



## **GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT**

### **MONITORAMENTO DA AMPACIDADE DE LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO O CABO OPGW COMO SENSOR DE TEMPERATURA**

**RAFAEL MARTINS(1); MAURO JOSÉ BUBNIAK(1); LUIZ FELIPE RIBEIRO BARROZO TOLEDO(2)  
COPEL GERAÇÃO E TRANSMISSÃO S.A.(1); LACTEC(2)**

#### **RESUMO**

A máxima corrente que pode circular em uma Linha de Transmissão (ampacidade) é determinada pela temperatura limite do cabo condutor. Essa temperatura é fortemente influenciada pelas condições climáticas. Na fase de projeto são utilizados dados climáticos conservadores, contudo, há possibilidade da temperatura limite ser ultrapassada, devido à possibilidade de ocorrência de condições climáticas extremas. Para resolver esse problema é necessário monitorar a temperatura do cabo em tempo real. Contudo, as metodologias convencionais de monitoramento possuem diversas limitações. O presente trabalho apresenta os resultados de um sistema de monitoramento de temperatura do cabo condutor, utilizando como sensor de temperatura o cabo OPGW da Linha de Transmissão.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

LINHAS DE TRANSMISSÃO, AMPACIDADE, MONITORAMENTO TÉRMICO, DTS

#### **1.0 INTRODUÇÃO**

A capacidade das linhas de transmissão (LT) é fortemente dependente das variáveis climáticas, uma vez que o limite de carga de um circuito é geralmente o limite térmico do cabo condutor. A ampacidade nominal, que é calculada na fase de projeto, é definida como a corrente máxima que garante a integridade e o funcionamento seguro da linha aérea, e é tradicionalmente calculada com base em parâmetros críticos, ou seja, conservadores, da condição climática [1] [2] [3]. Contudo, devido às variações climáticas, a ampacidade real da linha também varia. Com isso, o monitoramento térmico pode ser usado para aumentar a ampacidade adaptando os limites de acordo com as condições climáticas relevantes em tempo real.

Atualmente, a maioria das concessionárias de energia ainda usa o método determinístico para regular o fluxo de energia que resulta em um uso muito conservador das linhas. Outros métodos estão disponíveis hoje, mas até agora todos eles têm limitações em suas implementações e nenhum deles leva todo o comprimento da linha em consideração [4] [10]. Medições pontuais na linha levam à insegurança dos resultados, uma vez que os pontos escolhidos podem não representar a situação da linha mais crítica. Portanto, um método confiável de determinação dinâmica da ampacidade do cabo é necessário para garantir a estabilidade e a segurança do sistema elétrico, e também permitir o uso seguro das capacidades sazonais para um ganho significativo da capacidade de transmissão.

Este trabalho propõe uma metodologia para a estimativa em tempo real da temperatura do cabo de fase, bem como a determinação do vão crítico e da ampacidade dinâmica da linha, utilizando medições de temperatura distribuídas feitas nas fibras ópticas do cabo OPGW em cada metro ao longo de toda a extensão da linha. Para isso, a correlação entre a temperatura do OPGW e a temperatura do condutor de fase é estabelecida para diferentes características do cabo, a fim de permitir a identificação dos atributos relevantes.

#### **2.0 REVISÃO DOS MÉTODOS**

Para determinar a verdadeira ampacidade da LT com o objetivo de aumentar a capacidade de transmissão, existem atualmente diversos métodos na literatura. Esses métodos podem ser agrupados de acordo com a natureza do cálculo da ampacidade. Uma divisão é proposta da seguinte forma:

- Métodos Determinísticos
- Métodos Probabilísticos
- Métodos de monitoramento em tempo real
- Métodos de Previsão



Os métodos determinísticos consideram modelos analíticos para a análise de comportamento térmico do sistema. Esses são geralmente métodos conservadores, pois usam fatores meteorológicos constantes para todo o comprimento da LT, representando um cenário crítico principalmente de velocidade do vento e radiação solar. Esse método não reflete a realidade da LT ao longo do ano, ou as condições ao longo do comprimento da linha. No entanto, por serem os primeiros métodos a serem desenvolvidos, estão nos padrões atuais para cálculos de ampacidade no Brasil [5] e no resto do mundo [1, 6]. Os critérios presentes nessas normas são utilizados em projetos de linhas de transmissão.

Os métodos probabilísticos levam em conta o comportamento sazonal do clima, confiando em funções probabilísticas específicas que são estimadas a partir de dados históricos, considerando aspectos locais e sazonais do clima para fazer suposições mais precisas sobre os fatores meteorológicos e produzir cálculos mais realistas. As conclusões estatísticas desses métodos vêm basicamente dos cálculos de dois fatores: Risco térmico, que determina a probabilidade de superaquecimento do condutor, e risco de falha, associado à probabilidade de falha de isolamento da linha de transmissão. A grande desvantagem desses métodos é que eles requerem pelo menos três anos de histórico de dados meteorológicos da localização da LT, que nem sempre está disponível no momento do projeto. Uma proteção contra sobrecarga para linhas de transmissão com base neste método foi proposta em [7].

