



**XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GLT/18

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

**ESTIMAÇÃO EM TEMPO REAL DE TEMPERATURA AO LONGO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO
SENSORES ÓPTICOS DE TEMPERATURA DISTRIBUÍDA (DTS)**

**TOLEDO, L.F.R.B. (*)
Institutos LACTEC**

**KUSTER, K.K.
Institutos LACTEC**

**USSUNA, D.D.A.
Institutos LACTEC**

**MARTINS, R.
COPEL GeT**

**CARVALHO, R.V.
Institutos LACTEC**

**SWINKA, V.
Institutos LACTEC**

RESUMO

O artigo apresenta uma técnica de estimação de ampacidade em tempo real de linhas de transmissão utilizando sensores ópticos de temperatura distribuídos. O trabalho descreve o sistema de monitoramento desenvolvido bem como os resultados obtidos até o momento. Adicionalmente o artigo descreve a tecnologia óptica de medição empregada, o conceito de reflectometria óptica no domínio do tempo, descreve o processo de calibração da fibra para uso com a metodologia e mostra também como se obtém a correlação da temperatura do cabo OPGW com o cabo fase.

PALAVRAS-CHAVE

Sensores Ópticos, Sensores Distribuídos, Sensores de Temperatura Distribuídos (DTS), Ampacidade

1.0 - INTRODUÇÃO

A ampacidade das linhas de transmissão (LTs) é fortemente dependentes das variáveis climáticas, pois o limite de carga de um circuito é geralmente térmico. O monitoramento térmico dos condutores de uma linha de transmissão em tempo real permite o maior aproveitamento e o uso mais racional das linhas existentes, uma vez que a ampacidade de projeto é calculada com base em parâmetros conservadores de condições climáticas.

O crescimento da demanda por energia elétrica requer o aumento da capacidade de transmissão, desse modo, o monitoramento da ampacidade em tempo real é importante para garantir a segurança do sistema. As diferentes metodologias de monitoramento online de linha de transmissão disponíveis atualmente utilizam medidas pontuais, não levando em conta todo o comprimento da linha. Medições pontuais geram insegurança nos resultados, pois o ponto escolhido pode não representar a verdadeiro vão crítico da linha de transmissão. Adicionalmente o vão crítico de uma linha de transmissão pode variar ao longo do dia, ou ao longo dos dias do ano.

Desse modo, com o intuito de realizar a determinação da ampacidade de uma linha de transmissão em tempo real, independentemente da localização do vão crítico, e ainda realizar a medição de forma distribuída, desenvolveu-se um sistema que a partir da medição da temperatura do cabo OPGW se consegue determinar a temperatura do cabo condutor.

Portanto, este trabalho apresenta um método de estimação da temperatura do cabo condutor a cada metro, ao longo de toda a linha de transmissão, utilizando a correlação entre a temperatura ao longo do cabo guarda (OPGW), medida através do uso de suas próprias fibras óticas. O sistema desenvolvido consiste em um medidor de temperatura óptico DTS, além de uma estação meteorológica e um Power Donut, equipamentos estes utilizados para medição da corrente e temperatura do cabo condutor, para testar e validar os algoritmos desenvolvidos. Em suma, com a metodologia desenvolvida é possível realizar a mediação da ampacidade ao longo de toda a linha de transmissão e em tempo real, ou seja, fazer a medição da ampacidade distribuída ao longo da LT.

Ainda o artigo discute as vantagens da metodologia desenvolvida de medição de ampacidade em tempo real em relação aos métodos de medição pontuais disponíveis atualmente, bem como mostra os principais cenários onde o método pode ser empregado. Vale ressaltar que a metodologia desenvolvida, que pode ser facilmente empregada por qualquer transmissora é original e apresenta grande avanço em relação as técnicas tradicionais.

2.0 - DESENVOLVIMENTO

O sistema de monitoramento desenvolvido consiste de uma equipamento de medição de temperatura distribuída (DTS), que mede a temperatura do cabo OPGW, uma estação meteorológica, instalada em uma torre que mede as condições ambientais do local e um Power Donut, equipamento que mede a temperatura e corrente do cabo fase. Os equipamentos foram usados para se validar o método proposto e os valores medidos são enviados via comunicação GPRS. A seguir cada equipamento é detalhado bem como qual a sua função no sistema de monitoramento.

