

## **SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E ENSAIOS LABORATORIAIS EM LUVAS DE PROTEÇÃO DE ELETRICISTAS – UM ESTUDO COMPARATIVO**

VICTOR SALVINO BORGES<sup>1</sup>, LUCIANE TOMIO FAVERO<sup>2</sup>, GUILHERME RACHELLE HERNASKI<sup>3</sup>, SIGNIE LAUREANO FRANÇA SANTOS<sup>4</sup> e DIEGO DA LUZ MUNHOZ<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Me. Pesquisador, Lactec, Curitiba-PR, victor.borges@lactec.org.br;

<sup>2</sup>Estudante de Graduação. Engenharia Elétrica, UFPR, Curitiba-PR, luciane.favero@lactec.org.br;

<sup>3</sup>Me. Pesquisador, Lactec, Curitiba-PR, Guilherme.hernaski@lactec.org.br;

<sup>4</sup>Me. Pesquisador, Lactec, Curitiba-PR, signie@lactec.org.br;

<sup>5</sup>Engenheiro Eletricista, COPEL, Curitiba-PR, diego.munhoz@copel.com

Apresentado no  
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC  
Palmas/TO – Brasil  
17 a 19 de setembro de 2019

**RESUMO:** Para o avanço do desenvolvimento de algumas áreas, a ferramenta de simulação computacional é extremamente útil, pois a construção de modelos físicos reais para ensaios que sejam representativos, muitas vezes pode ser inviável. Desta maneira, com o objetivo de evoluir a compreensão dos efeitos sobre o electricista durante a realização de atividades em rede energizada, o presente trabalho apresenta a comparação de medições realizadas em laboratório com simulações computacionais, a fim de levantar e comparar parâmetros para a validação do uso desta ferramenta no estudo dos riscos a que electricistas estão expostos durante a execução de suas atividades diárias. São apresentados resultados comparativos de luvas isolantes, gerados a partir de ensaios laboratoriais e obtidos via simulação computacional, onde se obteve uma diferença média de 5% entre resultados medidos e simulados.

**PALAVRAS-CHAVE:** EPI, tensão elétrica induzida, corrente elétrica de fuga, manutenção em redes energizadas.

### **COMPUTATIONAL SIMULATION AND LABORATORY TESTS IN ELECTRICIAN PROTECTION GLOVES – A COMPARATIVE STUDY**

**ABSTRACT:** To advance the development of some areas, the computational simulation tool is extremely useful, in some cases the construction of real physical models for tests that are representative, can be impracticable. In order to develop an understanding of the effects on the electrician during the execution of activities in energized network, this paper presents a comparison of measurements made in the laboratory with computer simulations in order to raise and compare parameters to validate the use of this tool in the study of the risks the electricians are exposed during the execution of their daily activities. Comparative results of insulation gloves are presented, obtained by laboratory tests and through a computer simulation, where an average difference of 5% between the measured and simulated results were obtained.

**KEYWORDS:** PPE, induced electric voltage, leakage electric current, live line maintenance.

### **INTRODUÇÃO**

Com a evolução da sociedade, tem-se demandado o aumento da confiabilidade do sistema de energia elétrica, seja quanto a qualidade da energia fornecida ou quanto a manutenção da continuidade do fornecimento. Tais demandas, tem sido traduzidas no Brasil, em indicadores nos contratos de concessão das distribuidoras, definidos e monitorados pela ANEEL.

Para que as companhias de energia elétrica atinjam as exigências cada vez mais restritivas da ANEEL, deve-se realizar investimentos em infraestrutura como, por exemplo, construção de redes protegidas e subterrâneas, além da evolução no processo de manutenção dos ativos das

concessionárias por meio de melhorias em seus procedimentos. Nesse contexto a técnica de trabalho em redes energizadas (também conhecida como trabalho em linha viva) se faz necessária e é eficaz (Hernaski et al., 2015)

O trabalho em linha viva vem sendo amplamente utilizado devido a possibilidade da execução de intervenções nas redes sem a necessidade do desligamento dos consumidores, onde um dos benefícios diretos é a continuidade do fornecimento de energia elétrica, que resulta em faturamento para as empresas e melhores índices de continuidade como, por exemplo, o DEC e FEC (ANEEL, 2019).