Já os métodos de monitoramento em tempo real utilizam instrumentos de medição para se obter as variáveis necessárias ao longo da LT de duas maneiras possíveis: direta ou indireta. O monitoramento direto das variáveis consiste no uso de dados coletados a partir de instrumentos de medição como Power Donuts, Monitor de Capacidade Térmica, Sagômetros, Sonares e Radares. A abordagem indireta baseia-se na estimativa de uma das variáveis envolvidas na determinação da ampacidade através do monitoramento de uma segunda variável, como o uso de uma estação meteorológica em local de interesse próximo à LT para se coletar dados de velocidade do vento, temperatura ambiente e radiação solar, em vez de medir diretamente a temperatura do cabo ou sua catenária. Um algoritmo baseado na integração de métodos indiretos e diretos pode ser encontrado em [8].

Por fim, os métodos de previsão combinam condições climáticas e previsões de carga, a curto e longo prazo, para se estimar as variáveis necessárias para calcular a ampacidade. Essas previsões dependem de dados de outros métodos, e por isso trazem altas incertezas devido à dificuldade de obter dados confiáveis para as previsões necessárias. Uma maneira de melhorar a qualidade dos dados no método de previsão seria usar vários pontos de medição em tempo real em vez de um. No entanto, o uso de dezenas ou centenas de pontos de medição ao longo da LT resultaria em um sistema de monitoramento extremamente caro e complexo. Para evitar esse problema, a medição distribuída pode ser usada ao longo da linha de transmissão. Uma exposição mais detalhada dos métodos de previsão pode ser encontrada em [10]. Uma base do esquema de proteção no controle preditivo pode ser encontrada em [11], e um método de controle preditivo para aliviar a sobrecarga térmica é proposto em [12].

### 3.0 REFLECTOMETRIA ÓPTICA

Os sensores de fibra óptica têm sofrido grande desenvolvimento nas últimas décadas e têm sido usados em vários campos de instrumentação. Uma de suas principais vantagens é sua imunidade à radiação eletromagnética e sua capacidade de suportar ambientes severos. [13]. Como resultado, as fibras ópticas são amplamente utilizadas para medição de temperatura em sistemas de energia [14, 15, 16]. Entre as diversas tecnologias disponíveis, os sensores distribuídos são amplamente utilizados no monitoramento de grandes estruturas [17], ou quando se medem em grandes distâncias, como uma linha de transmissão aérea [21]. A realização desse tipo de medição é mais facilmente implementada quando a medição distribuída é utilizada em detrimento de um grande número de sensores (quase distribuídos).

A medição distribuída é comumente baseada na reflectometria óptica de domínio temporal (OTDR - Optical Time Domain Reflectometry). A técnica OTDR consiste no lançamento de um pulso óptico na fibra óptica e pela medição temporal das intensidades refletidas é possível analisar uma medição. Pode-se pensar na técnica OTDR como um radar óptico unidimensional. Tanto a tecnologia Raman quanto a Brillouin podem ser usadas para medição de temperatura ao longo de uma fibra óptica [18, 19]. Para utilizar essa tecnologia em linhas de transmissão é necessário que uma fibra óptica seja instalada na linha de transmissão. Esta instalação pode ser feita tanto no condutor, obtendo assim um cabo OPPC (Optical Power Conductor) ou instalando a fibra óptica no cabo OPGW (Optical Ground Wire). Embora a tecnologia OPPC já esteja disponível [20], no Brasil está em fase preliminar de desenvolvimento, apresentando diversos desafios a serem superados, especialmente relacionados aos aspectos de manutenção.

Portanto, a maneira mais viável de realizar a medição de temperatura distribuída usando sensores ópticos é usando cabos OPGW que são amplamente utilizados por concessionárias em todo o mundo. Uma vez que as fibras ópticas encontradas nos cabos OPGW são fibras monomodo o espalhamento de Brillouin é usado [19]. Com o uso de medição de temperatura distribuída utilizando fibras ópticas de cabo OPGW, obtidas pela dispersão de Brillouin, é possível obter dados que podem ser utilizados para determinar correlações, a fim de identificar tanto os pontos críticos quanto a ampacidade dinâmica das linhas. O equipamento utilizado no projeto é um Brillouin DTS (Distributed Temperature Sensing), instalado na Subestação. O equipamento mede a temperatura do cabo OPGW ao longo da linha de transmissão com resolução de um metro. Assim, é possível obter as medições de temperatura



do cabo OPGW ao longo de todo o comprimento da linha de transmissão aérea através do uso de sensoriamento distribuído.

