

GERADOR DE TRANSIENTES RÁPIDOS PARA TESTES DE INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA

Marcello Mezaroba¹, Neomar Giacomini¹ e Raphael Jorge Millnitz dos Santos¹

¹Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Campus Universitário Prof. Avelino Marcante s/n

Bairro Bom Retiro, CEP: 89223-100

Joinville, SC, Brasil.

E-mails: mezaroba@joinville.udesc.br, neomar@ieee.org e raphael.phh@gmail.com

Resumo - Esse trabalho apresenta a implementação de um Gerador de Transientes Rápidos para Testes de Interferência Eletromagnética. O gerador apresentado foi desenvolvido com base nas necessidades da norma IEC61000-4-4, que solicita a geração de pulsos de até 4kV em frequências de até 100kHz. O artigo trata de todos os subsistemas necessários para a construção de tal gerador, no entanto sua ênfase está nos dois subsistemas mais importantes que são a fonte de alta tensão e a unidade geradora de pulsos. Resultados experimentais e fotos do protótipo desenvolvido também são apresentados.

Palavras-chave – Fonte de Alta Tensão, Gerador de Burst, Gerador de Pulsos, Gerador de Transientes, Transientes Rápidos.

FAST TRANSIENT GENERATOR FOR ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE TESTS

Abstract – This article presents the implementation of a Fast Transient Generator for Electromagnetic Interference Tests. The presented generator was developed based on the IEC61000-4-4 standard needs that ask for pulses as high as 4kV and frequencies up to 100kHz. The article presents all the necessary subsystems to assemble such generator but emphasizes the two most important subsystems that are the High Voltage Power Source and the Pulse Shaping unit. Experimental results and pictures of the developed prototype are also presented.

Keywords – Burst Generator, Fast Transients, High Voltage Power Source, Pulse Generator, Transient Generator.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos com o aumento do número de elementos conectados as redes de energia, diversos problemas estão surgindo devido ao aumento na quantidade de ruídos provenientes tanto da falta de filtragem de ruídos nos equipamentos conectados a ela, quanto do chaveamento de

elementos de manobra dos sistemas de transmissão. Um dos problemas encontrados nas linhas de transmissão e distribuição são os chamados Transientes Rápidos popularmente conhecidos como *Bursts*. Este efeito, normalmente criado pelo chaveamento de elementos de manobra das linhas de transmissão e distribuição (interrupção de carga indutiva, vibração dos contatos de relés, etc.), é caracterizado por uma seqüência de pulsos de alta tensão em alta frequência que ocorre sobre a tensão nominal da linha tal como apresentado na Figura 1. Estes pulsos podem ser tanto positivos quanto negativos e das mais variadas amplitudes e frequências.

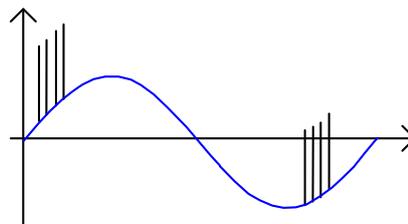


Fig. 1. Transientes rápidos em uma rede elétrica.

Depois de caracterizada a falha de equipamentos devido à presença de Transientes Rápidos na rede elétrica, diversos órgãos de normatização mundo afora iniciaram estudos para criar e padronizar testes que pudessem garantir o correto funcionamento de um equipamento mesmo sobre a influência deste fenômeno. Como resultados destes estudos foram criadas normas tais como a IEC61000-4-4 [1], aplicadas por diversos institutos cujos selos de qualidade garantem o correto funcionamento do equipamento em teste quando sujeito a tal fenômeno. Tais testes são caracterizados pela utilização de um gerador de pulsos de alta tensão e alta frequência que emite pacotes de pulsos, comumente chamados de *Bursts*, na rede em que o equipamento está conectado.

Até o presente momento, grande parte das publicações existentes relativas a transientes rápidos não tratam do gerador em si, mas sim da susceptibilidade de certos equipamentos na ocorrência de tal fenômeno e da análise do próprio teste [2]-[5]. Com o objetivo de preencher a lacuna existente e visando desenvolver um equipamento que atenda as exigências da IEC61000-4-4, o projeto de um gerador de transientes rápidos é apresentado neste trabalho, tratando de todos os subsistemas pertencentes ao equipamento.

Com a necessidade de se utilizar um interruptor rápido, de alta tensão e de baixo custo, foram analisadas estruturas que utilizam interruptores de potência conectados em série [6]-[14]. As estruturas analisadas que utilizavam *MOSFETs*

Artigo submetido em 14/04/2008. Revisão em 24/04/2009.
Aceito por recomendação do editor Fernando L. M. Antunes.

se mostraram de difícil ajuste experimental, enquanto que as estruturas com IGBTs não apresentaram tempos satisfatórios. Optou-se pelo desenvolvimento de uma nova técnica para conexão de chaves em série visando a concepção de um dispositivo chaveador de alta tensão, para a utilização na geração de transientes rápidos.

O gerador proposto neste trabalho poderá servir como uma alternativa simples e de menor custo frente aos geradores encontrados no mercado.

II. A NORMA VIGENTE: IEC61000-4-4

O circuito previsto pela norma é apresentado na Figura 2. Os elementos do circuito, C_C , R_M , R_C e R_S , deverão ser escolhidos de forma que o gerador tenha impedância efetiva de saída de 50Ω e que este seja capaz de gerar os transientes rápidos descritos no decorrer desta seção.

- R_C Resistência de carga do capacitor de armazenagem.
- C_C Capacitor de armazenagem.
- Q_P Chave do pulsador de alta tensão.
- R_S Resistência para formatação dos pulsos.
- R_M Resistência para casamento de impedâncias.
- C_D Capacitor para bloqueio de nível CC.

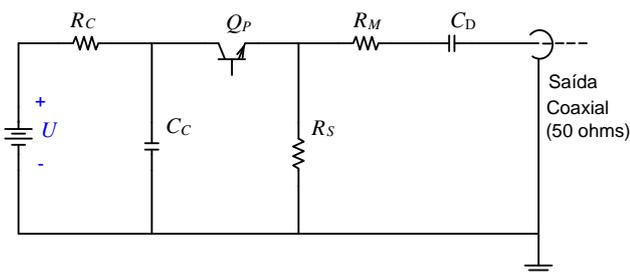


Fig. 2. Circuito simplificado do Gerador de Transientes Rápidos.

