



GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

MEDIÇÃO DE EMISSIVIDADE DE CONDUTORES EM CAMPO: DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO E RESULTADOS OBTIDOS NO P&D ANEEL 0422/2015 (COPEL/CPQD)

**MURYLLO AMALIO DE SOUZA(1); ERICO PAZ DA SILVA ERICO(2); CARLOS HENRIQUE ARIMATÉIA RODRIGUES(1); HAMILTON IWAMOTO
COPEL DISTRIBUIÇÃO(1); CPQD(2)**

RESUMO

O desenvolvimento da unidade de medição direta de emissividade em cabos condutores de linhas aéreas e em operação é escopo do P&D Aneel 2866-0422/2015 – Desenvolvimento de Metodologia para obtenção da emissividade e absortividade de condutores de linhas de transmissão em condição real de operação, desenvolvido pela Fundação CPQD e COPEL Distribuição. Neste IT serão apresentadas as etapas de desenvolvimento e principais características de equipamento portátil para medição de emissividade de condutores em campo e energizados em 69 e 138 kV. Serão apresentadas as estratégias aplicadas para construção do protótipo, as constatações obtidas nas provas de conceito e dados iniciais coletados em campo.

PALAVRAS-CHAVE

Emissividade;
Absortividade;
Medição direta;
Linha de transmissão;
Ampacidade.

1.0 INTRODUÇÃO

As concessionárias de energia elétrica em todo o mundo têm procurado maximizar o uso de sua infraestrutura, permitindo que as linhas de transmissão trabalhem com densidades de corrente mais elevadas, visando aumentar sua capacidade máxima de fornecer energia. Na maioria das linhas de transmissão aéreas, a máxima potência que pode ser transmitida é limitada pela máxima temperatura permitida para o condutor, a qual não pode ser excedida sob pena de provocar flechas excessivas nos vãos (com risco de curto-circuito e de causar acidentes com a população), assim como danos térmicos no condutor e nos acessórios de fixação.

Tradicionalmente, a temperatura máxima de projeto do condutor é calculada para condições críticas do ambiente, como temperatura ambiente elevada, insolação direta e pouco ou nenhum vento. Visando levar em conta condições mais realistas para a linha e, dessa forma, aumentar a potência transmitida, diversos esforços têm sido feitos. Por exemplo, o guia do CIGRÉ TB601 (1), que trata da capacidade de linhas de transmissão, aprimora o cálculo da temperatura do condutor em diversos aspectos. Destaca-se o cálculo da distribuição radial de temperatura no condutor, um modelo de radiação solar mais flexível e um refinamento do modelo para a convecção, principalmente para baixas velocidades do vento. Cabe ressaltar que a TB601 traz também uma completa revisão do estado da técnica e introduz o conceito de dimensionamento dinâmico da linha, o qual leva em conta as características ambientais medidas e / ou estimadas através de modelos probabilísticos.

Outro documento do CIGRÉ extremamente relevante para esse assunto é a TB299 (2), a qual identifica e descreve um processo para selecionar condições ambientais apropriadas para o cálculo da capacidade de transmissão (ampacidade) de uma linha de transmissão. A TB299 complementa a TB601 e fornece uma descrição detalhada dos diversos aspectos que envolvem o dimensionamento térmico de uma linha de transmissão.

Não obstante, na análise detalhada realizada pelas TB601 e TB299 chama a atenção o fato de que dois parâmetros bastante relevantes para o cálculo da ampacidade da linha permanecem sendo escolhidos de forma arbitrária. São eles a emissividade e a absortividade do condutor, os quais são muito importantes no cálculo do balanço energético do condutor, pois a emissão e a absorção de energia por radiação são diretamente proporcionais aos valores desses parâmetros. Em linhas gerais, um condutor novo apresenta um valor de emissividade relativamente baixo (e.g., 0,27), o qual aumenta com o tempo de serviço, devido às alterações sofridas na superfície do condutor, podendo atingir

valores próximos de 0,95. Um valor maior de emissividade permite um maior carregamento da linha. A literatura indica que a absorvidade tende a acompanhar a emissividade, aumentando com o envelhecimento do condutor.

A ANEEL sugere o valor 0,5 tanto para a emissividade quanto para a absorvidade como base de projeto (3). Essa recomendação comporta uma margem de segurança, pois implica em menores valores de corrente para linhas mais antigas, cujo envelhecimento do condutor pode ter elevado o valor da emissividade. Por outro lado, um melhor conhecimento dos valores reais desses fatores para uma linha (ou trechos de linha), possibilita o aumento da sua ampacidade, sem comprometer a segurança operacional.

Uma pesquisa realizada na literatura técnica revela que há poucos dados de medições de emissividade e absorvidade de condutores de linhas de transmissão. Por exemplo, Rigdon (4) realizou um programa de medição da emissividade de amostras de condutores retirados de linhas em operação em diversas partes dos Estados Unidos. Esse trabalho mostrou uma dependência da emissividade não apenas com o tempo de instalação do condutor, mas também com o ambiente de instalação e com a tensão de operação da linha.

As referências (5)-(7) também reportam medições de emissividade de condutores de linhas de transmissão, cujos valores variam de 0,54 a 0,90. Em todos os casos, os testes foram realizados em laboratório, com base em amostras de condutores. A forma mais simples de fazer isso é retirar jumpers de linhas de transmissão. No entanto, essa técnica apresenta alguns inconvenientes:

- A operação de substituir um jumper com a linha energizada requer uma equipe de linha viva especializada, sendo relativamente onerosa.
- A concessionária teria de ter um laboratório próprio ou contratar serviços de um laboratório de terceiros, o que incorre em custos adicionais.
- A retirada, acondicionamento e transporte das amostras requer uma logística específica.
- Em linhas com muitas estruturas de sustentação, a possibilidade de amostragem fica limitada à disponibilidade do jumper.
- Esse método pressupõe que o jumper é representativo do vão, i.e., que ele foi instalado junto com o condutor do vão e que a sua emissividade representa o condutor.

