

ENERGIZADOR DE CERCA ELÉTRICA RURAL ESTUDO, PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO

Marcelo Giovanni B. de Martino¹, Fernando S. dos Reis, Raphael R.N. Souza e Guilherme A.D. Dias

¹Walmur Instrumentos Veterinários Ltda.
CEP 90230-091, Porto Alegre - RS
Brasil
e-mail: mgiovanni@walmur.com.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
CEP 90619-900, Porto Alegre – RS
Brasil
e-mail: fdosreis@pucrs.br

Resumo – Este artigo relata os resultados de uma parceria de sucesso entre Universidade e Empresa que conduziu ao desenvolvimento de um novo produto industrial. O principal estímulo para esta parceria foi a total carência de estudos científicos no segmento de energizadores de cerca elétrica, comprovada através de uma ampla revisão bibliográfica, que vinha obrigando os fabricantes a desenvolver seus produtos através de métodos empíricos os quais implicavam na implementação de diversos protótipos intermediários resultando em longo tempo de projeto e, conseqüentemente, em elevado custo. Para superar estas dificuldades, foi desenvolvido, no escopo desta parceria, um completo estudo que permite a análise e a síntese deste tipo de equipamento, culminando na qualificação de recursos humanos e no desenvolvimento de tecnologia própria. Este trabalho está fundamentado nas teorias de eletrônica de potência, linhas de transmissão, aterramento e compatibilidade eletromagnética e atende às normas internacionais de segurança elétrica (IEC).

Palavras-Chave – Energizador de Cerca Elétrica, Circuito Gerador de Impulsos, Transformador de Pulso.

RURAL ELECTRIC FENCE ENERGIZER – STUDY, DESIGN AND IMPLEMENTATION

Abstract – This paper reports the results from a successful partnership involving University and Private Company which finished in the development of a new industrial product. The main motivation for this partnership was the reduced number of technical references in this field. As a result of this deficit, the manufacturers were led to develop their products employing empiricist methods that implicate in implementation of several intermediary prototypes and result in a long lead time and, consequently, in high costs. To overcome these difficulties, a complete study was carried out in the context of this partnership permitting the analysis and design of the electric fence energizers and resulting in the human resources qualification and development of local know how. This work is based on power electronics, transmission lines and grounding theories and is in conformity with the International Electrotechnical Commission (IEC) safety standards.

Artigo submetido em 29/05/2006. Primeira revisão em 09/08/2006.
Segunda revisão em 27/09/2006. Aceito por recomendação dos editores da Seção Especial José Antenor Pomilio e Andrés Ortiz Salazar.

Keywords – *Electric Fence Energizer, Impulse Generator Circuit, Pulse Transformer.*

I. INTRODUÇÃO

O uso de cercas eletrificadas para conter animais no meio rural vem ocorrendo desde o início do século passado. O princípio de funcionamento da cerca eletrificada consiste em formar uma barreira psicológica através da dor provocada pelo choque elétrico. Uma vez que o animal recebe o choque proveniente do arame da cerca, ele tentará evitar um novo contato com esta barreira, mantendo-se afastado. Portanto, a barreira deixa de ser a estrutura física da cerca e torna-se um condicionamento provocado pela sensação desagradável do choque elétrico.

Ainda que o emprego de cercas elétricas tenha obtido grande popularidade no meio rural a partir da década de setenta, estimulando o surgimento de vários fabricantes em todo o mundo (inclusive no Brasil onde dezenas de fabricantes disputam o mercado), poucos estudos em nível acadêmico foram realizados a respeito deste tema. Os fabricantes que melhor dominam esta tecnologia encontram-se na Nova Zelândia (que tem longa tradição na fabricação e uso de energizadores de cerca). Os fabricantes brasileiros têm aprimorado seus produtos ao longo dos últimos 20 anos.

Hoje, o Brasil tem o maior rebanho bovino de corte do planeta e é o maior exportador mundial de carne bovina. O território brasileiro oferece aos pecuaristas grandes áreas de campo a custo reduzido por hectare, se comparado com países desenvolvidos. Neste contexto, o Brasil desponta como um grande consumidor de equipamentos energizadores de cercas e apresenta um mercado disputado por dezenas de fabricantes nacionais e internacionais. A parceria entre universidade e empresa busca aumentar a competitividade através do desenvolvimento de tecnologia nacional de qualidade e baixo custo que garanta a sobrevivência da empresa, a redução de importações e a participação no mercado internacional.

Apesar da aparente simplicidade destes equipamentos, cuja tecnologia já foi absorvida e incorporada aos processos industriais vinculados a este segmento, muitos aspectos tecnológicos e de segurança abordados neste artigo, como o projeto do transformador, a modelagem da cerca, a estrutura dos circuitos de proteção e os efeitos da corrente elétrica em seres vivos, merecem especial atenção. Este trabalho apresenta uma metodologia completa para o projeto do energizador levando-se em consideração todos os aspectos anteriormente mencionados.

Uma cerca elétrica pode ser dividida em quatro partes, como pode ser visto na Figura 1. O arame da cerca é denominado fio vivo e é alimentado pelo energizador que produz pulsos de alta tensão de aproximadamente 10 kV de pico em relação ao terminal terra. O fio vivo é isolado do solo (terra) através de isoladores plásticos fixados aos mourões para que estes não atuem como um aterramento elétrico para o mesmo, o que comprometeria a eficácia do sistema.

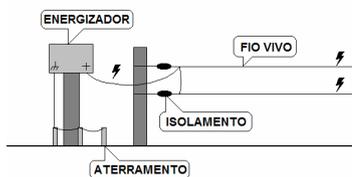


Fig. 1. Principais partes de uma cerca elétrica.

