

Efficiency of Class III Surge Protection Devices Against Lightning Surges

Gustavo O. Cavalcanti, Marcílio A. F. Feitosa, Kayro F. H. Pereira, Manoel H. N. Marinho, Antonio S. Neto, Lucas C. Sobral, Pollyana M. R. Gonçalves, Douglas T. M. Lara, Thiago F. Gomes, Renato J. Teixeira and Wagner A. Barbosa

Abstract— The power surges produced by lightning discharges affect the electrical network at residences and cause damages in home appliances. To avoid these damages, it is recommended to use Surge Protection Devices (SPD) in the power input of the appliances (SPD Class III). This article presents the current levels that the SPD Class III bypass at the entrance of the appliances. We show that the SPD can deflect 75% of the current that reaches it. We also show that SPD increase the voltage level supported by equipment in 2 kV or more and thus maintain the equipment's useful life. Cell phone chargers, laptop chargers and refrigerator power supply were submitted to a series of surges with different voltage levels to determine the number of surges that each equipment can withstand at a specific voltage. In all the studied equipment, SPD increased the number of supported surges.

Index Terms—Surges, Lightning protection, Current measurement, Current-voltage characteristics, Refrigerators and Low-power electronics.

I. INTRODUÇÃO

O carregamento eletrostático das partículas suspensas no ar dá origem a nuvens carregadas eletricamente. A nuvem carregada induz no solo cargas de sinais opostos, criando um campo elétrico intenso e uma elevada diferença de potencial. O ar atmosférico em condições padrão ($T = 293 \text{ K}$ e $P = 1 \text{ atm}$) é um meio isolante com rigidez dielétrica de $3 \times 10^6 \text{ V/m}$.

Funding for this research was provided by CLAMPER Indústria e Comércio S.A - Rodovia LMG 800, KM 1 N° 128 - Lagoa Santa (MG), Brasil.”

Gustavo Oliveira Cavalcanti, Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Recife/PE, Brasil, gustavooc@poli.br.

Marcílio A. F. Feitosa, Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Recife/PE, Brasil, marcelio@poli.br.

Kayro F. H. Pereira, Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Recife/PE, Brasil, kayrofellyxbr@gmail.com.

Manoel H. N. Marinho, Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Recife/PE, Brasil, marinho75@poli.br.

Antonio S. Neto, Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Recife/PE, Brasil, asneto01@poli.br.

Lucas C. Sobral, Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Recife/PE, Brasil, lucasdecarvalhosobral@gmail.com.

Pollyana M. R. Gonçalves, Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Recife/PE, Brasil, pmrg@poli.br.

Douglas T. M. Lara, CLAMPER Indústria e Comércio S.A, Lagoa Santa/MG, Brasil, douglas.lara@clamper.com.br.

Thiago F. Gomes, CLAMPER Indústria e Comércio S.A, Lagoa Santa/MG, Brasil, thiago.gomes@clamper.com.br.

Renato J. Teixeira, CLAMPER Indústria e Comércio S.A, Lagoa Santa/MG, Brasil, renato.teixeira@clamper.com.br.

Wagner A. Barbosa CLAMPER Indústria e Comércio S.A, Lagoa Santa/MG, Brasil, wagner@clamper.com.br.

Quando o campo elétrico local excede esse valor, o ar é convertido em um meio condutor, permitindo que correntes elétricas fluam na forma de uma descarga [1]. As descargas atmosféricas descendentes negativas atingem diversas localidades no Brasil, totalizando aproximadamente 77 milhões de raios por ano e causando a morte de mais de duas mil pessoas entre os anos de 2000 e 2017, segundo o Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) - INPE [2]. As descargas podem ainda causar danos materiais, como por exemplo danificando eletrodomésticos, danos ambientais, quando atingem árvores e provocam incêndio [3] e acidentes fatais com animais [4]. De acordo com a base de dados apresentada por Silveira [5], as correntes de pico de um raio estão situadas entre poucos e centenas de quiloampères, com mediana de 43.3 kA, o que provoca uma sobretensão transitória severa. Para evitar danos nos equipamentos conectados à rede elétrica são empregados dispositivos de proteção contra surtos (DPS).

Dessa forma, o presente trabalho apresenta uma análise sistemática, seguindo normas internacionais, da eficiência de proteção de um modelo de DPS Classe III, comumente empregados nas residências brasileiras para proteção de eletrodomésticos. Apresentam-se resultados experimentais do comportamento da corrente que atinge a entrada do dispositivo e o DPS consegue desviar. Também foram avaliados os níveis de tensão que três modelos de eletrodomésticos podem suportar com e sem a proteção de um DPS, para surtos com tensões de pico entre 2 e 7 kV.

II. ABORDAGEM DO PROBLEMA

As descargas atmosféricas podem provocar destruição em dispositivos elétricos em geral, entretanto, apenas 10% desses acidentes são causados por descargas diretas. Nos sistemas de distribuição de baixa tensão, mais de 90% dos defeitos apresentados nos equipamentos elétricos são provocados por tesões induzidas [6]. A tensão induzida no secundário de um transformador típico de distribuição (13.8 kV – 220/127 V, 30 kVA) devido a uma descarga atmosférica no primário pode chegar a 8 kV de pico, dependendo da carga a ela conectada [7]. A tensão de pico induzida em uma linha de transmissão, devido à incidência de descargas atmosféricas nas proximidades da linha, foi monitorada num trecho de 820 m, com pontos de medição a cada 50 m. Essa tensão atingiu valores de até 16.8 kV quando um raio incidiu em uma torre de 200 m de altura, situada a 200 m de distância do ponto da linha mais próximo da torre [8].

Além disso, o surto produzido por raios adjacentes pode induzir tensões transitórias na linha por acoplamento, que serão transferidas para o dispositivo que estiver conectado a esta linha [9 – 10]. O DPS é utilizado para resolver esse problema atuando em um tempo muito curto e limitando a tensão transitória para um nível mais baixo, protegendo assim os equipamentos conectados ao circuito [11].

A NBR 5419 descreve que as descargas atmosféricas podem chegar às instalações elétricas internas quando atingem diretamente a estrutura ou próximo a ela. Ou ainda quando atingem diretamente a linha externa de alimentação ou de sinal conectada com a instalação ou próximo a ela [12]. A NBR 5419 estabelece que para evitar danos aos equipamentos ligados à rede elétrica sejam utilizados Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) e Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS), que são o objeto deste trabalho [12].