A alternativa a essa técnica é utilizar um equipamento portátil que faça a leitura da emissividade diretamente no condutor energizado. Essa leitura pode ser feita em diversos pontos ao longo de um vão, visando obter um valor médio que leve em conta a variação da emissividade ao longo do condutor.

Para o desenvolvimento deste equipamento, deve ser considerado que a capacidade de condução de corrente em condutores aéreos depende de vários fatores, ambientais e físicos. Em geral, o cálculo dessa capacidade é realizado por meio de modelamento matemático, baseado na equação de equilíbrio térmico do condutor. Esta equação demonstra que a ampacidade do condutor depende do balanço energético entre o calor emitido e absorvido pelo condutor.

Um dos parâmetros físicos que são utilizados para cálculo de ampacidade é a emissividade. A emissividade é um fator adimensional que determina a quantidade de calor que um objeto emite para o ambiente e, portanto, traduz a quantidade de calor que esse corpo é capaz de “perder” para o ambiente. Esse fator depende diretamente das condições superficiais do objeto, variando entre zero e um. Desse modo, ao se conhecer com exatidão o fator de emissividade de um condutor, maior é a exatidão na determinação do limite operativo de uma linha aérea.

Portanto para este cenário foi desenvolvido um equipamento para medição de emissividade de condutores em campo, energizados, sem a necessidade de remover amostra de cabo das linhas aéreas.

2.0 DESENVOLVIMENTO

O processo de desenvolvimento iniciou com pesquisa do estado da arte nesse segmento, incluindo a relação entre emissividade, absorvidade e a temperatura superficial do condutor. O resultado da pesquisa, em nível mundial, indicou a não existência de equipamento similar com as características de medição direta do fator de emissividade em linha energizada.

Testes iniciais foram realizados com a utilização de sensores de contato tipo “Pogo-Pin”, entretanto, pelos fatos da superfície do cabo não ser plana e o cabo possuir vibrações e movimentações inerentes, os resultados não foram satisfatórios, com elevadas perdas de temperatura e eventuais perdas ou alterações no contato entre o cabo e o sensor. Dessa forma optou-se pela técnica de comparação de medição de temperatura utilizando a radiação térmica na faixa do infravermelho.

Dada a complexidade da modelagem optou-se por um processador robusto, com boa capacidade de memória e de processamento, com potencial para ser utilizado em outras soluções como, por exemplo, sensoriamento para soluções associadas a DLR – *Dynamic Line Ratings*. Os principais módulos funcionais do equipamento, onde se destacam: processador, GPS, sensor matricial IR, sensor de temperatura ambiente, bobina de Rogowski, sistema de

alimentação, servomecanismos, comunicação ZigBee, sistema on/off automático de alimentação associado a conexão no cabo e *watchdog timer*.

Na sequência a Figura 1 ilustra os principais elementos do sensoramento da radiação térmica do infravermelho, sendo eles uma ilustração dos principais elementos presentes no equipamento, o esquemático em 3D do dispositivo e por fim uma imagem de parte do interna onde é possível observar a câmera térmica e do arranjo com molas que mantem a fita de emissividade conhecida tensionada contra o condutor elétrico.

A solução de coleta de temperatura é feita pelo posicionamento de uma fita com emissividade conhecida sobre a superfície do cabo. A fita se mantém tensionada junto a superfície do condutor por meio de um conjunto de molas. Como o valor da emissividade da fita é conhecido ela fornecerá o valor da temperatura de referência.

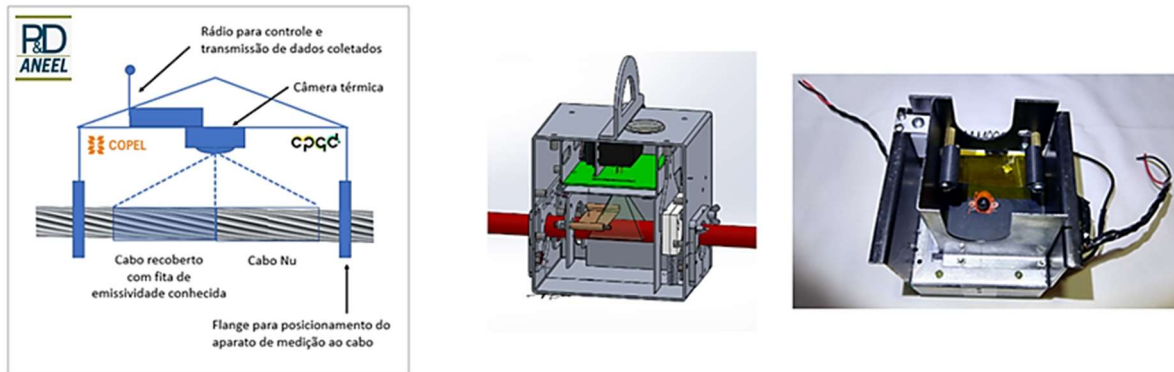


Figura 1 - Principais componentes do dispositivo de medição de emissividade de cabos aéreos

Na sequência uma câmara térmica presente no centro do dispositivo e precisamente posicionada entre a metade do cabo nu e a metade que está recoberta pela fita de emissividade conhecida realiza coleta de uma sequência de imagens térmicas.

