



Grupo de Estudo de Linhas de Transmissão-GLT

ESTIMAÇÃO DE ESTADOS E ANÁLISE DE ERROS GROSSEIROS APLICADOS A SISTEMAS DE MONITORAMENTO DA AMPACIDADE EM TEMPO REAL

SAMIR WALKER FERNANDES(1-2); DIEGO ISSICABA(1-2); MAURO AUGUSTO DA ROSA(1-2); CLAUDOMIRO DE SOUZA DE SALES JUNIOR(2-3); REGINALDO CORDEIRO DOS SANTOS FILHO(2-3); UFSC(1); INESC P&D Brasil(2); UFPA(3);

RESUMO

Sistemas de monitoramento da ampacidade em tempo real vêm sendo aplicados para a obtenção de informações acerca da real condição de operação de linhas de transmissão. Todavia, sabe-se que dados provenientes desses são suscetíveis a erros grosseiros causados por sensores defeituosos, problemas de calibração e até mesmo adulterações maliciosas. Neste contexto, este artigo apresenta o desenvolvimento de uma metodologia capaz de identificar medidas inconsistentes através da utilização dos procedimentos de estimação de estados e análise de erros grosseiros. Simulações numéricas demonstram a eficácia da abordagem proposta bem como seu impacto em sistemas de monitoramento da ampacidade em tempo real.

PALAVRAS-CHAVE

Estimação de estados, Ampacidade em tempo real, Redes de transmissão

1.0 - INTRODUÇÃO

Sistemas de transmissão são normalmente limitados pela capacidade de suas linhas de transmissão (LTs), estas podem ter sua capacidade definida por sua potência natural, limites de quedas de tensão, estabilidade e comumente pela temperatura de operação de seus condutores. As redes de transmissão podem operar sob condições normais e de emergência, sendo seus limites definidos pela ampacidade de suas LTs. A ampacidade de um condutor corresponde à máxima corrente que pode fluir através deste à determinada temperatura máxima de operação, sem que ocorram danos ao condutor ou violações nos critérios de segurança definidos em normas.

A temperatura de um condutor de uma LT aérea depende basicamente da corrente que flui através deste e das condições ambientais do local no qual a LT se encontra, como por exemplo temperatura ambiente, radiação solar, velocidade e direção de vento. IEEE e CIGRÉ disponibilizam diretrizes para a modelagem e o cálculo de ampacidade do condutor considerando-se seu comportamento térmico, tanto para regime permanente térmico quanto dinâmico e transitório (1,2). Na determinação da ampacidade em regime permanente considera-se que o condutor encontra-se em equilíbrio térmico, ou seja, que seus ganhos de calor são iguais às suas perdas de calor. Enquanto que para a ampacidade em regime dinâmico, também conhecida como ampacidade em tempo real ou *dynamic line rating* (DLR), considera-se que o condutor não encontra-se em equilíbrio térmico mas sim em estado de mudança contínua. Por fim, a ampacidade transitória é definida para eventos como, por exemplo, curto circuitos, onde assume-se uma condição adiabática, ou seja, em que não há troca de calor com o exterior.

Sistemas de monitoramento da ampacidade em tempo real, ou sistemas DLR, utilizam a medição de dados ambientais *in loco*. Além disso, também podem englobar o monitoramento de diversas outras grandezas, às quais auxiliam na determinação da real condição de operação da LT, tais como tração mecânica, flecha do condutor, distância condutor solo, vibração do condutor, campo eletromagnético, dentre outras. Haja vista que tais dados são obtidos *in loco*, sistemas de comunicação são necessários para enviá-los até o operador de modo a serem utilizados em sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*).

Sabe-se que, informações provenientes de sensores são suscetíveis à erros devido a própria sensibilidade e precisão desses, bem como à erros grosseiros (EGs) causados por problemas de comunicação, calibração ou até mesmo adulterações maliciosas. Dessa forma, os resultados apresentados por sistemas DLR podem ser comprometidos, o que pode acarretar em mau funcionamento do sistema, depreciação do ativo e até *blackouts* devido a uma desconexão desnecessária de uma importante LT. Assim, apresenta-se neste artigo uma abordagem para aumentar a confiabilidade e robustez de sistemas DLR que baseiam-se no monitoramento das condições ambientais e da tração mecânica no isolador de ancoragem, como no sistema desenvolvido no projeto TECCON II (Tecnologia de sensores em fibra ótica para supervisão, controle e proteção de sistemas de energia elétrica).

No projeto TECCON II vislumbrou-se a possibilidade de monitoramento de variáveis correspondentes a condições operativas de LTs através do processamento de medidas *in loco*. Neste contexto, foi proposto o desenvolvimento de uma metodologia composta de um estimador de estados, com análise de erros grosseiros, capaz de relacionar as condições mecânicas, elétricas e térmicas às quais as LTs são submetidas. O método da matriz aumentada de Hachtel é aplicado no processo de estimação de estados enquanto que multiplicadores de Lagrange normalizados e testes de colinearidade são utilizados na etapa de análise de erros grosseiros.

