

GRUPO DE ESTUDO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO - GDI

SISTEMA DE DETECÇÃO DE PROXIMIDADE ENTRE CAMINHÃO DE PODA AUTOMATIZADA E LINHAS DE MÉDIA TENSÃO

**RENATTO VAZ CARVALHO(1); DANIEL DE ANDRADE USSUNA(1); VITOLDO SWINKA FILHO(1); ALEXANDRE ALBARELLO COSTA(1); EDUARDO CASARIN(2)
LACTEC(1); ELEKTRO(2)**

RESUMO

A atividade de gestão da arborização próxima a redes de média tensão apresenta riscos à equipe executora, dentre eles o choque elétrico. A utilização de sistemas mecânicos tele operados pode mitigar esses riscos. Contudo, a operação à distância pode comprometer a sensibilidade do operador quanto à distância das ferramentas em relação aos condutores. O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um sensor de campo elétrico com comunicação sem fio, voltado à detecção da proximidade de condutores de 13,8 kV e 34,5 kV e das ferramentas de uma caminhão automatizado para poda de árvores. A validação foi realizada em laboratório por meio de arranjos experimentais representativos.

Campo Elétrico; Caminhão de poda; Segurança; Média tensão.

1.0 INTRODUÇÃO

A principal causa de falhas em redes de distribuição de energia elétrica aéreas é o contato de galhos de árvores com a rede elétrica, gerando grandes custos às empresas distribuidoras de energia. Apesar da gestão da arborização urbana não ser responsabilidade das concessionárias de distribuição de energia, elas devem realizar a poda sempre que as condições normais de operação da rede elétrica forem ameaçadas. Esta atividade apresenta riscos à equipe executora, dentre eles o choque elétrico.

A utilização de sistemas mecânicos tele operados se apresenta como uma forma de mitigar esses riscos. Contudo, a operação à distância pode comprometer a sensibilidade do operador quanto a distância de segurança das ferramentas em relação aos condutores. Quando da utilização de caminhões equipados com ferramentas próprias para a atividade, o contato acidental das ferramentas de corte ou do braço automatizado se traduz em risco para os operadores por transmitir o potencial elétrico da linha (média tensão) para a carroceria do veículo. Ademais, há a possibilidade de dano ao próprio cabo, que pode ocasionar desligamentos não programados.

O presente trabalho está inserido em um projeto de pesquisa e desenvolvimento que visa o aprimoramento de um protótipo de caminhão desenvolvido para realizar a poda de árvores com operação remota, dando enfoque na apresentação do desenvolvimento de um sistema para detectar e alarmar proximidade deste equipamento com os condutores das linhas de distribuição energizadas de média tensão (MT) de 13,8 kV ou 34,5 kV. Este sistema é composto de transdutores de campo elétrico tridimensionais pontuais instalados em locais críticos do caminhão, como ferramentas e articulações, além de central eletrônica com inteligência embarcada para análise e interpretação dos dados em tempo real.

A fim de estudar e modelar a distorção do campo elétrico em estruturas presentes no espaço, foi efetuada simulação numérica com estes objetos próximos à linhas de distribuição. A partir desta primeira análise foi desenvolvido um sensor esférico polimérico com três pares de calotas metálicas paralelas, sendo os conjuntos perpendiculares entre si, de forma a representar os três eixos cartesianos. A validação dos sensores foi realizada em laboratório aplicando-os em arranjos experimentais representativos de linhas reais, além de medições com instrumentos comerciais calibrados. Nestes testes foi possível observar comportamento exponencial decrescente da corrente elétrica induzida pelo campo elétrico nas calotas das esferas em função da distância da linha considerando potencial constante.

A central eletrônica desenvolvida recebe os dados analógicos de corrente induzida nos sensores, os converte para informações digitais e as interpreta de forma a obter informação de distância, sinalizando ao operador o grau de proximidade, em uma escala fuzzy, entre ferramenta e do braço do caminhão com a linha energizada. Para esta relação, foram utilizados como limites de alarmes as distâncias de Zona de Risco e Zona Controlada onde as operações de poda ocorrem, de acordo com a norma de segurança NR10.

Para manutenção do isolamento de segurança, este sistema de detecção e alarme está localizado na região de potencial flutuante do caminhão, então sua comunicação com o sistema de controle geral do caminhão foi

implementada utilizando protocolo sem fio bluetooth. Conforme apresentado na Figura 1 são aplicados dois destes sensores no braço do caminhão, sendo o primeiro (S1) próximo as ferramentas de corte e o segundo (S2) logo após o trecho isolante de suporte do braço. Estas regiões são selecionadas de modo que são estas partes o mais movimentadas do sistema.