Uma rotina computacional compara a temperatura entre as duas imagens, a parte recoberta pela fita e a parte com o cabo nu.

Se a emissividade do cabo for igual a emissividade da fita as duas áreas terão a mesma temperatura. Caso a temperatura entre as duas áreas seja diferente inicia-se um processo recursivo de variação do valor adotado para a emissividade do lado do cabo nu. Esse processo continua até as duas metades terem a mesma temperatura. Nesse momento o valor da emissividade do cabo é encontrado.

Durante o processo de construção e teste do disposto alguns desafios precisaram ser superados, entre eles destacam-se:

- a) **Seleção da câmara térmica:** a escolha da câmara térmica precisava atender alguns critérios técnicos como dimensões reduzidas, elevado nível de precisão, possibilidade de alteração do valor da emissividade por meio de comandos computacionais, robustez para operar em ambiente de temperatura elevada e sob intenso campo eletromagnético. Para esta aplicação foi considerado um sensor IR matricial 24 x 32, gerando uma coleta de 768 medições. Além disso, a câmara térmica deveria possuir simetrias internas de tal forma que as contribuições externas relacionadas a emitância, refletância, ou qualquer outra forma de troca de calor gerada tivesse igual contribuição para o cabo dentro da câmara.
- b) **O correto posicionamento da câmara térmica dentro do dispositivo:** uma vez selecionada a câmara térmica o projeto básico da estrutura do dispositivo de medição foi elaborado e impresso em uma impressora 3D. A partir de então foram realizados testes com o objetivo de encontrar o melhor posicionamento da câmara térmica, considerando, a simetria entre a parte com cabo nu e a parte recoberta pela fita de referência, a distância mais adequada para o posicionamento da câmara em relação ao cabo a fim de garantir que a imagem térmica tenha o melhor aproveitamento possível.

A Figura 2 a seguir ilustra os principais problemas de simetria durante o processo de montagem dos protótipos.

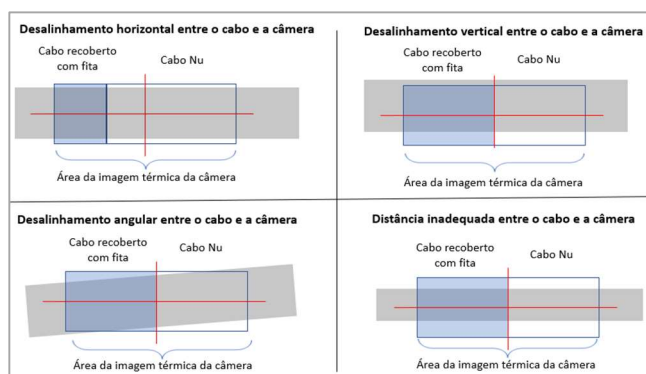


Figura 2 - Principais problemas de simetria que ocorrem durante o posicionamento da câmera térmica

- c) **Seleção da área de análise e coleta dos dados:** Considerando o modelo construtivo que foi montado, fez-se necessária a seleção de uma área na imagem térmica gerada pelo sensor para coleta dos dados de temperatura a serem processados. A seleção desta área deveria atender aos seguintes requisitos: ser aderente ao modelo construtivo do dispositivo, possuir elevada estabilidade de medição, evitar a coleta de dados de temperatura em regiões de fronteira entre a fita de referência e o cabo nu, compreender uma área representativa do cabo e conter amostras com pouca dispersão de dados.

A Figura 3 apresenta a área selecionada para análise dos dados coletados pelo sensor. Observe que a área selecionada não fica exatamente no centro da imagem térmica, este deslocamento em relação ao centro da câmera térmica foi necessária a fim de acomodar cabos de diferentes diâmetros. Na área selecionada temos um total de 48 amostras diferentes de temperatura, cabe destacar que na área selecionada o conjunto de amostras apresenta pouca variação entre a temperatura máxima mínima e média. Apresentando assim a melhor amostra de dados para a análise recursiva e terminação da emissividade do condutor.

