcleo de Metglas (Fig.2.1) foi feita a partir da estrutura do material que é essencial para a redução de perdas. As vantagens deste material nas mais diversas aplicações na área industrial são: a alta indução magnética (1,56T), volume reduzido, pequena perda em elevada temperatura devido ao seu *design* compacto e de baixa perda magnética.

Um dos aprimoramentos do circuito do modulador compacto é a chave IGBT que foi muito utilizada nos projetos anteriores, que altera seu estado de *off-state* para *on-state* com controle de tensão de porta igual a um MOSFET. Contudo, neste caso é necessário um circuito RCD (Resistor – Capacitor – Diodo) para a proteção do IGBT contra sobre tensões e desmagnetização do núcleo. Sem este circuito e sem um diodo reverso, a magnetização evitaria que a chave passasse para o *off-state*, aumentando assim a tensão do coletor do IGBT.

Uma fonte DC de alta tensão na ordem de 1 kV é utilizada para carregar o banco de capacitor do circuito modulador. O dispositivo IGBT chaveia tensão de carga de 1 kV para formar um pulso com amplitude máxima de 1 kV no primário do TP, que por sua vez amplifica a tensão de saída na faixa de 5 a 10 kV na saída do trafo, dependendo da relação de espiras entre primário e secundário e do bom acoplamento de trafo (no caso de baixas perdas).



Fig. 2.1 - Núcleo Magnético Metglass AMCC 100 sem enrolamentos.



Usando 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  $t=10 \mu\text{s}$ , tensão de saída  $V= 10 \text{ kV}$ , 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:

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

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. 2.2. 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.2.2). 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 o 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. Como já mencionado anteriormente, o núcleo Metglas AMCC100 foi usado apenas para os testes iniciais. No futuro, empregaremos o núcleo AMCC 1000, uma vez que sua área transversal é maior, possibilitando assim uma maior tensão de saída de acima de 20 kV (se possível até 30 kV) com duração máxima do pulso na ordem de 10  $\mu\text{s}$ .



Fig. 2.2. Enrolamento secundário mostrado sobre o primário no núcleo de Metglass (AMCC 100).

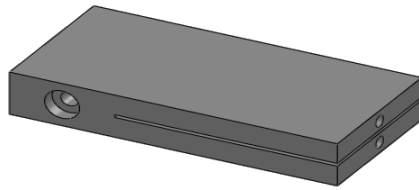


Fig. 2.3. Layout da forma de PVC usada no núcleo AMCC 100.

### 3. Circuito de Chaveamento

Na placa do circuito que estava sendo utilizada no modulador do LAP em 2010 [4], foram encontrados alguns problemas de condução nas trilhas durante os testes do TP. Em vista disto, foi decidida a confecção de uma nova placa de circuito impresso para os testes em alta tensão (10 kV ou mais) do TP desenvolvido, de acordo com o esquema mostrado na Fig. 3.1. Basicamente os componentes eletrônicos usados foram os mesmos, apenas com a mudança de trilhas mais grossas e a adaptação de duas novas trilhas para ligar os fios do primário do TP direto à placa. Basicamente, o modulador tem um capacitor de 50  $\mu\text{F}$  que se descarrega através do primário do TP por uma chave semicondutora IGBT, com uma tensão de bloqueio de aproximadamente 1,2 kV (ver Fig.3.1 novamente). Uma fonte DC de alta tensão (da ordem de 1 kV) é utilizada para carregar o capacitor no lado do primário do TP. Com o novo TP quando otimizado, espera-se chegar a aproximadamente um tensão de saída na faixa de 10 a 20 kV, com tempo de subida de pulso da ordem de  $1\mu\text{s}$ , dependendo da tensão de carregamento do modulador que pode variar de 500 a 1000 V, para uma relação de transformação aproximada de 20.

