

GERADOR DE PULSOS RÁPIDOS PARA EXPERIMENTOS EM FÍSICA NUCLEAR

Jonas Rubini Jr.
Centro Técnico Aeroespacial
CTA - IEAv / EFA-A
CEP:12.228-840 - São José dos Campos - SP
Brasil
jonas@ieav.cta.br

Walter Kaiser
Escola Politécnica da USP - PEA
CEP:05508-900 - São Paulo - SP
Brasil
kaiser@guarani.lac.usp.br

Resumo - Este trabalho analisa o comportamento de componentes semicondutores (BJT, MOSFET e IGBT) utilizados como dispositivos de chaveamento nas configurações típicas de geradores de pulsos rápidos para aplicações como instrumentação em experimentos na área de física nuclear. Este tipo de aplicação requer pulsos estreitos (largura ~100ns) e rápidos (tempo de subida ~0,5ns a 5ns) de alta tensão (tipicamente 1kV). Além da análise e de medições efetuadas em protótipos são propostas algumas diretrizes de projeto.

Abstract - The paper analyses semiconductor components (BJT, MOSFET and IGBT) employed as switching devices in typical circuit topologies for fast pulse generators used in instrumentation for nuclear physics research. Fast rise time (~0.5 ns to 5 ns), high voltage (1kV typically) and short pulse width (~100ns) are required in this kind of application. Design examples, practical measurements and design procedures are also presented.

I. INTRODUÇÃO

Determinados tipos de laser [1] assim como a instrumentação de aceleradores de elétrons [2] utilizados em experimentos de física nuclear necessitam de pulsos estreitos (largura ~ 100 ns) de alta tensão (tipicamente 1 kV de pico) envolvendo correntes elevadas (tipicamente 30 a 50 A de pico) conhecidos na literatura como pulsos rápidos (“fast pulses”) devido às suas especificações de tempo de subida (tipicamente 0,5ns a 5 ns).

Este trabalho analisa o desempenho dos transistores BJT (“Bipolar Junction Transistor”), MOSFET (“Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor”) e IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), quando utilizados como dispositivos de chaveamento em geradores de pulsos rápidos. A análise de desempenho dos componentes é realizada com base em resultados experimentais obtidos de medições em protótipos. Também são discutidos os critérios de seleção adotados para os dispositivos semicondutores para garantir uma boa reprodutibilidade do projeto.

Os protótipos construídos foram testados como geradores de pulso para o disparo de um canhão de elétrons utilizado em um acelerador linear de partículas.

II. GERADOR DE PULSOS

Um gerador de pulsos rápidos [3] é constituído de uma unidade de armazenamento, constituída por uma rede formadora de pulsos (PFN - “Pulse Forming Network”), alimentada por uma fonte de alta tensão, cuja energia é transferida à carga através de um dispositivo de chaveamento conforme mostra o diagrama de blocos da figura 1.

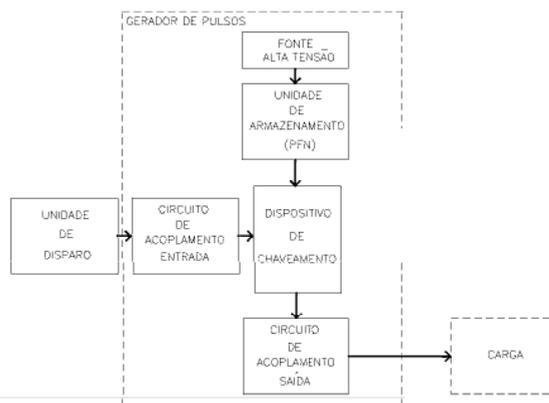


Figura A Diagrama de blocos de um gerador de pulsos.

A fonte de alta tensão possui rígidas especificações quanto à regulação da tensão e sua estabilidade.

A PFN é constituída de elementos capacitivos e indutivos e determina as características do pulso. Nos protótipos implementados utilizou-se um cabo coaxial com terminação em aberto, de forma que a largura do pulso correspondesse ao dobro do tempo de propagação do sinal pelo cabo. O comprimento do cabo e sua impedância característica (50Ω ou 75Ω) determinam a geometria do pulso e a impedância de saída do gerador.