2.1 Sistema de Monitoramento

O sistema de monitoramento desenvolvido é mostrado de forma esquemática na Figura 1. Na Figura 1 pode ser visto o equipamento DTS, instalado na Subestação. O DTS faz a medição de temperatura ao longo do cabo guarda, através da fibra óptica de comunicação, com uma resolução de 1 m. Na Figura 1 é possível a visualização de um sensor de temperatura e corrente (PowerDonut) que mede os dados do cabo fase. Os dados desses sensores são enviados via comunicação GPRS para um servidor. Nesse projeto foi utilizado apenas um sensor de temperatura e corrente. A função principal desse sensor é o de validar a metodologia proposta. Adicionalmente na Figura 1 pode ser visualizado a Estação Meteorológica. A estação meteorológica foi instalada em uma torre. Os dados medidos são enviados via comunicação GPRS.

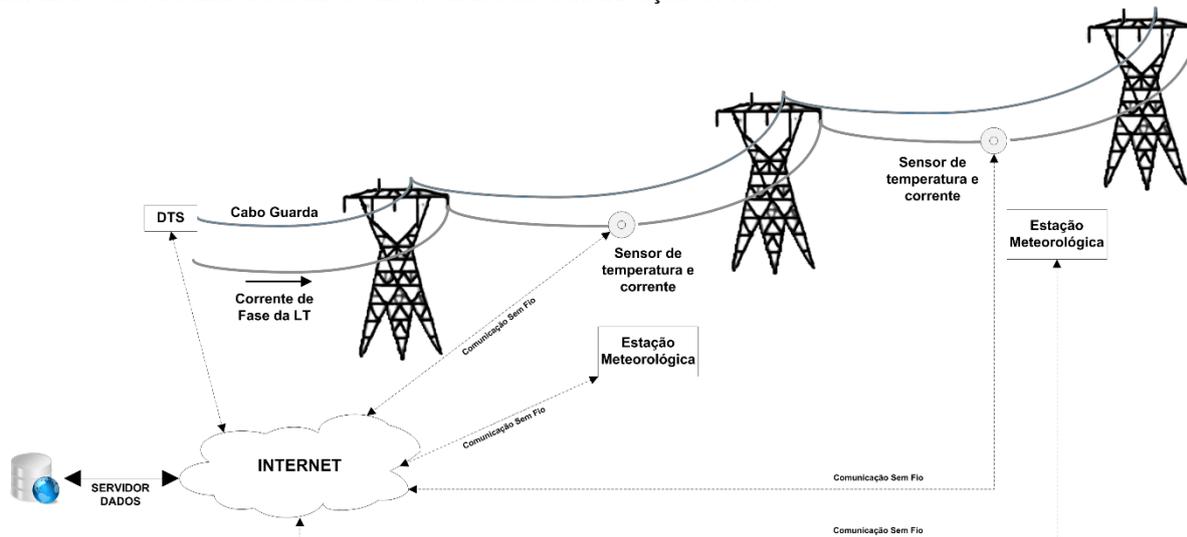


FIGURA 1 – Sistema de Monitoramento Desenvolvido

2.1.1 DTS

Os sensores de fibras ópticas tiveram grande desenvolvimento nas últimas décadas e têm sido utilizados em diversos campos da instrumentação. Dentre as diversas tecnologias disponíveis, os sensores distribuídos são vastamente utilizados quando se deseja realizar o monitoramento de grandes estruturas, ou quando se deseja realizar a medição em grandes áreas, como é o caso de uma Linha de Transmissão. A realização desse tipo de medição é mais facilmente implementada quando se utiliza a medição distribuída em detrimento a um grande número de sensores (quase-distribuída).

A medição distribuída é comumente baseada na reflectometria óptica no domínio do tempo (OTDR – Optical Time Domain Reflectometry). A técnica OTDR consiste em lançar um pulso óptico na fibra óptica e pela medição temporal das intensidades refletidas é possível analisar um mensurando. Pode-se pensar na técnica OTDR como um "radar" óptico unidimensional. Tanto a tecnologia Raman como a Brillouin podem ser utilizadas para medição da temperatura ao longo de uma fibra óptica [4-5]. Para se empregar essa tecnologia em linhas de transmissão é necessária que seja instalada na linha de transmissão uma fibra óptica. Essa instalação pode ser realizada tanto no cabo condutor, obtendo-se assim um cabo OPPC (do inglês: Optical Power Conductor) ou pela instalação da fibra óptica no cabo guarda OPGW (do inglês: Optical Ground Wire). Apesar de já estar disponível a

tecnologia OPPC [6], no Brasil ela está em uma fase preliminar de desenvolvimento, apresentado diversos desafios a serem transpostos, em especial relacionados aos aspectos de manutenção.