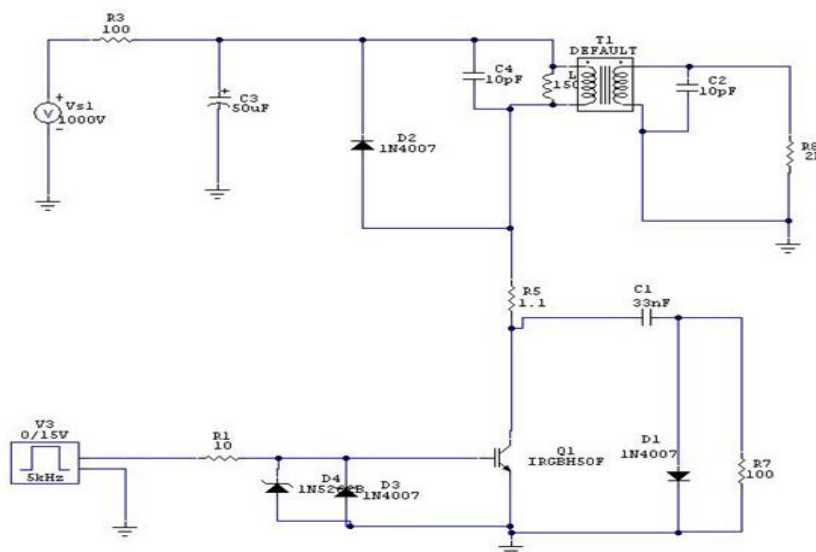


Fig. 3.1- Esquema do circuito do modulador Compacto com TP na saída.

#### 4 . Testes

Os testes do projeto foram realizados com o núcleo AMCC 100 no esquema da Fig. 3.1, utilizando um osciloscópio (Tektronix TDS 460 A), uma fonte DC de AT de 700 V/2.5 A da EMI-Lambda e um gerador de BT de 15 V da TTI Instruments . A Fig. 4.1 mostra a montagem experimental de bancada, onde se pode observar o osciloscópio ao fundo e no lado direito, no topo o gerador de funções da TTI e embaixo a fonte da EMI-Lambda. O transformador encontra-se ao lado alimentado pela placa PCB de chaveamento no centro. Conforme esperado, o transformador eleva a tensão de saída de acordo com a relação de transformação próxima da projetada de 1:20, mais precisamente da ordem de 1:16 conforme mostra os dados na tela do osciloscópio na Figura 4.2. Nesta figura, o pulso em azul representa a tensão de porta do IGBT com largura da ordem de 8  $\mu$ s e amplitude de 12 V com os correspondentes pulsos no primário e secundário do TP (respectivamente vermelho e verde). Observe que o platô do pulso de entrada é da ordem de 50 V para um platô de saída de 800 V, o que dá uma relação da ordem de 16, conforme já mencionado. Uma medida mais precisa para esta relação de transformação foi feita exportando-se as medidas dos canais CH1 (azul), CH2 (vermelho) e CH3 (verde) para um programa gráfico (Origin) em arquivos de dados (tipo .CSV). As Figs. 4.3, 4.4 e 4.5 mostram respectivamente a tensão na entrada da porta do IGBT, tensão do coletor do IGBT (ou pulso de entrada no primário do TP) e tensão na carga (ou no se secundário do TP) obtidas no Origin. Mais precisamente, o

acionamento do IGBT se dá com uma amplitude da ordem de 11,23 V para se produzir um pulso de saída com platô de 860 V com tensão primária de 60 V aproximadamente. Isto dá uma relação de transformação da ordem 14,33 e a diferença em relação a projetada de 20 pode ser explicado em termos de perdas ôhnicas e magnéticas do núcleo.

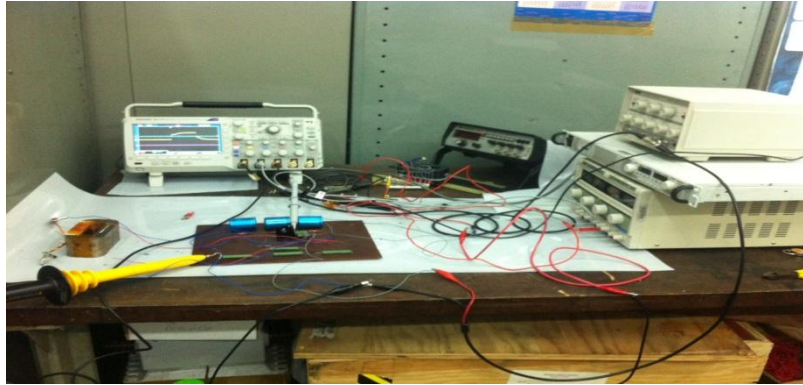


Fig.4.1 – Montagem experimental dos testes do TP.