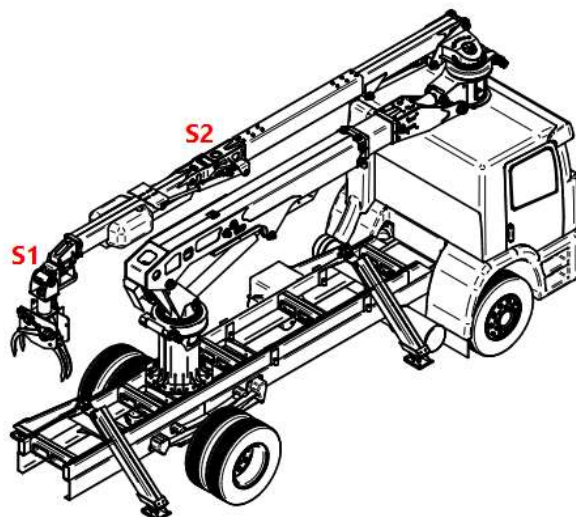


Figura 1: Caminhão de poda automatizada com sensores de distância da linha de MT

O sistema concebido neste trabalho apresentou resultados satisfatórios em testes laboratoriais e integrará o protótipo de caminhão de poda desenvolvido em projeto anterior de forma a possibilitar a operação segura tanto para o operador quanto para a rede de distribuição.

2.0 DISTORÇÃO DE CAMPO ELÉTRICO EM ELEMENTOS FLUTUANTES

Ao iniciar os desenvolvimentos relacionados ao protótipo de detector de distância da linha de MT utilizando como parâmetro a medição de campo elétrico, foi efetuada revisão da literatura de modo a gerar base de metodologia de medição dessa grandeza.

Foi verificado que, dado um campo elétrico disposto em uma região do espaço, quando se insere um corpo, condutor ou dielétrico, o campo elétrico na região ocupada pelo corpo e na sua vizinhança próxima se altera. Dessa forma, qualquer dispositivo que se utilize para a medida do campo elétrico em determinada região do espaço, deverá ser capaz de determinar o valor do campo elétrico que existia na região do espaço antes da sua interferência [1].

Os detectores construídos com materiais condutores e de formato esféricos são os que geram menor distorção no campo a ser medido e, consequentemente, possuem uma maior exatidão [1, 2].

A fim de comprovar e entender a distorção do campo elétrico em estruturas presentes no espaço, como por exemplo esferas e cilindros metálicos, foi efetuada simulação numérica no software COMSOL *Multiphysics* com estes objetos inseridos entre uma linha de potencial de 13,8 kV e o plano terra, simulando uma linha de distribuição real.

Os resultados dessa simulação são apresentados na

Figura 2 e na Figura 3, onde é possível verificar que os materiais com contornos em 90° geram pontos de concentração de campo elétrico e as esferas os distribuem de forma perpendicular à sua superfície, o que é desejável.

Outro fator a se considerar nos instantes de medição de campo elétrico é a existência de obstáculos condutores elétricos entre o detector e o dispositivo de leitura, alterando dessa forma o potencial elétrico no ponto do espaço onde se deseja medir o campo elétrico e, ainda, se a medição de campo elétrico for próxima a equipamentos energizados com alta tensão, estará reduzindo as condições de isolamento do equipamento, colocando em risco a segurança do operador e do equipamento.

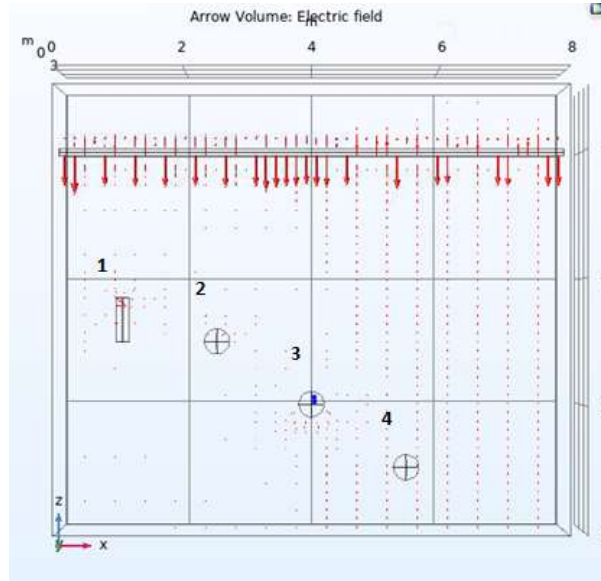


Figura 2: Simulação de distorção do campo elétrico sobre objetos flutuantes no espaço entre uma linha de distribuição de 13,8 kV e o plano terra.

