



XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

FI/GLT/14
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO- GLT

CÁLCULO DA TEMPERATURA INTERNA E EXTERNA DE CABOS POR MEIO DE FILTROS DE PARTÍCULAS

Farith M. Absi Salas(*) **Helcio R. B. Orlando** **Luis A. M. C. Domingues** **Carlos Ruy N. Barbosa**
CEPEL **UFRJ** **CEPEL** **CEPEL**

RESUMO

O presente IT trata da estimativa da temperatura interna e externa de cabos usados em linhas de transmissão. Isto é realizado por meio de um método estatístico baseado na Inferência Bayesiana. Esta metodologia utiliza a estimação de estado por meio de um filtro de partículas, o qual combina informações *a priori* com medições de temperatura na superfície externa obtidas com uma câmera de termografia. Como resultado, a temperatura em toda a seção transversal é estimada e comparada com medições experimentais, obtidas com termopares inseridos entre as camadas do condutor de um cabo ACSR. Uma das inovações desta metodologia consiste na obtenção do campo de temperatura considerando tanto as incertezas do modelo térmico ou problema direto, como das medições experimentais usadas dentro do filtro. Os resultados são promissores mostrando uma excelente concordância com as medições experimentais, encorajando a aplicação deste método nas LT's e possibilitando o monitoramento da temperatura interna e externa de cabos em tempo real.

PALAVRAS-CHAVE

Temperatura, Cabos de LT's, Estatística Bayesiana, Filtro de partículas SIR, Medições Experimentais

1.0 - INTRODUÇÃO

No passado, a caracterização térmica dos cabos não era uma tarefa fácil devido às limitações técnicas e tecnológicas do setor, optando-se por utilizar modelos conservadores e limitando, na grande maioria dos casos, a capacidade de transmissão das linhas. Por outro lado, com o advento de novas tecnologias de medição e processamento de dados, aliadas a metodologias matemáticas mais robustas, esta caracterização pode ser mais acurada, obtendo-se conhecimentos mais profundos e precisos do comportamento térmico das linhas. Na atualidade, o crescente consumo de energia elétrica traz a tona vários desafios para o setor elétrico, entre os quais se situa o aumento da capacidade de transmissão das linhas. Tais desafios têm motivado novos estudos com o objetivo de implementar tecnologias inovadoras que permitam aumentar a capacidade de transmissão de forma mais eficiente, isto é, diminuindo custos se sujeitando às normas de confiabilidade e segurança impostos neste processo. Neste contexto, o estudo do comportamento térmico dos cabos das LT's torna-se relevante desde que a capacidade de transmissão de energia elétrica por meio de cabos esteja ligada, basicamente, com a sua temperatura de operação.

Em geral, medições da temperatura interna de cabos mostram gradientes entre as camadas. Esta diferença de temperatura radial é uma função do valor da corrente aplicada, da condutividade térmica radial efetiva e da resistência elétrica e não depende da velocidade do vento, temperatura ambiente, irradiação térmica ou a temperatura da superfície do cabo (1), (2). Em condições normais de operação, os gradientes internos de temperatura são pequenos e muitas vezes podem ser negligenciados. Porém, para condições adversas de operação estes gradientes podem atingir valores significativos (2), deteriorando as propriedades mecânicas dos

(*)Av. Horacio Macedo, n° 354 – sala J 123 - Bloco J – CEP 21.941-911 Rio de Janeiro, RJ, – Brasil
Tel: (+55 21) 2598-6423 – Fax: (+55 21) 2598-6286 – Email: fabsi@cepel.br

cabos, tais como: resistência à tração, ruptura por fadiga, fluência ou deformação permanente. Quando altos valores de corrente são aplicados, a temperatura do núcleo do cabo é maior que a temperatura na superfície externa, provocando uma dilatação maior, aumentando a flecha e diminuindo as distâncias de segurança. Entre outros problemas oriundos dos gradientes internos de temperatura dos cabos, pode-se mencionar também o desencordamento associado à expansão térmica, ou também denominado “engaiolamento” do cabo. Cabe ressaltar que os problemas mencionados acima afetam diretamente a capacidade de transmissão e o tempo de vida útil dos cabos.

O presente trabalho apresenta uma metodologia inovadora para estimar a temperatura interna e externa de cabos de LT's. Esta metodologia é fundamentada na estatística Bayesiana, denotada como problema de estimação de estado (3), e é implementada por meio de um filtro de partículas (4), (5), o qual combina informações disponíveis sobre o processo térmico dos cabos em operação (informações *a priori*) com a temperatura medida apenas na sua superfície externa. Assim, este método estima sequencialmente a temperatura em qualquer ponto da seção transversal do cabo, conhecendo-se apenas a sua temperatura externa. Embora as bases da estatística Bayesiana tenham sido fundamentadas há muito tempo, somente nas últimas décadas tem sido popularizada devido, principalmente, ao surgimento de poderosos processadores, necessários para os pesados cálculos numéricos inerentes desta metodologia. Uma das principais vantagens do filtro de partículas é que no processo do cálculo da distribuição de temperatura são considerados tanto o erro das medições de temperatura como o erro do modelo numérico para solução do problema direto.