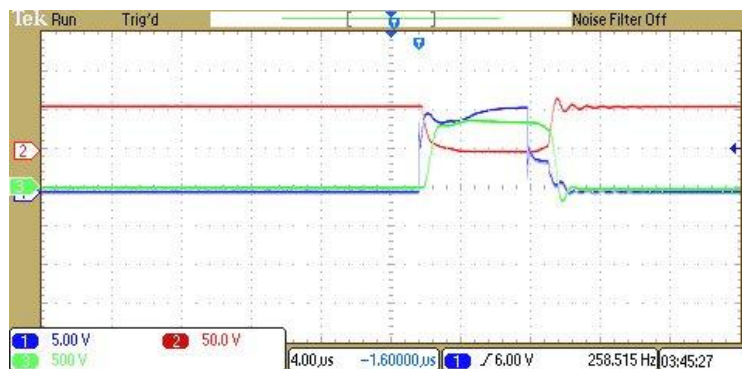


Fig. 4.2. Pulsos de entrada de porta( CH1-azul) , primário (Ch2-vermelho) e secundário (CH3-verde) do TP mostrada na tela do osciloscópio. Escala horizontal- 4  $\mu$ s; escala vertical- CH1: 5 V/div; CH2: 50 V/div e CH3: 500 V/div.

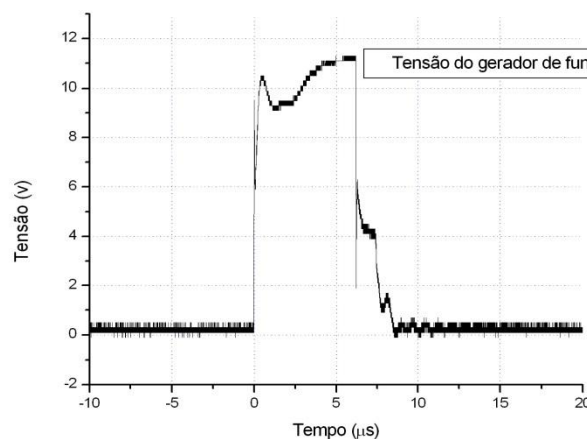


Fig. 4.3. Tensão de porta do IGBT.

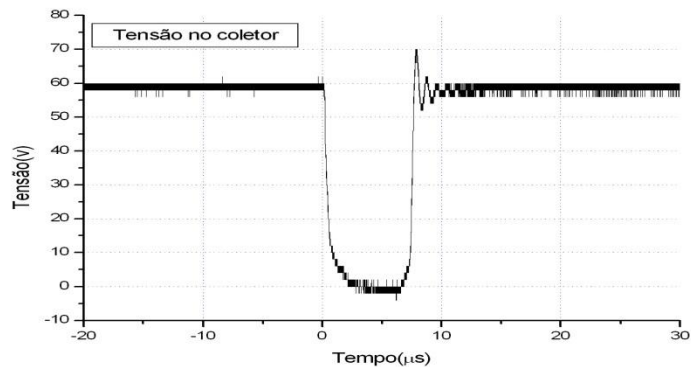


Fig. 4.4. Tensão no coletor no IGBT (pulso do primário).

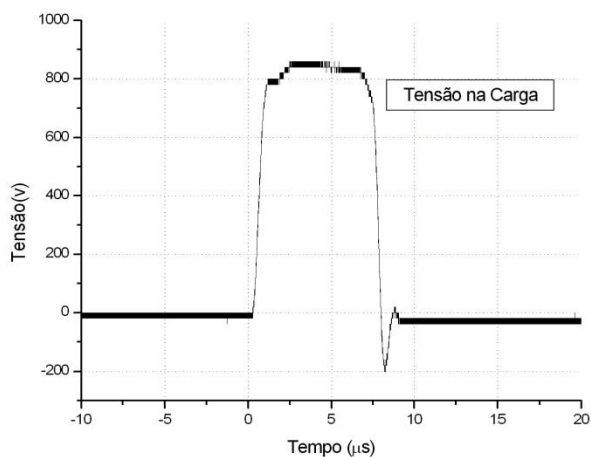


Fig. 4.5. Tensão na carga ou no secundário do TP.

Os testes continuaram até 4 kV (em verde) para uma tensão de carga da ordem de 260 V no primário em vermelho, conforme mostra a Fig. 4.6. 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/div devido ao uso de uma ponta de prova de AT da Agilent com relação de 1:1000, neste caso. Note também também que a relação de transformação é da ordem de 14/15 como no caso anterior e que para tensões acima de 2 kV foi observado um alargamento do tempo de subida para 4  $\mu$ s. Note que anteriormente para 800 V-1 kV (ver Fig. 4.2) o tempo de subida de pulso era da ordem de 1  $\mu$ 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  $\mu$ 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/buffer de corrente colocado entre a porta ou base do IGBT, uma vez que o 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 (corrente de coletor da chave através primário do > 50 A com tensão de saída acima de 5 kV).