Os dispositivos de acoplamento de entrada e saída realizam o casamento de impedância e o isolamento elétrico do gerador de pulsos com a unidade de disparo e a carga respectivamente.

Os dispositivos de chaveamento afetam diretamente as características dinâmicas dos pulsos de saída. Para atender às especificações de “pulsos rápidos” o componente deve apresentar: a) baixa resistência de condução; b) tempo de chaveamento compatível com as especificações do tempo de subida do pulso e c) capacidade para chaveamento de valores elevados de potência de pico.

III. DISPOSITIVOS DE CHAVEAMENTO

Os dispositivos de chaveamento podem ser implementados através de válvulas Thyatron [4] ou componentes semicondutores, como os transistores BJT, MOSFET e, mais recentemente, o IGBT.

A seguir são apresentadas as características básicas de cada uma das alternativas:

A. Válvula Thyatron

A válvula Thyatron é um dispositivo robusto e imune a transientes de tensão, que permite o chaveamento de elevados valores de pico de tensão e potência. No entanto, o seu volume e peso excessivos, a necessidade de circuitos auxiliares complexos, as elevadas perdas de potência no filamento, a vida útil limitada e o seu custo elevado inviabilizaram a sua utilização após os recentes desenvolvimentos na área de semicondutores de potência.

B. Transistor BJT operando na região de Avalanche

O transistor bipolar (BJT) entra na região de avalanche (“breakdown”) quando a máxima tensão reversa da junção coletor-base é excedida. Operando no modo de corrente do “second breakdown” (segunda ruptura) [5], o transistor passa a funcionar como uma chave de comutação rápida de alta tensão e baixo “jitter”. Esta condição de operação pode ser destrutiva para o componente, se durante o ciclo de trabalho, a potência ultrapassar os limites máximos de tensão e corrente ($V_{CEmax} \times I_{Cmax}$) determinados pela curva de operação segura do dispositivo semiconductor (SOAr - Safe Operation Area). A dissipação de potência está relacionada com a máxima tensão de ruptura (BV_{CBO}) e a corrente de pico máxima de coletor (I_{CPULSO}).

A velocidade de comutação depende essencialmente da resistência R_B de polarização da junção base-emissor e das características intrínsecas do componente, tais como: a largura efetiva de base (ω), a resistência intrínseca de base (r_{bb}), a resistência entre o coletor e a base efetiva (r_{ce}), a indutância nos terminais (devido ao encapsulamento)[5].

Na tabela 1, são indicados os principais parâmetros elétricos para 3 tipos de BJTs, comumente, utilizados como dispositivos de chaveamento em geradores de pulso rápidos.

TABELA I
- Principais parâmetros elétricos do BJT

Parâmetro	Tipo			Unid.
	2N5551	BD139-16	2N3055	
BV_{CBO}	180	180	100	V
$I_C(Max.)$	0.6	2	15	A
h_{FE}	80	40-250	70	-
$P_D(Max.)$	0.5	8	115	W
Encapsul.	TO-92	TO-126	TO-3	-

A associação série de BJTs operando na região de avalanche resulta num dispositivo de chaveamento robusto, de comutação rápida e baixo custo. A variação da amplitude do pulso de saída é discreta pois depende da tensão de ruptura de cada elemento da associação. O valor reduzido da tensão máxima de ruptura da junção coletor-base (BV_{CBO}) disponível em componentes comerciais e a elevada dispersão nas características entre lotes dificultam o projeto.

Portanto, é necessário qualificar individualmente cada componente de forma a se obter uma associação com a tensão de ruptura desejada. Cada componente é testado para determinação da sua tensão de ruptura (BV_{CBO}) e do tempo de chaveamento, utilizando o circuito indicado na figura 2.

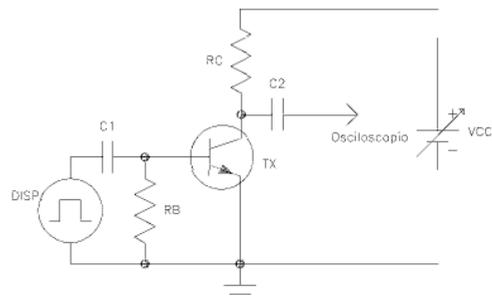


Figura 2 - Circuito de teste para seleção de BJTs

A figura 3 mostra o histograma com a dispersão do parâmetro BV_{CBO} para um lote de 30 componentes de cada modelo indicado na tabela 1. Verifica-se que alguns tipos de transistores, como o BD139-16, apresentam baixa dispersão em relação ao parâmetro (BV_{CBO}).