Segundo a Norma Internacional IEC 61643-11 [13], os DPSs estão divididos em três classes: Classe I – utilizados na entrada de edificações e capazes de suportar uma parcela da descarga atmosférica direta (no SPDA ou nas linhas de alimentação); Classe II – construídos para suportar apenas correntes induzidas por descargas e utilizados na entrada de edificações não expostas a descargas diretas e em quadros elétricos internos; Classe III – utilizados no interior das edificações e conectados na entrada do equipamento a ser protegido [13]. Os DPS Classe III são os estudados neste trabalho.

Nakazato et al [14] apresentam resultados experimentais e de simulação nos quais a tensão de pico de um surto em uma linha residencial pode atingir 4 kV, dependendo do comprimento da linha, mesmo com a instalação de dispositivo de proteção contra surto (DPS) no painel de entrada. Y. Du [15] apresenta a importância da utilização do DPS nas extremidades do circuito de distribuição para minimizar a tensão induzida por descargas atmosféricas e assim reduzir o efeito destrutivo aos equipamentos conectados a este circuito. Esses resultados mostram a importância da utilização de DPS na entrada dos equipamentos eletrodomésticos, que são os DPS Classe III.

Os equipamentos eletrodomésticos possuem proteção interna contra surtos elétricos e a NBR 5410 [16] normatiza que devem ser capazes de suportar tensões impulsivas mínimas, de pico, de 1.5 kV. Entretanto, em regiões de intensa incidência de descargas atmosféricas, a proteção interna do equipamento pode ser violada, reduzindo a vida útil do equipamento. Além disso, segundo o Institute of Electrical and Electronic Engineers – Surge Protective Committee (IEEE C62.41), a probabilidade de ocorrerem surtos de tensão de intensidade superiores a 6 kV, nos barramentos de entrada do quadro de distribuição de energia de um edifício, é muito baixa [17]. Consequentemente, um DPS instalado no quadro deve ser capaz de desviar com segurança um surto dessa magnitude. Observa-se que o valor indicado nos estudos do comitê do IEEE (6 kV) é superior à proteção exigida pela NBR 5410 e pode levar a uma falha nos eletrodomésticos.

Nesse contexto, os problemas abordados são: identificar o nível de tensão de surto que os eletrodomésticos suportam, e verificar se a utilização de DPSs Classe III na entrada dos eletrodomésticos é necessária ou não para garantir a vida útil do

equipamento.

Para tal, realizou-se uma série de experimentos com carregadores de notebook e celular e fontes de refrigerador. Os resultados experimentais são apresentados na forma de corrente desviada pelo DPS Classe III em função da tensão aplicada e número de surtos suportados pelos eletrodomésticos quando submetido a surtos de diferentes níveis de tensão com e sem a proteção do DPS.

III. SOLUÇÃO PROPOSTA

Para avaliar a eficiência de proteção dos DPSs em condições reais de uso, foram escolhidos, para serem protegidos, equipamentos comerciais e presentes nas residências brasileiras, tais como, carregador de celular, notebook e refrigerador. Todos os equipamentos utilizados eram originais e atendiam à Norma de instalação elétrica NBR 5410 [16]. As marcas e os modelos dos equipamentos escolhidos, bem como dos DPSs utilizados, não serão divulgados, pois não são o foco desta pesquisa. Os testes foram realizados em laboratório montado especificamente para os ensaios no Instituto de Inovação Tecnológica da Universidade de Pernambuco – IIT/UPE.

A IEC 61643-11 [13] especifica as características que um DPS Classe III deve atender, e os testes são realizados utilizando-se um Gerador de Onda Combinada capaz de gerar formas de onda de tensão de circuito aberto e corrente de curto circuito normalizadas, com parâmetros 1.2/50 μ s e 8/20 μ s (8 μ s de tempo de subida e 20 μ s de tempo de queda até 50%), respectivamente. O gerador de onda utilizado emite surtos elétricos que atendem à IEC 61000 [18]. Possui impedância interna de 2 Ω , e gera surtos de até 7.5 kV, com polaridade positiva ou negativa e a uma taxa de repetição de 25 s.

Um sistema de aterramento exclusivo para o Gerador de Surtos com uma resistência de 7.75 Ω , atendendo à NBR 5410 [16], foi construído para adequação do laboratório de testes. Assim, após passar pelo equipamento sob teste, o surto elétrico produzido pelo gerador é desviado para um aterramento independente, evitando que os surtos danifiquem outros equipamentos conectados à rede elétrica local. A seguir, descrevem-se a configuração e os procedimentos utilizados nos experimentos.

A. Configuração para os Experimentos

Os testes foram realizados individualmente e seguem o padrão internacional IEC 61000-4-5 [18], conforme o esquema de conexão apresentado na Figura 1. Nessa pode-se observar as

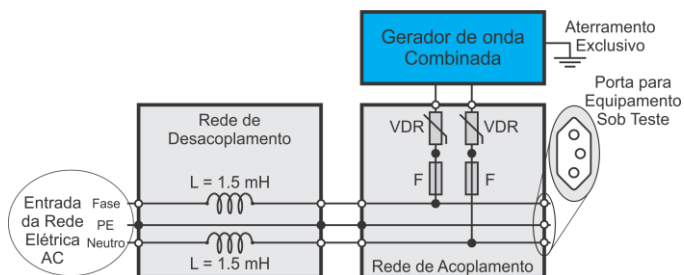


Fig. 1. Esquema de conexão do equipamento sob teste sem o DPS.

redes de acoplamento e desacoplamento que limitam os efeitos do surto produzido pelo gerador ao equipamento sob teste. O circuito de acoplamento, que conecta o gerador em paralelo com a rede elétrica de 220 V, é constituído por um varistor (VDR) em série com um fusível térmico F (10 A 150° C) nos condutores fase e neutro. O VDR impede que o sinal da rede elétrica de 220 V entre no Gerador de Surtos e ao mesmo tempo permite que o surto de alta tensão produzido pelo gerador seja injetado na rede de acoplamento. A corrente em regime permanente que passa pelo fusível térmico de 10 A é quase nula, uma vez que o VDR se comporta como uma elevada impedância para a tensão de 220 V. Os surtos elétricos com correntes superiores a 1 kA passam pelo fusível no instante do acionamento do gerador e não o danificam permanentemente por possuírem uma duração máxima de aproximadamente 250 μ s [18]. Ao final da vida útil do VDR, sua impedância é reduzida a valores próximos de zero para uma tensão de 220 V e, como consequência, a corrente que passa em regime permanente supera os 10 A, elevando a temperatura e acionando o fusível que protege o gerador. A Figura 2 apresenta uma fotografia da parte interna da caixa onde fica o circuito da rede de acoplamento. O surto elétrico sai do gerador, passa pelo varistor e pelo fusível e é injetado em paralelo com a rede elétrica, bem próximo ao equipamento sob teste, conforme esquema da Figura 1 e fotografia da Figura 2. O surto não segue para a rede elétrica pois é bloqueado pela rede de desacoplamento. A saída da rede de acoplamento é uma tomada 10 A comercial, para que o equipamento sob teste fique em condições padrão de uso.