O terminal terra do energizador é conectado ao sistema de aterramento que, de um modo geral, é implementado com a associação de hastes de aço cobreado ou aço galvanizado. O aterramento do energizador deve ser projetado de forma adequada, conforme as características do solo, uma vez que um valor elevado na resistência de aterramento do energizador pode provocar uma queda de tensão substancial entre o fio vivo e o solo. O energizador tem como função condicionar a energia elétrica disponível (seja ela contínua ou alternada, proveniente da rede elétrica ou de baterias alimentadas por painéis fotovoltaicos) de tal forma que não apresente risco à vida dos seres humanos e dos animais. Os energizadores comerciais liberam pulsos elétricos que são provocados pela descarga de um capacitor em um transformador por meio de um tiristor, o que resulta em um semiciclo ressonante. Assim, consegue-se controlar a energia liberada através da energia acumulada neste capacitor. Este pulso elétrico gerado pela descarga do capacitor é também chamado de impulso elétrico, uma vez que apresenta uma curta duração e uma elevada amplitude [1][2].

II. CERCA ELÉTRICA RURAL

Estudos experimentais realizados em campo evidenciaram que o gado bovino é contido de forma eficiente quando a tensão de pico a vazio na cerca encontra-se na faixa de 2 a 3 kV, considerando a utilização de voltímetros cuja resistência interna encontra-se na faixa de 50 a 100 kΩ. Estes medidores são produzidos pelos próprios fabricantes de energizadores para cercas elétricas. Quando o animal toca a cerca, a tensão reduz-se significativamente, pois a energia disponível é constante por questões de segurança elétrica. Este processo está associado à impedância da cerca e à baixa resistência elétrica do corpo do animal a impulsos elétricos (para a qual a norma estabelece um valor 175 Ω [3] com referência ao percurso de corrente que vai do nariz às patas).

O circuito elétrico simplificado de uma cerca elétrica é apresentado na Figura 2. Este circuito foi modelado a partir de medições realizadas em uma cerca elétrica com 1,2 km de extensão [4]. O parâmetro Z_0 é a impedância de surto da linha da cerca. Em alguns casos, a reatância capacitiva ou indutiva do condutor é mais expressiva do que a resistência elétrica do mesmo. Esta impedância pode ser obtida a partir da teoria de linhas de transmissão. Em medições realizadas

na cerca anteriormente referida (através de uma sonda de tensão e de um osciloscópio portátil) empregando o energizador proposto, observou-se que o fenômeno da reflexão deve ser levado em conta para o cálculo do valor de pico do impulso de tensão em um determinado ponto da cerca. Esta consideração se torna necessária uma vez que este fenômeno pode provocar elevação ou redução do valor do impulso devido à sobreposição da parte da onda refletida em relação à parte da onda incidente no final da cerca [4].

Quando o solo no local da instalação apresenta elevada resistividade, verifica-se a necessidade de instalar na cerca elétrica, além do fio vivo, condutores aterrados através de hastes de aterramento ou através dos próprios mourões. Nestes casos, reduz-se a impedância de surto. Como consequência, nas situações onde uma cerca convencional é utilizada para a instalação de uma cerca elétrica, obtém-se a elevação dos níveis da tensão de pico em toda a extensão da mesma através do seu aterramento e da adição do fio vivo.

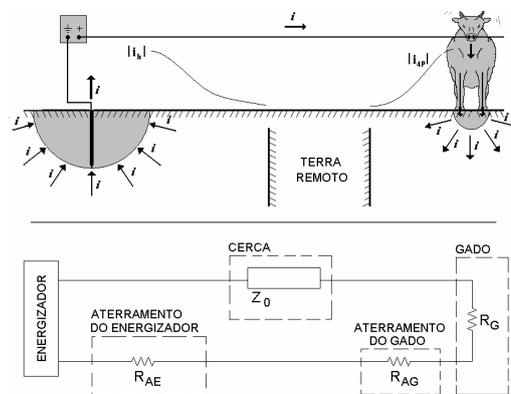


Fig. 2. Circuito equivalente simplificado de uma cerca sem perdas com um único ponto de aterramento.

O circuito elétrico da cerca, apresentado na Figura 2, é muito útil para estimar a amplitude da tensão no final da mesma. Na extremidade deste circuito, o animal é submetido a uma tensão menor e, conseqüentemente, a sensação de dor é reduzida. Neste sentido, este fato representa um ponto crítico. Através de estudos teóricos e medições realizadas em campo, verificou-se que o aterramento do energizador e a impedância da cerca são os parâmetros que influenciam de forma mais significativa a eficácia da cerca elétrica e o comportamento do pulso gerado pelo energizador. Observou-se também que o aterramento das patas do animal apresenta uma resistência expressiva, quando comparada à resistência elétrica do corpo. Este divisor de tensão (composto pela impedância de surto da cerca, resistência elétrica do corpo do animal, resistência de aterramento das patas e resistência de aterramento do energizador) reduz consideravelmente a tensão e a energia aplicadas ao corpo do animal [4]. Entretanto, uma vez que as pessoas também estão expostas às cercas elétricas, os fabricantes utilizam um resistor de 500 Ω para a determinação da tensão máxima admissível na saída do energizador. Este valor de resistência corresponde ao valor atribuído pela IEC 60479-2:1987 [1] para o corpo humano com referência a impulsos elétricos e representa o valor mínimo da soma das quatro resistências representadas na Figura 2. Por conseguinte, quanto maior for a resistividade do solo, maior será o valor da resistência de aterramento do gado, do energizador e da impedância de

surto, reduzindo assim a parcela da energia disponível que será efetivamente aplicada ao gado.

Não existem estudos sobre a forma pela qual estes parâmetros interferem no projeto do energizador, mas os fabricantes consideram que quanto maior for a resistividade do solo, maiores forem as perdas por isolamento e maior for a extensão da cerca, maior deverá ser a energia armazenada no energizador. De um modo geral, fabricantes têm adotado a regra prática de que o energizador deve armazenar 1 J para cada 10 km de cerca a ser energizada, preservando-se o objetivo de não exceder os limites de segurança pessoal.