Portanto, a maneira mais viável de realizar a medição distribuída de temperatura utilizando sensores ópticos é pela utilização de cabos OPGW que são vastamente utilizados pelas concessionárias de todo o mundo. Sendo que as fibras ópticas encontradas nos cabos OPGW são do tipo mono-modo, a tecnologia mais indicada é o espalhamento Brillouin [5]. Com o emprego da medição de temperatura distribuída utilizando fibras ópticas de cabos OPGW, obtida pelo espalhamento Brillouin, é possível a obtenção de dados que poderão ser utilizados para determinação de correlações de modo a identificar tanto os vãos críticos, quanto a ampacidade dinâmica de linhas de transmissão. O equipamento utilizado no projeto é um DTS Brillouin, instalado na Subestação. O equipamento faz a medição da temperatura do cabo OPGW ao longo da linha de transmissão.

2.1.2 Estação Meteorológica

Com o objetivo de validar os dados medidos de temperatura e ainda avaliar as diversas técnicas de estimação de dados, instalou-se uma estação meteorológica em uma das torres da linha de transmissão monitorada. A estação meteorológica faz a medição da temperatura ambiente, radiação solar, velocidade e direção do vento. A estação meteorológica instalada é mostrada na Figura 2. O envio de dados é feito via comunicação GPRS.



FIGURA 2 - Estação meteorológica

2.1.3 Power Donut

Para validar a metodologia de estimação de temperatura optou-se por medir diretamente a temperatura do cabo fase. A medição é realizada empregando-se um sensor de temperatura e corrente (PowerDonut) que é instalado diretamente no cabo fase. Os dados medidos são transmitidos via comunicação GPRS. O sensor instalado no cabo condutor é mostrado na Figura 3.



FIGURA 3 – Sensor de temperatura e corrente do cabo fase.

2.2 Estimação de Ampacidade

Com o objetivo de se determinar a temperatura do cabo condutor a partir da medição da temperatura do cabo guarda foi desenvolvido um algoritmo de estimação. O algoritmo faz uso da equação de equilíbrio térmico do cabo OPGW e do cabo condutor [2]. Inicialmente, a partir da medição da temperatura do cabo OPGW determina-se os possíveis valores de variáveis climáticas (velocidade e direção do vento, radiação solar e temperatura ambiente) que geram a temperatura medida do cabo-OPGW naquele instante. Em seguida, para cada um dos cenários possíveis determina-se a temperatura do cabo fase. A equação de equilíbrio utilizada é mostrada na Equação 1.

$$q_j(i, T_c) + q_s(S) - q_c(T_c, T_a, v, \varphi) - q_r(T_c, T_a) = 0 \quad (1)$$

Na Equação 1, T_c é a temperatura do condutor [°C], q_j são os ganhos de calor por efeito Joule [W/m], q_s são os ganhos de calor por radiação solar [W/m], q_c são as perdas de calor por convecção [W/m], q_r são as perdas de calor por irradiação [W/m], i é a corrente no condutor [A], T_a é a temperatura ambiente [°C], S é a radiação solar [W/m²], v é a velocidade do vento [m/s] e φ a direção do vento [°].

Como a temperatura do cabo OPGW é um dado de entrada e a corrente neste cabo é conhecida ($i=0$), as raízes da Equação 1 serão portanto o conjunto de valores possíveis das variáveis climáticas T_a , v , φ , S . O algoritmo, portanto, testa todas as combinações de uma lista de valores possíveis para as variáveis climáticas e guarda todos os conjuntos de valores que zeram a equação de equilíbrio térmico.

A partir do conjunto das variáveis climáticas encontradas, calcula-se a temperatura do cabo condutor para cada uma das condições climáticas. A partir dos valores obtidos pode-se determinar os valores máximos e médios de temperatura do cabo condutor. Assim, pode-se estimar a temperatura mais provável do condutor.

