



Ministério da
Ciência e Tecnologia



DESENVOLVIMENTO DE UM PULSADOR COMPACTO DE 10kV/5A PARA TRATAMENTO DE MATERIAIS AEROESPACIAIS

Paulo Rizzo Filho.

Relatórios de Pesquisa do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica,
orientado pelo Dr. José Osvaldo Rossi, aprovada em 01 de Agosto de 2009.

Registro do documento original:
<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.21.13.26>>

INPE
São José dos Campos
2010

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



Ministério da
Ciência e Tecnologia



DESENVOLVIMENTO DE UM PULSADOR COMPACTO DE 10kV/5A PARA TRATAMENTO DE MATERIAIS AEROESPACIAIS

Paulo Rizzo Filho.

Relatórios de Pesquisa do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica,
orientado pelo Dr. José Osvaldo Rossi, aprovada em 01 de Agosto de 2009.

Registro do documento original:
<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.21.13.26>>

INPE
São José dos Campos
2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Rizzo Filho, Paulo

Desenvolvimento de um pulsador compacto para tratamento de materiais aeroespaciais / Paulo Rizzo Filho - São José dos Campos: INPE, 2010.

00p. ; (INPE-0000 - RPQ/00)

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.

“Quando estás certo, ninguém se lembra; quando estás errado, ninguém esquece”.

Provérbio irlandês

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Dr. José Osvaldo Rossi, pelo conhecimento transmitido, pela orientação e apoio na realização deste trabalho.

Ao Laboratório Associado de Plasma (LAP) do CTE/INPE por ter disponibilizado a infra-estrutura necessária para a realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), pela bolsa de estudo.

Aos meus pais, Paulo Rizzo e Helena Rizzo, que sempre me incentivaram em meus estudos.

E a todos que de alguma forma me ajudaram neste trabalho.

RESUMO

Este documento descreve as atividades realizadas no programa de iniciação científica, no Laboratório Associado de Plasma, no INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) no período de Agosto/2009 à Junho/2010. O objetivo deste projeto consiste no desenvolvimento de um pulsador compacto baseado no *upgrade* de uma fonte similar compacta de 4 kV/2 A (já em uso no LAP). Este modulador está sendo desenvolvido para ser usado num processo de implantação de íons de nitrogênio de plasma em superfícies de materiais aeroespaciais (Al e polímeros, principalmente) o qual utiliza a tecnologia de transformador de pulso com chaveamento por uma chave semicondutora do tipo IGBT. Esse modulador compacto foi desenvolvido porque os moduladores convencionais empregam o tubos tetrodos à vácuo (HT- *Hard Tube*), que são excelentes chaves eletrônicas, porém são de grande tamanho, possuem filamento e são bem mais caros que semicondutores. Portanto, para processos industriais em que a otimização de custo é essencial, o emprego de moduladores do tipo HT acaba saindo de elevado custo. Este modulador em desenvolvimento utiliza um capacitor 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. Ele está sendo desenvolvido para gerar pulsos com amplitude máxima de 10 kV, duração máxima de pulso de 5 μ s, tempo de subida \sim 1 μ s e frequência máxima de repetição de 5 kHz. No nosso projeto o ponto principal do trabalho consiste no aprimoramento de nova uma topologia com apenas um transformador de pulso na saída para a redução do tempo de subida de pulso ($< 1 \mu$ s). Esse transformador de pulso (que já foi desenvolvido para os testes) foi desenvolvido com razão de 1:100 para operação com parâmetros V/I especificados de saída da ordem de 10kV/5A. No presente momento, nos testes em BT atingimos pulsos com amplitude média de 300 V como esperado na simulação, e nos testes em AT, no futuro esperamos atingir a máxima capacidade V/I especificada de 10kV/5A.