Neste artigo apresentam-se uma breve revisão sobre o sistema TECCON II e alguns similares, bem como dos conceitos necessários ao entendimento da abordagem proposta referentes aos modelos mecânico e térmico e aos procedimentos de estimação de estados e análise de erros grosseiros bem como sua implementação computacional. Por fim, são apresentados os resultados obtidos através da aplicação da abordagem proposta para o sistema DLR desenvolvido a nível de cabeça de série no projeto TECCON II, seguidos das conclusões.

2.0 - SISTEMAS DE MONITORAMENTO DA AMPACIDADE EM TEMPO REAL

Com o intuito de desenvolver soluções para a área de engenharia de controle e monitoramento de LTs, criou-se o projeto TECCON II, um projeto de pesquisa executado pelo INESC P&D Brasil em colaboração com oito universidades brasileiras, e enquadrado no programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Transmissora Brasileira de Energia (TBE), no qual visa-se aumentar a eficiência, confiabilidade e segurança de LTs utilizando sistemas sensores baseados em fibra ótica. No projeto TECCON II foi realizado o desenvolvimento, a nível de cabeça de série, de um isolador polimérico com classe de isolamento de 230 kV instrumentalizado com sensores em fibra ótica para medição de tração, corrente e temperatura do condutor, juntamente com um sistema supervisor com interface *web*. Um esquemático da solução desenvolvida é apresentado na Figura 1 (3).

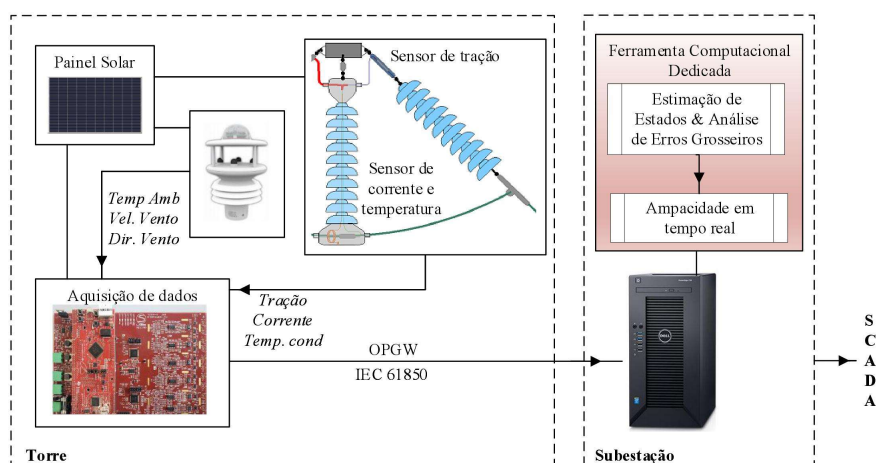


FIGURA 1 – Sistema TECCON II

A Figura 1 ilustra a estrutura da solução desenvolvida, esta é composta por painéis solares, terminal de aquisição de dados, isoladores poliméricos de passagem e suspensão, sensores ópticos para medição de tração mecânica, corrente elétrica e temperatura do condutor, estação meteorológica para medição das condições ambientais de temperatura ambiente, velocidade e direção de vento e de um servidor. Os dados obtidos *in loco*

são enviados via cabo OPGW (*Optical Ground Wire*) ao servidor responsável por realizar as devidas análises e disponibilizar informações relevantes ao sistema SCADA.

A ferramenta computacional desenvolvida, presente em um servidor, trata os pacotes oriundos da placa de aquisição de dados e disponibiliza (seja em tempo real ou através de um histórico dos dados) as informações de interesse por meio de uma interface *web*. O protocolo de comunicação utilizado entre a placa de aquisição de dados e o servidor é o *Sampled Values* (norma IEC 61850) que permite receber um fluxo de alta velocidade de dados codificados em quadros Ethernet. Após o recebimento de um pacote *sampled value*, um serviço rodando no servidor se encarrega de executar todas as tratativas de desempacotamento e recuperação do *payload* contendo informações de temperatura do condutor, temperatura ambiente, velocidade do vento, direção do vento, corrente e tração. Estas medições são persistidas em um banco de dados para que fiquem disponíveis na aplicação *web* para análise em tempo real, ou posterior, sob a condição de consultas pré-determinadas. Um conjunto de páginas *web* foram desenvolvidas tanto para aplicar o estimador de estados e análise de erros grosseiros, quanto para analisar em tempo real as medições de interesse.