Conhecer as normas de segurança elétrica e compreender a reação produzida pelo choque elétrico em seres vivos é um requisito necessário para um adequado projeto do energizador de cercas elétricas e, neste trabalho, as referências [1] e [2] foram utilizadas para este fim. A Tabela I define as principais características da onda de alta tensão gerada pelo energizador segundo a norma IEC 60335-2-76:2002 [2]. Aspectos como período mínimo de repetição, duração máxima, nível de energia associado e máxima corrente eficaz do pulso gerado por um energizador ao qual se conecta uma carga de 500 Ω, são abordados nesta tabela.

A norma IEC 60335-2-76:2002 abrange energizadores para uso em cercas elétricas rurais e de segurança e, no entanto, não leva em conta o uso deste equipamento por crianças ou pessoas portadoras de enfermidade. O documento contempla um anexo com instruções normativas referentes à instalação e conexão de cercas elétricas e ainda apresenta instruções informativas para a instalação de cercas elétricas de segurança. Desta forma, os requisitos apresentados na Tabela I são adequados não apenas ao projeto de energizadores para cercas elétricas rurais, como para cercas empregadas na segurança urbana.

TABELA I
Requisitos de Segurança da Onda de Tensão

Parâmetro:	Valor:
Período de repetição do impulso.	$T_r \geq 1 \text{ s}$ ou $f \leq 1 \text{ Hz}$
Duração do impulso com carga de 500 Ω.	$t_i \leq 10 \text{ ms}$
Energia dissipada em carga resistiva de 500 Ω para energizadores limitados por energia.	$W \leq 5 \text{ J}$
Corrente eficaz do impulso em carga de 500 Ω para energizadores limitados por corrente (Considerando o período T da definição de valor eficaz igual à duração do impulso, $T=t_i$).	Depende de t_i (Ver Figura 3). Para $t_i < 0,1 \text{ ms}$, $I_{C(ef)} = 15,7 \text{ A}$

IEC 60335-2-76:2002. *Safety of household and similar electrical appliances. Particular requirements for electric fence energizers.*

A Figura 3 apresenta o valor máximo da corrente eficaz fornecida pelo energizador a uma carga padrão de 500 Ω em função da duração do pulso.

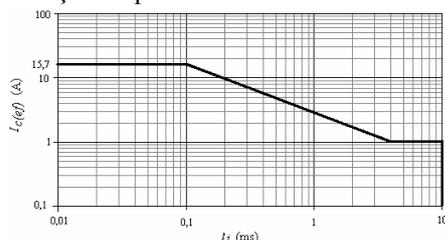


Fig. 3. Gráfico limite para energizador limitado por corrente.

A curva que apresenta o limite da sensação de dor em seres humanos é mostrada na Figura 4, e foi obtida através da descarga elétrica provocada por capacitores conectados às mãos de participantes voluntários [1]. As outras duas curvas apresentadas na Figura 4 (limite da energia – 5 J e limite da duração do pulso – 10 ms) representam a faixa de valores de segurança previstos na IEC 60335-2-76 [2] e apresentados na Tabela I.

Considera-se a sensação de dor como sendo uma sensação desagradável à qual o sujeito reluta em submeter-se novamente. A área pintada de cinza da Figura 4 define a região na qual ocorre a sensação de dor dentro de limites seguros. Através da mesma, observa-se que uma descarga elétrica de um capacitor de 10 pF com uma energia associada de 50 mJ (100 kV) não provocará uma sensação de dor e, no entanto, um outro capacitor de 100 nF com os mesmos 50 mJ (1 kV) provocará esta sensação.

A reta limite máximo da duração do pulso, mostrada na Figura 4 e definida na Tabela I (10 ms), representa um capacitor de 4 μF. Este valor foi obtido através de (1) onde se considerou que o tempo necessário para a descarga do capacitor em um ser humano (cuja resistência a impulsos elétricos é de 500 Ω) é de 5 constantes de tempo de um circuito RC.

$$C = \frac{t}{5 R_c} \quad (1)$$

Interpretando a Figura 4, é possível relacionar os valores de energia, tensão e capacitância necessários para provocar sensação de dor em pessoas e animais dentro de limites seguros. Um energizador projetado para produzir um impulso elétrico em um resistor de 500 Ω com um pico de tensão de aproximadamente 10 kV e 5 J de energia atingirá a máxima sensação de dor dentro de um limite seguro, conforme representado na Figura 4.

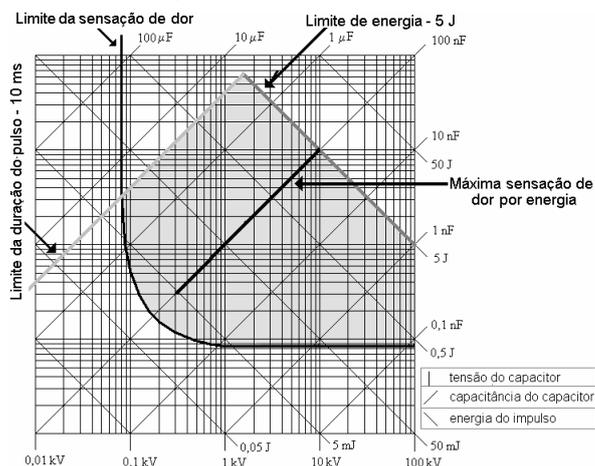


Fig. 4. Limites de segurança e de dor.

III. ENERGIZADOR

O circuito do energizador, amplamente utilizado pelos fabricantes, pode ser dividido em dois blocos fundamentais: Circuito de Alimentação e Circuito Gerador de Impulsos, conforme ilustra a Figura 5.

A. Circuito de alimentação

O Circuito de Alimentação gera um barramento CC para a carga do capacitor C_1 do circuito gerador de impulsos. O

retificador monofásico de onda completa foi adotado por simplicidade e conformidade com a norma IEEE 519.