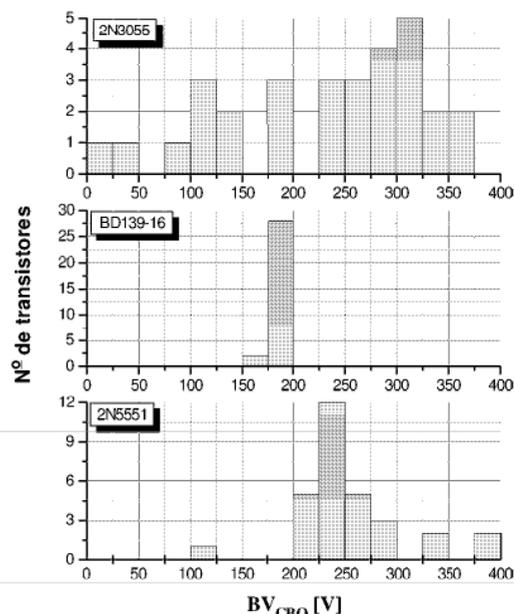


Figura 3 - Curvas de dispersão do parâmetro BV_{CBO}

Para garantir a estabilidade dos parâmetros é recomendável realizar-se um processo de “burn-in” [6], submetendo cada componente à sua tensão de BV_{CBO} durante algumas horas.

C. Transistor MOSFET de Potência

O MOSFET de potência é um dispositivo para chaveamentos rápidos, constituindo uma alternativa para este tipo de aplicação [7]. A velocidade intrínseca dos componentes comerciais é limitada em aproximadamente 300ps pelo encapsulamento (resistência e indutância dos terminais) e pela capacitância entre dreno e fonte.

A principal limitação do MOSFET de potência é a máxima tensão aplicável entre dreno e fonte. Os dispositivos comerciais suportam tensões V_{DS} até 1 kV e correntes pulsadas com valores de pico de 20 a 50 A. Para contornar este problema utiliza-se a técnica de empilhamento [7], associando-se componentes em série até alcançar os limites de tensão desejáveis. A condição de falha mais freqüente quando se utiliza esta técnica é a perfuração da interface de SiO_2 na região de gatilho-fonte, quando a tensão V_{gs} ultrapassa o seu limite máximo (tipicamente $\pm 20V$). Mesmo implementando as proteções usuais, tais como a inserção de um diodo zener em paralelo com o gatilho e a fonte, a associação continua susceptível a danos provocados por transitórios de tensão.

O circuito de disparo [8] ligado ao gatilho deve apresentar baixa impedância, ou seja, elevada capacidade de corrente de forma a carregar rapidamente a capacitância de entrada do MOSFET. Uma alternativa é utilizar um transistor bipolar operando no modo de avalanche, respeitando os limites especificados para o gatilho.

A amplitude máxima de tensão do pulso é determinada pela máxima tensão V_{DS} do MOSFET e máxima potência é limitada pela curva SOAr ($V_{DS} \times I_{DM}$) do dispositivo.

D. Transistor IGBT

Publicações recentes [9,10] apresentam o IGBT como dispositivo de chaveamento em geradores de pulsos rápidos de alta potência. O IGBT é um dispositivo BIMOS no qual um transistor bipolar PNP e um MOSFET de potência formam uma conexão Darlington com elevada impedância de entrada.

As proteções e limitações do circuito de gatilhamento são análogas às do MOSFET de potência. Similar ao BJT, o IGBT possui uma tensão máxima de operação (tipicamente 1200V) entre os terminais de coletor e emissor (V_{CES}) que determina a amplitude máxima do pulso de saída.

IV. CONFIGURAÇÕES UTILIZADAS EM GERADORES DE PULSOS RÁPIDOS

Devido às limitações impostas pela máxima tensão de trabalho dos dispositivos semicondutores disponíveis, foram analisadas duas configurações que elevam a amplitude da tensão do pulso de saída: a) empilhamento ("stacking") de dispositivos e (b) circuito Marx bank. As figuras 4(a) e 4(b) ilustram estas configurações utilizando o BJT como dispositivo de chaveamento.