3.0 - ABORDAGEM PROPOSTA

3.1 Modelo mecânico da linha de transmissão

Nos projetos mecânicos de uma LT procura-se determinar todos os esforços sobre seus elementos. Uma vez que estão expostas às condições ambientais e suas variações, as LTs têm seu estado operativo influenciado por variações nessas condições, como por exemplo, a ação de ventos atmosféricos e alterações em temperatura ambiente e radiação solar. A influência de tais variações pode ser notada na tração mecânica do condutor. Elevações na radiação solar e temperatura ambiente provocam uma redução nas trações, por exemplo. De modo a modelar o comportamento mecânico do condutor pode-se utilizar a difundida equação empírica de mudança de estado apresentada a seguir, que relaciona a tração mecânica à temperatura de operação do condutor.

$$T_{02}^3 + T_{02}^2 \left[\frac{ES p_1^2 A^2}{24 T_{01}^2} + ES \alpha_1 (\Theta_2 - \Theta_1) - T_{01} \right] = \frac{ES p_2^2 A^2}{24} \quad (1)$$

Onde E é o módulo de elasticidade do condutor (kgf/mm^2), S denota a área do condutor (mm^2), A é o tamanho do vão (m), α_1 é o coeficiente de dilatação do condutor ($1/^\circ\text{C}$), Θ , p e T_0 representam a temperatura do condutor ($^\circ\text{C}$), seu peso (kgf/m) e tração mecânica horizontal (kgf), respectivamente. Os subscritos 1 e 2 representam o estado inicial e final, respectivamente.

A equação (1) modela o comportamento da tração e temperatura para um vão único. Todavia, pode-se utilizar o conceito de vão regulador para sua aplicação para a análise de uma seção de tensionamento. O vão regulador corresponde a um vão fictício, isolado, equivalente aos vãos da seção de tensionamento. O valor do vão regulador A_r é dado pela Equação (2), onde a_n é o comprimento do vão n contido na seção. O cálculo de A_r é trabalhoso e está vinculado à distribuição das estruturas sobre os perfis da LT.

$$A_r = \sqrt{\frac{a_1^3 + a_2^3 + a_3^3 + \dots + a_n^3}{a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n}} \quad (2)$$

Por fim, substituindo A por A_r em (1), Θ_2 torna-se equivalente à temperatura média do condutor ao longo da seção, T_c . A partir de medições de tração no isolador de ancoragem, da utilização de dados meteorológicos e do conhecimento do estado inicial, pode-se resolver a equação anterior para T_c . Além disso, através do monitoramento da tração mecânica, pode-se estimar a flecha do condutor e conseqüentemente a distância de segurança condutor-solo. Demais detalhes sobre o modelo mecânico podem ser encontrados em (3).

3.2 Modelo térmico da linha de transmissão

Conforme disposto em (2), para os estudos sobre o comportamento térmico do condutor considera-se a modelagem de aspectos de transferência de calor e balanço térmico. Dessa forma, destaca-se que um condutor ganha calor por efeito Joule, P_J (W/m), e por radiação solar, P_S (W/m), e perde calor por convecção, P_C (W/m), e radiação, P_r (W/m). O ganho de calor por efeito Joule corresponde à passagem de corrente elétrica pelo condutor I (A) e pode ser calculado pela equação (3), onde R_{ac} é a resistência do condutor (Ω/m). Já o ganho de calor por radiação solar é proporcional à capacidade de absorção da superfície do condutor, α_s , à intensidade de radiação global, I_T (W/m²) e ao diâmetro do condutor, D (m), como apresentado na equação (4).

$$P_J = R_{ac} I^2 \quad (3)$$

$$P_S = \alpha_s I_T D \quad (4)$$

A perda de calor por convecção utilizada nos cálculos do comportamento térmico do condutor deve ser a maior dentre a forçada e a natural, sendo a diferença entre estas expressa em função do número de Nusselt, Nu , como segue.

$$P_c = \max(P_c^{for}, P_c^{nat}) = \pi \lambda_f (T_c - T_a) Nu \quad (5)$$

onde T_c e T_a são a temperatura na superfície do condutor e do ar ($^{\circ}C$), respectivamente, λ_f é a condutividade térmica do ar (W/K.m) na temperatura da película de ar em contato com a superfície, T_f ($^{\circ}C$), dada por $T_f = 0,5(T_c + T_a)$.

Por fim, o cálculo da perda de calor por radiação pode ser realizado através da equação (6), onde σ_B é a constante de Stefan-Boltzmann e ϵ_s é a emissividade da superfície do condutor. A emissividade do condutor varia com seu envelhecimento e pode ser determinada por medições de amostras. Todavia, é recomendado o uso de valores entre 0,8 - 0,9 para condutores expostos a intempéries.

$$P_r = \pi D \sigma_B \epsilon_s \left[(T_c + 273)^4 - (T_a + 273)^4 \right] \quad (6)$$

Para a condição em regime permanente térmico considera-se que o condutor encontra-se em equilíbrio térmico, ou seja, seus ganhos de calor são iguais às suas perdas de calor, como segue:

$$P_J + P_S = P_C + P_r \quad (7)$$

Uma vez que tanto as condições ambientais quanto a carga variam com o tempo, o condutor nem sempre encontra-se em equilíbrio térmico, mas sim em estado de mudança contínua, no qual o ganho de calor não é exatamente igual à perda de calor. Tal comportamento pode ser expresso pela seguinte equação.

$$mc \frac{dT_{avg}}{dt} = P_J + P_S - P_C - P_r \quad (8)$$

onde, m é a massa do condutor por unidade de comprimento (kg/m) e c denota a capacidade térmica específica do condutor (J/kgK). Considerando-se intervalos de tempo suficientemente pequenos em relação à constante de tempo térmica do condutor, pode-se solucionar a equação (8) para se avaliar a temperatura do condutor em tempo real e então determinar a ampacidade em tempo real, ou seja, a máxima corrente permitida que pode

percorrer o condutor de modo que a temperatura deste alcance seu valor máximo em um determinado tempo futuro.