Entre a rede de acoplamento e a entrada da rede elétrica, que alimenta o equipamento sob teste com 220 V, é colocada a rede de desacoplamento, conforme Figura 1. A rede de desacoplamento é composta por duas bobinas de 1.5 mH cada, em série com a linha, conectadas conforme a IEC 61000 [18], e impedem a passagem do surto para a rede local e concentra a energia do surto no equipamento sob teste.

As redes de acoplamento e desacoplamento, desenvolvidas seguindo a IEC 61000 [18], foram colocadas dentro de caixas para proteção e acondicionamento dos circuitos. A seguir apresentam-se os procedimentos experimentais adotados para

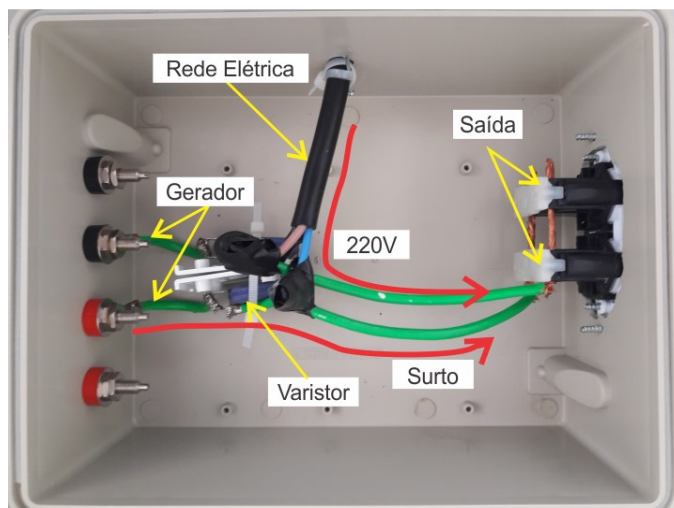


Fig. 2. Fotografia do circuito da rede de acoplamento.

realização dos testes.

B. Procedimentos de Teste

Foram realizados dois tipos de testes. No primeiro foi empregada a configuração experimental ilustrada na Figura 1, para determinar a corrente que passa pelo DPS, quando ele está sendo utilizado como elemento de proteção de um carregador de celular. O carregador de celular foi escolhido para esse teste por se tratar de um equipamento de baixo custo e muito comum em todas as residências. Além disso, a verificação de seu funcionamento durante o teste é realizada pela observação de um LED, que está conectado à saída do carregador e permanece aceso enquanto o equipamento estiver operando. Os valores de pico da tensão sobre as resistências R, ilustradas na Figura 3, são medidos com o auxílio do osciloscópio digital TDS 1012C-EDU da Tectronix e uma ponta de prova GE3421 CAL TEST com isolamento de 4 kV. Para cada nível de tensão de entrada ($V_{Entrada}$) aplica-se um surto e mede-se, inicialmente, a tensão de pico entre os pontos A e B, ilustrados na Figura 3. Um novo surto de mesmo nível de tensão é aplicado e mede-se a tensão de pico entre os pontos C e D. Esse procedimento é repetido cinco vezes para obtenção do valor médio das tensões de pico nas resistências e determinação das correntes I_{Total} e I_{Carga} .

No segundo tipo de teste, os equipamentos foram submetidos a surtos sucessivos e ininterruptos em um nível de tensão específico, com um intervalo de 30 segundos entre os surtos, sendo 5 surtos de polaridade positiva e 5 negativos. A bateria de testes só é interrompida caso o equipamento apresente falha ou ao atingir 700 pulsos. Esses valores foram escolhidos para atender à Norma IEC 61000-4-5 [18], garantir o total carregamento dos capacitores internos do gerador responsável pela geração dos surtos e para que o teste completo de um único equipamento tenha duração máxima de aproximadamente 6 horas. Um único equipamento foi testado por vez, para concentrar a energia do surto produzido pelo gerador.

Em ambos os testes, os surtos de tensão aplicados eram ondas combinadas de tensão de circuito aberto e corrente de curto circuito, com parâmetros 1.2/50 μ s e 8/20 μ s, respectivamente. Os estudos foram executados sob duas hipóteses de resultados: quantidade de surtos/pulsos até ocorrer a falha e não falhar. Ocorrendo a falha, anota-se a quantidade total de pulsos aplicados e, quando o aparelho não falhou, foi registrado 700 que é o número máximo de surtos ao qual cada equipamento foi submetido.

IV. RESULTADOS

Os experimentos foram realizados no IIT/UPE, empregando a configuração da Figura 1 e permitiram determinar a corrente que circula no DPS quando submetido a um surto elétrico em condições reais de uso e também o número de surtos suportados

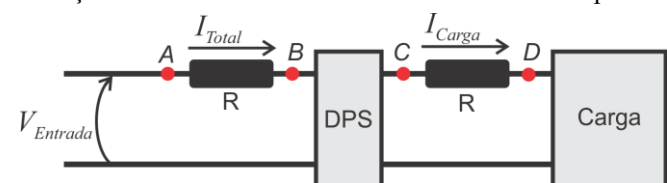


Fig. 3. Configuração utilizada nos experimentos para determinação da corrente desviada pelo DPS.

pelos carregadores de celular, notebook e refrigerador em diferentes níveis de tensão, conforme detalhado a seguir.

A. Corrente no Dispositivo de Proteção contra Surtos

A medição da corrente que passa pelo DPS é importante para determinação da degradação do varistor de óxido de metal, que é o principal componente do DPS [19 - 20]. A relação entre a corrente que passa pelo DPS e a corrente total provocada pelo surto fornece informações acerca do funcionamento do DPS.