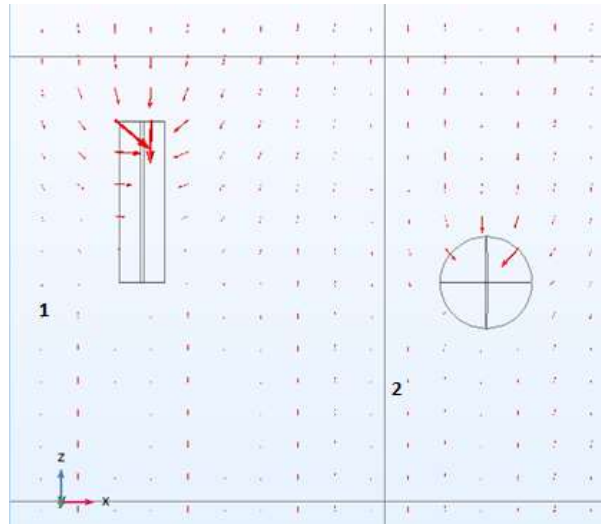


Figura 3: Detalhe da simulação de distorção do campo elétrico sobre objetos flutuantes no espaço entre uma linha de distribuição de 13,8 kV e o plano terra.

3.0 DESLOCAMENTO DE CARGAS NA SUPERFÍCIE DE UMA ESFERA FLUTUANTE SOB AÇÃO DO CAMPO ELÉTRICO

O detector projetado, é composto de semiesferas condutoras isoladas entre si, cujo princípio de funcionamento se baseia na aferição do deslocamento de cargas na superfície desses elementos. A medição é efetuada pela análise do deslocamento de cargas do hemisfério inferior para o superior. Dessa maneira, a carga total deslocada para uma esfera de raio a é dada por:

$$Q = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \sigma a^2 \sin\theta d\theta d\phi = 3\pi\epsilon_0 a^2 E_{0z} \quad (1)$$

Onde:

σ é a densidade superficial de cargas;

E_{0z} é a intensidade de campo elétrico antes da presença da esfera;

θ é o ângulo em relação ao eixo z ;

ϵ_0 é a permissividade dielétrica do meio;

Para um campo elétrico senoidal, a carga induzida entre os dois hemisférios será:

$$Q(t) = 3\pi\epsilon_0 a^2 E_{max} \sin(\omega t) \quad (2)$$

Ao derivar a carga em relação ao tempo se obtém a corrente induzida, que será:

$$I(t) = 3\pi\epsilon_0 a^2 \omega E_{max} \cos(\omega t) \quad (3)$$

A equação de corrente induzida nos hemisférios da esfera (3) é uma função linear do campo elétrico, de constantes que dependem da geometria, do meio onde se propaga o campo e da frequência angular. A dependência da frequência não é desejável no desenvolvimento do medidor de campo elétrico e pode ser eliminada por meio da integração eletrônica do sinal de corrente medido, dessa maneira, o protótipo de medidor de campo elétrico para determinação de distância da linha de MT foi concebido seguindo o sistema apresentado pelo diagrama em blocos da Figura 4.

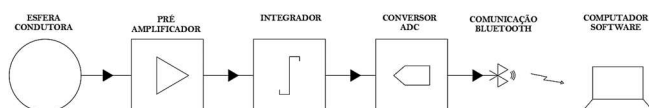


Figura 4: Diagrama em blocos do protótipo 1 do sensor de campo elétrico desenvolvido

4.0 INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA

A instrumentação eletrônica de aquisição, condicionamento, cálculo, interpretação e transmissão de sinal sem fio foi desenvolvida seguindo o diagrama em blocos apresentado na Figura 4.

Para o sistema de pré amplificação e integração de sinal foi projetado um circuito e desenvolvida uma placa de circuito impresso com 3 canais de entrada de modo a permitir a leitura das calotas em 3 eixos (X, Y e Z).