Na configuração de empilhamento, a amplitude de tensão do pulso pode ser teoricamente obtida multiplicando-se o número de transistores empilhados pela máxima tensão de ruptura (BV_{CBO}) do componente. O disparo do dispositivo situado no menor potencial de tensão leva ao chaveamento dos demais. Na configuração Marx bank os capacitores de

acoplamento "C", entre cada célula, são carregados em paralelo e após o disparo da primeira célula são descarregados em série. A amplitude do pulso de saída é determinada pelo número de células multiplicada pela máxima tensão de ruptura de cada dispositivo. Em ambos os casos, admite-se casamento perfeito entre as impedâncias da carga e do gerador.

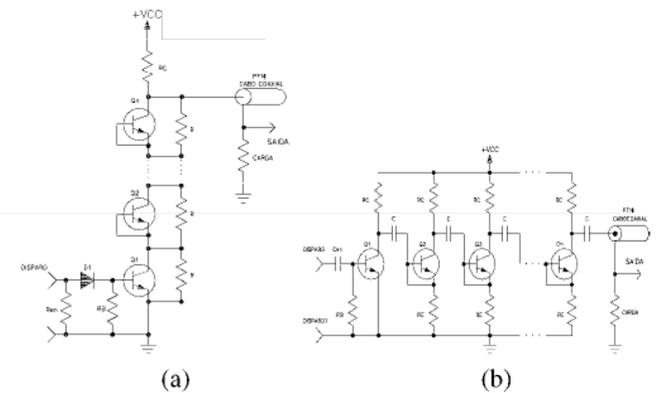


Figura 4 - Configurações de dispositivos: (a) empilhamento (b) configuração Marx bank.

A principal vantagem do empilhamento de transistores operando na região de avalanche em relação à configuração Marx bank é o menor número de componentes, o que se reflete numa menor indutância em série com a chave. A desvantagem é a necessidade de uma fonte com tensão de saída mais elevada.

Uma outra alternativa seria um arranjo híbrido no qual cada célula de uma configuração Marx bank utiliza o empilhamento de componentes.

V. RESULTADOS OBTIDOS

Foram implementados e testados protótipos de laboratório de um gerador de pulsos rápidos para um canhão de elétrons[11] utilizando os três dispositivos citados (BJT, MOSFET e IGBT). As características de pulso exigidas para tal aplicação são: a) amplitude de tensão de saída de 800V a 1 kV; b) largura de pulso de 200ns; c) tempo de subida de 5ns; d) taxa de repetição de 500Hz e e) impedância de saída de 50Ω a 150Ω. Nesta aplicação o gerador de pulsos opera em um potencial flutuante de 100 kV, de forma que as exigências de robustez e imunidade a transientes precisam ser severas.

Nos protótipos utilizando-se BJTs e MOSFETs de potência adotou-se a técnica de empilhamento dos dispositivos, em função da simplicidade de projeto e implementação. Também foi testado um protótipo utilizando um único IGBT com o objetivo de avaliar o seu desempenho nesta aplicação.

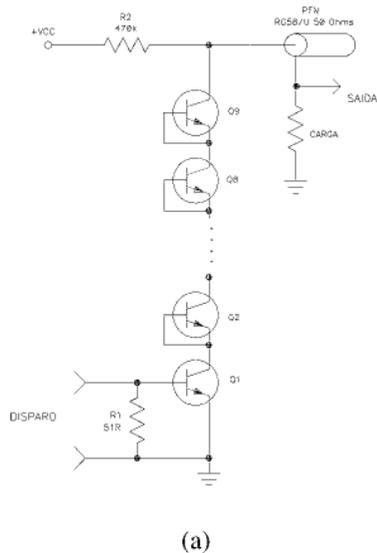
A PFN foi implementada utilizando-se 20m de cabo coaxial tipo RG58/U, com impedância própria de 50Ω e tempo de propagação de 5,05 [ns/m], resultando uma largura de pulso de 200 ns. Para efeito de projeto, utilizou-se uma resistência de 50Ω para representar o canhão de elétrons.