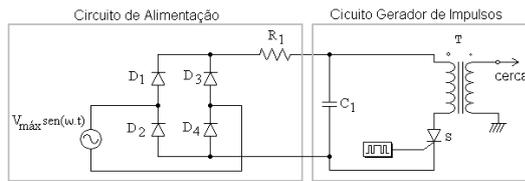


Fig. 5. Circuito simplificado de um energizador.

B. Circuito Gerador de Impulsos – CGI

O CGI está presente praticamente em todos os energizadores comerciais. O transformador T tem a função de elevar a tensão proveniente do capacitor C_1 e isolar o circuito da rede elétrica comercial, conforme exige a IEC 60335-2-76 [2]. A relação de espiras do transformador irá depender da tensão disponível no capacitor C_1 e do pico de tensão desejado na carga. O capacitor C_1 é o elemento armazenador de energia de maneira que, para carregá-lo completamente, dispõe-se de aproximadamente 1 s, conforme mostra a Tabela I.

O modelo utilizado para representar o CGI é apresentado na Figura 6, onde foram considerados os seguintes parâmetros: a resistência padrão da norma, a capacitância e a resistência série equivalente do capacitor C_1 , a relação de transformação, as resistências dos enrolamentos, as indutâncias de dispersão e a indutância de magnetização do transformador.

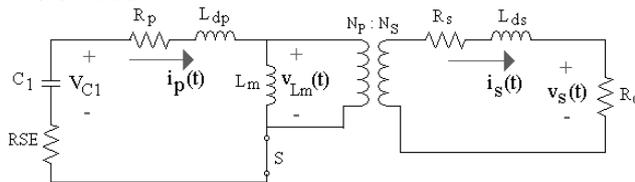


Fig. 6. CGI equivalente.

Este conversor comprovou ser uma solução simples e segura para o uso em energizadores de cerca. Buscando-se conceber novas topologias de CGI fundamentadas nas teorias da eletrônica de potência, analisou-se uma segunda alternativa baseada no conversor redutor-elevador isolado (*Flyback*), conforme mostrado na Figura 7. Contudo, apesar da vantagem de utilizar o próprio transformador como elemento armazenador de energia, este circuito apresenta como principais desvantagens: (a) necessidade de um diodo adicional de elevada tensão; (b) elevada corrente no MOSFET considerando-se o mesmo transformador empregado no CGI a tiristor; (c) elevadíssima indutância magnetizante do transformador para garantir a aplicação de pulsos com energia de 5 J em um intervalo máximo de 10 ms. Todos estes fatores contribuem para uma significativa elevação do custo do equipamento. Do ponto de vista técnico, cabe ainda destacar que, dada a característica de fonte de corrente deste conversor, a tensão de saída poderá variar dentro de uma faixa muito ampla ultrapassando a máxima tensão admissível pelo circuito.

IV. MÉTODO DE PROJETO DO CGI

O projeto do circuito gerador de impulsos é dificultado pela influência dos parâmetros de dispersão e de

magnetização do transformador. A principal característica a ser observada é a atenuação do pico de tensão produzido, uma vez que este não se comporta como um elemento ideal.

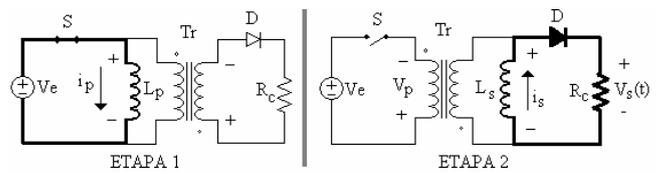


Fig. 7. Conversor *Flyback* adaptado como CGI.

Para desenvolver um método de projeto, é necessário o desenvolvimento de um estudo analítico prévio, onde o comportamento das diversas variáveis envolvidas é investigado. Este estudo será descrito de forma simplificada buscando apresentar um critério de projeto acessível não apenas à comunidade acadêmica, como também aos engenheiros que atuam junto às empresas. O modelo do CGI (Figura 6) refletido no primário do transformador é apresentado na Figura 8. Observa-se que a indutância magnetizante L_m do transformador encontra-se no centro do circuito formando uma configuração do tipo T e derivando parte da corrente fornecida à carga. A análise deste circuito poderia ser simplificada se esta indutância pudesse ser desprezada. Para esta simplificação ser válida do ponto de vista prático, a reatância da indutância magnetizante L_m deve ser pelo menos dez vezes superior à resistência da carga R_c refletida no primário R'_c .

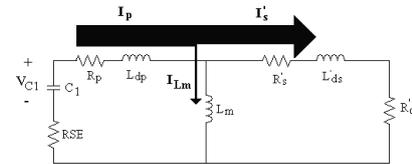


Fig. 8. Corrente máxima no CGI para $X_{Lm} \gg R_c$.

A Figura 9 apresenta o circuito simplificado sem a indutância magnetizante L_m .

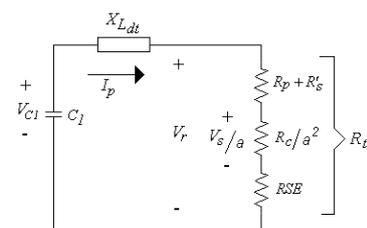


Fig. 9. Circuito Gerador de Impulsos simplificado.

Na Figura 9, (a) representa a relação de transformação, R_p é a resistência elétrica do enrolamento primário, R'_s é a resistência elétrica do enrolamento secundário refletida no primário, V_{C1} é a tensão inicial do capacitor C_1 , X_{Ldt} é a reatância de dispersão total do transformador e R_t é a resistência elétrica total do circuito.

A. Dados de Entrada

Os dados utilizados para elaboração do projeto do circuito de potência do energizador são:

- Energia nominal do aparelho W_{C1} ;
- Tensão no capacitor V_{C1} (aproximadamente igual ao pico da tensão da rede $V_{máx}$, conforme ilustra a Figura 5);

- Porcentagem de energia dissipada nos enrolamentos do transformador η_p ;
- Carga padrão na saída do energizador R_c ;
- Pico de tensão desejado na carga padrão V_{st} .