Para o sistema de conversão analógico digital e comunicação *bluetooth* foi desenvolvido um segundo circuito com placa dedicada para este fim.

O segundo circuito corresponde aos estágios de conversão ADC, armazenamento e cálculo de valores rms, comparação de valores com os limites armazenados em memória e comunicação. Nesta placa foi inserida um estágio filtro ativo passa baixas para minimização de interferências externas presentes em campo.

O filtro ativo de segunda ordem, além de ser projeto para filtrar frequências superiores a 1 kHz, com atenuação de -40 dB/década de frequência, como apresentado pela Figura 5, foi desenvolvido para acoplar o sinal AC proporcional ao campo elétrico medido pelo detector em um sinal DC. Esta segunda condição se faz necessário pois o conversor AD do microcontrolador selecionado só converte potenciais elétricos positivos.

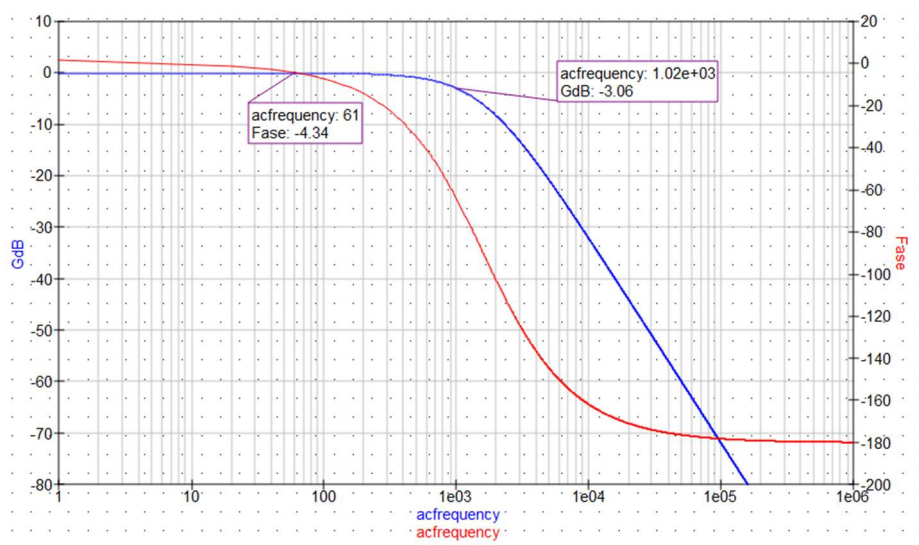


Figura 5: Resposta em frequência do filtro ativo de segunda ordem do detector de campo elétrico

O sistema de aquisição de dados do circuito de conversão AD de 12 bits foi otimizado para taxa de amostragem de 100 us, o que corresponde máxima frequência de amostragem de 10 kHz. Considerando a taxa de Nyquist [3], que representa a mínima frequência de amostragem necessária como sendo o dobro da máxima frequência presente no sinal analisado e considerando que para a frequência industrial de 60 Hz se analisa as componentes de até a 5ª harmônica (300 Hz), a taxa do equipamento é mais que suficiente para as futuras análises dos sinais. Além do circuito de filtragem analógica, o algoritmo implementado no microcontrolador aplica processos de decimação sobre os dados coletados, provendo mais um estágio de filtragem de sinal.

No microcontrolador, também foi implementado o algoritmo de integração e cálculo de valor de tensão eficaz, conforme apresentado na equação 4, utilizando os dados digitais coletados e transmitidos pelo sistema.

$$V_{ef} = \sqrt{\left(\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt\right)} \quad (4)$$

5.0 SENSOR ESFÉRICO DE CALOTAS METÁLICAS ISOLADAS

O elemento sensor esférico de calotas metálicas isoladas foi elaborado por meio de uma impressora 3D, com material PLA, cujas calotas foram cobertas com uma lâmina metálica. Este elemento de 150 mm de diâmetro, conforme apresentado na Figura 6, foi subdividido em um conjunto simétrico de 3 pares de calotas metálicas, proporcionando a medição das componentes tridimensionais de campo elétrico.



Figura 6: Sensor de campo elétrico esférico polimérico com circuito de pré amplificação no interior

Na Figura 7 é apresentada a fotografia do sensor montado com as calotas metálicas e fechada com o circuito de pré amplificação nem seu interior.