A Figura 3 apresenta o circuito utilizado na determinação da corrente que circula pelo DPS Classe III em estudo (I_{DPS}) em função da tensão de pico do surto selecionada no gerador e aplicada à entrada do circuito ($V_{Entrada}$). Neste circuito, o DPS é empregado como elemento de proteção de uma carga, que por simplicidade foi um carregador de celular. Dois resistores (R) de resistência 0.0147Ω foram utilizados no circuito para permitir a determinação da corrente total que entra no circuito (I_{Total}) e da corrente que passa para a carga (I_{Carga}) pela medição da tensão de pico do surto. Assim, a corrente que passa pelo DPS foi calculada por,

$$I_{DPS} = I_{Total} - I_{Carga}. \quad (1)$$

A forma de onda da tensão na entrada ($V_{Entrada}$) do circuito da Figura 3, que corresponde à saída da rede de acoplamento, para um surto de 3 kV está apresentada na Figura 4 (a). A onda de tensão utilizada nos testes de compatibilidade eletromagnética é padronizada pela norma IEC 61000-4-5 [18] e possui tempo de subida e duração a meia altura em microssegundos de $1.2 \pm 30\%$ e $50 \pm 20\%$, respectivamente. Os tempos de subida e duração a meia altura apresentados na Figura 4 (a), bem como dos demais surtos aplicados nos testes deste trabalho, atendem à norma supracitada. Não foram observadas alterações significativas nos formatos das formas de ondas das tensões medidas nos resistores R, apenas modificação no fator de escala. A Figura 4 (b) apresenta as correntes de pico medidas na entrada e na carga, e a calculada para o DPS, em função da tensão de surto selecionada no gerador e aplicada à entrada do circuito. Nesse experimento, a configuração adotada foi a descrita no parágrafo anterior. Os valores apresentados em cada ponto da curva são resultantes de uma média de cinco medições realizadas em diferentes instantes de tempo. A média visa minimizar erros na aquisição dos valores amostrados pelo osciloscópio. Observa-se, na Figura 4, que a corrente na entrada do circuito I_{Total} cresce rapidamente com a tensão e chega a 1.4 kA para uma tensão de 3 kV na entrada. A corrente no DPS I_{DPS} apresenta comportamento semelhante e também cresce rapidamente, entretanto, a corrente na carga I_{Carga} cresce lentamente e com uma tendência de saturação, mostrando que o DPS limita a corrente máxima que passa para o dispositivo sob proteção.

Considerando que uma das funções do DPS é desviar corrente para evitar danos no dispositivo sob proteção, foi utilizado um parâmetro para avaliar a eficácia do DPS em cumprir a sua função: A razão entre a corrente desviada em relação à corrente total que passaria pelo dispositivo. A Figura 5 apresenta a razão I_{DPS}/I_{Total} em função da tensão de pico do surto aplicado na entrada do circuito. Observa-se que a razão

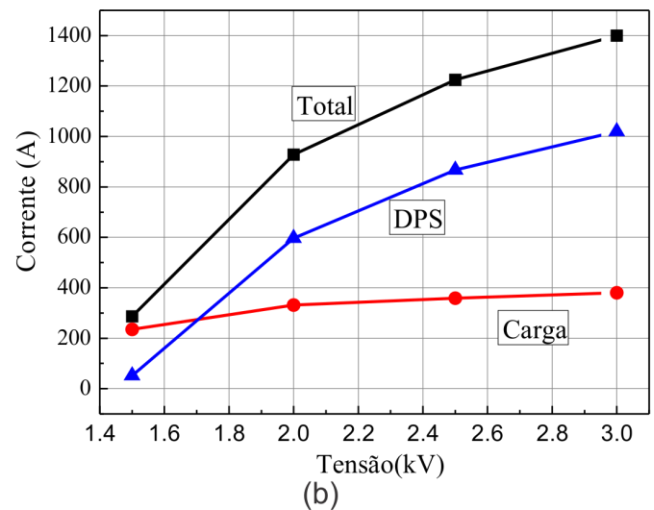
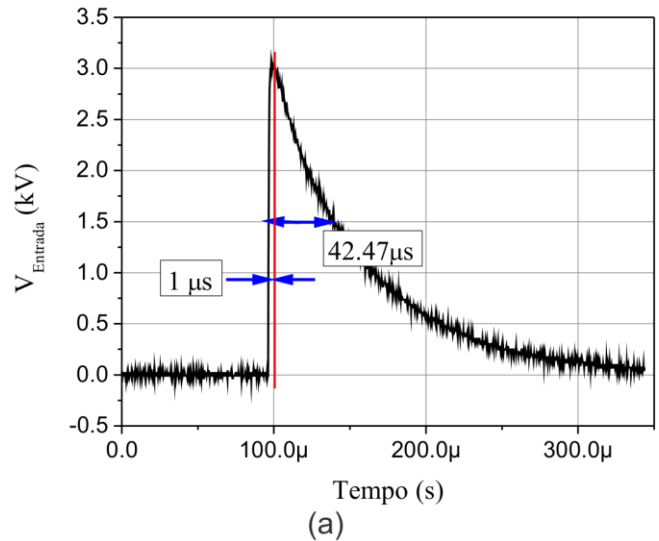


Fig. 4. (a) Forma de onda da tensão de entrada ($V_{Entrada}$) para um surto de 3 kV. (b) Corrente total (I_{Total}) na entrada do circuito da Figura 3, corrente desviada pelo DPS (I_{DPS}) e corrente que atinge a carga (I_{Carga}) em função da tensão na entrada do circuito.