Dentre os métodos de trabalho em redes energizadas até 35 kV o mais utilizado no Brasil é o método ao contato, em que, entre diversos EPIs (equipamento de proteção individual) e EPCs (equipamento de proteção coletiva), as luvas de borrachas assumem um papel de destaque, pois possibilitam que o eletricitista toque em partes energizadas do sistema para a realização da atividade.

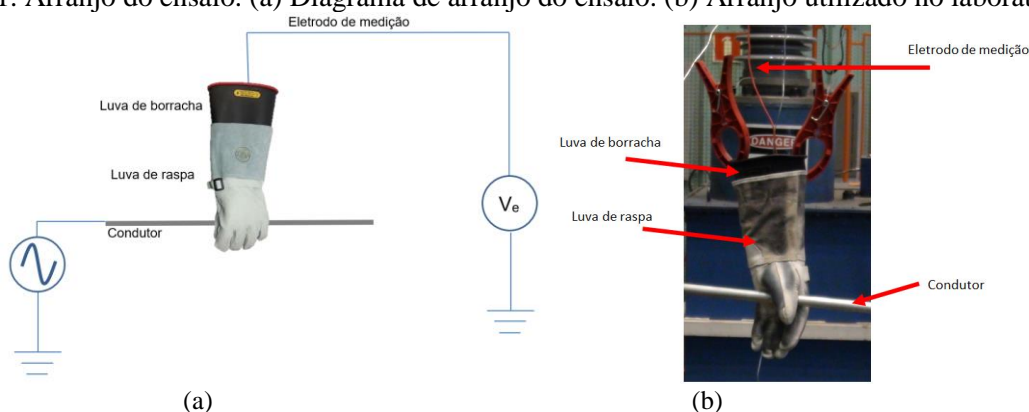
O presente trabalho apresenta o estudo do uso de luva isolante, bem como o uso do sistema de luva de raspa sobre a luva isolante, objetivando obter valores de potencial elétrico induzido no eletricitista e corrente elétrica de fuga, juntamente com o comparativo dos resultados obtidos via simulação computacional utilizando o COMSOL Multiphysics®. Estudos com a luva de proteção não são comuns na literatura científica, sendo este fato relevante do presente trabalho. Desta forma, no projeto de P&D 2866-0400/2014, em desenvolvimento pelo Lactec para a concessionária COPEL, os dados obtidos em laboratório estão sendo comparados aos resultados gerados em simulações computacionais a fim de validar o uso de ferramentas computacionais no estudo de atividades de manutenção (Borges, 2018).

## MATERIAL E MÉTODOS

Para que as comparações e análises fossem realizadas o trabalho foi dividido em duas etapas: a primeira trata da realização de ensaios em laboratório com o intuito de levantar os valores de tensão elétrica induzida e corrente elétrica de fuga no corpo do eletricitista. A segunda etapa é constituída pela representação gráfica e simulação em ambiente computacional da situação ensaiada em laboratório.

Em laboratório o arranjo de ensaio utilizado no estudo é semelhante ao diagrama apresentado na Figura 1(a), onde o condutor é energizado por uma fonte de alta tensão com 8 kV entre fase e terra (o qual corresponde aproximadamente a tensão elétrica de 13,8 kV entre fase-fase), e a luva de borracha é preenchida com água para simular o braço do eletricitista. Essa luva é colocada em contato com o condutor energizado, sendo assim realizadas medidas de tensão induzida com voltímetro eletrostático ( $V_e$ ) a partir do interior da luva de borracha. Foram avaliadas as configurações de arranjo utilizando somente a luva de borracha no contato direto ao condutor e o conjunto de luva de borracha e luva de raspa. Na Figura 1(b) é apresentada a imagem do arranjo de ensaio com conjunto de luva de borracha e luva de raspa utilizadas em laboratório.