3.3 Estimação de estados e análise de erros grosseiros

Estimadores de estado podem ser aplicados para o processamento de dados em tempo real de telemedidas redundantes. Além disso também podem processar pseudomedidas e informações *a priori* relevantes sobre o estado do sistema. O problema de estimação de estados pode ser definido por um problema de otimização no qual procura-se encontrar o vetor de estados estimados \hat{x} que minimiza a soma ponderada dos quadrados dos resíduos de medição. Considerando-se a inclusão de informações *a priori* o estimador pode ser formulado como:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar} \quad J(\hat{x}) &= \frac{1}{2} r^T R^{-1} r + \frac{1}{2} (\hat{x} - \hat{x})^T P^{-1} (\hat{x} - \hat{x}) & (9) \\ \text{Sujeito à} \quad & r = z - h(\hat{x}) \end{aligned}$$

onde z corresponde ao vetor de medidas, r é o vetor de resíduos de medição, R denota a matriz de covariância, P é a matriz de covariância das informações *a priori* \hat{x} e $h(\hat{x})$ representa o vetor que contém as funções que relacionam as medidas e estados. As matrizes R e P são diagonais devido a não correlação das informações, além disso, considera-se que as informações *a priori* são provenientes do processo de estimação de estados imediatamente anterior (4,5).

Na concepção dos estimadores de estados, considera-se que as seguintes medidas são obtidas pelo sistema DLR: temperatura do condutor, temperatura ambiente, velocidade de vento, direção de vento, tração mecânica e corrente elétrica. Tais grandezas compõem, respectivamente, o vetor de medidas descrito na Equação (10) sendo as quatro primeiras componentes do vetor de estados disposto na Equação (11).

$$z = [T_c \ T_a \ V \ w_{dir} \ T_{02} \ I]^T \quad (10)$$

$$\hat{x} = [\hat{T}_c \ \hat{T}_a \ \hat{V} \ \hat{w}_{dir}]^T \quad (11)$$

O símbolo \hat{u} indica que a variável u ($\hat{T}_c, \hat{T}_a, \hat{V}, \hat{w}_{dir}$) foi estimada. Ademais, o vetor $h(\hat{x})$ pode ser expresso como segue.

$$h(\hat{x}) = [h_1(\hat{x}) \ h_2(\hat{x}) \ h_3(\hat{x}) \ h_4(\hat{x}) \ h_5(\hat{x}) \ h_6(\hat{x})]^T \quad (12)$$

onde, $h_1(\hat{x}) = \hat{T}_c$, $h_2(\hat{x}) = \hat{T}_a$, $h_3(\hat{x}) = \hat{V}$, $h_4(\hat{x}) = \hat{w}_{dir}$ e $h_5(\hat{x})$ é modelada através da solução da Equação (1) para T_{02} por meio do uso da fórmula de Tartaglia-Ferro-Cardano. Por fim, a função em $h_6(\hat{x})$ é obtida rearranjando-se a Equação (7) através da substituição de P_J pela Equação (3) e isolando-se a corrente como segue.

$$h_6(\hat{x}) = I = \sqrt{\frac{P_c + P_r - P_s}{R_{ac}}} \quad (13)$$

Como disposto em (6), o problema dado pela Equação (9) pode ser resolvido através do método da matriz aumentada de Hachtel, sendo representado matricialmente como segue.

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & H^T(\hat{x}^i) \\ H(\hat{x}^i) & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \hat{x} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P^{-1}(\dot{x} - \hat{x}^i) \\ z - h(\hat{x}^i) \end{bmatrix} \quad (14)$$

onde $H^T(\hat{x}^i)$ é o Jacobiano de $h(\hat{x}^i)$ e λ é o vetor de multiplicadores de Lagrange. Por fim, para uma dada iteração i a solução consiste em resolver o sistema linear apresentado acima. A partir da solução obtida, pode-se atualizar o vetor de estados estimados da seguinte forma:

$$\hat{x}^{i+1} = \hat{x}^i + \Delta x \quad (15)$$

O processo de estimação de estados é concluído assim que $\|\Delta x\|$ torna-se inferior à tolerância considerada. Considera-se que os erros de medição são variáveis aleatórias Gaussianas, então, os multiplicadores de Lagrange associados a estas medições também são variáveis aleatórias Gaussianas. Como apresentado em (4), o multiplicador de Lagrange normalizado relativo à informação i pode ser calculado por:

$$\lambda_i^N = \frac{\lambda_i}{\sqrt{W(i, i)}} \quad (16)$$

onde W representa a matriz de covariância dos multiplicadores de Lagrange normalizados, que pode ser obtida através da inversa da matriz aumentada de Hachtel, como segue (4,5).

$$\begin{bmatrix} -\Sigma & C^T \\ C & W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P^{-1} & H^T(\hat{x}^i) \\ H(\hat{x}^i) & R \end{bmatrix}^{-1} \quad (17)$$

Por serem variáveis aleatórias normais, com média nula e desvio padrão unitário, existe uma probabilidade de 99% de os valores de λ_i^N se encontrarem entre -3σ e 3σ (7). Assim, considerando-se uma probabilidade de falso alarme de 1%, caso o máximo valor absoluto dos multiplicadores de Lagrange normalizados, λ_{max}^N , seja maior ou igual a um valor limiar λ_l , equivalente a três desvios-padrões, EG são detectados.