DEVELOPMENT OF A COMPACT PULSE OF 10kV/5A FOR TREATMENT OF MATERIAL AEROSPACE

ABSTRACT

This document describes the activities performed in PIBIC Program, at the Associated Plasma Laboratory of INPE (National Institute for Space Research) in the period of August/2009 Junho/2010. The objective of this project is to develop a compact pulser based on upgrade from a source similar compact 4 kV / 2 A source (already in use in LAP). This modulator has been developed for use in ion implantation process by nitrogen plasma for treatment aerospace materials surfaces (Al and polymers, mainly) which uses the technology of pulse transformer switched by a semiconductor-type IGBT. This compact modulator was built because conventional modulators employ tetrode vacuum tubes (HT-Hard Tube), that are excellent switch devices, but they are of great size, have filament and are much more expensive than semiconductors. Therefore, for industrial processes where cost optimization is essential, the use of modulators of type HT are not suitable due to their high cost. For now, this modulator in development uses a 50 μ F capacitor which discharges through a transformer primary pulse through an IGBT with blocking voltage of 1.2 kV. It has been developed to generate pulses with maximum amplitude of 10 kV, maximum pulse duration of 5 μ s, rise time of \sim 1 μ s and maximum repetition frequency of 5 kHz. The main point of this work consists in the improvement of a new topology with only one output pulse transformer to reduce the pulse rise time (<1 μ s). The pulse transformer (which has already been developed for testing) was developed with a ratio of 1:100 for operation with parameters V / I of around 10kV/5A. At present, tests on low voltages achieved pulses with average amplitude of 300 V as expected in the simulation, and for the high voltage testes in future it is expected to reach the maximum V/I capability of 10kV/5A.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	
LISTA DE SÍMBOLOS	
1. INTRODUÇÃO.....	15
2. PROJETO DO MODULADOR COMPACTO.....	16
3. SIMULAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	17
4. CONCLUSÃO.....	25
5. BIBLIOGRAFIA.....	27
6. ÍNDICE POR ASSUNTO.....	28

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Modulador Compacto usando um transformador de pulso de saída.....	17
3.1 - Simulação da tensão de saída do modulador em plena carga.....	18
3.2 - Pulso do coletor do IGBT durante o chaveamento.....	18
3.3 - Circuito do chaveador usado para testes em BT sem o transformador de pulso.	19
3.4 - Foto da placa do circuito de chaveamento para testes em BT.....	19
3.5 - Tensão de saída do gerador de pulsos de BT.....	20
3.6 - Tensão de porta ou de gate do IGBT.....	21
3.7 - Tensão no coletor do IGBT.....	21
3.8 - Foto mostrando duas vistas do transformador de pulso construído.....	22
3.9 - Tensão de saída do transformador de pulso nos testes em BT.....	22
3.10 - Tensão de porta do IGBT.....	23
3.11 - Tensão no coletor do IGBT.....	23

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
SID	Serviço de Informação e Documentação
RPQ	Relatório de Pesquisa
CNPQ	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
PIII	Implantação iônica por imersão em plasma
AT	Alta tensão
BT	Baixa tensão
IBI	Íon Beam Implantation
IGBT	transistor bipolar de porta isolada
HT	Tubo rígido
RCD	Resistor-Capacitor-Diodo

LISTA DE SÍMBOLOS

μs	microsegundos
Ω	Ohms
kV	Unidade SI de tensão elétrica
A	Ampere
Ns	Nanosegundos

1 INTRODUÇÃO

O processo de implantação PIII (Plasma Immersion Ion Implantation) é relativamente uma técnica nova usada para modificar as superfícies de materiais e componentes industriais. O respectivo tratamento de superfícies consiste na imersão de uma amostra em um gás ionizado (plasma) e subsequente aplicação de um pulso negativo de alta tensão (AT) com o objetivo de formar uma bainha de plasma ao redor da superfície, na qual os elétrons são repelidos de volta para o plasma e os íons são acelerados em direção a superfície do alvo. Portanto, o modulador de pulso tem um importante papel no tratamento de materiais pela técnica PIII [1,2]. A implantação destes íons no material (normalmente nitrogênio, podendo ser também qualquer outro tipo de gás nobre) introduz importantes modificações nas propriedades de superfície da peça tratada, como por exemplo, melhoramento de resistência à corrosão e aumento da dureza. Comparado com outras convencionais com a implantação por feixe de íons (IBI – Ion Beam Implantation), o processo PIII tem diversas vantagens tal como não necessidade de manipulação do alvo e capacidade de implantar objetos com formas complexas e de contorno irregular, o que é particularmente difícil usando-se o processo IBI.

Desta maneira, o programa de iniciação científica no INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) consiste no estudo e desenvolvimento de um modulador compacto para a implantação de íons de nitrogênio de plasma em superfícies de materiais aeroespaciais. Este modulador compacto está sendo projetado para produzir pulsos com amplitude de 10 kV, duração máxima de pulso da ordem de 5 μ s, tempo de subida < 1 μ s e frequência máxima de repetição da ordem de 5 kHz. De fato, este projeto será baseado no upgrade de uma fonte similar compacta de 4kV/2A com tempo de subida de pulso da ordem de 2 a 3 μ s, a qual já se encontra em operação no LAP/INPE para uso em sistemas de implantação com plasma de íons de Li, numa taxa de repetição da ordem de 5 kHz [3].