A. Protótipo utilizando BJT

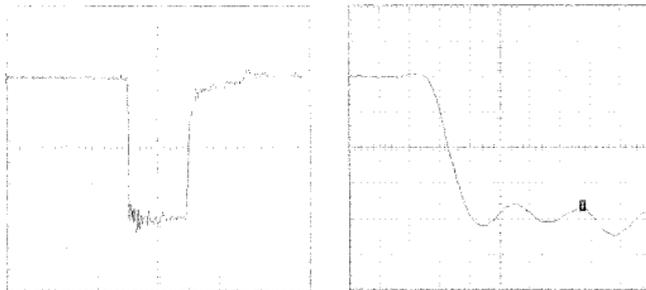
No protótipo foram utilizados 8 transistores BD139-16 ligados em série, utilizando a técnica de empilhamento mostrada na figura 5a e uma fonte de tensão de 1,7 kV. A escolha do componente foi realizada em função da baixa dispersão do valor BV_{CBO} (180 V), o que permite uma boa reprodutibilidade do projeto.

A figura 5b mostra o pulso de saída, com amplitude de aproximadamente 800V, largura de 200 ns e taxa de repetição de 50 Hz. Na figura 5c pode-se verificar um tempo de chaveamento (fall time) inferior a 5ns.

A implementação com transistores BJT apresentou operação estável e robustez em relação a picos de tensão durante os testes no canhão de elétrons do acelerador de partículas.



(a)



(b)

(c)

Figura 5 a) Circuito utilizando BJT b) Pulso de saída (200V/div - 200ns/div) e (c) Borda de descida (100V/div - 5ns/div)

B. Protótipo utilizando MOSFET de potência

O protótipo foi construído associando-se em série 4 componentes IRF 840 utilizando a técnica de empilhamento conforme mostra a figura 6a e uma tensão de fonte de 1,6kV. Cada componente apresenta uma tensão $V_{DSMAX}=500V$, suporta valores de pico de corrente de 16A e possui uma capacitância efetiva de entrada de $C_{gs}=3100pF$.

Para o projeto deste gerador de pulsos, foi utilizado o método proposto por Baker [7], que se baseia na divisão de tensão entre a capacitância efetiva C_{gs} do MOSFET e a capacitância CG conectada entre o terminal de gatilho e o potencial de terra.

As capacitâncias entre o gatilho e o potencial de terra podem ser obtidas pela expressão:

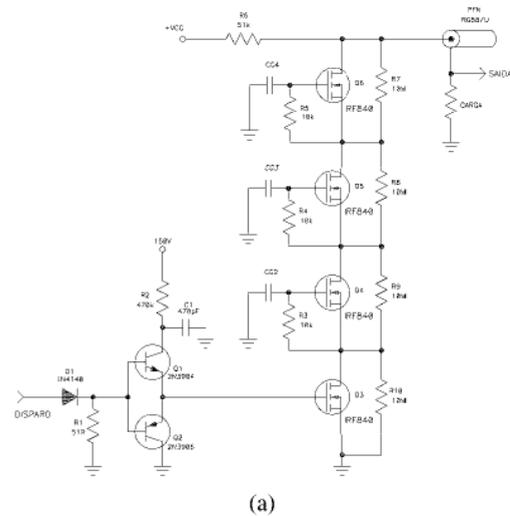
$$CG_n = [1 / (n - 1)] CG_2 \text{ para } n > 1 \quad (1)$$

onde:

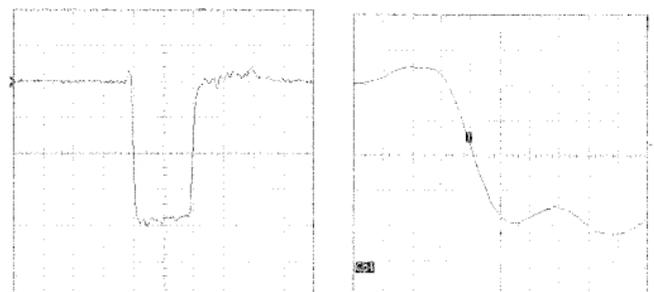
$$CG_2 = [C_{gs} / (A_V - 1)] \quad (2)$$

Para o protótipo resultaram os seguintes valores de capacitâncias: $CG_2=150pF$, $CG_3=50pF$ e $CG_4=33pF$. O pulso, mostrado na figura 6b, apresenta amplitude de 800V e largura de 200 ns. Pela figura 6c, verifica-se que o tempo de chaveamento é inferior a 10ns.