Os valores de V_{st} e W_{C1} são definidos com o auxílio do gráfico da Figura 4. É importante recordar que a energia dissipada em R_c é menor do que a energia armazenada em C_1 devido às perdas no CGI.

B. Determinação do Capacitor C_1

O valor do capacitor C_1 é determinado em função da sensação de dor, da energia nominal W_{C1} do equipamento que está sendo desenvolvido bem como da tensão disponível no barramento CC (V_{C1}). A expressão abaixo pode ser utilizada para determinar este valor.

$$C_1 = \frac{2 \cdot W_{C1}}{V_{C1}^2} \quad (2)$$

C. Determinação da Relação de Transformação do Trafo

O método de projeto do transformador desenvolvido para esta aplicação, emprega núcleos convencionais de geometria do tipo EI, fabricados a partir de lâminas de Aço Silício de Grãos Não Orientados (GNO). Para a obtenção da relação de transformação deste transformador especial, é necessário lembrar que o mesmo não é ideal, conforme ilustra a Figura 6. O projeto deste elemento visa a garantir a aplicação (na carga padrão) da tensão de pico V_{st} especificada. Para solucionar este problema, considerou-se o circuito ressonante equivalente refletido no primário, o qual é composto pelo capacitor C_1 associado com a sua resistência série equivalente RSE (a qual está em série com a resistência do primário R_p e do secundário refletida no primário R'_s do transformador, com a reatância de dispersão equivalente do mesmo X_{Ldt} , e com a carga padrão), conforme mostra a Figura 9. A determinação da relação de transformação baseou-se em um método recursivo no qual uma relação de transformação inicial a_i é determinada considerando-se um transformador ideal, conforme apresentado em (3).

$$a_i = \frac{V_{st}}{V_{C1}} \quad (3)$$

A resistência total dos enrolamentos ($R_p + R'_s$) é determinada utilizando-se o valor de a_i , conforme é apresentado em (4).

$$R_p + R'_s = \eta_p \cdot \left(\frac{R_c}{a_i^2} \right) \quad (4)$$

Para garantir que apenas um único pulso seja gerado a cada segundo e minimizar o valor da indutância de dispersão, adotou-se uma resposta superamortecida para o circuito RLC série ressonante a qual garante que a forma de onda da saída do energizador se aproxime de uma onda impulsiva atendendo às especificações básicas previstas pela norma IEC 60335-2-76:2002 [2]. Desta forma, este valor pode ser determinado através de (5) [5].

$$L_{dt} = \frac{C_1 \cdot \left(RSE + (R_p + R'_s) + \frac{R_c}{a_i^2} \right)^2}{8} \quad (5)$$

A tensão máxima na carga padrão R_c pode ser obtida através do circuito RLC série equivalente mostrado na Figura 9, resultando em (6).

$$V_s = R_c \cdot \frac{(D_1 e^{(-\alpha+\beta)t_{max}} + D_2 e^{(-\alpha-\beta)t_{max}})}{a_i} \quad (6)$$

Onde:

$$\alpha = \frac{R_t}{2 \cdot L_{dt}} \quad (7)$$

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{R_t}{2 \cdot L_{dt}} \right)^2 - \left(\frac{1}{\sqrt{L_{dt} \cdot C_1}} \right)^2} \quad (8)$$

$$D_1 = \frac{V_{C1} \cdot C_1}{2 \cdot \beta} \cdot (\alpha^2 - \beta^2) \quad (9)$$

$$D_2 = -D_1 \quad (10)$$

O tempo t_{max} necessário para que a tensão na carga V_s atinja o seu valor máximo é obtido a partir de (11).

$$t_{max} = \frac{\ln \left(\frac{-1}{-D_1 \cdot \alpha + D_2 \cdot \beta} [D_1 \cdot (-\alpha + \beta) \cdot D_2 \cdot (\alpha + \beta)]^{\frac{1}{2}} \right)}{\beta} \quad (11)$$

Com o valor do pico de tensão na carga V_s obtida através de (6) e utilizando a relação de transformação inicial a_i , pode-se agora determinar recursivamente o valor da relação de transformação (a) definitiva do transformador empregando-se a expressão abaixo.

$$a = a_i \cdot \frac{V_{st}}{V_s} \quad (12)$$

Com a nova relação de transformação, calcula-se novamente a resistência total dos enrolamentos ($R_p + R'_s$) e a reatância de dispersão total do transformador X_{Ldt} , uma vez que o conhecimento dos valores reais destes parâmetros é necessário para o dimensionamento do núcleo. Dependendo do grau de precisão adotado pelo projetista, este processo recursivo pode ser repetido várias vezes até que a tensão V_s seja praticamente igual a V_{st} . Contudo, observa-se que os resultados obtidos em uma única iteração convergem para o valor desejado.

D. Dimensionamento do núcleo do transformador – A_e e A_j

Para dimensionar o transformador de saída do CGI, desenvolveu-se uma nova metodologia para calcular os valores da área efetiva do núcleo A_e e da área da janela do núcleo A_j , de forma a evitar a saturação do mesmo e garantir a disponibilidade de espaço físico para os enrolamentos. De um modo geral, para seleção do núcleo magnético de transformadores, aplica-se o produto da área da janela pela área efetiva da seção transversal do mesmo ($A_p = A_e A_j$) [6][7][8]. Na bibliografia especializada, o cálculo de A_p está relacionado à potência consumida pela carga em regime permanente e ao acréscimo de temperatura no núcleo, a fim de garantir que a temperatura do mesmo não ultrapasse a temperatura Curie, o que evita a ocorrência de uma queda substancial no valor da permeabilidade do material magnético e, por conseguinte, a saturação do mesmo. Uma vez que a energia elétrica que circula pelo transformador no CGI do energizador é constituída por um pulso elétrico de curtíssima duração que se repete o cada segundo, não há a caracterização de um estado de regime permanente, o que impossibilita o uso da metodologia normalmente encontrada na bibliografia para o dimensionamento de transformadores. A tentativa de utilizar a metodologia convencional considerando o valor médio da potência que flui pelo transformador (e empregando-se o período de operação que é de 1 s), resulta na seleção de núcleos subdimensionados.