2 Projeto do Modulador Compacto

Após análises e estudos no laboratório do INPE, projetamos um modulador compacto para um sistema de implantação iônica que se encontra em operação no LAP/INPE. Neste circuito, utilizamos um **conversor forward** com saída ligada a um transformador de pulso. Basicamente, o conversor consiste de um capacitor de 50 μ F que se descarrega através do primário de um transformador de pulso por meio de uma **chave IGBT** com tensão de bloqueio de 1.2 kV aproximadamente, conforme mostra a Fig. 1. Uma fonte DC de alta tensão da ordem de 1 kV aproximadamente é usada para carregar o capacitor e o transformador de pulso deve ter uma relação de espiras da ordem de 1:100 para que a tensão final de saída atinja \approx 10 kV. Desta forma, com o uso do transformador de pulso uma tensão mais baixa de chaveamento pode produzir uma tensão bem mais elevada de saída, evitando a complexidade da ligação de várias chaves semicondutoras em série. Outra vantagem deste circuito é que se utiliza uma pequena chave semicondutora ao invés de usar um tetrodo rígido de maior tamanho, que são mais caro e com exigência de potência de filamento de aquecimento, como nos pulsadores HT convencionais. Uma nova característica adicional deste circuito é que foi projetado um circuito RCD (ver R7, C1 & D1 na Fig. 2.1) para proteção do IGBT contra sobre tensões e desmagnetização do núcleo do transformador entre pulsos, atuando juntamente com **diodo clamping** D2 da Fig. 2.1. Neste circuito, foram incluídas a indutância de magnetização da ordem de 150 μ H e as capacitâncias parasitas dos enrolamentos (primários & secundários) de apenas 10pF. Também, no modelo Spice do transformador (T1 Default) as indutâncias de dispersão de ambos os enrolamentos foram ajustadas em 1 μ H. Finalmente, um gerador de pulsos de BT (12 V) é empregado para o controle do tempo de chaveamento, cuja saída é ligada a porta do IGBT por meio de uma baixa resistência da ordem de 47 ohms.