Figura 7: Sensor de campo elétrico 3D com calotas metálicas

6.0 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO CIRCUITO DE DETECÇÃO DE DISTÂNCIA DE LINHA DE MT

Para validação do sensor de campo elétrico desenvolvido, foi elaborado um aparato experimental de modo a simular uma LD real de 13,8 kV. Este experimento consiste em aplicar este potencial elétrico sobre um condutor e efetuar afastamento do sensor na direção perpendicular ao condutor. O condutor utilizado possui geometria cilíndrica de 20 mm de diâmetro e 600 mm de comprimento.

Segundo a literatura [4], a variação do campo elétrico em relação a uma linha de carga finita é dada por:

$$E_x = kl \left[\frac{1}{x^2 \sqrt{1 + \left(\frac{l}{2x}\right)^2}} \right] \quad (5)$$

Onde:

l é o comprimento da linha de carga;

k é a relação entre densidade de carga da linha e a permissividade relativa do meio;

x a distância entre a linha e o ponto do sensor.

Os dados experimentais coletados são apresentados na Tabela I e na Figura 8 está apresentado, além dos dados experimentais, o melhor ajuste não linear representativo da equação 5 correspondente ao sensor, onde se obteve $k = 43,62 \cdot 10^{-3} \text{ v}$ e um termo independente $b = 6,34 \cdot 10^{-3} \text{ v}$ que corresponde ao ruído eletrônico do próprio sensor.

Vale ressaltar que este equipamento será aplicado como detector de distância utilizando o campo elétrico como grandeza de entrada, portanto, a saída apresentada em tensão, como a sensibilidade do sensor, já é suficiente para se estimar o que se espera e por isso não foi calibrado para apresentar valores de campo elétrico em V/m.

Tabela I. Dados do sensor de campo elétrico em função da distância.

Distância [m]	Vx Experimental [v]
0,1	0,8396
0,2	0,3431
0,3	0,2232
0,4	0,1484
0,5	0,1047
0,6	0,0784
0,7	0,059
0,8	0,0466
0,9	0,0367
1,0	0,0293
1,1	0,0249

1,2	0,0212
1,3	0,0183
1,4	0,0163
1,5	0,0147
1,6	0,0134
1,7	0,0121

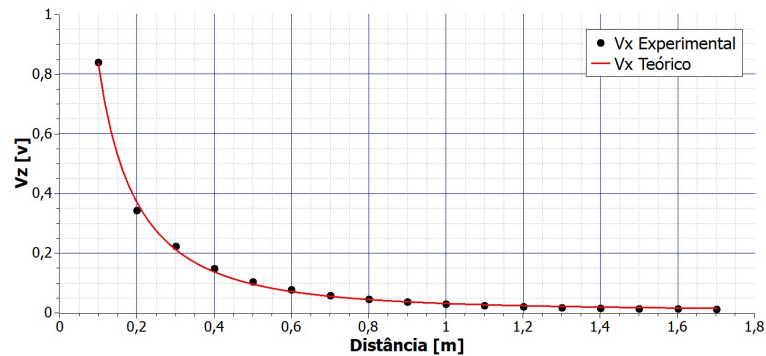


Figura 8: Ajuste não linear dos dados experimentais utilizando equação de linha de carga finita

7.0 DISTÂNCIA DE SEGURANÇA DA LINHA DE MT E CALIBRAÇÃO DE VALORES DE COMPARAÇÃO

Segundo a NBR 5410, as distâncias de segurança de trabalho próximo a equipamentos ou linhas energizadas são limitadas por raios de uma área circular, onde a distância é relativa ao ponto central energizado, conforme apresentado na Figura 9. As áreas delimitadas por estes raios são denominadas zonas, onde dentro do raio de risco (R_r) se encontra a Zona de risco (ZR) e se configura como região mais insegura para desenvolvimento da atividade, sendo recomendado evita-la e quando não for possível, que seja invadida apenas por pessoa capacitada e autorizada a realização da atividade. Já a Zona Controlada (ZC), região entre o R_r e o raio de controle (R_c) é a região onde existe menor grau de risco de choque elétrico, mas é uma região delimitada por sinalização e só pode ser acessada por pessoa capacitada e treinada. A área acima do R_c é denominada Zona Livre, ou seja, área livre de riscos elétricos.