Para a análise de erros múltiplos, a matriz de covariância W é particionada em colunas contendo as informações suspeitas W_S e confiáveis W_T , como:

$$W = [W_S \ W_T] \quad (18)$$

Em tal formulação assume-se que as medidas contidas em T são perfeitas e que todas as restrições em T modelam corretamente o problema. Dessa forma, uma vez que os multiplicadores de Lagrange estão relacionados aos erros nas medidas e restrições, ϵ_S , λ pode ser calculado por:

$$\lambda = W_S \epsilon_S \quad (19)$$

A partir da equação acima assume-se que todas as medidas afetadas por EG pertencem ao conjunto suspeito S e que o vetor de multiplicadores de Lagrange λ pertence ao espaço coluna de W_S . De modo a determinar a existência de EG no conjunto suspeito, a colinearidade entre λ e o espaço-coluna W pode ser testada através do cálculo do cosseno do ângulo entre eles. Todavia, por razões computacionais tal teste é realizado entre $R^{1/2} \lambda$ e $R^{1/2} W_S$, como segue (5).

$$\cos \delta = \sqrt{\frac{\lambda^T R W_\delta (W_\delta^T R W_\delta) W_\delta^T R \lambda}{\lambda^T R \lambda}} \quad (20)$$

Caso $\cos \delta$ seja próximo de um, dentro de uma certa tolerância, então todas as informações errôneas estão incluídas no conjunto suspeito S . Caso contrário, nem todas as informações errôneas estão presentes em S . Em síntese, para a implementação da etapa de análise de erros grosseiros foi desenvolvido o seguinte algoritmo.

1. Calcule $\lambda_i^N \forall i$ e defina o máximo multiplicador de Lagrange normalizado como $\lambda_{max}^N = \max \|\lambda_i^N\|, \forall i$
 - a) Caso $\lambda_{max}^N < \lambda_t$, não há EG no conjunto de medidas. Termine o algoritmo.
 - b) Caso $\lambda_{max}^N \geq \lambda_t$, as medidas podem estar contaminadas por EG. Dessa forma, inclua as medidas i às quais $\lambda_i^N \geq \lambda_t$ no conjunto suspeito S .
2. Calcule o cosseno inicial $\cos \delta_{ini}$ para o conjunto suspeito S . Armazene o conjunto suspeito em um vetor auxiliar S_{aux} .
3. Remova cada medida suspeita em S_{aux} e calcule $\cos \delta_i$.
 - a) Se $\cos \delta_i \geq 0,95 \cos \delta_{ini}$, a medida i não contém EG e deve ser removida de S .
 - b) Se $\cos \delta_i < 0,95 \cos \delta_{ini}$, a medida i contém EG e deve ser mantida em S e reincluída em S_{aux} .
4. Atualize a matriz de covariância R para as medidas contidas em S através da adição de um valor grande (i.e., 10^{12}) a sua variância inicial. A partir disso, a análise de EG é concluída e o processo de estimação de estados é reiniciado.

3.4 Implementação computacional

4.0 - RESULTADOS

Considera-se, para fins de estudo de caso, uma LT do Sistema de Transmissão Catarinense em 230 kV entre as subestações de Lages e Abdon Batista. Nesta LT serão instalados o isolador instrumentalizado e demais equipamentos do projeto TECCON II. Os parâmetros de projeto da LT, necessários aos modelos apresentados anteriormente, estão contidos na Tabela 1 (8).

Tabela 1 – Dados da LT do projeto TECCON II

Parâmetro	Valor	Unidade
Diâmetro do condutor	31,98	mm
Diâmetro de cada camada de alumínio	4,00	mm
Área total do condutor	603,22	mm ²
Resistência do condutor à 20°C	0,0514	Ω/km
Resistência do condutor à 75°C	0,064	Ω/km
Massa específica do condutor	1,868	kgf/m
Coefficiente de expansão termal	$2,2 \times 10^{-5}$	1/°C
Módulo de elasticidade do condutor	6628,1	kgf/mm ²
Tração mecânica de estado inicial	2570	Kgf
Emissividade	0,70	-

Coefficiente de absorvidade solar	0,90	-
Comprimento do vão regulador	300	m
Latitude	-28	°
Altitude	700	m
Azimute da linha	90	°
Nível de clareza	Limpo	-
Temperatura na condição inicial	18	°C
Calor específico do aço à 20°C	481	J/kg°C
Calor específico do alumínio à 20°C	897	J/kg°C
Coefficiente de temperatura do calor específico do aço	1.0×10^{-4}	1/°C
Coefficiente de temperatura do calor específico do alumínio	3.8×10^{-4}	1/°C
Massa específica do aço	0,5119	kg/m
Massa específica do alumínio	1,116	kg/m