O circuito utilizando MOSFET permite a variação contínua da amplitude do pulso de saída através de ajustes na tensão da dreno. Porém, o arranjo é muito sensível a transitórios da alta tensão, o que levou a destruição (perfuração da camada SiO_2 do terminal de porta) de vários componentes durante os testes utilizando o canhão de elétrons.



(a)



(b)

(c)

Figura 6 (a) Circuito utilizando MOSFET (b) Pulso de saída (200V/div - 100ns/div) (c) Borda de descida (200 V/div - 5ns/div)

C. Protótipo utilizando a IGBT

O IGBT surge como uma alternativa promissora, uma vez que a máxima tensão coletor-emissor sustentada é mais elevada que dos MOSFET's, com uma menor capacitância efetiva de entrada (<400 pF).

No protótipo, cujo circuito é apresentado na figura 7a, foi utilizado para o componente IRGBF20F. Neste caso, os

testes foram realizados utilizando-se uma resistência de 50Ω como carga e o gerador de pulso foi mantido em um potencial de 100 kV para simular uma condição real de ensaio.

Pelas figuras 7b e 7c verifica-se que o pulso apresenta amplitude de 800V e largura de 200 ns com um tempo de chaveamento inferior a 5ns.

Os resultados preliminares mostram que o IGBT pode ser usado como um dispositivo de chaveamento em geradores de pulsos rápidos. Tal como o MOSFET, permite a variação contínua da amplitude do pulso de saída através de ajustes na tensão da fonte.

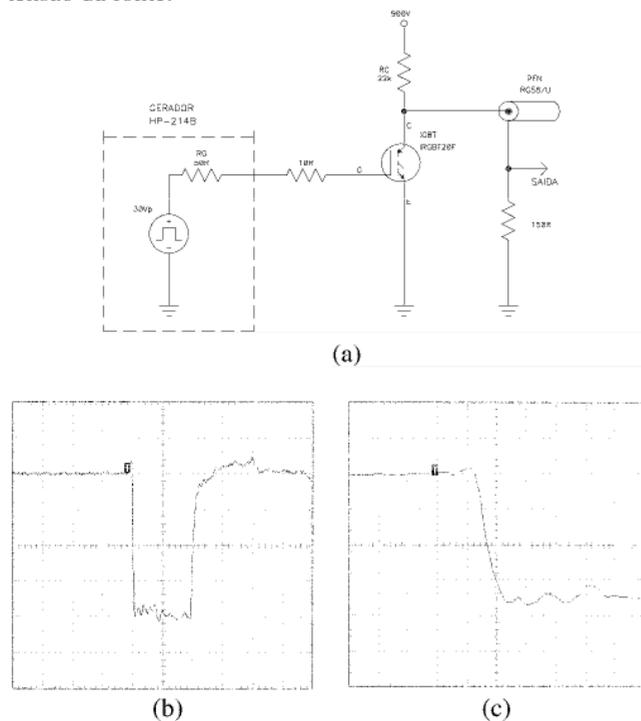


Figura 7 (a) Circuito utilizando IGBT (a) Pulso de saída (200V/div - 100ns/div) (b) Borda de descida (200V/div - 5ns/div)

VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se um estudo comparativo de dispositivos de chaveamento rápido de alta potência aplicados em instrumentação nuclear. Foram apresentados procedimentos para a escolha do dispositivo, bem como configurações de circuitos, aplicados em projetos de geradores de pulsos.