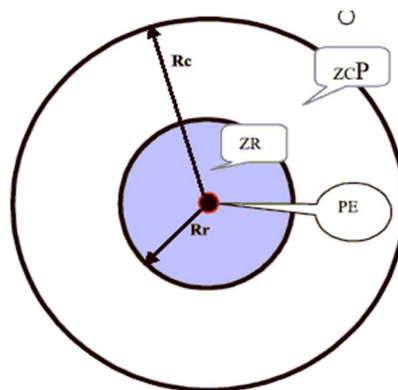


Figura 9: Zonas de Risco, Controlada e livre definidas pela NBR 5410

Para cada nível de tensão de operação se aplica uma distância para estes raios, sendo as padronizadas para este sistema conforme apresentada na Tabela 2: Distâncias de segurança em função da tensão segundo NBR 5410

Tabela 2: Distâncias de segurança em função da tensão segundo NBR 5410

Região	13,8 kV	34,5 kV
Raio de Controle	1,38 m	1,58 m
Raio de risco	0,38 m	0,58 m

Dada esta perspectiva de operação, onde a menor distância é de 0,38 m, foi efetuado alteração no ganho do sistema de pré amplificação para ampliar o excursionamento do sinal de saída e assim aumentar a precisão de

medida do equipamento. Dessa forma o valor de distância mínima aceitável para saturação do sensor passou a ser de 0,25 m para a linha de 13,8 kV.

Apesar de não ter sido elaborado aparato experimental para determinação das saídas do sensor quando distancia de uma linha de carga finita com 34,5 kV, a inferência de valores é diretamente proporcional a relação de tensão dessas duas linhas, ou seja, multiplicação por um fator de 2,5.

Dessa forma, após os ajustes foram definidos os limites de operação para as regiões e armazenados na memória do microcontrolador para que a leitura apresente a informação apenas da Zona de operação em que o sensor se encontra, conforme Figura 10.

Com esta especificação, se estabeleceu um código de cor definido por esses Limites Mínimos e Máximos, onde abaixo do limite mínimo o sensor se encontra na ZL (Verde), entre o limite mínimo e máximo se encontra na ZC (Amarela) e acima do limite máximo se encontra na ZR (Vermelha). Dessa forma, os dados de saída foram calculados como composição vetorial dos valores médios quadráticos dos 3 eixos do sensor e são apresentados em software C#, facilitando a interpretação do operador, conforme filosofia *fuzzy*.

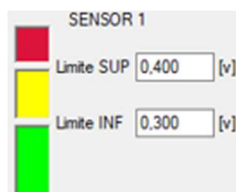


Figura 10: Apresentação da região onde se encontra o sensor

8.0 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA NO BRAÇO DO CAMINHÃO

Conforme apresentado anteriormente, junto as simulações de campo elétrico, é possível verificar que qualquer corpo flutuante, dielétrico ou metálico, provê distorção do campo e prejudica a medição do mesmo. Porém, por se tratar de um elemento fixo em relação ao sensor, o braço do caminhão tende a deslocar esse campo de maneira constante, permitindo assim que o valor medido represente a distância calibrada.

Dessa maneira, o procedimento para calibração de distância deve ser efetuado em laboratório de alta tensão para os 2 níveis de tensão, 13,8 e 34,5 kV, posicionando o braço do sensor nas distâncias estabelecidas e aferindo o sinal de tensão de saída do mesmo para ser armazenado na memória do microcontrolador e posteriormente utilizado este dado para comparação com o sinal coletado durante operação.

9.0 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram aplicados experimentos e efetuadas análises que demonstraram o efetivo desenvolvimento de um sensor de campo elétrico validado em laboratório.

Constata-se que, apesar de o dispositivo poder operar como um sensor, este é aplicado como detector de distância da linha de MT por conta da distorção de campo elétrico que o próprio braço automatizado do caminhão proporciona. Esta característica também resulta na necessidade de que o detector deva ser calibrado apenas quando conectado ao braço automatizado.

Em relação a forma de sinalização das regiões onde se encontra o sensor, estas foram estabelecidas segundo norma vigente e facilita a interpretação pelo operador. Esta saída simplificada pode futuramente compor o acionamento de outro tipo de dispositivo de sinalização de segurança, como por exemplo sonoro.

A próxima etapa do projeto consiste em testes em laboratório de alta tensão nos níveis de linha especificados para a operação, validando o sistema de forma prática

10.0 AGRADECIMENTOS

Este projeto foi concebido com recursos do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento cadastrado sob o número PD 0385-0071/2019 do Programa de P&D da Agência Nacional de Energia Elétrica em parceria com a companhia Neoenergia Elektro, dessa forma a equipe de Pesquisa e Desenvolvimento do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento Lactec agradece pela viabilização que estas instituições proporcionaram.