### 3.1 Procedimento de calibração

Para medir a temperatura de uma determinada linha de transmissão foi utilizado um DTS. Para a calibração desse equipamento foi necessária a determinação do coeficiente de temperatura ( $C_t$ ). Normalmente, o cabo OPGW é composto por vários segmentos, por isso é importante que todos os segmentos sejam calibrados. A temperatura ao longo do comprimento é dada pela equação 1.

$$T(x) = (f(x) - F_{bl}(x)) * C_T + T_{bl}(x) \quad (1)$$

onde:

- $T(x)$  é a temperatura do cabo em função da distância [°C];
- $f(x)$  representa a frequência de Brillouin medida pelo DTS em função da distância [Mhz];
- $F_{bl}$  é a frequência de Brillouin de referência (linha de base) em função da distância [Mhz];
- $C_T$  é o coeficiente que correlaciona a variação de frequência em função da variação de temperatura para cada fibra [°C/Mhz];
- $T_{bl}$  é a temperatura do cabo no momento da medição da linha de base [°C];

Portanto, a calibração do equipamento consiste na determinação do coeficiente de temperatura da fibra óptica, bem como na determinação da referência de frequência. O coeficiente  $C_t$  é dado por Eq. 2.

$$C_t = \frac{\Delta T}{\Delta f} \quad [°C/Mhz]; \quad (2)$$

Onde  $\Delta T$  representa a diferença na temperatura do cabo em um determinado momento em relação à temperatura no momento da determinação da linha de base e  $\Delta f$  representa a diferença de frequência entre a frequência medida e a linha de base.

## 4.0 ESTIMAÇÃO DE TEMPERATURA

### 4.1 Modelo térmico do condutor

A temperatura dos condutores nus é uma função dos seguintes parâmetros [1]:

1. Propriedades e tamanho do material condutor (diâmetro)
2. Condições da superfície do condutor
3. Condições meteorológicas do condutor
4. Corrente elétrica do condutor

Enquanto o primeiro e o segundo parâmetros são definidos por propriedades físicas específicas do cabo, a meteorologia (terceiro) apresenta comportamento estocástico. Além disso, a corrente elétrica do condutor varia de acordo com o carregamento e geração do sistema de potência.

A equação de equilíbrio térmico para linhas de transmissão aéreas nuas expressa os ganhos de calor e perdas no condutor e é dada por [1]:

$$mC \frac{dT_c}{dt} = q_j(i, T_c) + q_s(S) - q_c(T_c, T_a, v, \varphi) - q_r(T_c, T_a) \quad (3)$$

onde:

- $T_c$  - Temperatura do condutor [°C]
- $q_j$  - Ganho de calor joule [Wm]
- $q_s$  - Ganho de calor solar [Wm]
- $q_c$  - Perda de calor convecção [Wm]
- $q_r$  - Perda de calor por radiação [Wm]
- $mC$  - Capacidade total de calor do condutor [JmK]



- $i$  - Corrente do condutor [A]
- $T_a$  - Temperatura ambiente [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- $S$  - Radiação solar [ $\text{W/m}^2$ ]
- $v$  - Velocidade do vento [m/s]
- $\varphi$  - Direção do vento [ $^{\circ}$ ]

Cada componente de ganho e perda de calor, e suas equações são declaradas em [1]. A norma também detalha as propriedades físicas do cabo que influenciam a temperatura do condutor.

Quando em regime permanente, os ganhos de calor e o equilíbrio das perdas são iguais, sem alterar a temperatura do condutor. Se houver interesse apenas em condições de regime permanente, o termo derivativo na equação 3 é definido como zero, resultando em uma equação algébrica de equilíbrio.

As taxas de convecção e perda de calor por radiação não são lineares em relação à temperatura do condutor. A fim de resolver a equação de equilíbrio térmico de regime permanente para a temperatura do condutor, dada a corrente e as variáveis meteorológicas, uma prova de exaustão é realizada computacionalmente para descobrir qual valor de um conjunto finito de temperaturas viáveis se encaixa na equação. Esse cálculo também pode ser feito iterativamente [1].