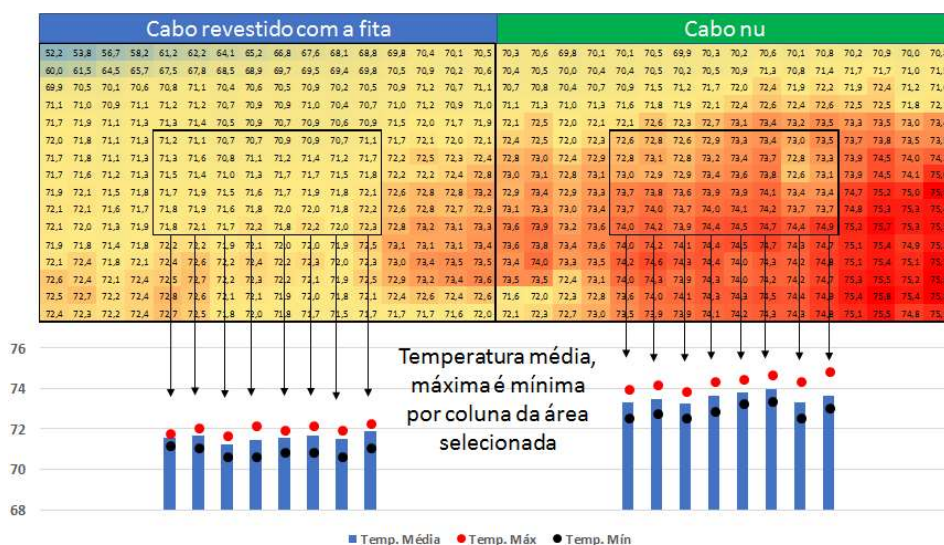


Figura 3 - Análise dos dados coletados pela câmera térmica

- d) **A seleção e determinação da emissividade da fita utilizada no dispositivo:** A fita utilizada para recobrir o condutor deveria ser resistente, maleável, altamente condutiva termicamente, suportar temperaturas elevadas e ter emissividade conhecida e constante para uma faixa de temperatura entre 40 e 100 graus Celsius. Assim a fita escolhida foi a fita Kapton® da Dupont de espessura 5 mil, cuja emissividade declarada pelo fabricante é 0,85. Sua emissividade foi aferida através de um processo comparativo utilizando como referência uma amostra do cabo E3X de emissividade certificada pela NASA e EPRI, em 0,89, que foi utilização nesse projeto.
- e) A Figura 4 apresenta o resultado consolidado de 40 ensaios de cálculo da emissividade da fita Kapton para uma faixa de temperatura entre 40 e 120°C.

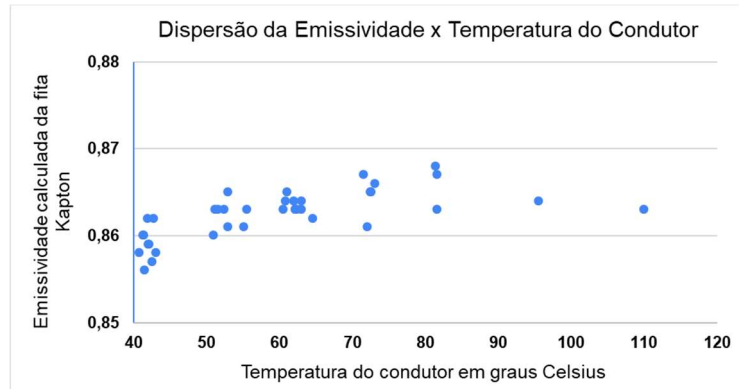


Figura 4 - Dados amostrais para do cálculo da emissividade da fita Kapton

Como resultado estimou-se a emissividade da fita Kapton para a faixa de temperatura entre 40 e 120°C sendo de 0,864. Para fins de aproximação e utilização em testes reais adotou-se o valor de 0,86.

- f) **Capacidade de adequação do dispositivo operar com cabos diferentes:** para garantir a usabilidade do dispositivo em cabos de transmissão com diferentes diâmetros o esquema construtivo criado pelo CPqD conta com franges removíveis que permitem conexão em diferentes cabos. Atualmente o disposto suporta a operação em cabos CAA Ibis, Drake, Partridge e Grosbeak.
- g) **Garantia de que os circuitos eletrônicos, GPS e o link de rádio funcionassem em ambientes de alta tensão e intensos campos eletromagnéticos:** Os testes com o protótipo em carcaça plástica feito em impressora 3D possibilitam a determinação da correta posição do sensor térmico, a melhor área para coleta de dados bem como extensivas seções de testes funcionais em laboratório de alta corrente e baixa tensão.

Posteriormente realizaram-se ensaios no laboratório de alta tensão do CPqD, para estes testes um novo protótipo foi montado, desta vez em alumínio. No laboratório de alta tensão realizou-se testes de acoplamento e desacoplamento do condutor energizado, medições de temperatura e testes com o rádio transmissor para transferência de dados. Os níveis de tensão aplicados no condutor durante os testes variavam de 20 a 80 KV entre fase e terra. Estes testes garantiam a robustez do sistema eletrônico e de rádio e serviu de preparação para os testes em redes reais em campo.

A Figura 5 mostra o setup de testes parcial em laboratório, ainda com uma câmara em material impresso em impressora 3D e amostras de cabo. Neste caso há que se destacar que o aquecimento da superfície do cabo fez-se pela injeção de corrente na alma de aço do cabo. Outro detalhe construtivo está associado à bobina de Rogowski em formato de ferradura, que apresentou resposta linear até 1.000 A.

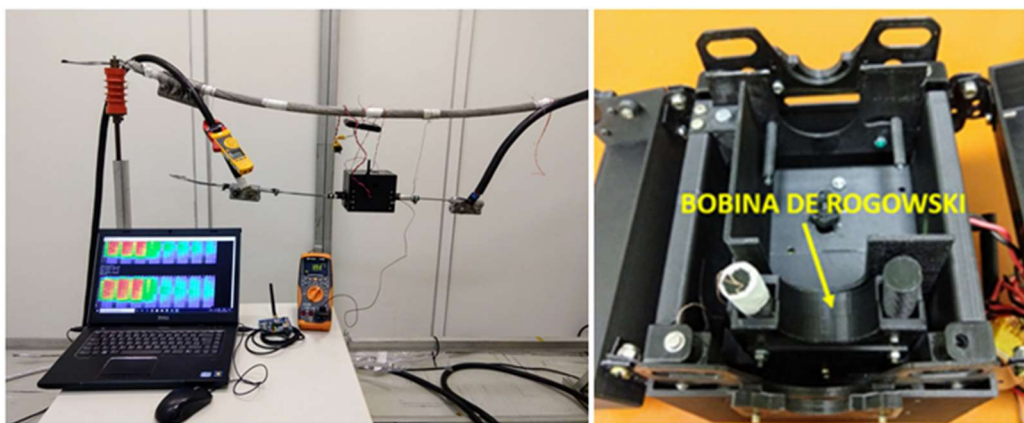


Figura 5 - Setup de testes em laboratório

- h) **Obtenção da absortividade:** Para a obtenção da absortividade, a metodologia considerava as recomendações das normas e recomendações do Cigré e IEEE. A análise dos dados obtidos pelos grupos de estudos destas entidades, entretanto, permitiu a observação de uma curva plotada de α/ϵ em função de ϵ , onde se observa que ela é monotonicamente decrescente, e apresenta uma relação praticamente linear. Para ser mais exato, a

equação mostra que a relação entre α e ε é quadrática. É notável concluir que essa relação pode ser expressa por uma equação simples, que foi adotada neste projeto.