O circuito apresentado deve ser capaz de gerar o perfil de pulsos apresentado na Figura 3. A Figura 4 apresenta a característica individual dos pulsos a serem gerados. As características ressaltadas na Figura 4 devem seguir certas especificações descritas na norma.

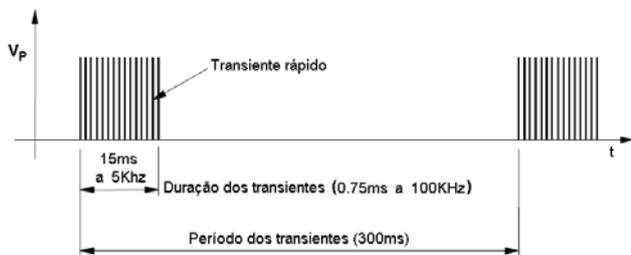


Fig. 3. Temporização dos Transientes Rápidos.

As características solicitadas pela IEC61000-4-4 em relação ao gerador são:

- Tensão de saída (Verificar TABELA I)
- Polaridade positiva e negativa
- Saída Coaxial
- Capacitor de bloqueio CC (C_D) de $10\text{nF} \pm 20\%$

- Frequência dos pulsos
 - $5\text{kHz} \pm 20\%$
 - $100\text{kHz} \pm 20\%$
- Relação com a rede de alimentação: Assíncrono
- Duração do trem de pulsos
 - $15\text{ms} \pm 20\%$ a 5kHz
 - $0,75\text{ms} \pm 20\%$ a 100kHz
- Período do trem de pulsos: $300\text{ms} \pm 20\%$
- Formato dos pulsos para carga de 50Ω
 - tr $5\text{ns} \pm 30\%$
 - td $50\text{ns} \pm 30\%$
- Formato dos pulsos para carga de $1\text{k}\Omega$ (Com capacitância menor ou igual a 6pF)
 - tr $5\text{ns} \pm 30\%$
 - td $50\text{ns} (-15\text{ns a } +100\text{ns})$

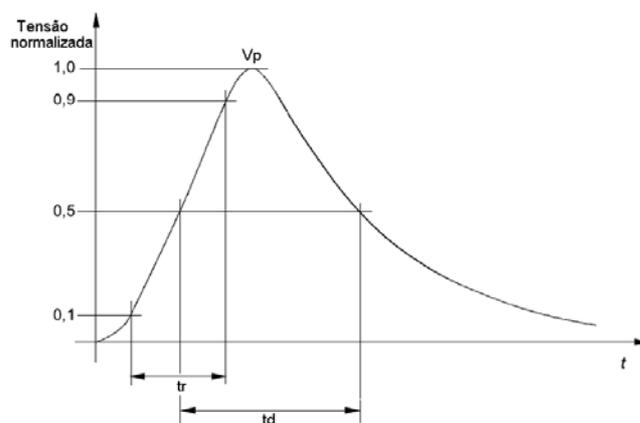


Fig. 4. Forma de um pulso.

TABELA I
Tensão V_p na saída do gerador

Tensão escolhida	V_p (aberto)	$V_p(1\text{k}\Omega)$	$V_p(50\Omega)$	Frequências
kV	kV	kV	kV	kHz
0,25	0,25	0,24	0,125	5 / 100
0,50	0,50	0,48	0,250	5 / 100
1,00	1,00	0,95	0,500	5 / 100
2,00	2,00	1,90	1,000	5 / 100
4,00	4,00	3,80	2,000	5 / 100

Todas as características apresentadas devem ser validadas utilizando um equipamento de medição e cargas de teste com banda passante de no mínimo 400MHz .

III. O GERADOR

O diagrama de blocos do sistema proposto, apresentado na Figura 5, é composto por diversos subsistemas necessários para satisfazer todas as necessidades previstas na norma tomada como base e outras características especificadas a partir de uma breve análise dos geradores de transientes rápidos disponíveis no mercado.

A lista abaixo identifica os blocos utilizados para a criação de tal gerador.

- Filtro de Interferência Eletromagnética.
- Fontes Auxiliares Isoladas.
- Interface Local
 - Teclado.
 - Display de Cristal Líquido.
- Comunicação RS232 Isolada. (Interface Remota)
- Detecção de passagem por zero (Sincronismo).
- Unidade de Gerenciamento (Controlador Digital de Sinais TMS320LF2401 da *Texas Instruments*)
- Fonte CC de Alta Tensão.
- Pulsador de Alta Tensão.

Devido ao grande número de blocos funcionais necessários para a sua correta operação, este artigo apresentará todos estes blocos, no entanto serão discutidos em maiores detalhes somente a Fonte CA-CC isolada de alta tensão e o Pulsador de alta tensão, ambos destacados na Figura 5.

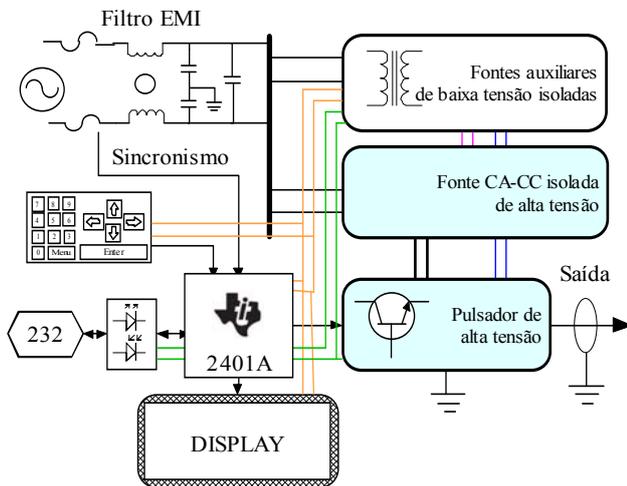


Fig. 5. Diagrama de blocos do gerador proposto.