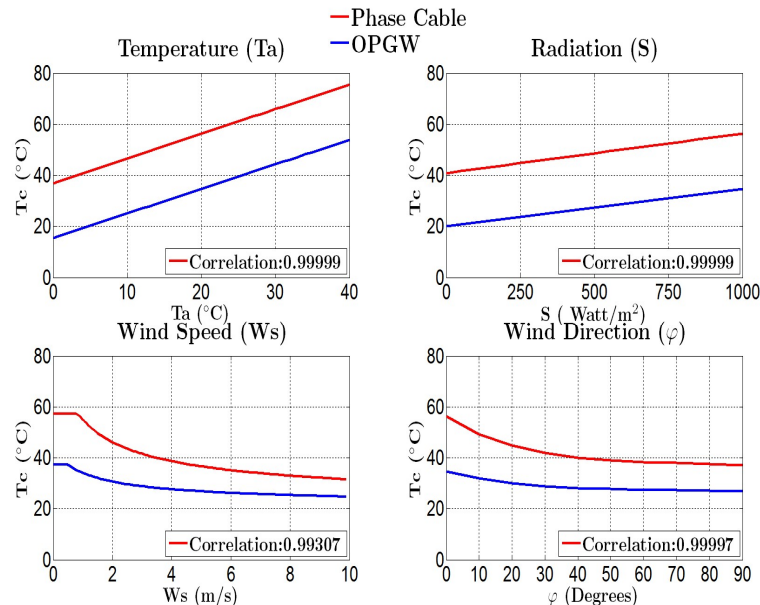
#### 4.2 Correlações de temperatura

Em uma linha de transmissão aérea, o cabo guarda e o cabo de fase estão sujeitos às mesmas condições meteorológicas. Contudo, suas propriedades físicas são diferentes, resultando em um equilíbrio térmico diferente e, com isso, ganhos de calor e perdas diferentes para ambos os cabos. No entanto, a radiação solar incidente, velocidade e direção do vento, e temperatura ambiente são os mesmos em ambos os cabos, o que gera uma correlação entre a temperatura do OPGW e a temperatura do cabo de fase.

Foi realizada uma análise para validar essa correlação, supondo dois cabos diferentes (Drake e Grosbeak), detalhados na Tabela 1 sob as mesmas condições climáticas e correntes diferentes. Os resultados apresentados na Figura 1 se referem ao cabo Drake, pois esse é o cabo da linha de transmissão estudada, conforme demonstrado no item 5.

TABELA 1: Propriedades dos cabos analisados

Propriedades Físicas	Drake	Grosbeak
Diâmetro (m)	0.0281	0.02515
Emissividade	0.5	0.5
Absortividade	0.5	0.5
Altitude (m)	900	900
Resistividade @ 25 $^{\circ}\text{C}$ ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	7.283e-5	9.119e-5
Resistividade @ 75 $^{\circ}\text{C}$ ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	8.688e-5	11.540e-5
Capacidade total de calor (J/mK)	1066	1066



Constant values:  $S = 1000 \text{ W/m}^2$   $\varphi = 0$  degrees  $T_a = 20^{\circ}\text{C}$   $W_s = 1 \text{ m/s}$



FIGURA 1: Variação da Temperatura do Cabo (Tc) e Temperatura OPGW em relação às variáveis meteorológicas.

Supondo que não haja corrente no cabo OPGW e um valor diferente de zero no condutor (por exemplo 500 A), eles apresentam uma alta correlação, sob as mesmas variações nas condições climáticas, como descrito na Figura 1.

Com base nessa correlação, quando se sabe a temperatura de um cabo, é possível estimar a temperatura do outro cabo, isso se as condições climáticas a que são submetidos forem conhecidas. Contudo, quando tem-se apenas a temperatura do cabo OPGW, não é possível determinar quais são as condições climáticas que resultaram nesse valor de temperatura, sendo necessário então realizar uma estimativa, que está explicada na subseção a seguir.

#### 4.3 Estimação pelo método de Monte Carlo

O método de Monte Carlo é uma maneira para se estimar a temperatura do condutor com base na temperatura do cabo OPGW. Esta técnica consiste em realizar uma amostragem aleatória de possíveis conjuntos de dados e realizar a análise desses conjuntos em cálculos determinísticos. O resultado probabilístico tende a ser o fenômeno simulado. As simulações de Monte Carlo permitem uma solução numérica para problemas analíticos complexos sem simplificação de modelos.

Uma aplicação do método de Monte Carlo para estimar a temperatura do condutor é apresentada em [7]. Carneiro e Ferrarini propõem um método onde vários cenários climáticos são criados desenhando um conjunto de quatro números aleatórios, um para cada variável meteorológica, a partir de sua respectiva distribuição de probabilidades. Um cenário meteorológico é mantido por uma hora, a temperatura do condutor é avaliada a cada minuto usando a equação de equilíbrio térmico. Este procedimento é repetido para um grande número de simulações, até que o valor médio e o desvio padrão da evolução da temperatura do condutor dentro de uma hora seja encontrado.

Um método semelhante é desenvolvido neste trabalho. Primeiro, um conjunto de valores aleatórios para cada variável climática é determinado. As distribuições de probabilidade que descrevem o comportamento aleatório das variáveis ambientais  $T_a$ ,  $S$ ,  $v$ , e  $\varphi$  são Normais, Uniformes, Weibull e Von Mises, respectivamente [7]. Os conjuntos amostrados podem ser expressos como tal:

$$A = \{T_{a_1}, T_{a_2}, \dots, T_{a_k}\} \quad (4)$$

$$B = \{S_1, S_2, \dots, S_l\} \quad (5)$$

$$C = \{v_1, v_2, \dots, v_m\} \quad (6)$$

$$D = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m\} \quad (7)$$

Os elementos de cada conjunto combinados entre si resultam em conjuntos de quatro variáveis meteorológicas que, pela regra do produto, dão  $k * l * m * n$  possíveis combinações de amostras de condições climáticas.