Foram implementados e testados protótipos de geradores de pulsos para o disparo de um canhão de elétrons. O protótipo a MOSFET, apesar de permitir uma variação contínua da amplitude do pulso, mostrou fragilidade em relação transitórios inerentes neste tipo de aplicação. O protótipo utilizando o BJT mostrou-se mais robusto, no entanto requer um procedimento especial de seleção de componente, em função da grande dispersão da tensão de ruptura. O IGBT foi testado e avaliado como alternativa de dispositivo de chaveamento rápido, cujos resultados são promissores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Oak, S.M.; Biandra, K.S.; Narayan, B. S.; Khardekar, R.K. A fast cavity dumper for a picosecond glass laser, *Rev. Sci. Instrum.*, v. 62, n. 2, p. 308-312, Feb. 1991.
- [2] Stopa, C.R.S.; Silva, R.; Gonzalez, O.L.; Venneri, W.; Cardoso, J.L. Jr.; Padovan, M.C.; Schelin, H.R.; Chagas, E.F.; Veissid, V.L.C.P.; Takahashi, J. **Projeto Curumim, proposta para um acelerador de elétrons de 14 MeV.** São José dos Campos, CTA/IEAv/FEX, 1984. (Proposta de Projeto CTA/IEAv. PP. 001/84).
- [3] Glasoe, G. N.; Lebacqz, J. V. **Pulse Generators.** New York and London, McGraw-Hill, 1948.
- [4] Vilela, W.A.; Rubini, J. Jr.; Monteiro, M. Jr.; Nadir, A.S.; Ribeiro, R. **Disparador Thyatron,** Memorando Técnico N^o -104, CTA-IEAv-EAN-T, Ago. 1995.
- [5] Baker, R.J. High voltage pulse generation using current mode second breakdown in a bipolar junction transistor, *Rev. Sci. Instrum.*, v. 62, n. 4, p. 1031-1036, Apr. 1991.
- [6] Christiansen, J.; Frank, K.; Hartmann, W. Fast solid state high voltage pulse generator. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A256, p. 529-531, Jan. 1987.
- [7] Baker, R.J.; Johnson, B.P. Stacking power MOSFETs for use in high speed instrumentation, *Rev. Sci. Instrum.*, v. 63, n. 12, p. 5799-5801, Dec. 1992.
- [8] Baker, R.J.; Pocha, M.D. Nanosecond switching using power MOSFETs, *Rev. Sci. Instrum.*, v. 61, n. 8, p. 2211-2213, Aug. 1990.
- [9] Gerster, C. Fast high - power/high-voltage switch using series-connected IGBTs with active gate - controlled voltage-balancing, **APEC'94 IEEE APPLIED POWER ELECTRONICS CONFERENCE**, Orlando, Florida, 1994. n.p..
- [10] Park, K.; Kim, J.J. A high power current pulse generator using an Insulated-Gate Bipolar Transistor, *Rev. of Sci. Instrum.*, v. 66, n. 6, p. 3713-3717, Jun. 1995.
- [11] Tessarotto, L. A. B. **Aspectos da construção de um canhão de elétrons de alta corrente.** São Paulo, 1989. 70p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Física, Universidade de São Paulo.

DADOS BIOGRÁFICOS

Jonas RUBINI Jr., Nasceu em Rio Claro - SP, em 18 de setembro de 1962. Formou-se em Eng. Elétrica pelo INATEL - Instituto Nacional de Telecomunicações de Santa Rita do Sapucaí - MG, em 1986. Obteve o título de M.S. em Eng. Elétrica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, em 1997. Atua como Tecnologista Sênior no Instituto de Estudos Avançados (IEAv) do Centro Técnico Aeroespacial (CTA) de São José dos Campos - SP, desde 1986. Atua como professor, do Depto. de Eletrônica da Escola Técnica Prof. Everardo Passos - ETEP de São José dos Campos -SP, desde 1987. Sua área de interesse compreende análise, projeto e aplicações de geradores de pulsos rápidos de alta potência.

Walter KAISER, Formou-se em Eng. Elétrica pela Escola Politécnica (POLI) da Universidade de São Paulo (USP) em 1980. Obteve os títulos de M.S. e Ph.D. em Eng. Elétrica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, em 1983 e 1989 respectivamente. Entre 1983 e 1989, atuou como engenheiro de desenvolvimento da fundação de engenharia e tecnologia da Universidade de São Paulo e inspetor de equipamento elétrico da *American Bureau of Shipping*. Está na POLI/USP desde 1990 e atualmente é professor assistente de eletrônica de potência do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas - PEA. Sua área de interesse é conversores estáticos aplicados em lâmpadas HID.