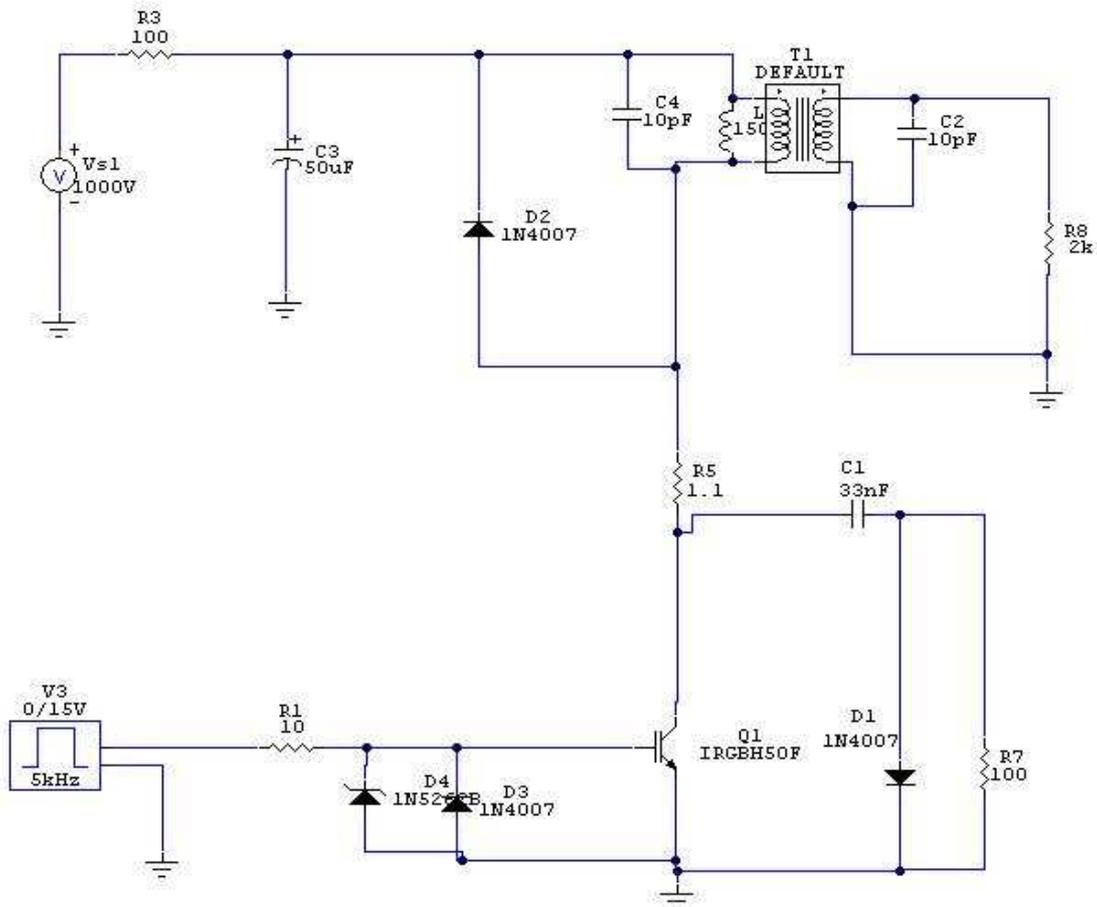


Figura 2.1: Modulador Compacto usando um transformador de pulso de saída.

3 Simulação e Resultados Experimentais

As Figs. 3.1 & 3.2 mostram respectivamente as simulações da tensão de saída no secundário do transformador de pulso e de chaveamento no coletor do IGBT. Ambas as figuras mostram as voltagens obtidas para uma largura de pulso da ordem de $5 \mu\text{s}$ ajustada no gerador de pulsos com tempos de subida & descida da ordem de 10 ns e taxa de repetição da ordem de 2 kHz . Observe que usando um transformador com baixa indutância de dispersão ($1 \mu\text{H}$) com relação 1:100 a tensão obtida na saída fica próxima á 10kV , com tempo de subida de pulso $\approx 1\mu\text{s}$, como esperado. O transformador foi projetado para operar com uma duração máxima de pulso de $7.0 \mu\text{s}$ para não exceder a taxa V-A do núcleo magnético do transformador

Também note que a chave IGBT muda do nível de bloqueio de aproximadamente 1000 V rapidamente para uma tensão próxima de zero (região de saturação) durante o tempo de condução do pulso, porém com, seu tempo de recuperação de bloqueio de aproximadamente 500 ns de acordo com a simulação da Fig. 3.2..

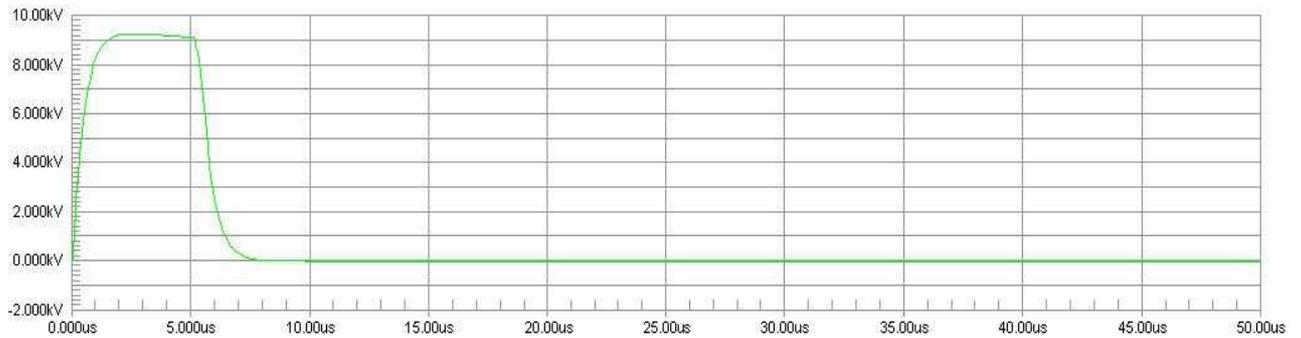


Figura 3.1: Simulação da tensão de saída do modulador em plena carga.

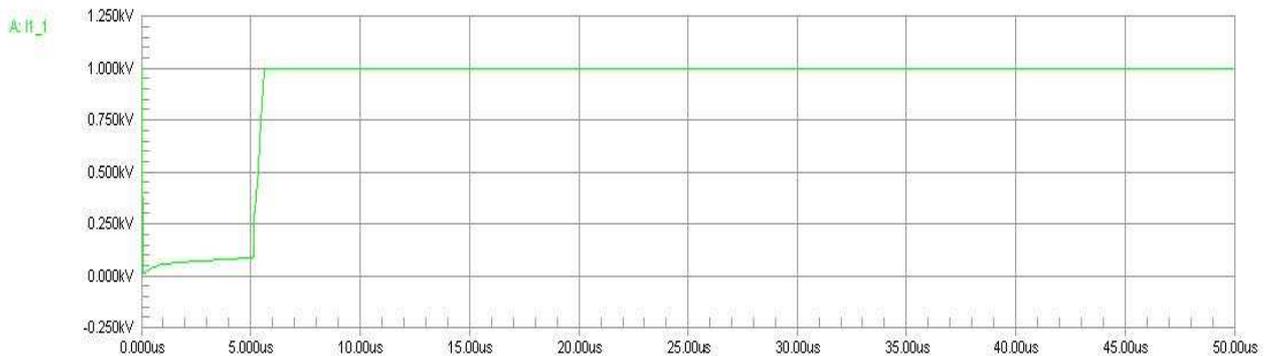


Figura 3.2: Pulso do coletor do IGBT durante o chaveamento.