O resultado forma um conjunto de possíveis temperaturas de condutor de fase, que poderiam ser avaliadas estatisticamente como um valor médio e um desvio padrão. O processo completo é apresentado na Figura 2.

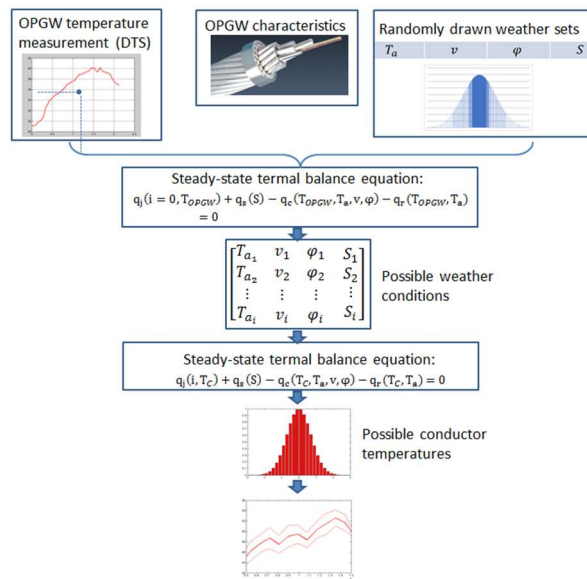




FIGURA 2: Esquema de Algoritmo

Conforme a Figura 2, cada condição meteorológica dentro do conjunto é avaliada usando a equação de equilíbrio térmico expressa em (3) para o cabo OPGW, supondo um equilíbrio térmico de regime permanente. A temperatura calculada do OPGW é comparada com a temperatura atual do OPGW obtida pelas medições do DTS. Todos os possíveis quadruplos dentro dos conjuntos de variáveis meteorológicas que gerariam tal temperatura do cabo guarda são encontrados. Estas possíveis condições meteorológicas são usadas para calcular todas as possíveis temperaturas do condutor de fase, considerando a corrente neste cabo.

## 5.0 SISTEMA DE MONITORAMENTO

Foi criado um sistema de monitoramento para testar a metodologia proposta. Este sistema de monitoramento foi concebido para medir simultaneamente todas as variáveis necessárias, incluindo as temperaturas do cabo fase, as temperaturas do cabo OPGW, bem como as condições climáticas em uma linha de transmissão escolhida. Todas as medições são transmitidas a um servidor de dados por um sinal de comunicação GPRS. Os instrumentos de medição são descritos a seguir.

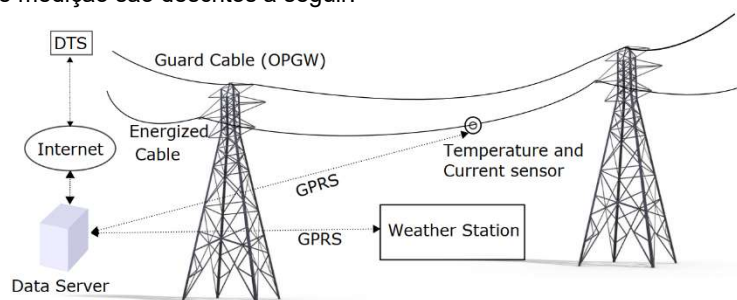


FIGURA 3: Esquema do Sistema de Monitoramento

### 5.1 DTS

Um equipamento BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer) feito pela OzOptics foi usado como DTS. Este equipamento é capaz de medir distâncias de até 70 km, tem uma precisão de temperatura abaixo de 1 °C e tem uma resolução espacial na ordem do metro. Para linhas de transmissão com mais de 70 km é possível elaborar esquemas especiais de medição, como alocar o sistema no meio da linha de transmissão ou usar um esquema de amplificação de sinal.

### 5.2 ESTAÇÃO METEOROLÓGICA

Utilizada para validação dos resultados, a estação meteorológica empregada mede todas as variáveis meteorológicas necessárias para o cálculo da ampacidade. A estação possui um sensor de vento ultrassônico que mede a intensidade do vento, bem como sua direção, um sensor piranômetro para medição de radiação, um sensor de temperatura ambiente, um sensor de umidade do ar e pressão barométrica, um painel solar com uma bateria e também um modem de comunicação GPRS.

### 5.3 POWER DONUT

Um Power Donut PD3-Usi foi usado para medições de corrente e tensão do condutor, bem como a temperatura do cabo de fase, também para validação dos resultados.

## 6.0 CONJUNTO DE DADOS

O sistema de monitoramento foi instalado em uma linha de transmissão na cidade de Cascavel, no Paraná, sul do Brasil. A LT monitorado com tensão de 230 kV e 16 km de comprimento, localizada a 780 m de altitude. As condições meteorológicas em Cascavel são extraídas de dados meteorológicos históricos. Utilizando-se este conjunto de dados, foram calculados os parâmetros de distribuição estatística para as quatro variáveis meteorológicas.