IV. SUBSISTEMAS QUE COMPÕEM O GERADOR

A. Fonte CA-CC de Alta Tensão

Dentre as diversas estruturas capazes de fornecer alta tensão optou-se pela estrutura apresentada na Figura 6, por esta apresentar menor susceptibilidade a efeitos parasitas quando comparada às demais estruturas testadas pelos autores. A saída de alta tensão é obtida através de quatro estágios de processamento de energia. No primeiro, um retificador com filtro capacitivo, ocorre a conversão CA-CC para criação do barramento CC não controlado. Este barramento CC é conectado a um conversor CC-CC básico não isolado do tipo *Buck* controlado em malha fechada para obter o barramento CC controlado, o qual realiza o controle indireto da tensão de saída. O barramento CC controlado é então elevado e alternado utilizando um conversor *Push-Pull* que fornece ao estágio multiplicador uma tensão de entrada alternada com valor de até 1kV de pico. O estágio de saída é constituído por um Multiplicador de Tensão de

Cockcroft-Walton cuja saída alimenta um capacitor de grande capacidade de armazenamento de energia, o qual estabiliza a tensão de saída durante a geração dos transientes rápidos [18].

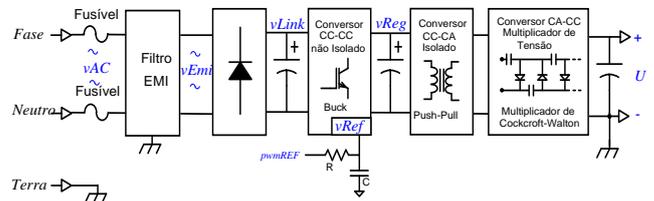


Fig. 6. Diagrama de blocos da Fonte de Alta Tensão Isolada.

A Figura 7 apresenta o esquema elétrico do filtro de EMI utilizado. Da esquerda para a direita encontram-se a entrada de alimentação proveniente da rede, fusíveis de proteção, capacitores C_x , os indutores acoplados de modo comum, indutores série, capacitores C_y e novamente capacitores C_x conectados em paralelo com a saída.

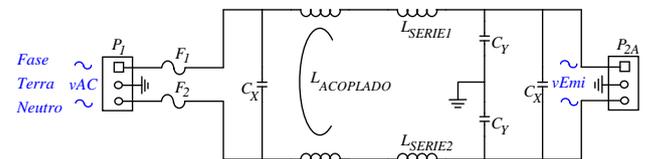


Fig. 7. Filtro de Interferência Eletromagnética.

A Figura 8 apresenta o esquema elétrico do retificador de entrada já conectado ao conversor CC-CC não isolado. Da esquerda para a direita encontram-se a entrada de alimentação proveniente do filtro de EMI, novamente protegida por um fusível usado durante os testes preliminares, conectada ao retificador de onda completa com filtro capacitivo. A tensão sobre o capacitor de filtragem, nomeada previamente como $vLink$, é enviada ao conversor *Buck* que opera com controle de tensão em malha fechada e possui como saída o barramento de tensão regulado chamado de $vReg$. Este barramento regulado é então disponibilizado na conexão de saída para ser fornecido ao estágio isolador.

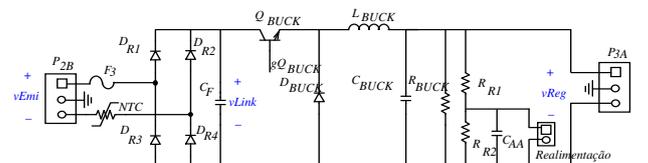


Fig. 8. Retificador de entrada e Conversor CC-CC não isolado do tipo *Buck*.

A Figura 9 apresenta o esquema elétrico do conversor CC-CA isolador do tipo *Push-Pull* conectado a um multiplicador de tensão de *Cockcroft-Walton*. Entre os transistores responsáveis pelo chaveamento do transformador pode-se verificar o conector que traz a tensão $vReg$ para este estágio. A tensão regulada é então alternada e elevada pelo *Push-Pull*, que apresenta uma tensão alternada quadrada de valor já elevado ao estágio de multiplicação de tensão. O multiplicador utilizado é do tipo *Cockcroft-Walton* de seis estágios, suficientes para obter os quase 5kV de saída necessários. A presença de uma resistência em série com o enrolamento secundário deve-se a limitação dos picos de

corrente que aparecem no transformador durante a carga dos capacitores do multiplicador.

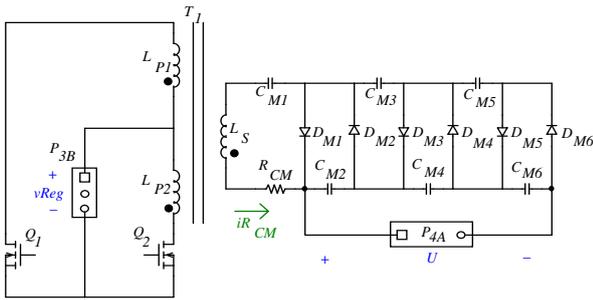


Fig. 9. Conversor CC-CA isolado do tipo Push-Pull e Multiplicador de tensão de Cockcroft-Walton.

B. Pulsador de Alta Tensão

Avaliando as características solicitadas em norma, verificou-se que a estrutura proposta pela norma vigente é uma opção viável e simples para a implementação do pulsador. A Figura 10 apresenta o circuito elétrico do gerador de pulsos em questão.

Ao longo da análise qualitativa, serão assumidas as referências de tensões e correntes apresentadas na Figura 10. Na análise também será considerada a existência de uma resistência série com a chave. Esta consideração é necessária devido a característica dos MOSFETs, que é a classe de transistores prevista para este circuito.

O comando da chave Q_P será realizado considerando que esta ficará fechada somente o tempo necessário para finalização do transitório de descarga do capacitor C_C , sendo aberta logo que este finalizar. As formas de onda apresentadas nesta análise não estão apresentadas em escala no tempo. O comportamento transitório durante a geração de um pulso é muito mais rápido que o transitório de recuperação do circuito, porém na análise estão apresentados com igual duração para melhor entendimento.

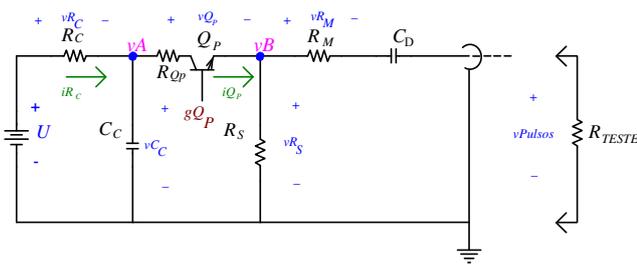


Fig. 10. Circuito Gerador de Transientes Rápidos utilizado ao longo das análises.