Inicialmente para testar apenas o circuito chaveador em BT, montamos o seguinte circuito mostrado na Fig. 3.3, sem o transformador de pulso de saída, e comparamos os resultados de simulação com os experimentais, porém com o tempo de largura de pulso muito maior (da ordem de 125 μ s) uma vez que não foi usado o transformador. Também, observe nesse caso que foi usado uma capacitância menor (4 μ F) para os testes do circuito chaveador em BT. A placa de testes do circuito chaveador está mostrada na Fig 3.4.

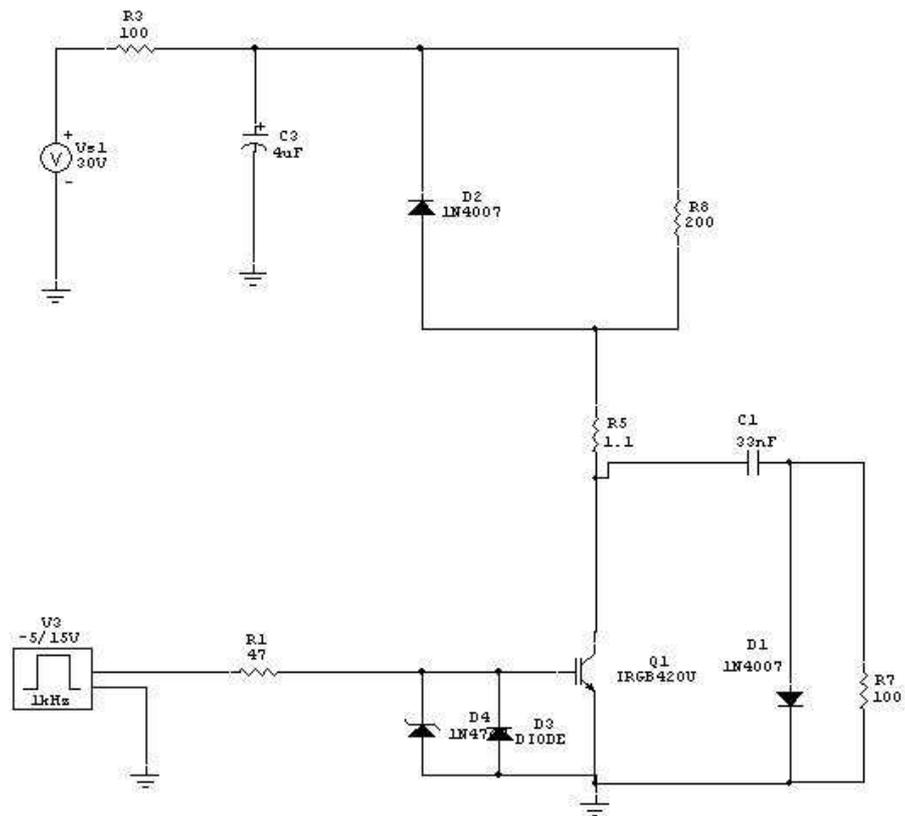


Figura 3.3: Circuito do chaveador usado para testes em BT sem o transformador de pulso.

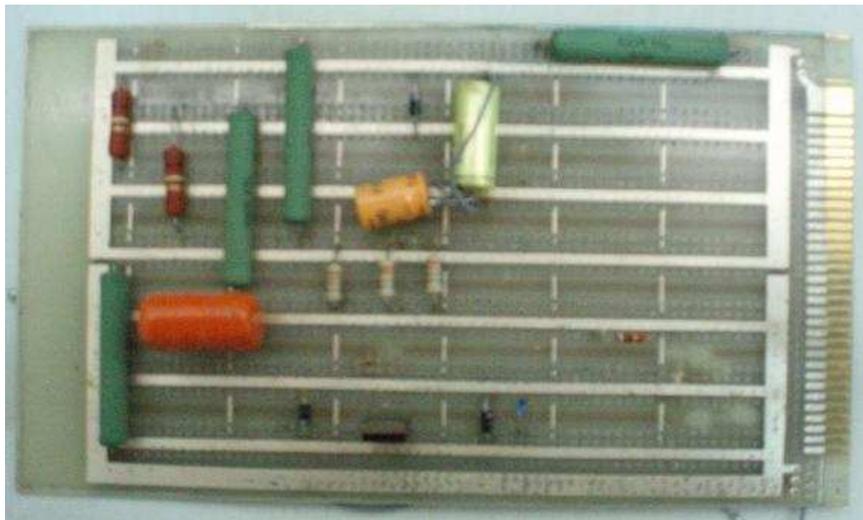


Figura 3.4: Foto da placa do circuito de chaveamento para testes em BT.