A temperatura do ar foi tratada como uma distribuição normal, com os parâmetros médios ( $\mu_T$ ) e desvio padrão ( $\sigma_T$ ), bem como a direção do vento que, embora originalmente se comporta como uma distribuição von Mises, foi aproximada a uma normal de 0° para 180° com sua própria média ( $\mu_\varphi$ ) e desvio padrão ( $\sigma_\varphi$ ). A velocidade do vento foi modelada como uma distribuição weibull com os parâmetros velocidade característica ( $\lambda$ ) e



fator declividade ( $k$ ), enquanto a radiação solar foi modelada com uma distribuição uniforme com os valores mínimo ( $a$ ) e máximo ( $b$ ). Os parâmetros calculados são mostrados na Tabela 2.

Para o experimento, o DTS mediu a temperatura a cada hora por 3 dias consecutivos, com resolução espacial de um metro. As medidas do Power Donut foram amostradas nos mesmos instantes de tempo do DTS. As medições foram feitas à 2 km da subestação, próxima da estação meteorológica.

TABELA 2: Parâmetros de distribuição para Cascavel

Variável	Distribuição Parâmetros	
Temperature ( $T_a$ )	$\mu_T = 20,37$	$\sigma_T = 5,32$
Velocidade do Vento ( $v$ )	$\lambda = 4,68$	$k = 2,13$
Direção do Vento ( $\varphi$ )	$\mu_\varphi = 80,86$	$\sigma_\varphi = 50,73$
Radiação Solar ( $s$ )	$a = 0$	$b = 1136$

Os parâmetros do cabo fase utilizados na simulação foram os de um cabo Drake 795 CAA, enquanto os parâmetros do cabo OPGW foram de um cabo com 12,5 mm de diâmetro e 36 fibra óptica (FO).

## 7.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 7.1 Dados do DTS

Os dados do DTS que originaram as temperaturas do OPGW para o período de tempo escolhido podem ser vistos na Figura 4. A figura apresenta um gráfico das temperaturas do OPGW. As temperaturas estão representadas por cores. A distância ao longo da linha de transmissão é representada pelo eixo vertical enquanto o tempo é o eixo horizontal. As temperaturas de OPGW medidas também podem ser vistas como um ponto de tempo específico, como mostrado na Figura 5, bem como em uma distância específica da LT, como mostrado na Figura 6.

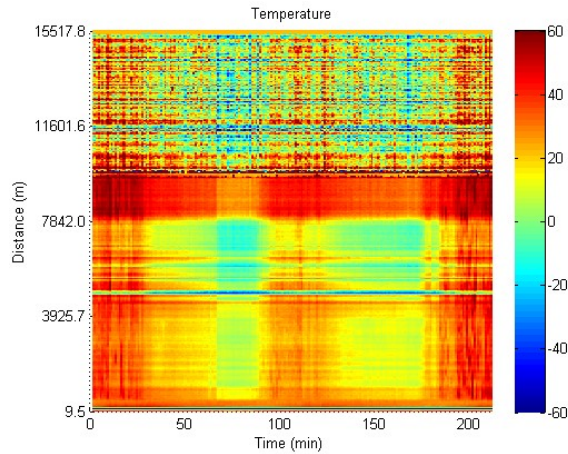


FIGURA 4: DTS data Graph

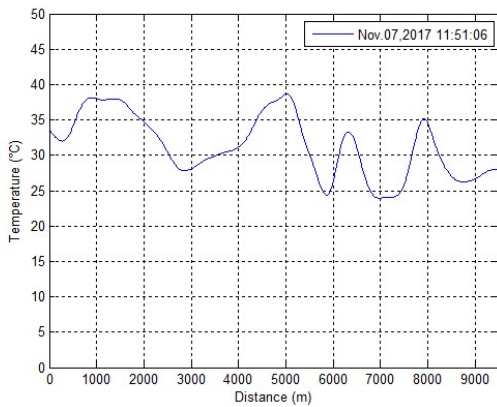


FIGURA 5: Temperature x Distance

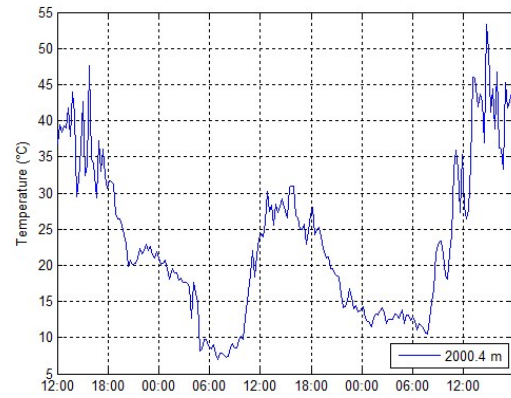


FIGURA 6: Temperature x Time



## 7.2 Simulação de Monte Carlo

Após o processamento dos dados do DTS utilizando a simulação de Monte Carlo, os resultados mostrados nas Figuras 7 e 8 são obtidos. A Figura 7 mostra o valor médio estimado da temperatura do cabo fase e também o desvio padrão. A Figura 8 compara o valor médio estimado da temperatura do cabo fase com a temperatura real medida adquirida pelo Power Donut. A temperatura do cabo medida não é contínua devido a falhas de medição. Ainda assim, é possível verificar que o valor estimado (linha azul) está correlacionado com o valor medido (linha escura). O desvio médio quadrático total (RMSD) da temperatura medida no período analisado foi de 6,3 °C.