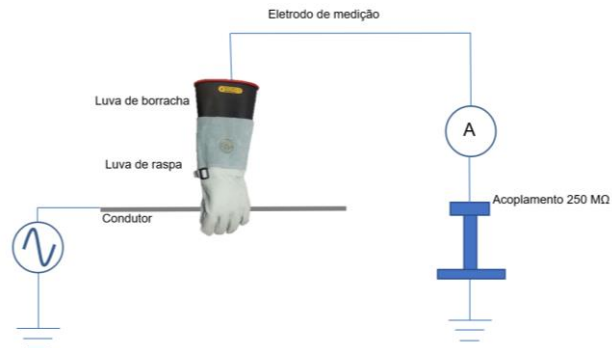
Figura 1. Arranjo do ensaio. (a) Diagrama de arranjo do ensaio. (b) Arranjo utilizado no laboratório.



Para medição da corrente elétrica de fuga utilizou-se o diagrama apresentado na Figura 2. Neste caso o tubo que simula o condutor foi energizado com uma tensão elétrica de 8 kV e a luva colocada em contato com este. A parte interna da luva preenchida com água foi conectada em série ao amperímetro e este ligado em série um resistor de 250 M $\Omega$  a fim de simular a impedância de

acoplamento existente entre o eletricitista, calçado de segurança e o cesto aéreo isolado. Uma segunda medida foi realizada sem a inserção do resistor de  $250\text{ M}\Omega$  com intuito de simular a maior corrente a qual o eletricitista estaria sujeito considerando como única proteção a luva isolante.

Figura 2. Diagrama de arranjo de ensaio de medição de corrente de fuga com acoplamento resistivo de  $250\text{ M}\Omega$



Na Tabela 1 são apresentados os resultados das medições de potencial elétrico induzido no interior da luva para as configurações utilizando somente a luva de borracha (LB) e para o conjunto luva de borracha e luva de raspas (LB e LR). Observa-se pelos resultados médios, que com a inserção da luva de raspas se tem um aumento em 32% do potencial induzido medido no interior da luva.

Tabela 1. Medição de potencial elétrico induzido no interior da luva.

	LB (kV)	LB e LR (kV)	(LB e LR)/LB (%)
<b>Média</b>	3,32	4,38	32

A Tabela 2 apresenta os resultados da medida da corrente elétrica de fuga sem o resistor e com o resistor de  $250\text{ M}\Omega$  em série ao circuito, que simula o acoplamento entre o eletricitista, caminhão e solo. Sem o resistor, verifica-se que para a luva de borracha tem-se em média uma corrente circulante de  $129,68\ \mu\text{A}$  e para o conjunto de luva de borracha e luva de raspas  $159,6\ \mu\text{A}$ . O conjunto luva de borracha e luva de raspas apresentou um aumento de 23% na corrente medida quando comparado a medição somente com a luva de borracha, porém vale ressaltar que considerando a ordem de grandeza, ambos se encontram na faixa de  $100\ \mu\text{A}$ . Este aumento da corrente de fuga não representa uma redução considerável da impedância de isolamento, sendo esta da ordem de  $60\text{ M}\Omega$  para a luva de borracha e  $50\text{ M}\Omega$  para o conjunto luva de borracha e luva de raspas.

Comparativamente, a medição sem o resistor e com o resistor de  $250\text{ M}\Omega$  em série ao circuito apresentada na Tabela 2, os valores médios medidos tiveram uma redução em aproximadamente 10 vezes, sendo estes na ordem de  $10\ \mu\text{A}$  a  $20\ \mu\text{A}$ , para as situações com e sem a luva de raspas respectivamente.

Tabela 2. Corrente elétrica de fuga ( $I_f$ ) medida no interior da luva sem o resistor de  $250\text{ M}\Omega$  em série no circuito.