$$\alpha = 2,3864 \varepsilon - 1,5287 \varepsilon^2, \quad \varepsilon \leq 0,9$$

$$\alpha = \varepsilon, \quad \varepsilon > 0,9$$

- i) **Análise de Catenária:** Para a obtenção da altura de entre o cabo e o solo a partir de um determinado cenário, foi desenvolvida uma ferramenta em Excel, que calcula o valor desta altura para um outro cenário. Assim, tendo uma altura para um determinado valor de corrente, temperatura ambiente, velocidade e direção do vento, e claridade da atmosfera, é possível se obter o novo comprimento do cabo e a nova distância entre o cabo e o solo, podendo ser variadas todas as grandezas acima declaradas.

3.0 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os dados de medição obtidos em laboratório e prova de conceito em campo (PoC) realizados em linhas da COPEL na região metropolitana de Curitiba – PR.

A Figura 6 apresenta um conjunto de imagens do primeiro protótipo construído em alumínio inteiramente finalizado e testado em ambiente de laboratório. Na imagem é possível observar alguns detalhes construtivos como a estrutura para encaixe do dispositivo ao condutor elétrico (item 1), a alça para içamento, acoplamento e remoção do dispositivo ao condutor (item 2), a câmara de medição de temperatura (item 3) onde encontra-se o sensor de temperatura, a fita Kapton bem como mecanismo de fixação da fita ao cabo. Cabe destacar que após acoplado ao cabo um conjunto de flanges se fecham prendendo firmemente o dispositivo ao cabo e fechando também a câmara de medição. No item 4 temos o local onde as baterias para fornecimento de energia elétrica para o dispositivo são armazenadas, e o item 5 temos em detalhe a antena de transmissão dos dados de temperatura coletados em campo, utilizou para transmissão de dados um rádio ZigBee.



Figura 6 - Detalhes do protótipo final

Na sequência a Figura 7 mostra um conjunto de dados já processados com o valor de medição da emissividade de um cabo em ambiente de laboratório.

Observe que com os dados processados e a emissividade do cabo devidamente calculada ambas as áreas de medição possuem praticamente a mesma temperatura, apresentado uma diferença entre elas de apenas 0,07°C. A emissividade calculada para o cabo foi de 0.89, exatamente o mesmo valor declarado pelo fabricante.

Cabo revestido com a fita															Cabo nu																	
54,0	56,9	55,4	56,1	55,7	58,7	57,0	57,8	57,0	59,6	57,8	58,4	57,7	60,0	58,4	59,1	58,7	60,9	59,0	59,6	58,5	60,6	58,4	58,7	57,3	58,7	55,6	55,4	52,4	54,2	49,7	48,7	
57,4	58,6	58,7	57,7	58,3	59,5	59,4	58,5	58,5	59,7	59,5	58,7	59,0	59,9	60,0	59,5	59,2	60,2	59,9	59,1	59,2	60,2	59,9	59,5	58,9	59,8	59,4	58,3	58,2	58,7	57,6	55,9	
58,7	61,5	59,1	59,7	58,9	61,3	59,2	59,7	59,0	61,3	59,2	59,6	59,2	61,2	59,7	60,3	59,3	61,5	60,0	60,2	59,4	61,5	59,5	60,0	58,8	61,1	59,5	60,2	59,7	62,1	59,8	60,4	
59,4	60,4	60,4	59,5	59,5	60,6	60,4	59,6	59,7	60,5	60,3	59,6	59,6	60,5	60,4	59,9	59,8	60,8	60,4	59,7	60,0	60,7	60,6	59,8	60,1	60,2	59,8	60,0	60,8	60,8	60,1		
59,4	61,7	59,4	60,3	59,5	61,6	59,5	60,4	59,7	61,8	59,7	60,3	59,6	61,8	59,9	60,4	59,5	61,4	59,9	60,3	59,6	61,4	59,9	60,3	60,1	62,0	59,9	60,6	60,0	62,0	59,9	60,5	
59,8	60,9	60,7	59,7	60,2	60,8	60,3	59,6	60,1	60,8	60,8	59,9	59,8	60,7	60,8	60,0	59,5	60,3	60,3	59,7	59,9	60,5	60,6	59,6	59,9	60,8	60,9	60,1	60,6	61,1	61,0	60,0	
59,7	62,0	60,0	60,4	59,7	62,0	60,0	60,3	59,7	61,8	59,8	60,4	59,8	61,6	60,3	60,7	59,8	61,6	60,0	60,4	59,7	61,4	59,7	60,2	59,3	61,7	59,9	60,4	59,9	62,1	60,4	61,0	
60,2	61,0	60,9	60,1	60,4	60,9	61,0	60,1	60,3	61,2	60,8	60,1	60,0	60,7	61,1	60,4	60,1	60,9	60,9	60,0	60,2	60,6	60,7	59,9	59,8	60,6	60,8	59,7	60,4	61,1	61,3	60,3	
59,7	62,2	59,8	60,7	59,8	62,0	60,1	60,6	59,9	62,1	60,1	60,7	59,9	61,9	60,4	61,1	59,9	61,7	60,1	60,5	60,0	61,7	60,2	60,5	60,1	61,8	60,2	60,4	59,8	61,9	60,2	60,4	
60,1	61,0	61,1	60,0	60,2	61,0	61,0	60,2	60,5	61,2	61,2	60,3	60,3	60,9	61,1	60,7	60,2	60,9	60,8	60,3	60,3	60,9	60,9	60,2	60,5	61,2	61,1	60,2	60,3	61,2	60,9	59,7	
59,7	62,0	59,8	60,7	59,6	62,0	60,0	60,7	60,0	62,0	60,5	61,0	60,2	62,1	60,3	60,9	59,9	61,9	60,2	60,6	60,0	61,9	60,2	60,8	60,3	62,4	60,6	61,1	60,5	62,6	60,3	60,9	
60,3	60,8	60,7	59,9	60,1	60,8	60,8	60,0	60,4	60,9	61,1	60,4	60,4	61,1	61,8	60,6	60,0	60,7	60,8	60,1	60,3	60,8	61,0	60,4	60,8	61,1	61,4	60,7	60,5	61,2	61,3	60,5	
59,3	61,7	59,5	60,1	59,2	61,6	59,5	60,4	59,7	62,0	60,1	60,5	59,8	61,8	60,6	60,3	59,3	61,7	60,1	60,5	60,0	61,7	60,2	60,5	60,1	61,8	60,2	60,4	59,8	61,9	60,2	60,4	
59,5	60,2	60,6	59,4	59,5	60,3	60,4	59,4	59,8	60,7	60,7	59,8	60,1	60,7	60,7	60,3	59,5	61,7	60,1	60,5	60,0	61,7	60,2	60,5	60,1	61,8	60,2	60,4	59,8	61,9	60,2	60,4	
58,8	61,6	59,3	59,7	58,6	61,1	59,1	59,8	58,9	61,0	59,3	59,9	59,1	61,1	59,1	59,1	59,3	61,7	60,1	60,5	60,0	61,7	60,2	60,5	60,1	61,8	60,2	60,4	59,8	61,9	60,2	60,4	
59,3	60,2	60,0	58,9	58,9	59,8	59,8	59,1	59,2	59,7	60,0	59,1	59,1	59,8	60,0	59,1	59,1	59,3	61,7	60,1	60,5	60,0	61,7	60,2	60,5	60,1	61,8	60,2	60,4	59,8	61,9	60,2	60,4
Área Seleccionada															Temp. Media			Std Dev			Emissividade											
Cabo Nu															60,57			0,69			0,89											
Fita Kapton															60,50			0,67			0,86											