A Figura 8 também mostra a temperatura ambiente e a temperatura calculada usando o Padrão IEEE [1]. É possível verificar que a temperatura calculada pelo Padrão IEEE é superestimada em relação à temperatura real do cabo. Ainda o método também apresenta maior RMSD em relação ao Método Monte Carlo. A comparação entre o RMSD de ambos os métodos de estimativa é apresentada na Tabela 3.

TABELA 3: Comparação entre métodos de cálculo de temperatura

Método de estimativa	Monte Carlo	IEEE Standard
RMSD (°C)	6.3	15.0

A correlação tende a ser aumentada no período diurno. Durante o período noturno, o valor estimado tende a ser inferior ao valor medido. A baixa correlação no período noturno ocorre pois durante esse período uma das principais fontes de aquecimento do cabo está ausente (fonte solar), contudo, o período mais crítico para a linha é o diurno, quando a correlação é maior.

Outra forma possível para se melhorar a precisão da estimativa é incluir o efeito de aquecimento no cabo OPGW causado pela corrente induzida, o que não foi considerado neste estudo.

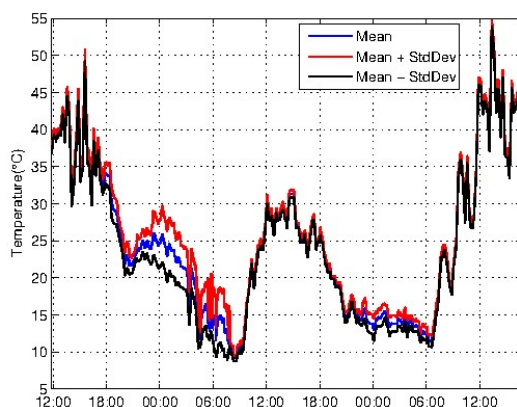


FIGURA 7: Resultados de Monte Carlo

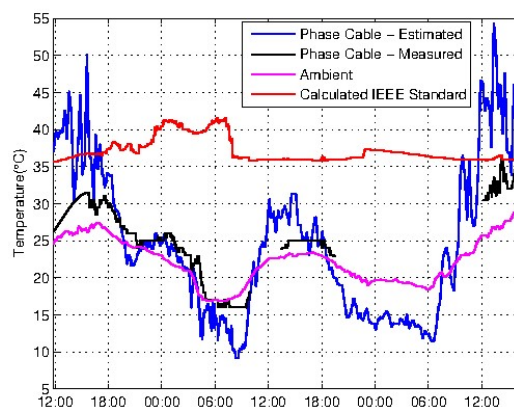


FIGURA 8: Resultados de Monte Carlo

## 8.0 CONCLUSÕES

Este artigo apresenta uma metodologia para se estimar a temperatura do cabo fase de uma linha de transmissão aérea empregando-se sensores de temperatura distribuídos utilizando o cabo OPGW da mesma. Através da reflectometria óptica no domínio do tempo, é possível medir a temperatura do cabo OPGW de uma LT ao longo de seu comprimento. Esta medida é então usada para se estimar as condições climáticas que poderiam ter gerado tal temperatura, a partir da análise do equilíbrio térmico do cabo. Esta estimativa é feita por uma abordagem de Monte Carlo. As possíveis condições meteorológicas são usadas para se calcular a temperatura do cabo fase dada a corrente real neste cabo e também suas propriedades físicas. O resultado é a temperatura em tempo real do cabo fase dentro de um intervalo de confiança.

Esse método foi testado e implementado com um sistema de monitoramento instalado em uma linha de transmissão localizada em uma cidade do sul do Brasil. Os resultados mostraram que a temperatura estimada está altamente correlacionada com a temperatura medida. Este método pode ser usado para se verificar, em tempo real, a capacidade de uma LT e compará-la ao seu limite de projeto, permitindo assim melhor uso de suas capacidades e, ao mesmo tempo, garantir a estabilidade e a segurança do sistema.

Além disso, a correlação aumentou no período diurno e durante o período noturno o valor estimado tende a ser inferior ao valor medido devido à ausência da fonte solar. Essa característica, na verdade, não é uma limitação pois a linha apresenta maior risco térmico no período diurno. Ainda assim, é possível aumentar a correlação, incluindo o efeito do aquecimento do cabo OPGW por corrente induzida.