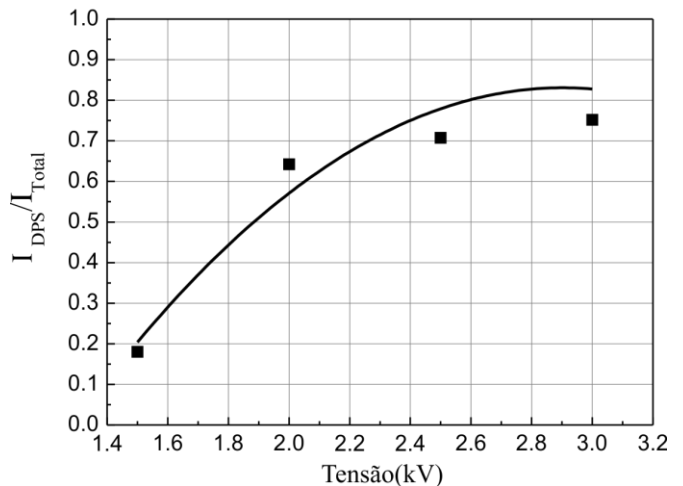


Fig. 5. Razão I_{DPS}/I_{Total} em função da tensão de pico do surto aplicado na entrada do circuito.

entre as correntes, com relação à tensão de surto aplicada, cresce rapidamente no início do gráfico da Figura 5, reduzindo essa taxa de crescimento para surtos de tensão de pico acima de 2 kV. Em 3 kV a razão entre as correntes chega a 0.75, ou seja, 75% da corrente que atingiria o dispositivo é desviada pelo DPS. Esses valores de eficiência mostram a importância da utilização do DPS na proteção de eletrodomésticos em regiões de alta incidência de descargas. Cabe ainda salientar a necessidade de padronização, por meio de atualização das normas, da eficiência em função da tensão para garantir que os DPSs comercializados atendam a requisitos mínimos. Mostrada essa eficiência, realizou-se um estudo para determinação dos números de surtos suportados pelos equipamentos com e sem a proteção do DPS em diferentes níveis de tensão.

B. Número de Surtos nos Carregadores de Celular

Seguindo os procedimentos de teste, foram realizados ensaios destrutivos em dezoito carregadores de celular comerciais idênticos, com surtos em três níveis de tensão de pico: 4, 5 e 6 kV. Nove carregadores foram testados sem proteção e nove protegidos com os DPS. Cargas resistivas, que drenam corrente compatível com a corrente de carga de um celular, foram fabricadas e conectadas ao carregador para testar o equipamento em condições de uso. Os carregadores foram testados individualmente e cada nível de tensão foi aplicado a três equipamentos. Os números de surtos suportados pelos carregadores com e sem a proteção do DPS estão apresentados na Tabela I. Nos testes realizados sem a proteção do DPS, os carregadores apresentaram falha permanente e, para surtos acima de 5 kV de pico, o carregador queimou com no máximo 2 surtos, mostrando baixa suportabilidade.

Nos testes realizados com a proteção do DPS na entrada do equipamento, não foram observadas falhas nos níveis 4 kV e 5 kV, nem no DPS nem no carregador. Em 6 kV, o DPS chegou ao final da vida útil, mas os equipamentos não apresentaram falha, ou seja, os três carregadores de celular continuaram funcionando após receber 220, 147 e 573 surtos de 6 kV cada um, quando protegidos pelo DPS. As diferenças entre esses valores são, provavelmente, provocadas por variações nas características construtivas dos varistores utilizados nos DPSs.

TABELA I
DADOS EXPERIMENTAIS DOS CARREGADORES DE CELULAR

Carregadores de Celular Sem DPS			
Teste	4 kV	5 kV	6 kV
1º	259 (FE)	2 (FE)	1 (FE)
2º	131 (FE)	1 (FE)	1 (FE)
3º	137 (FE)	1 (FE)	1 (FE)
Carregadores de Celular Com DPS			
Teste	4 kV	5 kV	6 kV
1º	700 (S)	700 (S)	220 (FV)
2º	700 (S)	700 (S)	147 (FV)
3º	700 (S)	700 (S)	573 (FV)

FE = Ocorreu Falha no Equipamento / FV = Final da vida útil do DPS / S = Não ocorreu Falha no Equipamento nem no DPS.

C. Número de Surtos nos Carregadores de Notebook

Conforme os procedimentos de teste, foram analisados

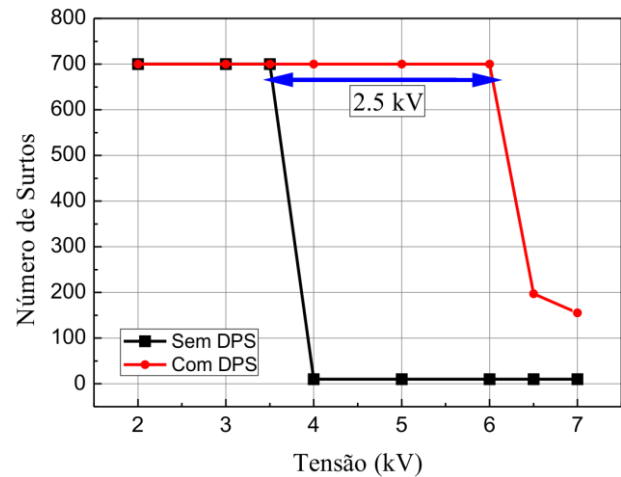


Fig. 6. Média do número de surtos suportados pelos carregadores de notebook em função da tensão aplicada.

dezoito carregadores de notebook de modelo comercial sendo dez carregadores sem proteção do DPS e oito protegidos com os DPS. Para os carregadores de notebook, também foram construídas cargas resistivas que consumiam corrente compatível com a corrente que seria drenada pelo notebook caso estivesse conectado. Os carregadores de notebook também foram testados individualmente e, com a experiência dos testes realizados nos carregadores de celular, ficou evidenciada a importância de escolher os níveis de tensão buscando determinar em qual deles o equipamento começaria a apresentar falhas. Nos testes da Tabela I, por exemplo, não precisariam ser testado os carregadores de celular sem o DPS para o nível 6 kV, visto que com 5 kV já ficou evidenciada a falha imediata. Por isso, nos testes com carregadores de notebook foram utilizados surtos com 8 níveis diferentes de tensão. A Tabela II apresenta o número de surtos suportados pelos carregadores de notebook com e sem a proteção dos DPS.

TABELA II
DADOS EXPERIMENTAIS DOS CARREGADORES DE NOTEBOOK

Carregadores de Notebook Sem DPS					
Teste	2 kV	3 kV	3,5 kV	4 kV	
1º	700 (S)	700 (S)	700 (S)	1 (FE)	
2º	700 (S)	700 (S)	-	1 (FE)	
3º	700 (S)	700 (S)	-	2 (FE)	
Carregadores de Notebook Com DPS					
Teste	4 kV	5 kV	6 kV	6,5 kV	7 kV
1º	700 (S)	700 (S)	700 (S)	217 (FV)	144 (FV)
2º	-	-	700 (S)	177 (FV)	167 (FV)

FE = Ocorreu Falha no Equipamento / FV = Final da vida útil do DPS / S = Não ocorreu Falha no Equipamento nem no DPS.