Figura 7 - Resultados de medição de emissividade

Neste caso, como se dispunha tanto da fita Kapton quanto do cabo E3X com revestimento, ambos com fatores de emissividade conhecidos, a maioria dos testes foram no sentido de se fazer testes de validação dos fatores de emissividade em diversos níveis de temperatura. Assim eram feitos testes nas duas situações, ou seja, num momento tomava-se como conhecido o fator de emissividade do cabo E3X e determinava-se o fator de emissividade da fita Kapton e num segundo momento tomava-se como conhecido o fator de emissividade da fita Kapton e determinava-se o fator de emissividade do cabo E3X. Os resultados foram satisfatórios em especial quando se trabalha com valores de temperatura superficial do cabo mais elevados. Em baixas temperaturas o erro tende a ser maior em função de que a emissividade é proporcional à diferença entre a temperatura superficial do cabo elevada à quarta potência e a temperatura ambiente, também elevada à quarta potência, ambas em graus Kelvin.

Na Figura 8 são apresentadas imagens da realização da PoC, onde o equipamento é alçado na linha energizada por meio de bastão de linha viva. Também pode ser visto na figura que está sendo utilizada uma mini estação meteorológica para fins de validação de resultados.



Figura 8 - PoC

O equipamento mostrou-se adequado para o manuseio pela equipe de LV e não apresentou qualquer problema de falha associado ao fato de estar operando ao potencial da linha. Na Figura 9 é apresentada uma coleta e parte do tratamento matemático dado às leituras para a obtenção do fator de emissividade. Observa-se os valores de temperatura média e desvio padrão para a amostra presente na área selecionada, bem como um gráfico de barras mostrando a temperatura máxima, média e mínima de cada coluna presente na área selecionada.

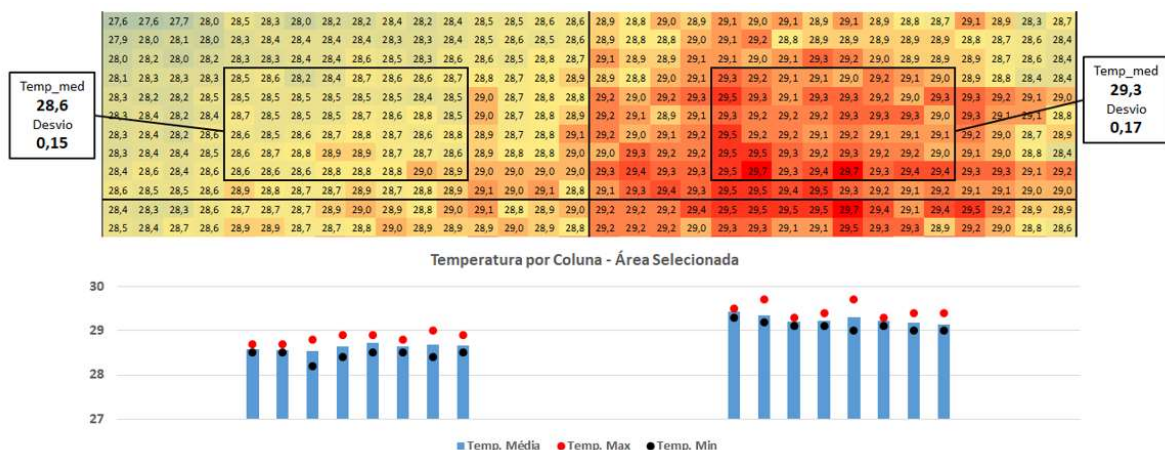


Figura 9 - Análise da coleta

Durante os testes em campo foram obtidos resultados de fatores de emissividade que variaram entre 0,75 e 0,93, compatíveis com a idade e enegrecimento (visual) dos cabos.