11.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SWINKA-FILHO, V. *Desenvolvimento de um sensor de campo elétrico alternado com transmissão por fibra-óptica*. Dissertação de mestrado. Programa de Pós Graduação em Física UFPR. Curitiba. 1996
- [2] HUI, Z.; FEIYU, Y. *The influence of Probe on the Measuring Accuracy of Electric Field*. Ninth International Symposium on High Voltage Engineering, no. 8326 Graz Convention Center Austria, Europe, 1995
- [3] SMITH, A. S., SMITH, K. C. *Microeletrônica*. 5 ed. São Paulo. Pearson Prentice Hall, 2007
- [4] HAYT, W. H., BUCK, J. A. *Eletromagnetismo*. 8 ed. Porto Alegre. AMGH, 2013

- [5] ALEXANDER, C. K., SADIKU, M. N. O. Fundamentos de circuitos elétricos. 5 ed. Porto Alegre. AMGH 2013

DADOS BIOGRÁFICOS



Renatto Vaz Carvalho possui graduação em Engenharia Elétrica - Ênfase em eletrônica pela Universidade Federal do Paraná (2015) e mestrado em Engenharia Elétrica (2017) pela mesma instituição. Atualmente é Pesquisador nos institutos Lactec, onde desenvolve instrumentação eletrônica para ensaios de diagnóstico em materiais. Possui experiência em simulação e desenvolvimento de circuitos eletrônicos, além de programação em baixo e alto nível. Também possui experiência como docente, tendo trabalhado como professor nos cursos de Engenharia Elétrica e tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas.

(2) DANIEL DE ANDRADE USSUNA

Daniel de Andrade Ussuna possui mestrado em Engenharia Elétrica área de concentração Instrumentação Eletrônica pela Universidade Federal do Paraná (2014) e graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica e Telecomunicações pela Universidade Federal do Paraná (2011). Possui experiência teórica e prática nas áreas de Medidas Elétricas em Altas Frequências, Instrumentação Eletrônica, Simulação Numérica, Programação, Microeletrônica, Microcontroladores, Desenvolvimento e Otimização de Projetos Eletrônicos Analógicos e Digitais relacionados a Instrumentação e Controle, além de Sistemas Elétricos de Transmissão e Distribuição de Potência.

(3) VITOLDO SWINKA FILHO

Possui graduação em Bacharelado em Física pela Universidade Federal do Paraná (1992), mestrado em Física pela Universidade Federal do Paraná (1996) e doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais pela Universidade Federal do Paraná (2000). Atualmente é Pesquisador Consultor do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento LACTEC e Professor Adjunto do Departamento de Mecânica da Universidade Federal do Paraná. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais, com ênfase em Propriedades Elétricas, atuando principalmente nos seguintes temas: materiais dielétricos, instrumentação eletrônica, radiografia e tomografia de raios X aplicada a materiais.

(4) ALEXANDRE ALBARELLO COSTA

Alexandre possui Mestrado em Engenharia Elétrica, e é doutorando em Confiabilidade de eletrônica. Trabalha como pesquisador no LACTEC desde 2012, dentro do time de pesquisa em aterramentos e qualidade de energia, tendo atuado em projetos de desenvolvimento de metodologias de medição, testes de vida acelerada, desenvolvimento de dispositivos robóticos, medição e simulação de campos eletromagnéticos, entre outros.

(5) EDUARDO CASARIN

Bacharel Engenharia Mecânica pela Escola de Engenharia de Piracicaba (EEP/FUMEP - 2004), Pós Graduado Administração Industrial (2007) e Logística Empresarial (2009) pelo Instituto Nacional de Pós Graduação (INPG), Pós Graduado Metodologia de Educação a Distância (2012) pelo Centro Universitário Claretiano de Batatais (CEUCLAR), Pós Graduado Gestão de Projetos pela Universidad Europea del Atlántico (ESP 2019) e Mestrado Profissional Desenvolvimento de Tecnologia (em andamento). Engenheiro de Frota Sênior na Elektro Redes S.A. (6 anos), coordenador do curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica (2 anos) do Centro Universitário Claretiano de Rio Claro e docente (11 anos) na mesma instituição.