De modo a se avaliar a metodologia desenvolvida foram simulados dados de corrente elétrica e condições ambientais no traçado da LT para o dia 10 de Junho de 2018 entre 12:00 – 13:00, conforme ilustrado na Figura 2. Além disso, considera-se que a precisão dos sensores de tração mecânica e corrente elétrica é de 0,50%, dos demais de 1% e que o condutor encontrava-se em equilíbrio térmico nos intervalos imediatamente anteriores ao meio dia sob as seguintes condições: corrente elétrica de 553,72 A, tração mecânica de 2406,62 kgf, temperatura ambiente de 18°C, velocidade de vento de 2 m/s a 90° (3).

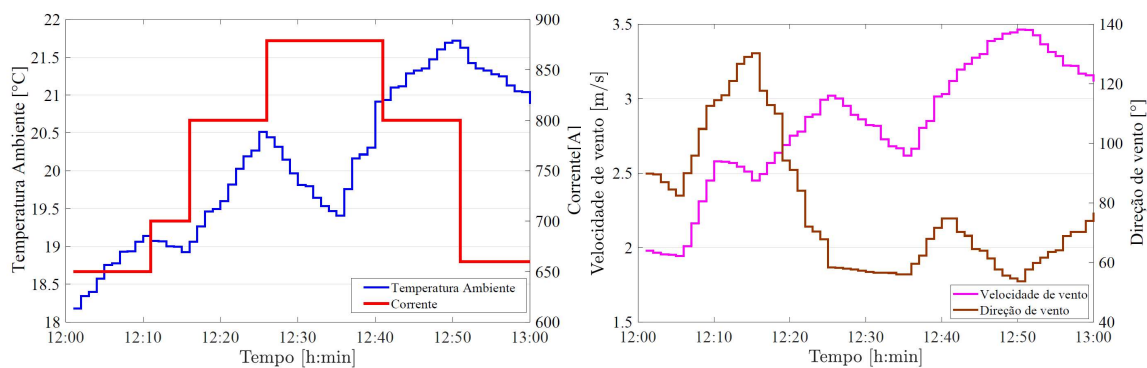


Figura 2 – Condições ambientais e corrente elétrica no período de análise

Visando analisar o impacto de EGs nas medidas processadas pelo sistema TECCON II considerou-se dois cenários de EGs simples nas medidas de temperatura ambiente e tração mecânica. Para o primeiro caso, a temperatura ambiente assume o valor 28°C ao invés de 18°C, enquanto que para a segunda condição a tração mecânica tem seu valor reduzido em 20%. Tais EGs foram propositalmente inseridos no seguinte vetor de medidas simuladas que inicialmente está afetado apenas pela precisão dos sensores.

$$z = [33,78118,0321,99690,1432405,596553,941]^T \quad (21)$$

Destaca-se que para o estudo de caso em questão determina-se o valor de DLR para uma máxima temperatura de operação do condutor de 65°C a ser alcançada em 20 minutos à frente. Ademais, como os resultados de DLR dependem fortemente das condições ambientais e da LT EGs nestas medidas podem comprometer os resultados obtidos tanto pela utilização do modelo térmico quanto do modelo de tração.

A Tabela 3 apresenta os resultados referentes à condição de regime permanente considerado o EG em T_a . Nota-se que o EG afeta o valor de T_c quando calculado através do modelo térmico, enquanto não impacta o valor de T_c obtido pelo modelo de tração. Em relação à abordagem proposta, inicialmente as medidas T_c , T_a e I são incluídas no conjunto suspeito S . Ao final do primeiro processo de solução de estimação de estados é análise de EGs obtém-se T_a como medida portadora de EG, uma vez que $\cos \delta_2 = 0,863$. Assim, após a atualização de R e reinicialização do processo de solução observa-se uma redução em J de 1839,8 para 0,114, o que indica

que os valores estimados são consistentes. Por fim, obtém-se o seguinte vetor de variáveis estimadas.

$$z = [33,79718, 0021,99690, 0032406, 7552,74]^T \quad (22)$$

Como pode ser observado, os valores dispostos acima são próximos aos valores apresentados na equação (21) na ausência de erros grosseiros. Apesar que o EG não afeta inicialmente a condição em regime permanente do modelo de tração, tal EG causa impacto no cálculo do DLR obtido por este no tempo à frente, como ilustrado na Figura 3.