Observe no circuito da Fig. 3.3 que uma resistência de 200 ohms foi usada para simular uma carga de 2 K ohms refletida no primário do transformador.

As Figuras 3.5., 3.6. e 3.7. mostram respectivamente as tensões de saída do gerador de pulso (V_p), **de porta ou gate** do IGBT (V_g) e de coletor (V_c). As curvas em azul mostram os resultados de simulação, enquanto as curvas em vermelho os experimentais. Praticamente, como observado nas Fig. 3.5 & 3.6, não existe basicamente diferença entre V_p e V_g , visto que a existe apenas uma pequena resistência de 47 ohms entre a porta do IGBT e a saída do gerador e a corrente de base da chave é mínima (praticamente zero). Verifica-se que existe uma boa concordância entre os gráficos de simulação e experimentais, o que demonstra a confiabilidade e funcionalidade do circuito chaveador proposto. Observe também neste caso que o tempo de recuperação de bloqueio da chave (veja a Fig. 3.7) que o tempo de recuperação de bloqueio da chave é afetado pela inclusão da capacitância de 33 nF circuito RCD de proteção do IGBT, uma vez que o primário do transformador não está conectado ao circuito. Observa-se que na simulação da Fig. 3.2 que o uso do transformador reduz o longo tempo de subida que é observado durante o corte da chave IGBT nos testes em BT (Fig. 3.7). No entanto, como anteriormente, o tempo de condução é controlado pela largura de pulso ajustada no gerador de pulsos de 12 V e é extremamente rápido (na faixa de ns), sendo basicamente limitado pela características elétricas da chave IGBT.

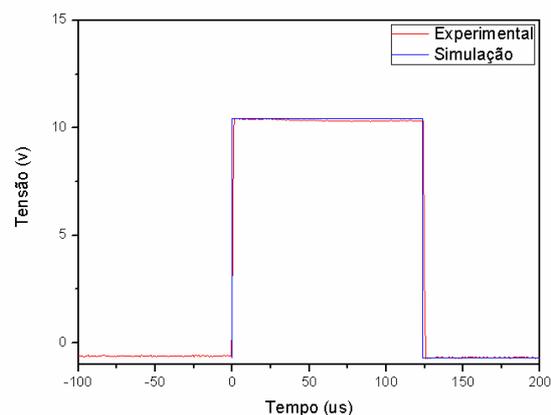


Figura 3.5: Tensão de saída do gerador de pulsos de BT.

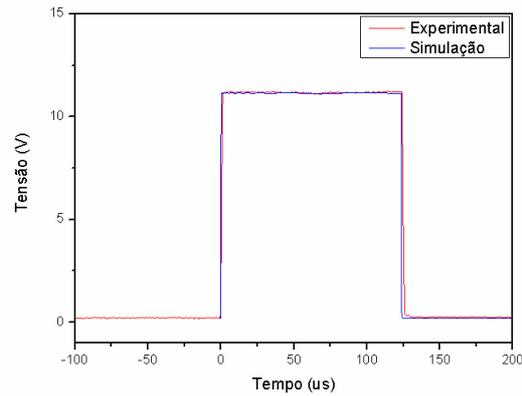


Figura 3.6: Tensão de porta ou de gate do IGBT.

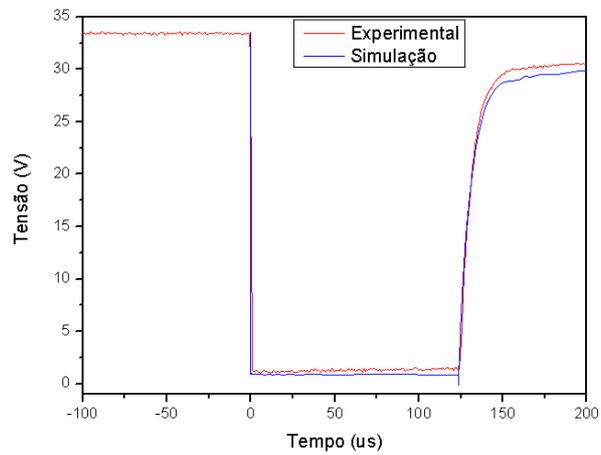


Figura 3.7: Tensão no coletor do IGBT

Para próxima fase do projeto, construímos um transformador de pulso de AT com uma relação de espiras de 1:100 conforme mostra a Fig. 3.8. Entretanto, em primeiro lugar fizemos os testes em BT do transformador de pulso acoplado ao circuito chaveador para checar o funcionamento do modulador em topologia completa.