Para o dimensionamento do núcleo, definiu-se de forma original o Parâmetro Dimensional do Núcleo PDN (cm^3) o qual teve sua expressão obtida a partir da igualdade entre

(13), que determina o número mínimo necessário de espiras do primário (a partir da indutância magnetizante do transformador) para que não ocorra a saturação do núcleo e (14), a qual determina o número de espiras no primário (a partir da ocupação da área da janela do enrolamento primário com determinada resistência elétrica [4]).

$$N_p = \frac{\frac{L_m}{(1+ka)} I_p}{A_e B_{\max}} \quad (13)$$

$$N_p = \sqrt{\frac{R_p \cdot A_j \cdot k_u}{4 \cdot \rho_c \cdot \beta \cdot A_e}} \quad (14)$$

Onde:

- B_{\max} - Máxima densidade de fluxo no núcleo do transformador (Tesla).
- ρ_c - Resistividade do material condutor empregado na confecção dos enrolamentos (Ωm).
- I_p - Corrente de pico no primário (A), conforme (16).
- k_u - Fator de utilização da área da janela do enrolamento primário.
- L_m - Indutância magnetizante do transformador (H), calculada através de (17), a qual foi obtida a partir da geometria do núcleo EI empregado na confecção do transformador sem entreferro.
- a - Relação de transformação.
- k - Coeficiente de acoplamento dos enrolamentos do transformador.
- R_p - Resistência estipulada para o enrolamento primário (Ω) (que é enrolado em primeiro lugar e cujo valor é obtido através de (18)).

$$PDN = \frac{4\rho_c \left(\frac{L_m}{1+ka}\right)^2 I_p^2}{R_p B_{\max}^2 k_u} \quad (15)$$

Onde:

$$I_p = D_1 e^{(-\alpha+\beta)t_{\max}} + D_2 e^{(-\alpha-\beta)t_{\max}} \quad (16)$$

$$L_m \cong 30 L_{dt} \quad (17)$$

$$R_p = 0,4 \eta_p \left(\frac{R_c}{a^2}\right) \quad (18)$$

Portanto, a relação entre o valor de PDN, a área efetiva A_e e a área da janela A_j é dada através de (19).

$$A_j A_e^{1,5} \geq PDN \quad (19)$$

A determinação do fator de utilização da área da janela k_u deve ser realizada a partir da experiência profissional de quem executa a montagem do transformador. Deve ainda levar em consideração o espaço necessário para alojar o enrolamento secundário, o espaço ocupado pela isolamento entre primário e secundário (exigido pela norma IEC 60335-2-76 [2]), assim como a isolamento entre as espiras do secundário. Esta isolamento se torna necessária devido à alta tensão produzida pelo circuito e/ou à minimização dos efeitos de possíveis descargas atmosféricas na cerca [9].

A. Determinação do número de espiras do primário e do secundário – N_p e N_s

O número de espiras do primário N_p é calculado como se o transformador fosse um indutor acoplado usando (13) e o número de espiras do secundário N_s é calculado através de (20).

$$N_s = a N_p \quad (20)$$

B. Determinação da área da seção dos condutores do primário e do secundário – A_{cp} e A_{cs}

Ambas as áreas podem ser determinadas utilizando (21) e (22) que empregam os valores das resistências equivalentes dos enrolamentos primário R_p e secundário R_s , os valores de N_p e N_s para o número de espiras em ambos os enrolamentos, o valor da resistividade do condutor ρ_c e o valor do comprimento médio das espiras do enrolamento l_m .

$$A_{cp} = \frac{N_p \rho_c l_m 10^2}{R_p} \quad (21)$$

$$A_{cs} = \frac{N_s \rho_c l_m 10^2}{R_s} \quad (22)$$

A resistência do condutor do secundário pode ser obtida de forma aproximada por meio de (23).

$$R_s = 0,6 (R_p + R'_s) a^2 \quad (23)$$

C. Determinação do tiristor S

Para especificar o tiristor S, é necessário que se conheça o valor máximo da corrente que por ele circula I_p obtido através de (16), assim como o valor máximo da tensão no capacitor $V_{C1} \cong V_{\max}$ e as taxas máximas de crescimento da tensão (dv/dt) e da corrente (di/dt) às quais o elemento é submetido, estas últimas são determinadas de acordo com (24) e (25) respectivamente. Eventuais sobretensões provenientes de transitórios na rede elétrica ou de descargas atmosféricas na cerca devem ser consideradas e minimizadas através da utilização de circuitos de proteção [9].

$$\frac{dv}{dt} = \frac{V_s}{a t_{\max}} \quad (24)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{I_p}{t_{\max}} \quad (25)$$

V. SIMULAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção, será realizado um estudo comparativo entre os resultados experimentais e os resultados obtidos através de simulação computacional, mostrando a validade do modelo desenvolvido e da metodologia de projeto originalmente apresentada neste trabalho. Conforme já mencionado, este artigo relata os resultados de uma parceria empresa-universidade. O produto comercial resultante desta parceria pode ser visto na Figura 10.



Fig. 10. Energizador comercial.

O circuito de potência do energizador simulado usando o software PSIM 6 é mostrado na Figura 11.

A Tabela II sintetiza os dados de entrada do projeto, os valores calculados e simulados bem como os parâmetros do transformador confeccionado.

O ensaio do transformador foi realizado nas frequências de 1 kHz e 10 kHz utilizando-se uma ponte RLC Genrad modelo 1659.