2.2.1 Ensaios de Campo

Com o objetivo de avaliar a metodologia proposta fez-se a avaliação com dados reais. Coletou-se pelo período de seis dias dados de todos os sensores. Aplicou-se o método desenvolvido aos valores medidos de temperatura do cabo OPGW e em seguida os valores estimados foram comparados com os valores obtidos através do sensor de temperatura. A Figura 4 mostra os valores obtidos de temperatura utilizando o DTS.

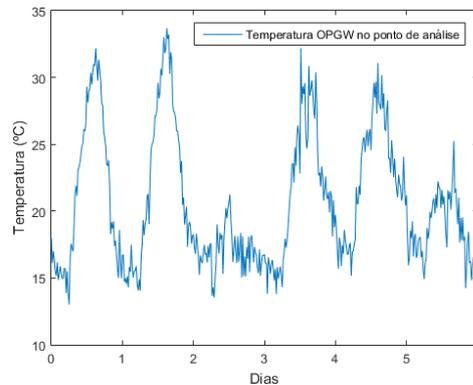


FIGURA 4 – Temperatura do Cabo OPGW.

A Figura 5 mostra os dados de corrente e de temperatura do cabo fase no mesmo período de análise. A Figura 6 mostra os dados obtidos pela estação meteorológica.

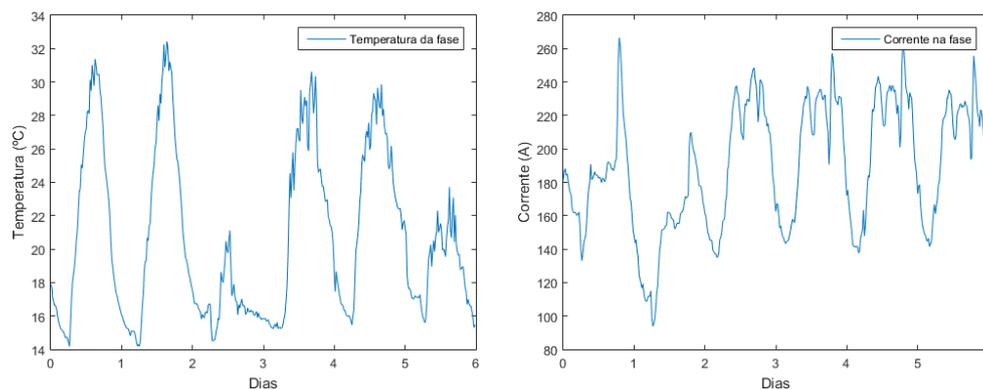


FIGURA 5 – Temperatura e corrente do cabo fase.