As variáveis elétricas e os componentes auxiliares ou parasitas apresentados na Figura 10 seguem a nomenclatura abaixo.

- v_A Tensão no nó A.
- v_B Tensão no nó B.
- v_{C_C} Tensão no capacitor de armazenagem.
- v_{Q_P} Tensão na chave Q_P .
- g_{Q_P} Gatilho da chave Q_P .

- v_{R_C} Tensão na resistência de carga do capacitor de armazenagem.
- v_{R_M} Tensão na resistência de casamento da impedância.
- v_{R_S} Tensão do resistor de formatação dos pulsos.
- v_{Pulsos} Tensão de saída do pulsador.
- i_{R_C} Corrente na resistência de carga do capacitor de armazenagem.
- i_{Q_P} Corrente na chave do Pulsador de Alta Tensão.
- R_{Q_P} Resistência série da chave do pulsador.
- R_{TESTE} Carga resistiva utilizada para o projeto do pulsador.

Analisando o circuito apresentado, pode-se verificar que o mesmo possui duas etapas de operação, descritas a seguir.

A primeira etapa de operação, ilustrada na Figura 11, inicia com o fechamento da chave Q_P , o que faz com que o capacitor C_C seja conectado ao circuito de saída. Com isto, a tensão no capacitor C_C , que está com valor próximo a U , começa a diminuir e sua energia passa a ser fornecida para a saída através de R_M e C_D , e consumida, em parte, pela resistência R_S . Após a finalização do transitório de descarga, a tensão no capacitor C_C tende a estabilização no valor definido pelo divisor resistivo formado por R_C e R_S .

A segunda etapa de operação, ilustrada na Figura 12 inicia com a abertura da chave Q_P , desta forma o circuito de saída é desacoplado do circuito de entrada permitindo assim que o capacitor C_C se carregue com uma tensão de valor próximo a U . Nesta etapa o capacitor C_D inicia sua descarga através dos resistores R_M e R_S , no entanto a sua tensão sofrerá somente uma pequena variação devido às constantes de tempo do circuito. A Figura 12 apresenta esta etapa de operação.

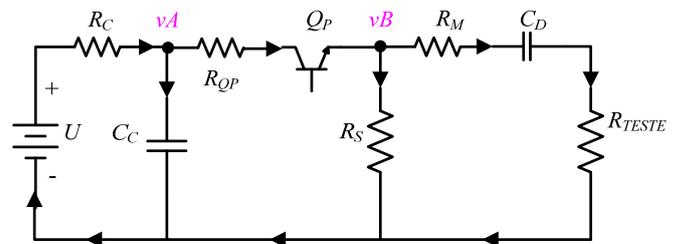


Fig. 11. Primeira etapa de operação do Pulsador de Alta Tensão.

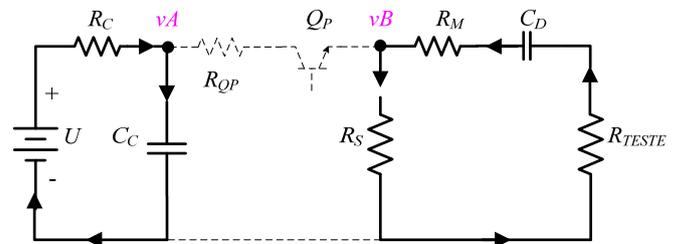


Fig. 12. Segunda etapa de operação do Pulsador de Alta Tensão.

As formas de onda das principais variáveis deste pulsador são apresentadas na Figura 13.

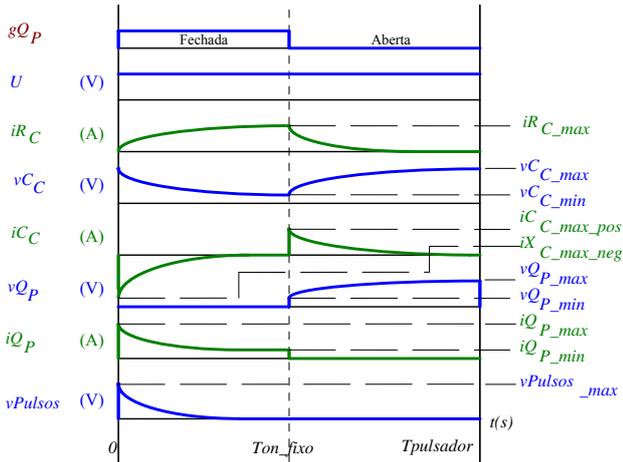


Fig. 13. Formas de onda para o pulsador de alta tensão.

Para equacionar a tensão de saída em função do tempo, optou-se pela solução através da Análise Nodal nos pontos A e B, juntamente com as teorias de Laplace aplicadas a circuitos.

Visando obter as equações que descrevem o comportamento da tensão de saída, pode-se analisar o circuito a partir do momento em que a chave Q_P é fechada. O capacitor C_D , utilizado para bloqueio de tensão contínua, será desconsiderado nesta análise de transitório, pois seu comportamento não afetará consideravelmente o mesmo. A equação (1) apresenta a análise nodal no ponto A.

$$\frac{V_A(S) - U/S}{R_C} + \frac{(V_A(S) - U/S)}{C_C \cdot S} + \frac{V_A(S) - V_B(S)}{R_{QP}} = 0 \quad (1)$$

A equação (2) apresenta a análise nodal no ponto B.

$$\frac{V_B(S) - V_A(S)}{R_{QP}} + \frac{V_B(S)}{R_S} + \frac{V_B(S)}{R_M + R_{TESTE}} = 0 \quad (2)$$

Utilizando as equações (1) e (2) em conjunto com as teorias de análise de circuitos pertinentes ao caso, pode-se encontrar $vB(t)$ e com esta achar $vPulsos(t)$, apresentada na equação (3).

$$vPulsos(t) = U \left(\delta e^{-\frac{\alpha t}{C_C R_C \beta}} + \lambda \right) \frac{R_S}{\alpha \beta} \left(\frac{R_{TESTE}}{R_{TESTE} + R_M} \right) \quad (3)$$

Onde:

$$\begin{aligned} \alpha &= R_{QP}(R_M + R_{TESTE} + R_S) + R_S(R_M + R_{TESTE}) + R_C(R_M + R_{TESTE} + R_S) \\ \beta &= R_{QP}(R_M + R_{TESTE} + R_S) + R_S(R_M + R_{TESTE}) \\ \delta &= (R_M + R_{TESTE} + R_S)(R_M + R_{TESTE})R_C \\ \lambda &= R_M R_{QP} R_S + R_{TESTE} \cdot (2R_M(R_{QP} + R_S) + R_{QP}R_S) + (R_{QP} + R_S)(R_{TESTE}^2 + R_M^2) \end{aligned}$$

A metodologia de projeto será suprimida devido à quantidade de considerações necessárias. A metodologia de projeto pode ser encontrada em [2].