Iniciaram-se os testes dos carregadores de notebook (3) sem DPS com um nível de tensão de 2 kV e não se observou falha. A tensão foi elevada para 3 kV e mais 3 carregadores foram testados sem apresentar falhas. Quando o nível de tensão foi elevado para 4 kV, os três carregadores falharam após 1 ou 2 pulsos. Até essa etapa já tinham sido testados 9 carregadores, mas decidiu-se testar mais um com 3.5 kV para tentar identificar a tensão mínima que provoca falhas.

Os resultados apresentados na Tabela II demonstram que, sem a proteção do DPS, o carregador de notebook falha com surtos

com tensão a partir de 4 kV. Os carregadores protegidos por DPS foram testados com surtos de tensões de pico de 4, 5, 6, 6.5 e 7 kV e não apresentaram falhas, considerando o número máximo de 700 surtos. Os DPS chegaram ao final da vida útil quando submetidos a surtos de 6.5 kV e 7 kV, conforme apresentado na Tabela II. A Figura 6 apresenta a média do número de surtos suportados pelos carregadores de notebook, na qual observam-se curvas de comportamento semelhante, entretanto, com níveis de tensão deslocados. Na curva do equipamento sem proteção as falhas iniciam com os níveis de tensão acima de 3.5 kV (quando a curva inicia a queda). Para o equipamento com DPS esse nível é de 6 kV. Assim, conclui-se que o DPS provoca um deslocamento no nível de tensão que provoca a falha no carregador de 2.5 kV.

D. Número de Surtos nas Fontes dos Refrigeradores

Seguindo os procedimentos de teste do presente trabalho foram realizados dezoito experimentos com um refrigerador comercial. Nove testes foram realizados com o refrigerador conectado diretamente ao circuito gerador de surtos e nove com o equipamento protegido pelo DPS. Por se tratar de um equipamento com custo e volume elevados, os experimentos foram realizados com um único refrigerador e as falhas apresentadas eram corrigidas pela equipe dos autores antes da próxima sequência de testes. Assim, realizava-se uma bateria de testes até a falha do refrigerador. Na sequência as peças que apresentavam falha eram substituídas e o equipamento ficava em observação por 48 horas, período no qual a temperatura do refrigerador era observada. Só após a comprovação de que o equipamento funcionava corretamente, uma nova bateria de testes era realizada.

A falha mais comumente apresentada foi a queima de um capacitor na placa de potência do refrigerador. Essa placa foi substituída em todos os testes. O número de surtos suportados pelo refrigerador com e sem a utilização do DPS estão apresentados na Tabela III. Observa-se que, sem a proteção do DPS, o refrigerador apresenta falhas com surtos a partir de 4 kV, porém, com o DPS, as falhas só ocorrem a partir dos 6 kV.

TABELA III
DADOS EXPERIMENTAIS DO REFRIGERADOR

Refrigeradores Sem DPS			
Teste	3 kV	4 kV	5 kV
1º	700 (S)	114 (FE)	1 (FE)
2º	700 (S)	225 (FE)	1 (FE)
3º	700 (S)	700 (S)	1 (FE)
Refrigeradores Com DPS			
Teste	5 kV	6 kV	7 kV
1º	700 (S)	160 (FV)	74 (FV)
2º	700 (S)	104 (FV)	55 (FV)
3º	700 (S)	256 (FV)	53 (FV)

FE = Ocorreu Falha no Equipamento / FV = Final da vida útil do DPS / S = Não ocorreu Falha no Equipamento nem no DPS.

A Figura 7 apresenta a média do número de surtos suportados pelo refrigerador em função da tensão aplicada. Esses experimentos mostraram que o uso do DPS eleva o nível de tensão ao qual o refrigerador pode ser submetido, sem apresentar falhas, de 3 kV para 5 kV, ou seja uma elevação de

2 kV, conforme ilustrado na Figura 7. Constatou-se ainda que o refrigerador não apresentou nenhuma falha de operação durante os testes com a proteção do DPS. Os DPS atuaram como esperado. Devido aos surtos alguns atingiram o fim de sua vida útil, mas o refrigerador continuou funcionando após os ensaios.

E. Vida Útil dos Equipamentos com e sem DPS

Para análise da vida útil dos equipamentos com e sem DPS é importante salientar que a única diferença nos testes com e sem a proteção do DPS é a inserção do DPS, sendo mantidos todos os comprimentos dos cabos e demais variáveis inalteradas. Assim, a comparação dos resultados relata apenas a influência do dispositivo de proteção.

Para avaliar se o equipamento terá sua vida útil interrompida por um surto elétrico, é necessário estimar o número de surtos que atingem uma edificação por ano. Um surto elétrico pode atingir um equipamento em uso na residência quando uma descarga atmosférica incide: em uma área próxima à estrutura num raio de 500 m [21] ou em uma área próxima à linha externa de alimentação, por um comprimento da linha de 1km e distante da linha de até 2 km para um lado e para o outro [21], conforme ilustrado na Figura 8. Desconsiderando a sobreposição entre as duas áreas, a área total de influência de uma descarga na edificação é de 4.39 km². No estado de Tocantins, por exemplo, que possui a maior densidade de raios do Brasil com 19.8 raios por km² por ano [22], uma edificação estaria sujeita a aproximadamente 85 surtos provenientes de raios por ano.

Considerando que os três modelos de equipamentos estudados apresentaram falha já nos dois primeiros surtos em 5 kV, conforme os resultados apresentados nas Tabelas I, II e III, em uma edificação sujeita a surtos com esse nível de tensão, os equipamentos teriam sua vida útil interrompida por uma falha em decorrência de surtos elétricos. Por outro lado, com a proteção do DPS Classe III, todos os equipamentos suportaram o número máximo de surtos que foi de 700. Assim, mesmo que o equipamento com DPS fosse submetido a 85 surtos de 5 kV por ano, ele não apresentaria falha em decorrência desses surtos por, pelo menos, 8 anos. Essa análise mostra quantitativamente a importância de utilizar o DPS em regiões sujeitas a descargas atmosféricas para garantir a vida útil do equipamento.