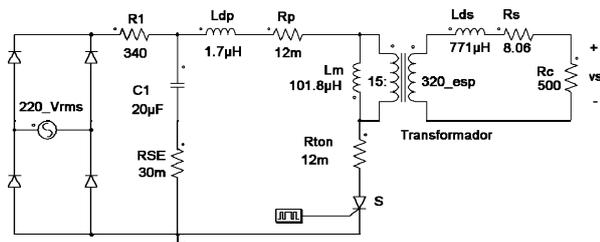


Fig. 11. Circuito simulado.

TABELA II
Dados do Projeto.

Dados de Entrada do Projeto					
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
W_{C1}	1 J	V_{C1}	311 V	R_c	500 Ω
$V_{Entrada}$	220V _{CA}	F_p	3 %	V_{st}	5 kV
Parâmetros do transformador calculados e utilizados na simulação					
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
C_1	20 μ F	L_{dp}	1,7 μ H	R_p	12 m Ω
L_m	101 μ H	L_{ds}	771 μ H	R_s	8,06 Ω
N_p	15	N_s	320	a	21,3
Parâmetros do transformador confeccionado					
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
L_m (10 kHz)	108 μ H	L_{dp} (10 kHz)	2 μ H	L_{ds} (10 kHz)	880 μ H
L_m (1 kHz)	250 μ H	L_{dp} (1 kHz)	2,2 μ H	L_{ds} (1 kHz)	965 μ H
R_p	30 m Ω	R_s	10,2 Ω		

A curva da corrente no primário do transformador $i_p(t)$ obtida através de simulação é mostrada na Figura 12, e a curva medida é mostrada na Figura 13. A corrente máxima obtida por simulação foi de 230 A e a corrente máxima obtida experimentalmente foi de aproximadamente 220 A. Apesar da pequena diferença na corrente de pico, é possível afirmar que o modelo de simulação do circuito CGI é fiel ao circuito elétrico real.

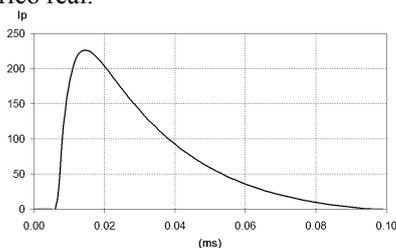


Fig. 12. Simulação da corrente no primário do transformador.

As Figuras 14 e 15 apresentam os resultados obtidos através de simulações e de ensaios experimentais realizados no equipamento comercial para a tensão de saída $v_s(t)$, considerando uma carga padrão de 500 Ω . Em ambas as curvas, observa-se que o valor máximo de $v_s(t)$ é aproximadamente igual a 5 kV. É importante destacar que este resultado é plenamente satisfatório para validar a metodologia de projeto, a qual se destaca por permitir o projeto do CGI a partir da especificação da tensão máxima produzida em uma determinada carga.

Apesar do valor máximo da tensão na carga padrão ser praticamente o mesmo nos resultados obtidos

experimentalmente e nos obtidos por simulação, cabe ressaltar que a forma de onda simulada e a obtida a partir dos ensaios realizados no equipamento industrial apresentam pequenas diferenças em função das perdas no núcleo do transformador (que foram desprezadas neste estudo).

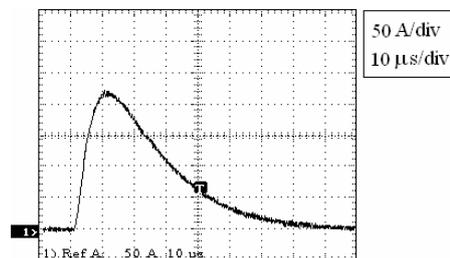


Fig. 13. Medição da corrente no primário do transformador.

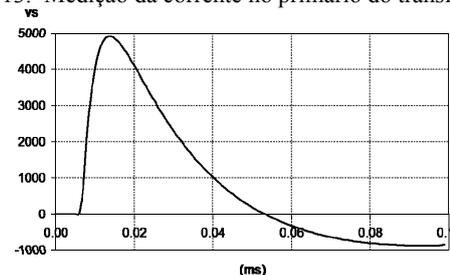


Fig. 14. Simulação da tensão na carga padrão.

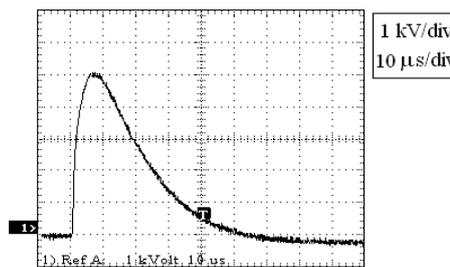


Fig. 15. Medição toda tensão na carga padrão.

A partir da aquisição da curva de corrente e de tensão na carga padrão de 500 Ω , é possível calcular a potência instantânea e, conseqüentemente, a energia dissipada na carga padrão de 500 Ω , a qual se encontra representada na Figura 16. Observa-se que a energia dissipada na carga foi de 0,85 J, o que corresponde a aproximadamente 85 % da energia acumulada no capacitor C_1 ao passo que, em circuitos comerciais, a energia máxima transferida para a carga é de 80 % da energia acumulada. Esta comparação demonstra que o valor de 0,85 J (obtido neste projeto a partir da metodologia proposta) representa um ganho real.

A energia dissipada em uma carga resistiva conectada aos terminais de saída do energizador varia com o valor da carga. Fabricantes utilizam o valor de 500 Ω para simular uma carga elétrica com poucas perdas, ou seja, com bom isolamento do fio vivo, e o valor de 100 Ω para simular uma carga elétrica com perdas consideráveis, ou seja, apresentando falha no isolamento do fio vivo. Desta forma, é possível projetar, por exemplo, um energizador com energia nominal de 10 J que dissipe o máximo de energia em uma carga de 100 Ω , e que, em uma carga de 500 Ω , dissipe um valor máximo de 5 J, de forma a assegurar um desempenho adequado em cercas com perdas e garantir a conformidade com a norma IEC.