Tal como se pode verificar pela topologia do Gerador de Transientes utilizado, há a necessidade da utilização de um elemento chaveador de alta tensão e de rápido fechamento. Devido aos custos envolvidos na obtenção de um dispositivo com estas características, os autores optaram por utilizar um arranjo de chaves de potência discretas conectadas em série.

A Figura 14 apresenta o circuito de *driver* utilizado para realizar o chaveamento das chaves conectadas em série.

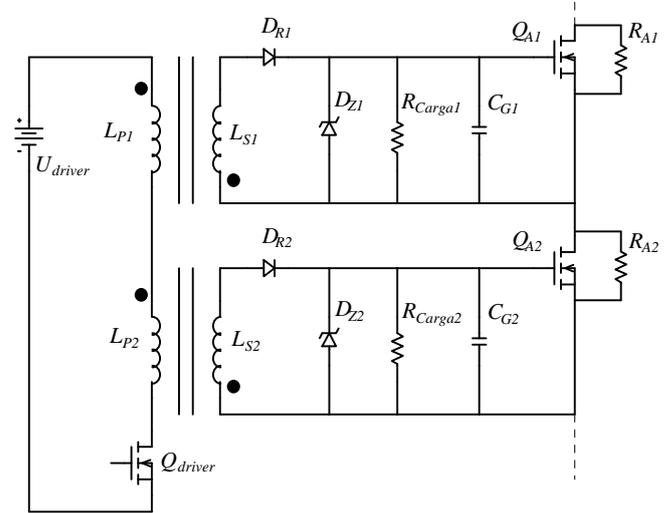


Fig. 14. Driver isolado ultra-rápido com tempo ligado fixo.

O rápido fechamento é garantido pelos *drivers* do tipo Flyback, que operam no modo de injeção de corrente. O tempo ligado, neste caso fixo, é garantido pela quantidade de energia armazenada nos conjuntos magnéticos. O equilíbrio entre as tensões das chaves do arranjo é garantido pelos resistores de balanço estático, localizados em paralelo com as chaves de potência, e pela calibração dos circuitos de *driver*. O funcionamento deste *driver* e também sua metodologia de projeto são detalhados em [16].

V. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.

A. O protótipo

O protótipo desenvolvido é apresentado na Figura 15. Na Figura 16 é apresentada uma vista superior identificando os subsistemas e as suas alocações dentro do protótipo. Nestas figuras é possível também verificar a presença das placas de blindagem utilizadas para evitar o acoplamento de ruídos provenientes dos subsistemas mais ruidosos.

A Figura 17 apresenta em detalhe a saída da fonte de alta tensão, onde foram utilizadas ranhuras e distâncias apropriadas para as tensões presentes no circuito. Diversas considerações relativas à confecção dos dispositivos eletromagnéticos e das placas de circuito impresso são apresentadas em [17] e devem obrigatoriamente ser seguidas para o correto funcionamento do sistema.

A Figura 18 apresenta a conexão entre a fonte de alta tensão e o Pulsador de Alta Tensão.

A Figura 19 apresenta o Pulsador de alta tensão com a carga teste de 50Ω conectada à sua saída. Também é possível verificar a chegada da conexão de alta tensão, das alimentações auxiliares e do sinal de gatilho.



Fig. 15. Protótipo do Gerador de Transientes Rápidos.

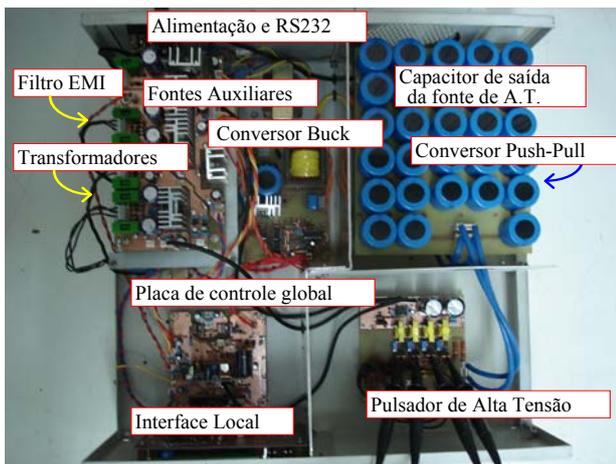


Fig. 16. Alocação dos subsistemas do gerador de Transientes.



Fig. 17. Detalhe na parte do multiplicador de Cockroft-Walton.



Fig. 18. Conexão da fonte de Alta-Tensão ao Pulsador.

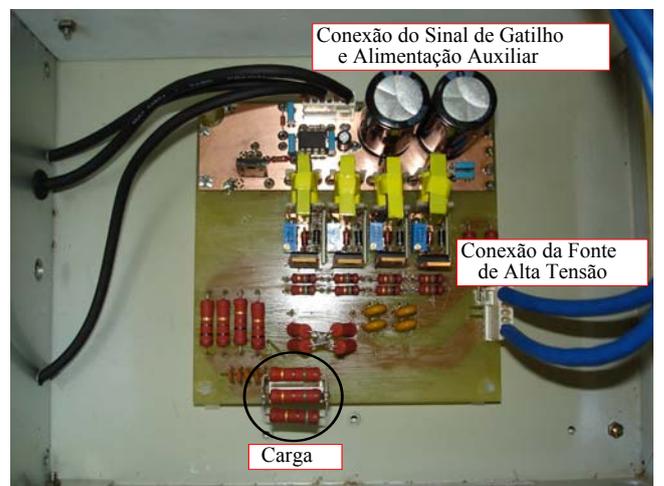


Fig. 19. Pulsador de alta tensão com carga teste de 50 Ω.