## 9.0 REFERÊNCIAS

- [1] Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society, *IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors*, IEEE std.738-1993,1993.
- [2] J. Rodriguez and C.M. Frank, *Dynamic Line Rating of Overhead Transmission Lines under Natural Convective Cooling*, PowerTech, IEEE Eindhoven,pp. 1-5, 2005.
- [3] S. Uski, *Estimation method for dynamic line rating potential and economic benefits*, Electrical Power and Energy Systems (65), pp 76–82,2015.
- [4] D. Douglass, et al, *Real-Time Overhead Transmission Line Monitoring for Dynamic Rating*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 31, no. 3, pp. 921-927, June 2016.
- [5] ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas, *Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica*. 1985
- [6] CIGRE, The thermal behaviour of overhead conductors. CIGRE Technical Brochure, Work Group 12, 2002.
- [7] J.S.A. Carneiro and L. Ferrarini, *A probabilistic protection against thermal overloads of transmission lines*, Electric Power Systems Research (81), pp 1874– 1880, 2011.
- [8] D. L. Alvarez, et al, *An approach to dynamic line rating state estimation at thermal steady state using direct and indirect measurements*. Electric Power Systems Research, 2017.
- [9] T.O Seppa, *Increasing Transmission Capacity by Real Time Monitoring*, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2002.
- [10] J.B. Rawlings, *Tutorial overview of model predictive control*, IEEE Control Systems, Volume 20, Issue 3, Jun 2000.
- [11] J.S.A. Carneiro and L. Ferrarini, *Preventing Thermal Overloads in Transmission Circuits via Model Predictive Control*, IEE Transactions on Control Systems Technology, vol 18, no 6, 2010.
- [12] B. Otomega, et al, *Model Predictive Control to Alleviate Thermal Overloads*, IEEE Transactions on Power Systems, Volume 22, Issue 3, Aug 2007.
- [13] K. Thyagarajan; Ajoy Ghatak, "Optical Fiber Sensors," in *Fiber Optic Essentials*, Wiley-IEEE Press, 2007, pp.344-, doi: 10.1002/9780470152560.ch14
- [14] I. Hurezeanu, et al, *Temperature Control and Monitoring System for Power Transformer Windings Using Fiber Optic Sensors*, International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering, 2016.
- [15] Y. Ding, et al, *Low-Cost Fiber-Optic Temperature Measurement System for High-Voltage Electrical Power Equipment*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, volume 59,no. 4, 2010.
- [16] T. Wang and C. Luo, *Fiber-optic Semiconductor Absorption Temperature Sensor for Electrical Power System Applications*, Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2004.
- [17] Z. Wang, et al, *To-wards ultra-long-distance distributed fiber-optic sensing*, Optical Fiber Sensors Conference,pp. 1-4, 2017.
- [18] A. Signorini, et al, *40 km long-range Raman-based distributed temperature sensor with meter-scale spatial resolution*, Optical Fiber Communication (OFC), 2010.
- [19] T. Horiguchi, et al, *Development of a Distributed Sensing Technique Using Brillouin Scattering*, Journal of Lightwave Technology, 1995.
- [20] J. Bevan, *Design, development and installation of an optical phase conductor on 33kV wood pole line*, Power Engineering Journal, 1995.
- [21] J. Luo, et al, *Development of Optical Fiber Sensors Based on Brillouin Scattering and FBG for On-Line Monitoring in Overhead Transmission Lines*, Journal off Lightwave Tecnology, volume 31, no. 10, 2013.

## DADOS BIOGRÁFICOS



Rafael Martins possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, com Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais e Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Paraná - UFPR. Atuou como Professor de Graduação e Pós Graduação em Engenharia, Pesquisador de Sistemas Elétricos, Engenheiro de Planejamento do Sistema Interligado Nacional, e Engenheiro de Projetos de Subestações. Atualmente é Gerente do Departamento de Engenharia de Linhas de Transmissão da Companhia Paranaense de Energia - COPEL.

(2) MAURO JOSÉ BUBNIAK é Engenheiro Eletricista pela UTFPR, possui especialização em Planejamento, Operação e Comercialização na Indústria de Energia Elétrica pela UFPR. Atualmente é superintendente de Estudos e Projetos de Engenharia da Copel Geração e Transmissão S.A. Atuou durante 7 anos com superintendente da Diretoria de Desenvolvimento de Negócios. Foi gerente da Divisão de Construção de Linhas de



Transmissão, por 8 anos (2007-2014). Atuou ainda como Projetista e Fiscal de Obras do Departamento de Engenharia de Linhas de Transmissão por 18 anos, (1988-2007). Atua como representante da Copel GeT na Comissão Técnica do SNPTEE do CIGRÉ Brasil.

(3) LUIZ FELIPE RIBEIRO BARROZO TOLEDO 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) e doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais pela Universidade Federal do Paraná (2018). Atualmente é pesquisador no Instituto Lactec. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Simulação de Transitórios, Medição, Controle e Proteção de Sistemas Elétricos de Potência e desenvolvimento de equipamentos de alta tensão.