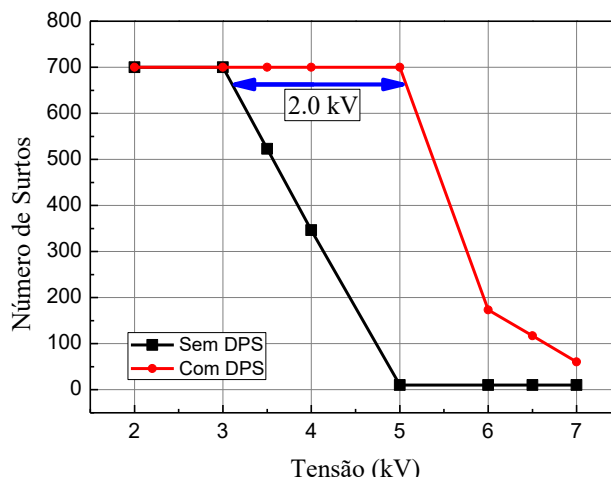


Fig. 7. Média do número de surtos suportado pelo refrigerador em função da tensão aplicada.

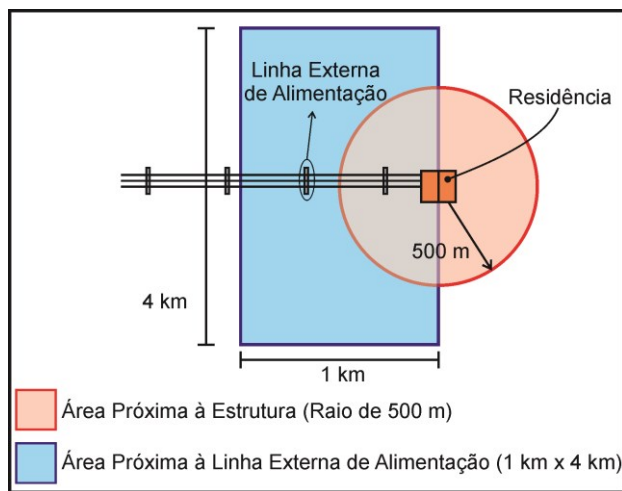


Fig. 8. Área de influência de uma descarga atmosférica na edificação.

Os resultados experimentais também mostraram que o DPS pode desviar até 75 % da corrente que o atinge e eleva o nível de tensão suportado pelos equipamentos estudados em, pelo menos, 2 kV. Fica evidente que essas duas propriedades, proporcionadas pelos DPSs, contribuem para prorrogar o funcionamento dos equipamentos, mesmo sob a incidência de surtos de tensão que os equipamentos não suportariam.

V. CONCLUSÕES

O presente artigo descreve uma análise sistemática da eficiência do uso de Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS) na proteção de eletrodomésticos comumente utilizados em residências brasileiras. Destacam-se como contribuições a medição das correntes que circulam pelo DPS em condições reais de uso dos equipamentos, que permitiu determinar uma eficiência de 75%, ou seja, o DPS pode desviar 75% da corrente que o atinge, a determinação da elevação no nível de tensão que os equipamentos suportam com o DPS e, a partir dessas informações, comprovar a eficiência dos DPSs analisados, na proteção e garantia da vida útil de equipamentos, contra surtos na rede elétrica com formato e amplitude determinados pela IEC 61643-11 [13].

Um desdobramento desses resultados é a necessidade de realizar uma padronização dos DPSs comercializados no país. Assim, os DPS teriam que atender a condições determinadas de desvio de corrente e não apenas suportar um número de surtos predefinido, como é exigido atualmente. Com isso, garantindo que pelos equipamentos passaria apenas uma pequena parcela da corrente dos surtos, diminuem-se também os efeitos negativos a longo prazo devido à destruição gradativa dos componentes pela passagem de correntes elevadas, mas não o suficiente para os danificar de imediato.

Os testes comprovam e quantificam a elevação do nível de tensão e do número de surtos suportados pelos equipamentos quando protegidos pelo DPS. A quantificação desses níveis é uma contribuição deste trabalho e em conjunto com a determinação da corrente que circula pelo DPS serve de base para estudos futuros sobre o tempo de vida dos DPSs por meio da análise da degradação do varistor, que é um dos principais

constituintes do dispositivo. Como trabalho futuro, destaca-se a importância de analisar DPSs, comercializados no Brasil, de diferentes modelos e fabricantes para determinar o nível de proteção desses dispositivos e discutir, nos fóruns competentes, como esses equipamentos podem ser mais bem padronizados e fiscalizados para garantir sua qualidade.

REFERÊNCIAS

- [1] Cooray, Vernon. An introduction to lightning. Springer, 2015.
- [2] Grupo de Eletricidade atmosférica (ELAT) – INPE, *Vítimas de raios – Infográfico*. Disponível em: <encurtador.com.br/uwFKS> Acesso 16 de abril de 2019.
- [3] Kidermann, G. Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia. São Paulo: ABDR Editora, 1997. p.132.
- [4] C. J. A. Cristancho, H. Suárez, Y. Urbano and F. Román, "Fatal livestock lightning accident in Colombia," 2017 International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA), Natal, 2017, pp. 295-298.
- [5] F. H. Silveira and S. Visacro, "Lightning Parameters of a Tropical Region for Engineering Application: Statistics of 51 Flashes Measured at Morro do Cachimbo and Expressions for Peak Current Distributions," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 62, no. 4, pp. 1186-1191, Aug. 2020.
- [6] Y. Zhang, S. Chen, X. Yan, W. Lv and C. Chen, "Observation and analysis of residual voltage of SPD connecting to overhead line," 2015 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Taipei, 2015, pp. 360-363.
- [7] Silva Neto, A. ; Piantini, A. "Sobretensões Induzidas por Descargas Atmosféricas em Redes Secundárias." In: VII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (VII SBQEE), 2007, Santos. VII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (VII SBQEE), 2007. vol. único. pp. 1-6.
- [8] Yokoyama, S.; Miyake, K.; Mitani, H. "Advanced observations of lightning induced voltage on power distribution lines." IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 1, no.2, pp.129-139, Apr. 1986.
- [9] F. J. Mo, J. J. Ruan and Y. P. Chen, "Surge Suppression and Electromagnetic Compatibility", Power System Technology, vol.28, no.5, pp. 69-72, Mar.2004.
- [10] Y. Yang, R. Cheng, J. Shen, et al. "Method for online outdoor electrical equipment lightning warning based on grey relation analysis." Electric Power, 45: pp. 20-23, 2012.
- [11] V. Milardić, I. Uglešić and I. Pavić, "Selection of Surge Protective Devices for Low-Voltage Systems Connected to Overhead Line," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 3, pp. 1530-1537, July 2010.
- [12] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR-5419 "Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas", Maio 2015.
- [13] Norma IEC 61643-11:2011, "Low-voltage surge protective devices – Part 11: Surge protective devices connected to low-voltage power systems - Requirements and test methods", 2011.
- [14] F. Nakazato, H. Shimizu and N. Watanabe, "A study on lightning protection system for low voltage customer system using EMTF," 2011 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning, Chengdu, 2011, pp. 629-632.
- [15] Y. Du, B. Li and M. Chen, "Lightning-induced surges in building electrical systems," 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Shanghai, 2014, pp. 1217-1222.
- [16] ABNT, NBR 5410, "Instalações Elétricas de Baixa Tensão", versão corrigida, Março 2008.
- [17] IEEE Std. C62.41 (IEEE 587) – "Recommended Practice on Characterization of Surge in Low-Voltage (1000V and less) AC Power Circuit", PES SPDC, New York, 2002.
- [18] Norma IEC 61000-4-5:2015, "Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-5: Testing and measurement techniques – Surge immunity test", Edition 3.0, 2014.
- [19] G. Li, C. Lei, G. Ling and G. Yang, "Analytical Method for Performance Degradation of Voltage Limiting Type SPD Based on Leakage Current Measurement," 2019 11th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL), Hong Kong, 2019, pp. 1-5.
- [20] D. T. Khanmiri, R. Ball, J. Mosesian and B. Lehman, "Degradation of low voltage metal oxide varistors in power supplies," 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach, CA, 2016, pp. 2122-2126.