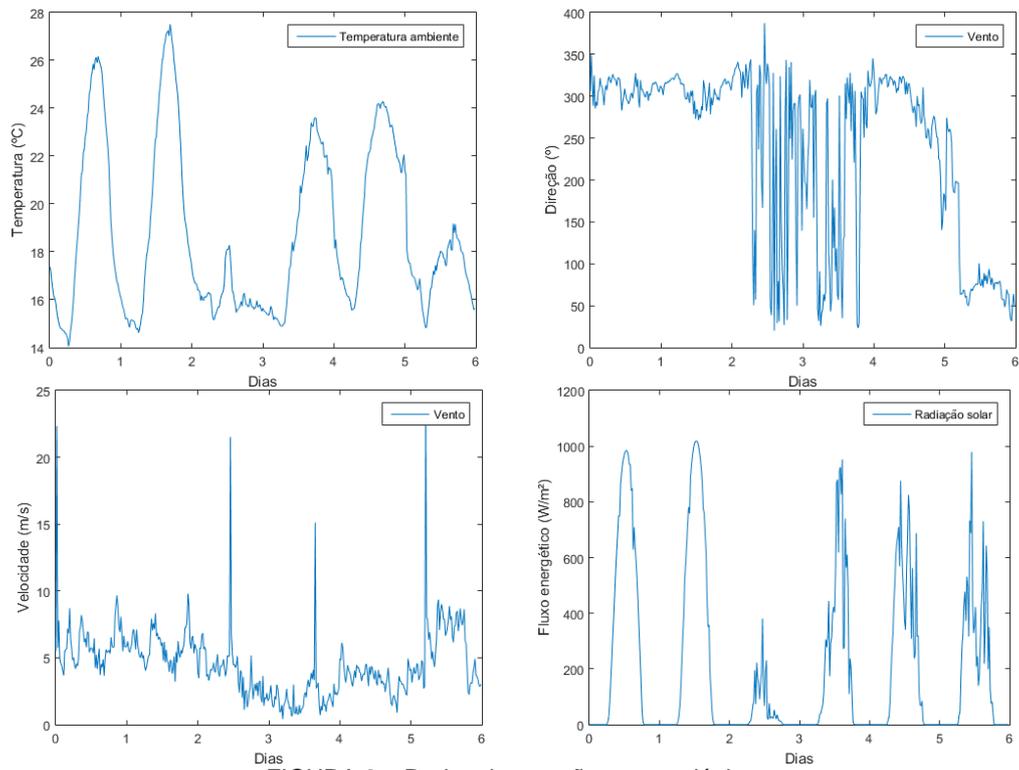


FIGURA 6 – Dados da estação meteorológica.

A partir dos dados de temperatura obteve-se a temperatura estimada do cabo fase. Os valores obtidos são mostrados na Figura 7. Na Figura 7 é mostrado a temperatura estimada média, bem como a temperatura estimada para 1 e 2 desvios padrão. Verifica-se pela análise da Figura 7 que os dados estimados estão de acordo com os dados medidos.

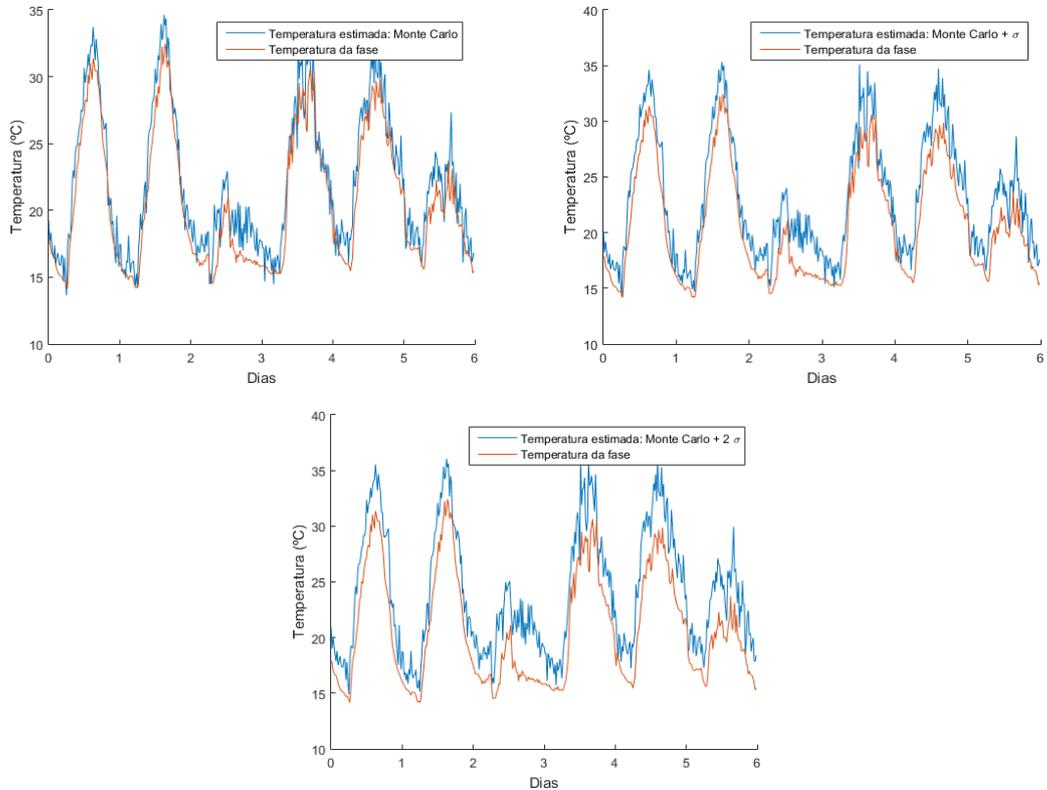


FIGURA 7 – Dados de temperatura estimados.