	$I_f$ LB ( $\mu\text{A}$ )	$I_f$ LB e LR ( $\mu\text{A}$ )	(LB e LR)/LB (%)
<b>Média (sem acoplamento de <math>250\text{ M}\Omega</math>)</b>	129,68	159,6	23
<b>Média (com acoplamento de <math>250\text{ M}\Omega</math>)</b>	13,4	20,6	54

Ao se analisar estes resultados, observa-se que em relação a corrente elétrica de fuga, o uso da luva de raspas sobre a luva de borracha não apresentou divergências consideráveis, ou seja, não se observou intensificação considerável na corrente elétrica de fuga que passaria pelo corpo do eletricitista. Ressalta-se que a luva de raspas utilizada nos testes estava em estado de conservação ótimo.

Quanto ao potencial elétrico induzido se observou o aumento de intensidade nas medidas em que se utilizou a luva de raspas, porém o impacto deste aumento ainda é desconhecido.

Para a realização das simulações computacionais utilizou-se o *software* COMSOL *Multiphysic*, o qual possibilita a realização de simulações de geometrias em 2D e 3D para diferentes tipos de problemas físicos. Para este trabalho foi utilizado o modelo eletrostático, no qual é possível

definir diferentes características físicas para cada material, como condutividade elétrica e permissividade relativa.

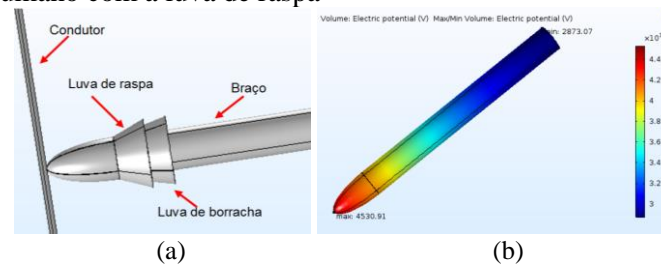
Nas simulações obteve-se como resultado o potencial elétrico induzido em um modelo computacional, que representa o braço humano envolto por uma luva de borracha com e sem uma luva de raspa em contato com um condutor energizado com 8,0 kV. Algumas simplificações foram feitas referentes à geometria da luva de forma a não prejudicar a resolução da simulação pelo método dos elementos finitos.

Na literatura não foram encontrados valores específicos para a permissividade relativa do couro da luva de raspa e, desta forma, foram realizadas três simulações distintas utilizando os valores 1100, 300 e 30 com intuito de realizar ajustes nos valores ao que melhor representa a condição real medida em laboratório.

Para as simulações foi desenvolvida uma geometria 3D com a luva de borracha de classe 2, espessura 1,27 mm e comprimento 356 mm, ao passo que para luva de raspa considerou-se como dimensões 2 mm de espessura e 292 mm de comprimento, sendo esta adicionada sobre a luva de borracha, de forma que a distância entre o final da luva de raspa e o final da luva de borracha fosse de 640 mm.

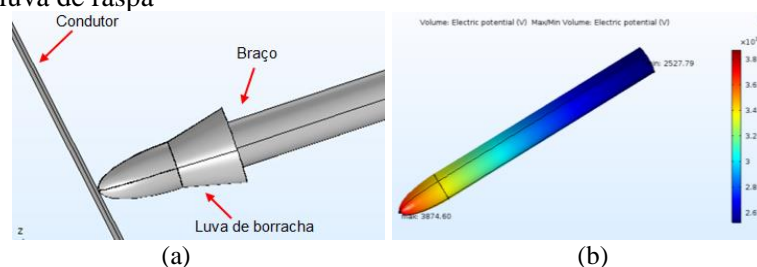
O condutor desenhado possui 20 mm de diâmetro conforme o utilizado em laboratório. A geometria simulada pode ser vista na Figura 3(a). Foram medidos os valores de potencial elétrico na parte interna da luva (braço), sendo o resultado para a permissividade relativa de 1100 apresentado na Figura 3(b). Observa-se o valor máximo de potencial no braço humano de 4,5 kV.

Figura 3. Simulações de 13,8 kV com a luva de raspa. (a) Geometria simulada. (b) Potencial encontrado no braço humano com a luva de raspa



Em seguida se realizou a mesma simulação, porém sem a presença da luva de raspa como mostra a Figura 4(a), sendo o braço humano coberto somente com a luva de borracha. Na Figura 4(b) pode ser observado o valor máximo do potencial induzido no braço humano sem a luva de raspa de 3,8 kV.