- [21] ABNT, NBR 5419-2, "Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 2: Gerenciamento de risco", Junho 2015.
- [22] Folha de S.Paulo, *Tocantins é Estado campeão em raios; em SP, São Caetano lidera ranking*. Disponível em: < encurtador.com.br/cfr00 > Acesso em 02 de maio de 2019.



Gustavo Oliveira Cavalcanti, graduado em Engenharia Elétrica (2005), Mestre (2008) e Doutor em Engenharia Elétrica (2013) pela Universidade Federal de Pernambuco. Atualmente é professor Associado da Universidade de Pernambuco. Suas áreas de interesse são: qualidade da energia elétrica, interferência e compatibilidade eletromagnética e sensoriamento.



Marcílio André Félix Feitosa, graduado em Engenharia Elétrica (1997), Mestre em Biofísica (2000) e Doutor em Engenharia Elétrica (2009) pela Universidade Federal de Pernambuco. Atualmente é professor adjunto da Universidade de Pernambuco. Suas áreas de interesse são: instrumentação, sistemas embarcados, sistemas de controle eletrônicos e eletrônica de potência.



Kayro Félyx Henrique Pereira, graduado em Ciência da Computação pela Faculdade de Tecnologia e Ciências de Pernambuco. Atualmente é estudante de Mestrado da Universidade de Pernambuco. Suas áreas de interesse são: Eletrônica digital, sistemas embarcados, automação, desenvolvimento de software e inteligência artificial.



Manoel Henrique da Nóbrega Marinho, graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal da Campina Grande (1999), Mestre em Engenharia Civil (2002) e Doutor em Engenharia Elétrica (2005) pela Universidade Estadual de Campinas. Atualmente é professor adjunto da Universidade de Pernambuco. Suas áreas de interesse são: probabilidade, estatística, processos estocásticos, e engenharia de confiabilidade na área de Análise de Dados de Vida.



Antonio Samuel Neto, graduado em Engenharia Elétrica (2003) e Mestre (2005) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco. Atualmente é professor assistente da Universidade de Pernambuco. Suas áreas de interesse são: transitórios eletromagnéticos, eletrônica de potência aplicada a sistema elétrico, integração de energias renováveis ao sistema elétrico de potência.



Lucas de Carvalho Sobral, graduando em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica pela Universidade de Pernambuco. Técnico em Eletrônica pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial - SENAI (2016). Suas áreas de interesse são: Eletrônica de potência, sistemas embarcados, projetos e sistemas com microcontroladores e instrumentação.



Pollyana Maria Ramos Gonçalves, graduanda em Engenharia Elétrica eletrotécnica pela Universidade de Pernambuco. Suas áreas de interesse são: eficiência energética, sistemas de automação industrial, planejamento dos sistemas elétricos, geração de energia elétrica, acionamentos e operação de máquinas elétricas.



Douglas Thiago Moreira Lara, graduado em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações (2010) pela PUC-Minas e pós-graduado em gestão de projetos (2011) pela Faculdade Pitágoras. Atualmente é engenheiro da CLAMPER S/A. Suas áreas de interesse são: manutenção industrial, engenharia de processos, projetos industriais e ensaios elétricos de dispositivos de proteção contra surtos elétricos na CLAMPER S/A.



Thiago Francisco Gomes, graduado em Engenharia Elétrica - Eletrônica (2014) pela PUC Minas e Matemática (2018) pela ISEAT. Atualmente é engenheiro de aplicação de dispositivos de proteção contra surtos elétricos na CLAMPER S/A. Suas áreas de interesse são: soluções para medição de energia elétrica com sistemas Smart Grid e dispositivos de proteção contra surtos.



Renato Jardim Teixeira, graduado em Engenharia Elétrica (2012) pela Unileste-MG e pós-graduado em Automação Industrial (2013) pela PUC-Minas. Atualmente é engenheiro de aplicação de dispositivos de proteção contra surtos elétricos na CLAMPER S/A. Suas áreas de interesse são: telecomunicações, usinas de

geração a diesel e dispositivos de proteção contra surtos.



Wagner Almeida Barbosa, graduado em Engenharia Elétrica (1993) pela PUC-Minas e pós-graduado em gestão de empresas e negócios (2015) pelo B.I. Internacional. Atualmente é Membro do Cobei (Comitê Brasileiro de Eletricidade, Eletrônica, Iluminação e Telecomunicações), representante do

Brasil no TC37A da IEC, coordenador da CE-003.037.005 - Comissão de estudos de dispositivos de proteção contra surtos de baixa tensão e diretor de pesquisa, desenvolvimento e manufatura de dispositivos de proteção contra surtos na CLAMPER S/A. Suas áreas de interesse são: descargas atmosféricas, normas e procedimentos relacionados a DPS.