2.3 Avaliação da Correlação

A partir da análise da Figura 7 pode-se verificar que os valores estimados apresentam boa correlação com os valores medidos. O erro entre os valores estimados e medidos são mostrados na Figura 8. Verifica-se que o método é conservativo, de modo que o erro na estimativa, para o 1º e 2º desvio padrão é quase sempre positivo.

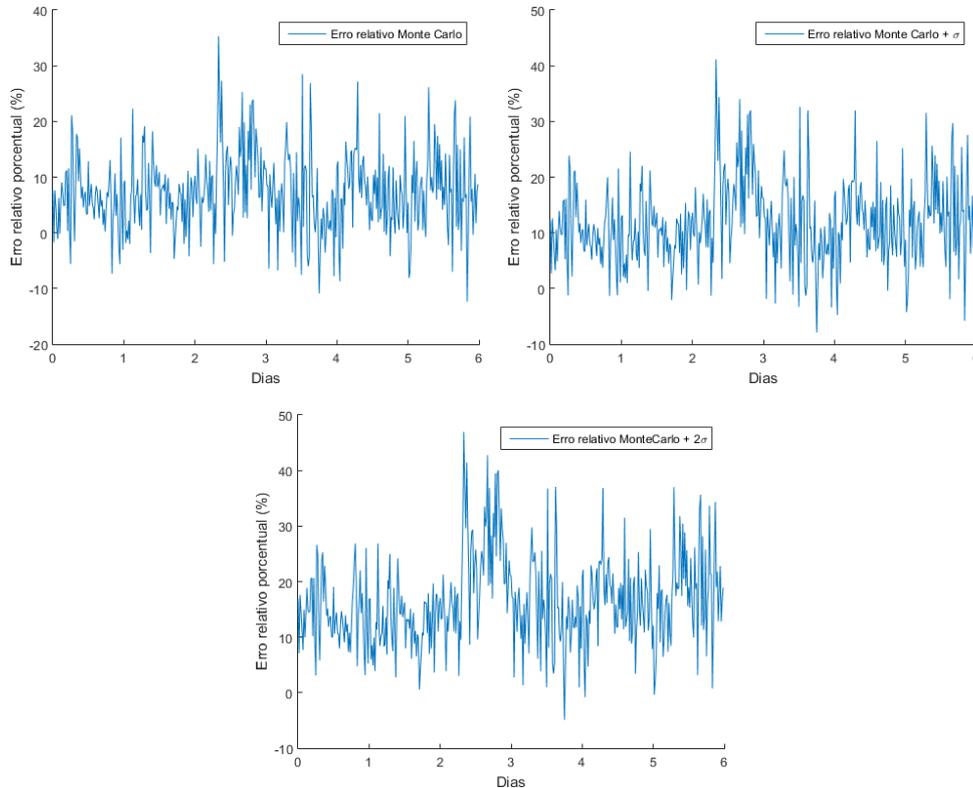


FIGURA 8 – Erro entre temperatura medida e estimada.

A correlação entre as temperaturas medidas e estimadas são mostradas na Tabela 1. Verifica-se que o valor estimado apresenta grande correlação com o valor medido, ou seja, a estimativa é uma boa representação dos dados medidos. Ressalta-se que novos ensaios continuam sendo realizados com o objetivo de melhorar a estimativa dos valores de temperatura.

TABELA 1 – Correlação entre temperatura medida e estimada.

Estimação	Correlação
Monte carlo	0,9647
Monte carlo + σ	0,9636
Monte carlo + 2σ	0,9602

3.0 - CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma metodologia de estimação da temperatura do cabo condutor a partir da temperatura do cabo-guarda. A metodologia foi testada com dados reais medidos em campo. A metodologia consegue estimar de forma adequada a temperatura do cabo condutor. A correlação obtida entre a temperatura estimada e a temperatura medida foi elevada. Mesmo para os casos em que há erros na estimativa, os erros são conservadores, de modo que a metodologia tem grande potencial de aplicação.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABNT 5422, “Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica”, 1985
- [2] “IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors (IEEE 738TM – 2006)”. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2007.
- [3] “Thermal Behaviour of Overhead Conductors”. Working Group 22.12, Cigre, 2002.