Figura 3.8: Foto mostrando duas vistas do transformador de pulso construído.

Para os testes em BT do modulador com topologia completa usamos uma capacitância maior no circuito chaveador de $50 \mu\text{F}$ (de acordo com o projeto da Fig. 2.1) e usamos uma fonte DC ajustada em 33 V. Como carga, um resistor de alto valor de 100 k ohms foi ligado ao secundário do transformador. Após simulações e testes em BT com o circuito chaveador, utilizando o transformador de pulso, comparamos a tensão de saída simulada na carga com aquela obtida experimentalmente, conforme mostra a Fig. 3.9. Nesta figura, observa-se que a uma boa concordância entre os resultados experimentais e de simulação demonstrando que os parâmetros estimados de projeto, como indutância de dispersão e de magnetização do transformador estão corretos, bem como a capacitância parasita calculada dos enrolamentos primário e secundário.

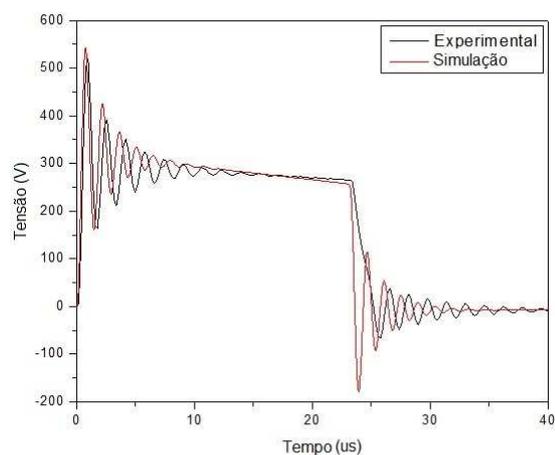


Fig. 3.9: Tensão de saída do transformador de pulso nos testes em BT.

Os testes e simulações a seguir (ver Fig 3.10 e 3.11) .mostram respectivamente a tensões de porta e de coletor do IGBT. As curvas em preto mostram os resultados de simulação, enquanto as curvas em vermelho os experimentais. Verifica-se novamente que existe uma boa concordância entre os gráficos de simulação e experimentais, o que demonstra uma boa confiabilidade e funcionalidade do circuito chaveador proposto.

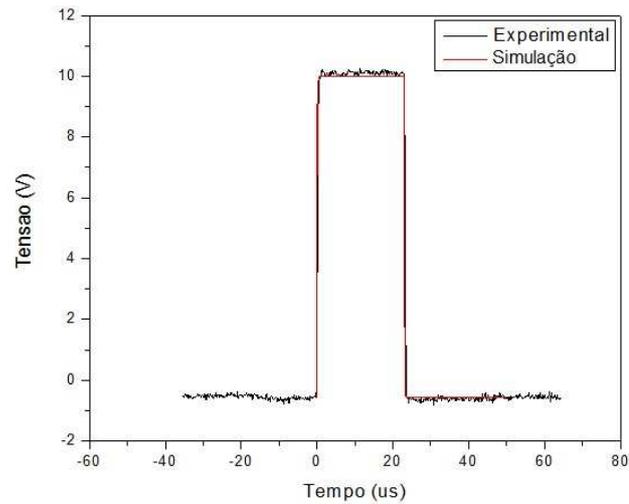


Fig. 3.10: Tensão de porta do IGBT.

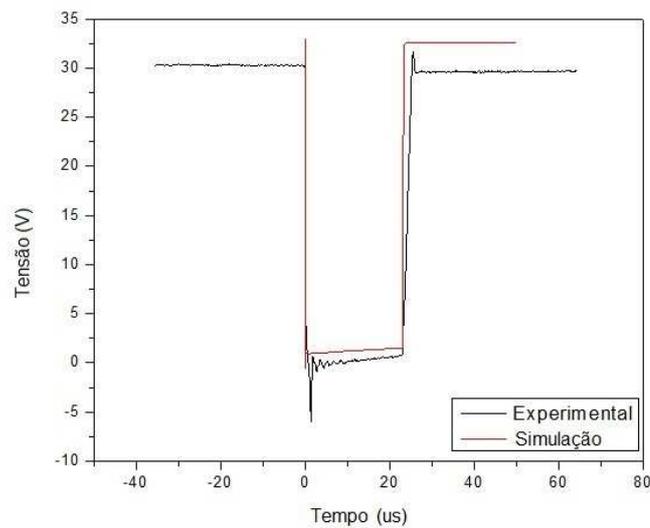


Fig. 3.11: Tensão no coletor do IGBT.