B. Geração de sinais

Visando verificar as exigências impostas pela norma vigente, foi realizada a análise do perfil dos pulsos gerados pelo equipamento. A Figura 20 apresenta o perfil de pulsos de comando macro. Tal como especificado os trens de pulsos ocorrem aproximadamente a cada 300ms.

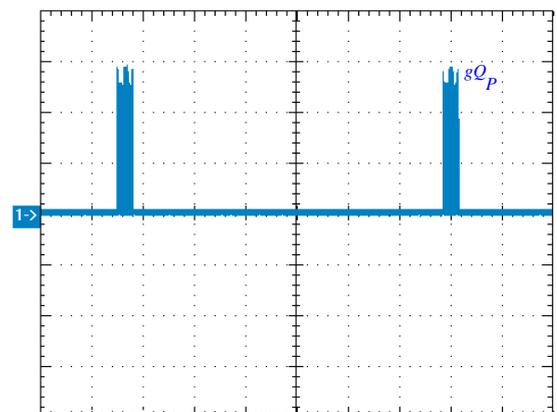


Fig. 20. Perfil global de geração de pulsos visto do sinal de comando do elemento chaveador (g_{QP} : 5V/div, 50ms/div).

A Figura 21 apresenta um zoom em um trem de pulsos, permitindo assim a verificação do número de pulsos gerados.

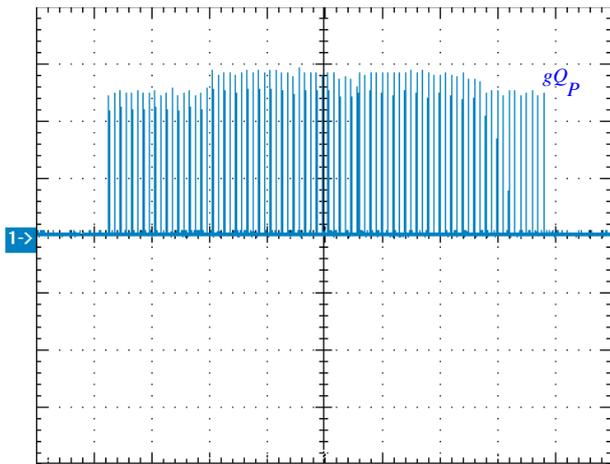


Fig. 21. Apresentação de um trem de pulsos do sinal de controle da geração de pulsos (gQ_p : 5V/div, 2ms/div).

Na Figura 22 são apresentados apenas três pulsos desse trem de pulsos. Desta forma é possível verificar a frequência de geração de pulsos, que neste caso encontra-se em 5kHz.

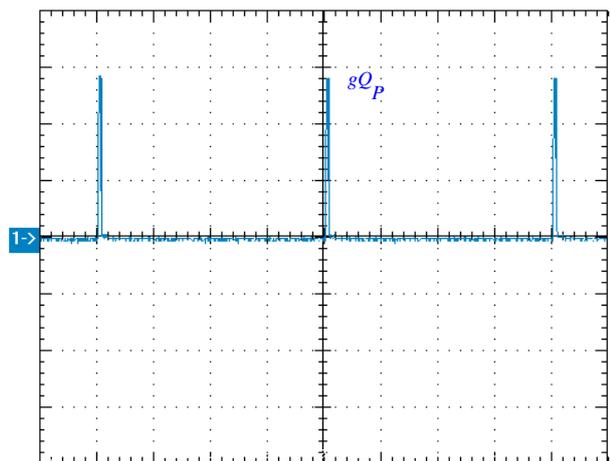


Fig. 22. Detalhe em três do sinal de controle na frequência de 5kHz (gQ_p : 5V/div, 50us/div).

A Figura 23 apresenta o pulso de saída sobre uma carga de 50Ω na tensão escolhida para 250V. Na Figura 23 (a) verifica-se o formato do pulso como um todo e o tempo de duração de 54ns com um pico de 116V. Na Figura 23 (b) é apresentado o tempo de subida deste pulso que gira em torno de 6,94ns.

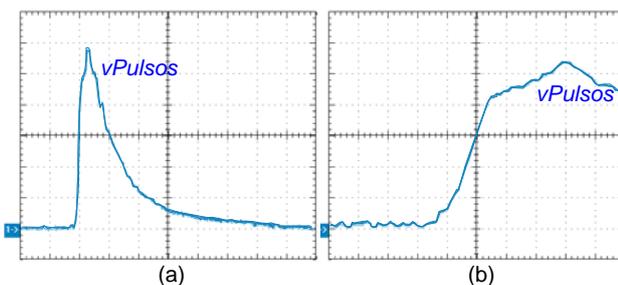


Fig. 23. Pulso de saída para tensão de 250V sobre uma carga de 50Ω ((a) $vPulsos$: 20V/div, 50ns/div; (b) $vPulsos$: 20V/div, 5ns/div).

A Figura 24 apresenta o pulso sobre uma carga de 1000Ω na tensão escolhida para 250V. Na Figura 24 (a) verifica-se o formato do pulso como um todo e o tempo de duração de 88ns com um pico de 212V. Na Figura 24 (b) é apresentado o tempo de subida deste pulso que gira em torno de 7,3ns.

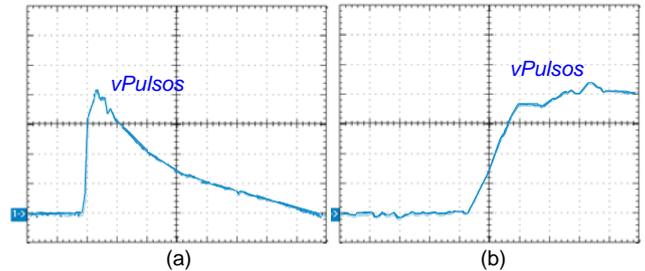


Fig. 24. Pulso de saída para tensão de 250V sobre uma carga de 1000Ω ((a) $vPulsos$: 50V/div, 50ns/div; (b) $vPulsos$: 50V/div, 5ns/div).

A Figura 25 apresenta o pulso sobre uma carga de 50Ω na tensão escolhida para 4000V. Na Figura 25 (a) verifica-se o formato do pulso como um todo e o tempo de duração de 100ns com um pico de 660V. Na Figura 25 (b) é apresentado o tempo de subida deste pulso que gira em torno de 16,7ns.