Tabela 2 – Resultados para um erro grosseiro em T_a

Variável	Modelo		Proposto		
	Tração	Térmico	λ_i^{IV}	$\hat{c} \vee \lambda_{max}^{IV} \vee \hat{c} \geq \lambda_t?$	S
T_c (°C)	33,91	25,80	7,55	Sim	1
T_a (°C)	28,0	28,0	38,868	Sim	1
V (m/s)	1,996	1,996	-0,1603	Não	0
W_{dir} (°)	90,143	90,143	0,156	Não	0
T_{02} (kgf)	2405,6	2405,6	-1,946	Não	0
I (A)	553,94	553,94	26,522	Sim	1

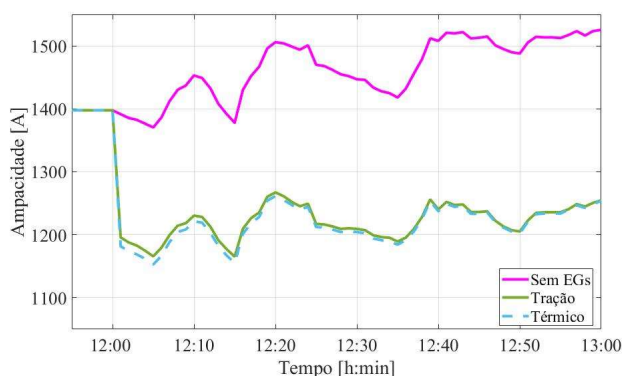


Figura 3 – DLRs na presença de EG em T_a

Para a segunda análise, o valor de T_{02} na equação (21) foi reduzido em 20%. A Tabela 2 apresenta os resultados bem como o impacto da inserção do EG nos modelos. Nota-se que um EG na tração afeta imediatamente o valor de T_c obtido pelo modelo de tração e não causa impacto nos resultados do modelo térmico. Ademais, na abordagem proposta inicialmente as medidas V e T_{02} são identificadas como suspeitas. Ao final do primeiro processo de solução T_{02} é identificada como inconsistente e sua variância é atualizada em R . Na iteração seguinte o valor de T_{02} é estimado conforme disposto na equação (23), o que acarreta em uma redução no valor de J de 1260,4 para 0,2563, o que denota novamente que os valores estimados são consistentes.

Tabela 2 – Resultados para um erro grosseiro em T_{02}

Tração	Térmico	Modelo	
		Proposto	S

Variável			λ_i^{IV}	$\hat{G} \vee \lambda_{max}^{IV} \vee \hat{G} \geq \lambda_t?$	S
T_c (°C)	102,83	33,80	-0,0313	Não	0
T_a (°C)	18,03	18,03	0,1541	Não	0
V (m/s)	1,996	1,996	7,6232	Sim	1
w_{dir} (°)	90,143	90,143	0,1565	Não	0
T_{02} (kgf)	1924,77	1924,77	-50,0874	Sim	1
I (A)	553,94	553,94	0,0647	Não	0

A Figura 4 ilustra o impacto do EG em T_{02} nos valores de DLR obtidos pelos modelos em análise. Observa-se que como tal EG não causa impacto no valor de T_c calculado pelo modelo térmico, os valores de DLR apresentados por este aproximam-se dos de DLR calculados na ausência de EGs. Todavia, como há impacto direto no modelo de tração e conseqüentemente no valor de T_c , os resultados apresentados por tal modelo são comprometidos.

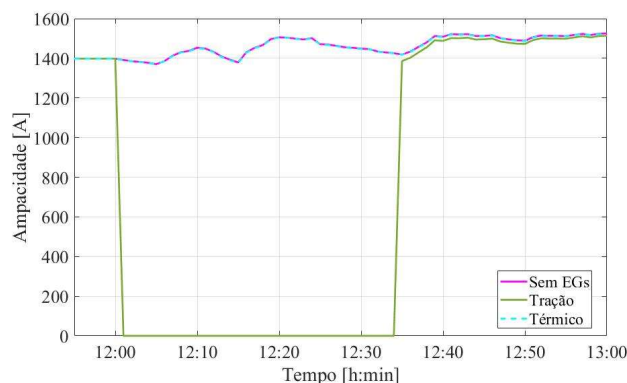


Figura 4 – DLRs na presença de EG em T_{02}

Em relação à aplicação do modelo proposto, nota-se que os EGs foram corretamente detectados, identificados, removidos e então substituídos por valores estimados. Ressalta-se que a identificação de EGs no conjunto de medidas processado permite uma ratificação dos valores de DLR obtidos e apresentados pelo sistema DLR. Além disso, a presença de EGs no conjunto de medidas pode indicar que os sensores estão com mal funcionamento, problemas de calibração ou foram adulterados, dessa forma o operador pode indicar a necessidade em enviar uma equipe de manutenção à campo para análise detalhada da situação.

5.0 - CONCLUSÕES

A aplicação de sistemas DLR permite os operadores a terem acesso a informações referentes à real condição de operação da LT. Todavia, sabe-se que medidas obtidas por sensores podem ser comprometidas pela presença de erros causados pela precisão dos sensores, sensibilidade, acurácia, mal funcionamento, problemas de calibração ou até mesmo adulterações maliciosas acarretando desde a depreciação dos equipamentos até *blackouts*. Dessa forma, este artigo introduziu uma abordagem para aumentar a confiabilidade e robustez de sistemas DLR que baseiam-se no monitoramento de condições ambientais, elétrica e mecânica da LT, tal como no sistema TECCON II.