Figura 4. Simulações sem a luva de raspa. (a) Geometria simulada. (b) Potencial no braço humano encontrado sem a luva de raspa



## RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentadas nas Tabela 3 e Tabela 4 as comparações entre a média dos valores medidos em laboratório e valores médios simulados para a região que representa o braço humano. Considera-se para os valores simulados a permissividade relativa do couro da luva de raspa ( $\epsilon_r$ ) os valores de 1100, 300 e 30.

Tabela 3. Comparação entre medido e simulado para o uso somente da luva de borracha.

	Medido	Simulado	$\Delta\%$
<b>Potencial Interno (kV)</b>	3,32	3,5	5%

Na Tabela 3, observa-se que, para as simulações computacionais utilizando somente a luva de borracha, o resultado simulado do potencial induzido na parte interna (braço) teve uma variação de 5% quando comparado ao valor medido em laboratório, apresentando uma forte correlação (95%) entre os resultados.

Tabela 4. Comparação entre medido e simulado com o uso da luva de raspa, para a as permissividades relativas de 1100, 300 e 30.

	Medido	Simulado		
		$\epsilon_r = 1100$	$\epsilon_r = 300$	$\epsilon_r = 30$
<b>Potencial Interno (kV)</b>	4,38	4,197	3,988	3,685
<b><math>\Delta\%</math></b>		-4%	-5%	-8%

Para a comparação das situações em que se aplicou a luva de raspa (Tabela 4), observou-se um comportamento inverso, onde os valores obtidos via simulação computacional foram inferiores ao medido em laboratório. O menor erro obtido para esta situação foi para a simulação utilizando a permissividade relativa de 1100 (-4%), o que também representa uma correlação de 96% ao obtido em laboratório.

## CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou um comparativo entre resultados de medidas de tensão induzida e corrente elétrica de fuga obtidos por meio de ensaios laboratoriais e simulações computacionais. Este comparativo demonstrou uma correlação entre os resultados de 95%, sendo esta considerável ao se comparar modelos computacionais com medições de campo, o que reforça a validade do uso de simulações computacionais no estudo de exposição de eletricitistas durante o trabalho em redes energizadas.

Vale ressaltar que o erro observado pode ser justificado em função de imperfeições dos materiais utilizados em laboratório, já que, via simulação computacional, são considerados materiais sem imperfeições, com espessura constante ao longo de todo material, contatos perfeitos entre as partes, amostras totalmente limpas e parâmetros como permissividade elétrica constante e absoluta ao longo de todo o material. Também devem ser considerados os erros vindos dos instrumentos e medições, além dos oriundos da estatística de ensaio.

Além deste comparativo entre resultados via simulação e medições em laboratório, o estudo também possibilitou a verificação do aumento do potencial induzido no eletricitista com o uso de luvas de raspas sobre a luva isolante, porém os efeitos ao corpo resultantes desta exposição ainda são desconhecidos na literatura.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à COPEL e à ANEEL pelo financiamento do projeto, ao Lactec pela infraestrutura dada aos pesquisadores e ao CNPq pelo incentivo da lei 8010/90.

## REFERÊNCIAS

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica, [2019]. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/indicadores-coletivos-de-continuidade>. Acesso em: 01 de Abril de 2019.

Borges, V. S.; Kowalski, E. L.; Hernaski, G. R.; Machado, R. P.; Pires, L. F.; Tureck, R.; Munhoz, D. L.; Garcia, F. A. Comparativo dos níveis de tensão induzida e corrente de fuga para trabalhos em redes energizadas em redes de classe 13,8 kV e 34,5 kV. In: VIII CITTES, 2018, Paraná (Argentina).

Hernaski, G. R.; Borges, V. S.; Kowalski, E. L.; Machado, R. P.; Ravaglio, M. A.; Cerqueira, D. P. Desenvolvimento de metodologia e ferramentas para substituição de cabos multiplexados em redes de baixa tensão energizada. In: VII CITTES, 2015, Buenos Aires (Argentina).