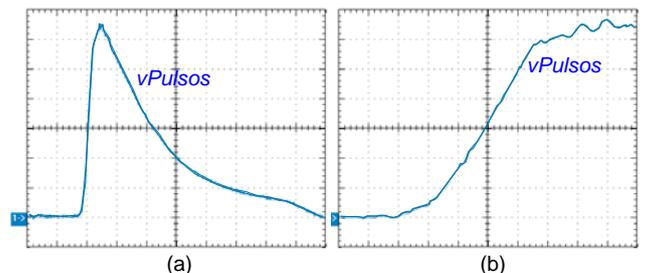


Fig. 25. Pulso de saída para tensão de 4000V sobre uma carga de 50Ω ((a) $vPulsos$: 100V/div, 50ns/div; (b) $vPulsos$: 100V/div, 5ns/div).

A Figura 26 apresenta o pulso sobre uma carga de 1000Ω na tensão escolhida para 4000V. Na Figura 26 (a) verifica-se o formato do pulso como um todo e o tempo de duração de 125ns com um pico de 2300V. Na Figura 26 (b) é apresentado o tempo de subida deste pulso que gira em torno de 18,66ns.

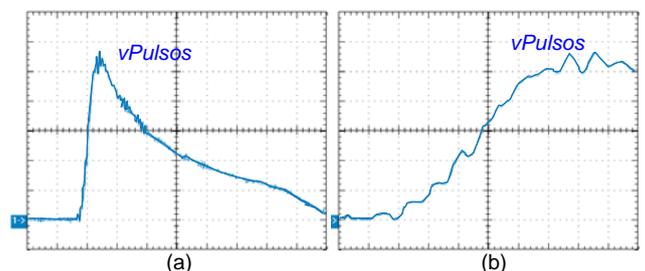


Fig. 26. Pulso de saída para tensão de 4000V sobre uma carga de 1000Ω ((a) $vPulsos$: 400V/div, 50ns/div; (b) $vPulsos$: 400V/div, 5ns/div).

Comparando os valores obtidos com as faixas de tolerância apresentadas previamente observou-se que, mesmo com os pulsos em baixa tensão estando dentro da norma em termos de amplitude e tempo de duração, os pulsos gerados após o aumento da tensão de geração tendem

a não atender a norma vigente. Verificou-se que os tempos de duração em sua maioria estavam dentro da faixa esperada ou próximos a esta, no entanto a amplitude dos pulsos e o tempo de subida dos mesmos não atingiram os níveis desejados.

Observou-se através da análise da tensão sobre o elemento chaveador que o seu transitório de fechamento é fortemente alterado com o aumento da tensão sobre o mesmo, tal como pode ser verificado na Figura 27.

Devido ao fato do pulso de saída ser gerado durante este transitório, conforme se aumenta a tensão é possível verificar que a tensão faltante na amplitude dos pulsos de saída se encontra sobre este elemento tal como detalhado na mesma figura.

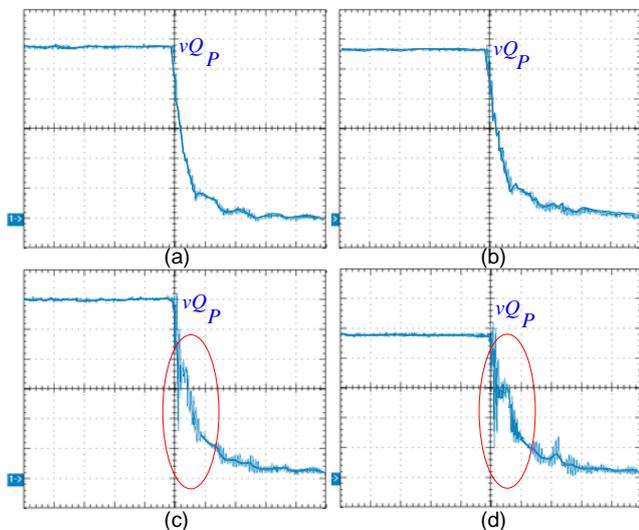


Fig. 27. Tensão na chave do pulsador ((a) v_{Q_P} : 50V/div, 50ns/div; (b) v_{Q_P} : 100V/div, 50ns/div; (c) v_{Q_P} : 200V/div, 50ns/div; (d) v_{Q_P} : 500V/div, 50ns/div).

VI. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com a realização de testes em laboratório mostraram que o sistema de gerenciamento do gerador é eficiente no controle dos subsistemas e imune ao ruído gerado pelo próprio equipamento. Esta imunidade foi garantida através da filtragem adequada dos sinais e fontes de alimentação e pela utilização de cabeamento coaxial ao transitar com sinais e alimentações nos ambientes ruidosos, tal como o compartimento onde o Pulsador de alta tensão está localizado.

A fonte de alta tensão apresentou comportamento estável e capacidade para fornecer a potência desejada. O conversor Buck utilizado para criação de um barramento intermediário controlado mostrou excelente comportamento dinâmico e térmico, sendo assim validado com sucesso. O conversor elevador isolado do tipo *Push-Pull* com multiplicador de *Cockcroft-Walton* proporcionou a isolamento e a elevação desejada. A estabilidade da sua tensão de saída foi garantida através de um capacitor de grande capacidade de armazenamento de energia que foi capaz de suportar os transientes gerados.

O perfil de geração de pulsos foi obtido com sucesso. No entanto o formato, incluindo tempo de subida, tempo de duração e amplitude dos pulsos, não satisfaz todas as necessidades da norma vigente.

O sistema foi capaz de gerar pulsos de saída com amplitudes maiores que 2000V, no entanto as amplitudes não condizem totalmente com as amplitudes escolhidas via interface. Analisando o comportamento do Pulsador de Alta Tensão, foi identificada uma dependência do seu comportamento dinâmico no momento do fechamento do elemento chaveador, em função da tensão aplicada sobre tal elemento. A estrutura se comportou de tal forma que quanto maior a tensão de alimentação do pulsador, maior o tempo de fechamento do elemento chaveador.

Sendo assim, verificou-se a necessidade de um estudo mais aprofundado no que se diz respeito à dependência do comportamento dinâmico do elemento chaveador de alta tensão com a tensão aplicada sobre o mesmo. O efeito Miller deve ser melhor avaliado e os efeitos parasitas no sistema de *drivers* devem ser minimizados.