- [4] A. Signorini, et al, "40 km long-range Raman-based distributed temperature sensor with meter-scale spatial resolution", Optical Fiber Communication (OFC), 2010.
- [5] T. Horiguchi, et al, "Development of a Distributed Sensing Technique Using Brillouin Scattering", Journal of Lightwave Technology, 1995.
- [6] J. Bevan. "Design, development and installation of an optical phase conductor on 33kV wood pole line", Power Engineering Journal, 1995.
- [7] Carneiro, Juliano Silva de Assis. "Advanced Control and Protection strategies against thermal overloads in transmission circuits". 2009. 193 p. Tese (Doutorado em Engenharia da Informação) – Departamento de Eletrônica e Informação, Politécnico de Milão, Itália, 2009.

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Luiz Felipe Toledo, São Paulo – 15/12/1983, possui graduação em Engenharia Industrial Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (2007), mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (2010). Doutorado em andamento no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais na UFPR. Atualmente trabalha como pesquisador no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - Lactec, onde desenvolve projetos de P&D. Tem experiência em sistemas de potência, equipamentos e medição de alta tensão, simulação de sistemas de potência, descargas atmosféricas, processamento de sinais e instrumentação óptica.



Kristie Kaminski Kuster, Guarapuava - 13/06/1984. Possui graduação em Engenharia Industrial Elétrica, Eletrotécnica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (2007). Em 2013 concluiu com título de Master of Sciences o programa PPRE - " Postgraduate Programme Renewable Energy" na Carl-von-Ossietzky Universität Oldenburg. Atualmente trabalha como pesquisador no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - Lactec, onde desenvolve projetos de P&D.



Daniel de Andrade Ussuna, Bauru SP, 11/03/1985. Técnico em Eletrônica pelo Colégio Técnico Industrial Isaac Portal Roldán - Unesp (2002), graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica e Telecomunicações pela Universidade Federal do Paraná (2011), mestrado em Engenharia Elétrica área de concentração Instrumentação Eletrônica pela Universidade Federal do Paraná (2014). Doutorado em andamento no Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica área de concentração Instrumentação Eletrônica pela Universidade Federal do Paraná (2015). Atualmente é Pesquisador no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento LACTEC - DPEM/DVSE. Experiência nas áreas de Medidas Elétricas em Altas Frequências, Instrumentação Eletrônica, Simulação Numérica, Programação, Microeletrônica, Microcontroladores,



Rafael Martins formado em Engenharia Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, com Mestrado em Engenharia Elétrica e Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais, ambos pela Universidade Federal do Paraná. Atualmente trabalha como professor do curso de Engenharia Elétrica das Faculdade OPET e também atua como Engenheiro na Companhia Paranaense de Energia COPEL.



Renatto Vaz Carvalho, Nascido em Curitiba-PR em 28/03/1992, Graduado em 2015 no curso de Engenharia Elétrica pela UFPR. Prêmios: 2015 - 1º Lugar na banca EINTI - LACTEC do 8º EINTI, apresentando o trabalho Desenvolvimento De Sistema De Aquisição Para Ensaio de Trilhamento Elétrico, UFPR. 2014 - 1º Lugar na banca EINTI - LACTEC do 7º EINTI, apresentando o trabalho Desenvolvimento De Sistema, Com Tecnologia Nacional, Para Localização de Defeitos Em Cabos Isolados - UFPR. Autor de artigos e patentes.



Vitoldo Swinka Filho, Ponta Grossa – Pr, Bacharel em Física pela UFPR (1992), Mestre em Física pela Universidade Federal do Paraná (1996), Doutor em Engenharia e Ciência de Materiais pela Universidade Federal do Paraná (2000). Ocupações atuais: Pesquisador Sênior dos Institutos LACTEC lotado no Departamento de Eletricidade e Materiais, Professor Adjunto do Departamento de Mecânica da UFPR, Bolsista de Produtividade Desen. Tec. e Extensão Inovadora do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Nível 2, Supervisor de Radioproteção na área de Radiografia Industrial Credenciado pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) em 2007, Professor credenciado nos Programas de Pós-graduação em Engenharia da UFPR (PIPE) e Mestrado em Tecnologia (LACTEC) onde orienta alunos de mestrado e doutorado. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais, com ênfase em propriedades elétricas, atuando principalmente nos seguintes temas: materiais dielétricos, descarga parcial, ruptura dielétrica, raios x e isoladores poliméricos.