A avaliação de catenárias também apresentou resultados compatíveis com o esperado embora não tenha sido comprovado em função de dificuldades de transferências de carga. Durante a prova de conceitos foi feita a leitura num vão de linha e foi obtido o seguinte resultado apresentado na Figura 10.

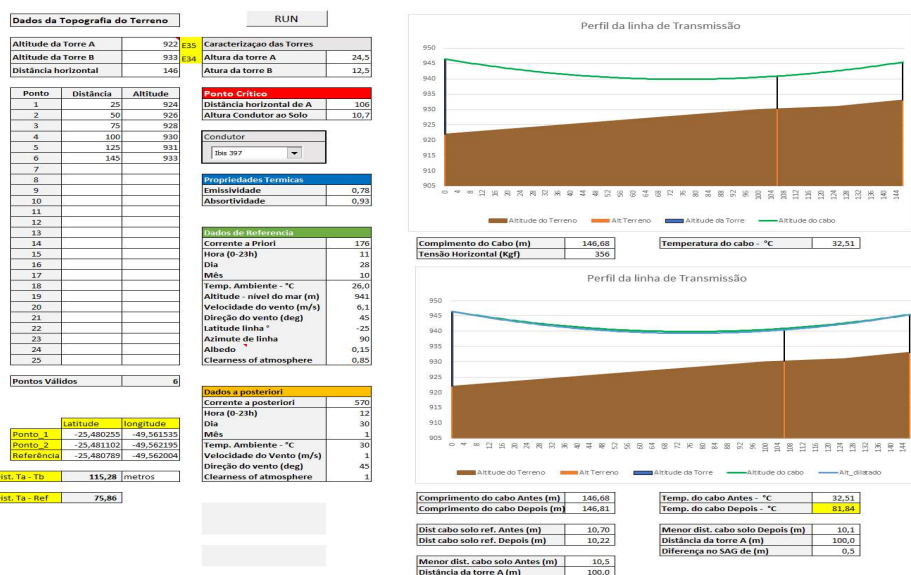


Figura 10 - Análise da Catenária vão E34-E35 – LDAT Bateias-Lapa – 138 kV

Um dos resultados que não foi atingido, mas foi próximo e garante melhor segurança operativa em função de possível redução na altura de segurança do cabo ao solo, foi o ganho em ampacidade. A premissa do projeto era de que, para uma temperatura de 90°C e coeficientes de emissividade / absortividade = 0,85 / 0,85 no lugar de 0,5 / 0,5, poderia ser obtido um ganho de até 6,1%.

Na PoC foi obtida emissividade 0,78 e considerada absortividade 0,93. Neste caso, considerando a mesma temperatura de 90°C, temos:

- Ganho médio em ampacidade ao longo do dia é de **2,3%**.
- Ganho médio no horário de ponta (18:00 as 21:00) é de **4,0%**.
- O cabo apresenta ganho constante de 4,2% no período sem incidência solar.
- O período de maior incidência solar é o período de pior performance chegando a uma perda percentual de 1,5% às 13h.

A Figura 11 indica o ganho de ampacidade em um dia típico, considerando emissividade 0,85 e absortividade 0,92.

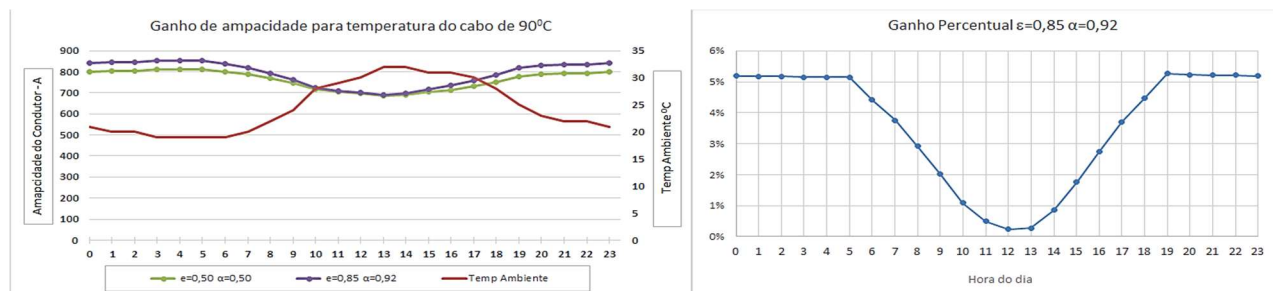


Figura 11 - Ganho em ampacidade ao longo de um dia típico

4.0 CONCLUSÕES

Embora não tenha sido atingido o ganho em ampacidade de 6,1% para as premissas iniciais do projeto, pode-se atingir ainda o significativo valor de ganho de 4,2% nos períodos sem incidência solar, que pode ser coincidente com o horário de ponta. O projeto traz uma contribuição no que diz respeito a absortividade que hoje é tratada de forma menos conservadora daquele que é conseguido no projeto.