A utilização de componentes com banda passante adequada, principalmente resistores, deve ser fortemente considerada. Testes experimentais verificaram que em algumas situações os efeitos das impedâncias tiveram influência muito maior que os das resistências DC esperadas.

Por fim, chegou-se a conclusão de que o projeto desenvolvido, mesmo não atingindo completamente os objetivos iniciais, fornece uma base para que em estudos futuros se possa projetar um gerador capaz de atingir todas as especificações desejadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, IEC61000-4-4 Electromagnetic Compatibility (EMC) – Testing and measurement techniques – Electrical fast transient/burst immunity test, International Electrotechnical Commission standard, 2004.
- [2] M. Camp, H. Garbe, “Susceptibility of Personal Computer Systems to Fast Transient Electromagnetic Pulses”, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 48, n° 4, pp. 829-833, November 2006.
- [3] C. Graziano, R. Leo, V.M. Primiani, “Investigation of Radiated Susceptibility During EFT Tests”, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 39, n° 4, pp. 298-303, Novembro 2007.
- [4] F.D. Martzloff, T.F. Leedy, “Electrical Fast Transient Tests: Applications and Limitations”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 26, n° 1, pp. 151-159, January 1994.
- [5] H. Hunkel, S. Klezar, “Electrical Fast Transients (EFT): The revision of IEC61000-4-4”, *International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility*, pp. 403-408, December 2003.
- [6] R.J. Baker, B.P. Johnson, “Stacking Power MOSFETS for Use in High Speed Instrumentation”, *Review of*

Scientific Instruments, Vol. 63, nº 12, pp. 5799-5801, Dezembro 1992.

- [7] R.J. Baker, B.P. Johnson, "Series Operation of Power MOSFETS for High Speed, High Voltage Switching Applications", *Review of Scientific Instruments*, Vol. 64, nº 6, pp. 1655-1656, Julho 1993.
- [8] R.J. Baker, H. Hess, "Transformerless Capacitive Coupling of Gate Signals for Series Operation of Power MOSFET Devices", *International Electric Machines and Drives Conference*, pp. 673-676, Maio 1999.
- [9] R.J. Baker, H. Hess, "Transformerless Capacitive Coupling of Gate Signals for Series Operation of Power MOS Devices", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 15, nº 5, pp. 1910-1915, Setembro 2000.
- [10] W.D. Keith, D. Pringle, P. Rice, P.V. Birke, "Distributed Magnetic Coupling Synchronizes a Stacked 25kV MOSFET Switch", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 15, nº 1, pp. 58-61, Janeiro 2000.
- [11] C. Gerster, "Fast High-Power/High-Voltage Switch Using Series-connected IGBTs with Active Gate-Controlled Voltage-Balancing", *Applied Power Electronics Conference and Exposition*; Vol. 1, pp. 469-472, Fevereiro 1994.
- [12] P.R. Palmer, A.N. Githiari, "The Series Connection of IGBTs with Optimized Voltage Sharing in the Switching Transient", *Power Electronics Specialist Conference*, Vol. 1, pp. 44-49, Junho 1995.
- [13] A. Consoli, S. Musumeci, G. Oriti, A. Testa, "Active Voltage Balancement of Series Connected IGBTs", *Industry Applications Conference*, Vol. 3, pp. 2752-2758, Outubro 1995.
- [14] K. Sasagawa, Y. Abe, K. Matsube, "Voltage Balancing Method for IGBTs Connected in Series", *IEEE Transactions on Industrial Applications*, Vol. 40, nº 4, pp. 1025-1030, Julho 2004.
- [15] N. Giacomini, M. Mezaroba, R.J.M. Santos, "Low Cost IEC61000-4-4 Compatible Pulse Generator", *COBEP*, pp. 233-238, 2007.
- [16] N. Giacomini, M. Mezaroba, R.J.M. Santos, "High Voltage Ultra-Fast Turn On Fixed On-Time Power Switch", *COBEP*, pp. 1054-1059, 2007.
- [17] N. Giacomini, "Projeto de um Gerador de Transientes Rápidos para Aplicação em Testes de Interferência Eletromagnética", Universidade do Estado de Santa Catarina, Dissertação de Mestrado, 2007.
- [18] J.M. Beck, "Using Rectifiers in Voltage Multiplier Circuits", *General Instrument Data Book*, pp. 615-61, 1991.

AGRADECIMENTOS

A Universidade do Estado de Santa Catarina pelo auxílio com bolsa de monitoria (PROMOP).

A empresa *Texas Instruments* pela doação de diversos componentes eletrônicos.

A empresa *Voltage Multipliers*, pela doação de diodos de alta tensão usados em protótipos de outras estruturas que vieram a não fazer parte do protótipo final.

A empresa *ST Semiconductors* pela doação de inúmeros tipos de transistores utilizados no protótipo final, em especial pelos modelos de alta tensão, tão difíceis de encontrar no mercado local.

A empresa *Embraco Electronic Controls* pelo incentivo na construção deste gerador.

A *Supplier Indústria e Comércio de Eletro-eletrônicos LTDA* pelo financiamento parcial do protótipo final.

DADOS BIOGRÁFICOS

Marcello Mezaroba, nascido em Videira, SC em 1972. Recebeu os graus de Engenheiro Eletricista, Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica em 1996, 1998 e 2001 respectivamente, pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Atualmente é Professor Associado no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Santa Catarina (UDESC). Suas áreas de interesse incluem comutação suave, correção do fator de potência, acionamento elétrico e controle de conversores.

Neomar Giacomini, nascido em 1980 na cidade de Joinville-SC, recebeu os títulos de Engenheiro Eletricista e Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade do Estado de Santa Catarina em 2005 e 2007 respectivamente. Atualmente é Engenheiro de Desenvolvimento de hardware no *Technology Advantage* da Whirlpool S.A.. Suas áreas de interesse são: Geração e Sensoreamento de Sinais, Conversores Estáticos de Energia, Equipamentos para Teste de Compatibilidade Eletromagnética e Interfaces de Usuário.

Raphael Jorge Millnitz dos Santos, nascido em 1986 na cidade de Joinville-SC, recebeu o grau de Engenheiro Eletricista em 2008 pela Universidade do Estado de Santa Catarina, onde atualmente é aluno do curso de mestrado em Engenharia Elétrica. Suas áreas de interesse são: Conversores Chaveados, Geração de Transientes e Comutação Suave.