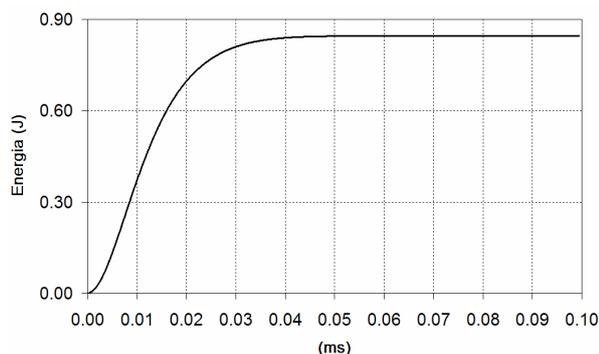


Fig. 16. Energia dissipada pelo impulso elétrico produzido pelo energizador implementado em um resistor de 500 Ω .

VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho, buscou-se preencher uma importante lacuna técnico-científica através da análise sistemática dos circuitos energizadores. O resultado deste estudo foi o desenvolvimento de uma metodologia de projeto que viabiliza o dimensionamento dos diversos componentes que integram o sistema. Utilizando a metodologia proposta, é possível projetar estes equipamentos em conformidade com as normas técnicas IEC 60479-2:1987 e IEC 60335-2-76:2002. Desta forma, não apenas se garante a segurança de pessoas e animais como também se obtém a qualificação necessária do equipamento para a aquisição de certificação internacional. Outra importante contribuição deste trabalho é apresentar à comunidade científica uma nova forma de dimensionar transformadores de pulso único.

Os resultados obtidos por meio de processos experimentais validam integralmente a metodologia proposta que, em conformidade com os procedimentos descritos, permite o projeto de energizadores de cerca elétrica de forma mais rápida e eficiente, deixando de lado os antigos métodos empíricos que implicam na implementação de diversos protótipos e resultam em elevado custo de projeto.

Dentro deste contexto, é possível destacar ainda que os resultados obtidos através desta atividade envolvendo empresa e universidade superaram as expectativas e criaram vínculos de parceria e colaboração.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Romeo Bonifacino, diretor da Walmur Instrumentos Veterinários Ltda, empresa que financiou este estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEC 60479-2:1987 – Effects of current passing through the human body Part 2: Special Aspects.
- [2] IEC 60335-2-76:2002 – Safety of household and similar electrical appliances - Part 2-76: Particular requirements for electric fence energizers.
- [3] IEC 60479-3:1998 – Effects of current on human beings and livestock – Part 3: Effects of currents passing through the body of livestock.
- [4] Marcelo Giovanni B. De Martino. *Estudo e Implementação de um Energizador de Cercas Elétricas*, Dissertação de Mestrado apresentada na PUCRS como

parte dos requisitos para obter o grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Brasil, 2005.

- [5] Mahmood Nahvi, Joseph A. Edminister. *Theory and Problems of Electric Circuits*, McGraw-Hill. 2003.
- [6] N. Mohan, T. Undelan, W. Robbins, *Power Electronics*, John Wiley and Sons, Inc, 2003.
- [7] Ivo Barbi, Carlos Henrique Illa Font, Ricardo Luiz Alves. *Apostila de Projeto Físico de Indutores*, Universidade Federal de Santa Catarina.2002.
- [8] Colonel Wm. T. McLyman. *Magnetic Core Selection for Transformers and Inductors*, Marcel Dekker, Inc. 1982.
- [9] Marcelo Giovanni B. De Martino, Fernando S. dos Reis, Guilherme A. Dias. “Model and Simulation in ATP of Electric Fence with Lightning Protection Device”, *VIII SIPDA, - Simpósio Internacional de Proteção contra Descargas Atmosféricas*. São Paulo, Brazil. 2005.

DADOS BIOGRÁFICOS

Marcelo Giovanni Bonifacino de Martino, nascido em 08/05/1979 em Porto Alegre-RS, Brasil, graduado em Engenharia de Controle e Automação (2002) e Mestre em Engenharia Elétrica (2005) pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul e, atualmente, exerce o cargo de Engenheiro de Produto da empresa Walmur Instrumentos Veterinários Ltda.

Fernando Soares dos Reis, nascido a 13/11/1963 em Pelotas-RS, Brasil graduado em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, PUCRS, em 1987, Mestre em Engenharia pela Universidade Federal Santa Catarina em 1990 e Doutor em Eletrônica Industrial pela Universidad Politécnica de Madrid na Espanha em 1995. Iniciou suas atividades na PUCRS em 1990 como professor assistente e atualmente é professor titular do departamento Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia. Publicou mais de 70 artigos técnicos. Tendo especial interesse em PFCs, Reatores Eletrônicos, Qualidade de Energia e na aplicação da eletrônica de potência em Sistemas de Energias Renováveis. É conselheiro da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP) e membro do IEEE.

Raphael Ronald Noal Souza, nascido em 03/11/1973 em Porto Alegre-RS, Brasil, graduado em Engenharia Elétrica (2003) pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul UFRGS e, atualmente, desenvolve a atividade de mestrando no Laboratório de Eletrônica de Potência (LEPUC) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

Guilherme Alfredo Dentzien Dias, nascido em 28/04/1950 em Porto Alegre-RS, Brasil graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, em 1975, Mestre em Engenharia pela Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, em 1986 e Doutor em Qualidade da Energia pela Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, em 2000. Professor da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, PUCRS de 1976 até 2006. Publicou mais de 120 artigos técnicos. Tendo especial interesse em Qualidade de Energia, Transitórios Eletromagnéticos, Sistemas de aterramento de Alta e Baixa Frequência, Medidas Elétricas e Magnéticas e na aplicação da Compatibilidade Eletromagnética. É autor do livro *Harmônicas em Sistemas Industriais*. É membro do CIGRÉ e do IEEE.