O desenvolvimento desse equipamento demonstrou a possibilidade de se obter diretamente o fator de emissividade de cabos singelos aéreos, em linhas energizadas, de forma não intrusiva, que se apresenta como inovador, podendo ser utilizado em qualquer concessionária.

A medição realizada através da metodologia descrita neste trabalho reduz o tempo e o custo para obtenção desse parâmetro que, por sua vez, dá maior precisão no cálculo de ampacidade em linhas aéreas, com consequentes benefícios em capacidade operativa dessas linhas, otimizando o uso dos ativos existentes.

O P&D também contribuiu para a cadeia de inovação, propondo metodologia para a evolução para soluções *DLR*, que permitem a supervisão em tempo real de vãos críticos, incluindo a estimativa de altura de segurança, além de contribuir para estudos relacionados com operação de cabos de alta temperatura e/ou com revestimento, e na proposta de uma nova relação direta entre emissividade e absortividade de condutores.

Como resultado do seu caráter inovador, uma solicitação de registro de patente está em andamento. O protótipo de equipamentos desenvolvido mostrou-se com viabilidade técnica e comercial e sua evolução para produto deve considerar melhorias mecânicas para redução das suas dimensões e peso e otimizações no software embarcados.

5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CIGRÉ TB601, *Guide for thermal rating calculation of overhead lines*, WG B2.43, Dec. 2014.
- (2) CIGRÉ TB299, *Guide for selection of weather parameters for bare overhead conductor ratings*, WG B2.12, Aug. 2006.
- (3) ANEEL NT 038/2005, "Cálculo da capacidade operativa de longa duração de linhas aéreas de transmissão", Anexo A, SRT/ANEEL, 14/11/2005.

- (4) Rigdon, W. S., House, H. E., Grosh, R. J. and Cottingham, W. B. *Emissivity of weathered conductors after service in rural and industrial environments*, Trans. AIEE, vol.82, pp.891-896, Feb. 1963.
- (5) Taylor, C.S. e House H.E., *Emissivity and its effect on the current-carrying capacity of stranded aluminum conductors*. AIEE Trans. on Power Apparatus and Systems. PAS 75 (10), pp. 970-976, Out. 1956.
- (6) Black, W.Z. e Rehberg, R.L. *Simplified model for steady state and real-time ampacity of overhead conductors*. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. PAS 104, pp.2942-2953, Out. 1985.
- (7) Eduardo, J.V., Nogueira, A.E.A., Régis Jr., O. Determinação das capacidades operativas das linhas de transmissão de acordo com a Resolução Normativa 191 da Aneel - A visão da Chesf". Seminário Nacional de Prod. e Trans. de Energia Elétrica (SNPTEE), GLT23, Out. 2007.

DADOS BIOGRÁFICOS



Muryllo Amalio de Souza possui mestrado em Engenharia (2020), graduação em Engenharia Industrial Elétrica, ênfase Eletrotécnica (2004) e curso técnico em Eletrotécnica (1997), pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Atualmente é engenheiro de projetos eletromecânicos da Copel Distribuição, atuando na Divisão de Projetos de Linhas de Distribuição de Alta Tensão (69 e 138 kV). Atua na prospecção, desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias e Inovação relacionadas a projeto e construção de linhas de transmissão desde 2006. É membro do Cigre Brasil pelo Comitê B2 (Linhas Aéreas). contribuiu ativamente em eventos como SNPTEE, ERIAC, SENDI e CIGRE Session.

(2) IWAMOTO
HAMILTON
Hamilton Iwamoto graduou-se em Engenharia Elétrica pela UNICAMP em 1982. Possui especialização em Engenharia de Subtransmissão pela USP, em Telecomunicações pela UNICAMP, em Administração e em Análise de Valor e Investimentos, ambas pela FGV. Trabalhou como professor e também como engenheiro na CPFL, Novakoasin, Areva/Alstom e CPqD. Atualmente, trabalha na IOSI Energia como consultor especialista. É Membro de Comissões de Estudo do Cobei/ABNT nas áreas de proteção e comunicações. Também é membro do Cigré B2. Possui experiência nas áreas de automação, proteção, qualidade, telecomunicações, gerência e monitoramentos relacionados a Sistemas Elétricos de Potência.

(3) ERICO
ERICO PAZ DA SILVA
Engenheiro eletricitista formado pela UFMS em 1998, com mestrado pela UNICAMP em 2000 e posteriormente especialização em economia financeira em 2008 também pela UNICAMP. Ingressou no CPQD em 2011 como consultor onde atuou na área de consultoria e em projetos de P&D com foco no setor elétrico. Participação em projeto de relevância nacional: BNDES: Internet das Coisas - Um plano de ação para o Brasil. Consorcio McKinsey, CPqD e Pereira Neto Macedo advogados. Programa de Mobilidade Elétrica - CPFL Energia. Abradee: Plano Nacional de Smart Grid Projeto Cidades do Futuro – CEMIG Estudo da massificação da TV Digital - Sinditelebrasil

(4) RODRIGUES
CARLOS HENRIQUE ARIMATÉIA
Carlos Henrique Arimatéia Rodrigues graduou-se em Engenharia Elétrica pela UTFPR em 2006. Trabalhou como engenheiro eletricitista nas áreas de automação, predial e industrial, ingressando na Copel em 2010. Trabalhou com manutenção de linhas de distribuição de alta tensão por mais de cinco anos e em 2020 passou a atuar na construção de linhas de distribuição de alta tensão da companhia. É membro do Cigré B2.