Finalmente observe que para estes testes a largura do pulso do modulador foi ajustada em 23 μ s, neste caso, novamente para os testes em BT, a razão V-A do trafo não é excedida, pois a máxima tensão de entrada e da ordem de apenas 30 V. Para os testes em AT, a simulação na figura 3.2 mostra que as oscilações são suprimidas devido ao uso de uma maior carga na saída (2 k Ω), visto que maiores perdas ocorrem no circuito em função de uma maior corrente de saída durante o chaveamento. Portanto para a próxima fase do projeto, estamos planejando os testes em AT do transformador com máxima tensão de entrada em 1 kV, pois os resultados de simulação indicam que é possível chegar a tensões acima de 9 kV.

4 CONCLUSÃO

Como descrito, o objetivo deste projeto consiste no desenvolvimento de um pulsador compacto de estado sólido composto basicamente de um conversor DC direto chaveado por uma chave semicondutora do tipo IGBT e em série com um transformador de pulso. De fato, este projeto está baseado no *upgrade* de uma fonte similar compacta de 4kV/2A, a qual já se encontra em operação no LAP/INPE. No entanto, neste caso, o uso de uma topologia com vários transformadores de pulso de saída eleva o tempo de subida de pulso para mais de 2 -3 μ s. Isto é causado pela conexão utilizada paralela/ série respectivamente dos enrolamentos primários dos transformadores. Neste projeto, o ponto principal do trabalho consiste no aprimoramento de nova uma topologia com apenas um transformador de pulso na saída para a redução do tempo de subida de pulso. No presente momento, atingimos na simulação do circuito uma capacidade V/I máxima da ordem de 10 kV/5 A por enquanto. As simulações em AT desta topologia, bem como os testes de BT feitos neste trabalho indicam que é praticamente é possível obter uma redução do tempo de subida de pulso para valores ao redor de 1 μ s. Obtivemos bons resultados dos testes em BT em 125 μ s para o circuito *Forward* de chaveamento, O grande problema nesta configuração parece ser a inclusão do circuito RCD (para a desmagnetização do núcleo e proteção do IGBT) que aumenta consideravelmente o tempo de descida de pulso para valores na faixa de 20 μ s. Porém, com a inclusão do transformador de pulso, a simulação indica que este problema é minimizado pela a atuação do diodo D2 (*clamping*) que provoca a desmagnetização do núcleo, juntamente com o circuito RCD. Outro problema que parece afetar o desempenho do modulador parece ser as oscilações na tensão de saída do transformador durante o chaveamento em BT. Entretanto, isto aparenta ser eliminado quando o modulador está em operação a plena carga como indicam a simulação na Fig. 3.1. Para a próxima fase do projeto esperamos confirmar isto com os testes em AT, bem como o tempo de subida de pulso de aproximadamente 1 μ s. Por ultimo, também estamos programando testes em carga total do modulador para uso no sistema de implantação iônica, que e o objetivo final do projeto.

Nos testes de BT até o momento temos usado um transformador de 2 k Ω que em principio simula o comportamento do plasma. Porém, como o plasma e bastante dinâmico sua resistência varia enormemente durante o processo. Daí a importância dos testes finais do modulador em plena carga com a câmara a vácuo de implantação iônica em operação.

5 BIBLIOGRAFIA

- [1] X. Tian, X.Wang, B. Tan, and P. K. Chu, "Special modulator for high frequency, low-voltage plasma immersion implantation," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 70, no. 3, pp. 1824–1827, Mar. 1999
- [2] J L. M. Redondo, E. Margato, and J. F. Silva, "A new method to build a high-voltage pulse using only semiconductor switches for plasma immersion ion implantation," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 136, no. 1–3, pp. 51–54, Feb. 2001.
- [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.

ÍNDICE POR ASSUNTO

ABSTRACT, 10
INTRODUÇÃO, 15
LISTA DE FIGURAS, 12
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS, 13
LISTA DE SÍMBOLOS, 14
PROJETO DO MODULADOR COMPACTO, 16
SIMULAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS, 17
CONCLUSÃO, 25
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS, 27

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.