A abordagem proposta envolve a aplicação dos conceitos e procedimentos de estimação de estados e análise de erros grosseiros em sistemas DLR. O método da matriz aumentada de Hatchel é utilizado para a determinação dos valores estimados das variáveis observadas, enquanto que multiplicadores de Lagrange normalizados e testes de colinearidade são aplicados nas etapas de detecção e identificação de medidas espúrias, respectivamente.

Através das simulações numéricas apresentadas pode-se observar o potencial da aplicação da abordagem proposta na avaliação dos resultados obtidos por sistemas DLR que monitoram as condições ambientais, elétrica e mecânica de LTs. Os EGs inseridos no conjunto de medidas foram corretamente detectados, identificados e as medidas espúrias substituídas por consistentes valores estimados, demonstrando assim a eficácia da utilização da abordagem proposta. Além disso, destaca-se que tal abordagem pode ser aplicada em sistemas que processam as mesmas medidas do sistema TECCON II e também pode ser estendida para outros sistemas DLR que determinam a ampacidade em tempo real a partir do modelo do CIGRÉ, até mesmo se a temperatura do condutor é obtida indiretamente por outra medida, como por exemplo flecha do condutor, distância condutor-solo ou vibração.

Trabalhos futuros irão explorar a aplicação e adequação da metodologia proposta para um estimador de estados voltado tanto às análises da condição em regime permanente térmico quanto dinâmico. Ademais, um estudo detalhado acerca da utilização do modelo mecânico em uma seção de tensionamento também será explorado, bem como a aplicação de equações de mudança de estado acopladas para a seção de tensionamento.

6.0 - AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve o suporte do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e do Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Pesquisa e Desenvolvimento Brasil (INESC P&D Brasil). Este trabalho foi desenvolvido no projeto TECCON II com as Transmissoras Brasileiras de Energia (TBE).

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) IEEE. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors. [S.l.: s.n.], 2013. 1{72 p. ISBN 9780738188874.
- (2) CIGRÉ. Guide for Selection of Weather Parameters for Bare Overhead Conductor Ratings. CIGRE, 2006.
- (3) FERNANDES, S. W. Estimação de Estados e Análise de Erros Grosseiros Aplicadas a Sistemas de Monitoramento de Ampacidade em Tempo Real.
- (4) CLEMENTS, K.; COSTA, A. Topology error identification using normalized Lagrange multipliers. IEEE Transactions on Power Systems, v. 13, n. 2, p. 347{353, 1998. ISSN 08858950.
- (5) LOURENÇO, E. Análise de Observabilidade e Identificação de Erros de Topologia na Estimação de Estados Generalizada, 2001.
- (6) GJELSVIK, A.; AAM, S.; HOLTEN, L. Hachtel's Augmented Matrix Method - A Rapid Method Improving Numerical Stability in Power System Static State Estimation. IEEE Power Engineering Review, PER-5, n. 11, p. 22-23, 1985. ISSN 02721724.
- (7) PAPOULIS, A. Probability, random variables, and statistic process. McGraw-Hill Book Com., NY, 1991.
- (8) MARTE ENGENHARIA. Projeto Básico Linha de Transmissão em 230 kV Barra Grande-Lages-Rio do Sul. [S.l.], 2006.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Samir Walker Fernandes possui Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2018) onde atuou junto ao INESC P&D Brasil no projeto TECCON II. Seus interesses de pesquisa são monitoramento em tempo real de linhas de transmissão, ampacidade em tempo real e estimação de estados.

Diego Issicaba possui Doutorado em Sistemas Sustentáveis de Energia (2013) pela Faculdade de Engenharia da



XXV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

3870
GLT/29

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

Universidade do Porto (Portugal), no âmbito do programa doutoral MIT Portugal, sob acolhimento do Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto (INESC Porto). Atualmente é professor do Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica da Universidade Federal de Santa Catarina, além disso, é pesquisador líder no INESC P&D Brasil. Seus interesses de pesquisa são smart grids, sistemas multi agentes, geração distribuída e sistemas de distribuição.

Mauro Augusto da Rosa possui Doutorado Europeu pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (2010), em Portugal, com estágio no Royal Institute of Technology (KTH Suécia). Atualmente, é professor e pesquisador da Universidade Federal de Santa Catarina. Desenvolve suas atividades de pesquisa nas áreas de Planejamento e Operação de Sistemas Elétricos considerando fontes de energia renováveis, Inteligência Artificial (Agentes Inteligentes, Computação Evolucionária) aplicada a Confiabilidade de Sistemas de Potência.

Reginaldo Cordeiro dos Santos Filho possui Doutorado em Ciência da Computação pela Universidade Federal do Pará (2019). Seus interesses de pesquisa envolvem machine learning, metaheurísticas e monitoramento estrutural da saúde.

Claudio de Souza de Sales Junior possui Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2009). Atualmente é professor Associado I da Faculdade de Computação dos Instituto de Ciência Exatas e Naturais da Universidade Federal do Pará. Seus interesses de pesquisa envolvem machine learning para sistemas de identificação com aplicações em rede de banda larga baseada em cobre e monitoramento estrutural da saúde.