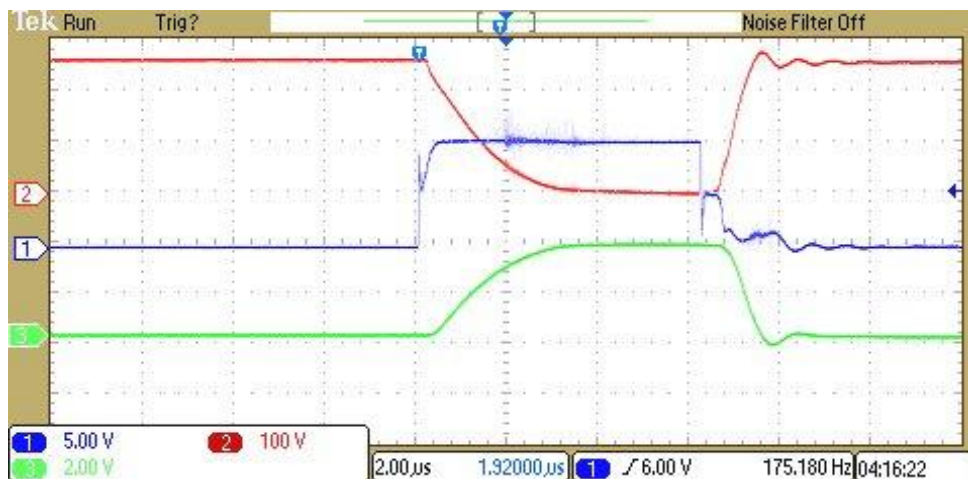


Fig. 4.6 Testes do núcleo AMCC100 em 4 kV mostrando os pulsos de tensão. Escala horizontal: 2  $\mu$ s/div; escala vertical: CH1 (gate do IGBT em azul) – 5 V/div; CH2 (no coletor do IGBT ou no primário do TP em vermelho) - 100 V/div; CH3 (na carga em verde)- 2 kV/div.

## 5 . Conclusões

Um dos principais objetivos do projeto 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 $\mu$ s, baseado em uma fonte similar de 4kV/2 A que se encontra no em operação no LAP/INPE e que usa vários transformadores de pulso na saída, porém opera com um tempo de subida de pulso de saída da ordem de 3  $\mu$ s.

No projeto anterior, concluiu-se que a baixa densidade de fluxo magnético B do núcleo com um grande número de espiras causava uma alta indutância de dispersão. Teoricamente, o aumento da densidade do fluxo magnético B contribui para a diminuição da indutância de dispersão através do uso de um núcleo com alta densidade B (como o Metglas), por causa do menor número de espiras necessárias no secundário do TP. Entretanto, a maior dificuldade observada durante a montagem do TP foi no acoplamento dos enrolamentos, visto que 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, por causa do aumento da indutância de dispersão, o que leva a um aumento do tempo de subida de pulso. Isto aparentemente estava comprometendo a operação do TP em tensões já ao redor de 1 kV em projetos anteriores. Com o novo projeto desenvolvido neste trabalho, isto parece ter sido superado visto que o TP operou satisfatoriamente até 2 kV com tempos de subida de pulso da ordem de 1  $\mu$ s. Entretanto, conforme observado pelos resultados da Fig. 4.5 em 4 kV, ou mais precisamente a partir de 2 kV, o tempo de subida de pulso começa a aumentar por causa do tempo de chaveamento do dispositivo IGBT (turn-off time) e para isto, um buffer/driver de corrente de porta é necessário para a operação da chave no primário do TP em altas correntes. Por outro lado, quando do uso de um núcleo maior (AMCC 1000), a expectativa aqui consiste em se atingir 20 kV de tensão de saída com os mesmos parâmetros de largura de pulso de 10  $\mu$ s e de tempo de subida da ordem de 1  $\mu$ s, uma vez que os problemas de acoplamento entre os enrolamentos já foram solucionados e os de chaveamento também serão por meio da implementação de um buffer/driver para IGBTs em altas correntes.

Como o esperado no projeto foi alcançado, além da inclusão do buffer de acionamento, iniciamos o upgrade do transformador para 20kV/10A/10 $\mu$ s. Para isso, demos início a criação do molde para o enrolamento das espiras do núcleo Metglass AMCC1000, o qual será utilizado como núcleo final nesse projeto.

## Referências

- [1] M. Ueda, L.A. Berni, J.O. Rossi et al., “Plasma immersion ion Implantation experiments at INPE, Brazil,” *Surface and Coatings Technology* 136 (2001) 28-31.

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

[3] 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.

[4] P. Rizzo Filho. Desenvolvimento de um Pulsador Compacto de 10 kV/5A para Tratamento de Materiais Aeroespaciais. Relatório Final PIBIC, INPE, Brasil, 2010.