2.0 - ESTIMAÇÃO DE ESTADO - FILTRO DE PARTÍCULAS

Nos problemas de estimação de estado as medições experimentais disponíveis são combinadas com as informações *a priori* disponíveis sobre o fenômeno físico em questão com o propósito de estimar sequencialmente a variável dinâmica desejada. A variável dinâmica ou variável de estado no presente problema de condução de calor é o campo de temperatura transiente dos cabos de linhas de transmissão.

Para analisar sistemas dinâmicos se faz uso de dois modelos: o primeiro é o modelo de evolução de estado, o qual descreve a evolução da variável de estado com respeito ao tempo, \mathbf{x} , por meio da equação vetorial,

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{v}_k) \quad (1)$$

Onde \mathbf{f} é no caso mais geral uma função não linear de \mathbf{x} e do vetor de incertezas $\mathbf{v}_k \in \mathbf{R}^{n_v}$. O subscrito $k=1,2,3,\dots$, denota o instante de tempo t_k no problema de estimativa de estado. O vetor de estado \mathbf{x}_k avança no tempo segundo o modelo de evolução de estado da Eq. (1). O segundo é o modelo das medições, o qual descreve a relação entre o vetor de medidas \mathbf{z} e as variáveis dinâmicas a serem estimadas \mathbf{x} . Esta relação é representada matematicamente por meio da equação a seguir:

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{h}(\mathbf{x}_k, \mathbf{n}_k) \quad (2)$$

Onde a função \mathbf{h} é no caso mais geral uma função não linear. O vetor \mathbf{z}_k é definido em qualquer instante de tempo t_k , para $k=1,2,3,\dots$. Na equação do modelo de medidas, Eq. (2), o vetor \mathbf{n}_k denota o erro ou incerteza das medições experimentais. O objetivo desta teoria é combinar todas as informações disponíveis com o modelo de evolução e o modelo de medidas, de forma a se obter uma estimativa das variáveis dinâmicas contidas no vetor \mathbf{x}_k . Assumindo que $\pi(\mathbf{x}_0|\mathbf{z}_0) = \pi(\mathbf{x}_0)$ é uma informação conhecida (*a priori*), a distribuição ou função de densidade de probabilidade (FDP) *a posteriori* $\pi(\mathbf{x}_k, \mathbf{z}_{1:k})$ é o objetivo do problema de filtro. Esta distribuição pode ser obtida por meio dos filtros Bayesianos através de duas etapas (6): previsão e atualização. Este processo é ilustrado na Figura 1.

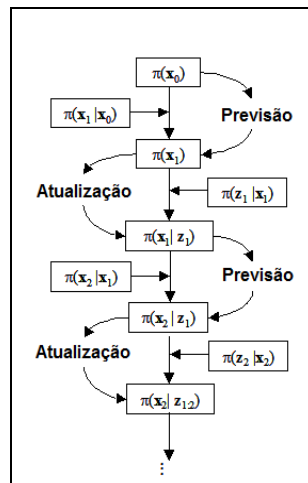


FIGURA 1. Passos da previsão e atualização para filtros Bayesianos (4)

Para se calcular as temperaturas internas e externas dos cabos usaremos o filtro de partículas SIR (Sampling Importance Resampling). Este filtro tem como objetivo principal representar a FDP a *posteriori* em termos de conjuntos de amostras randômicas ou partículas com pesos associados a elas e estimar o campo de temperatura em função destas amostras e seus pesos (5)

2.1 Medições Experimentais de Temperatura

A temperatura foi medida em um cabo ACSR do tipo Tern. Os experimentos foram desenvolvidos no Laboratório de Propriedades Elétricas e Magnéticas do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL. Ensaios em laboratório fechado permitem ter um maior controle das condições ambientais e de corrente em que o cabo opera, obtendo-se assim medidas de temperatura mais uniformes e precisas. A temperatura do laboratório é mantida uniforme e constante a 25 °C. A sala em que os ensaios são realizados é isolada de fontes de vento e radiação, de forma a considerar convecção natural na superfície do cabo.

Com o objetivo de obter medições internas e externas de temperatura nos cabos foram usadas duas técnicas diferentes (7). A primeira técnica consiste na medição de temperatura da superfície externa do cabo por meio de uma câmera de termografia por infravermelhos. Os dados de temperatura obtidos com a câmera são utilizados pelo do filtro de partículas dentro do modelo das medições que junto com o modelo de estimativa de estado fornecem a estimativa do campo de temperatura dentro e fora do cabo. Cabe ressaltar que no modelo das medidas também é considerado o erro inerente às medições. Com a câmera de termovisão foram medidas as temperaturas durante os ciclos térmicos dos cabos ensaiados. A luz do recinto foi desligada durante todo o ensaio de forma a evitar possíveis reflexões (ver Figura 2.a). Cabe ressaltar que as possíveis fontes de calor e de reflexão que possam interferir nas medições termográficas foram evitadas, tais como pontos quentes na proximidade do transformador, objetos refletores, etc.

A segunda técnica de medição consiste na medição de temperatura por meio de termopares inseridos entre as camadas do condutor durante seu processo de fabricação. As medições de temperatura obtidas como termopares servirão para comparação com as estimativas da temperatura interna dos cabos por meio do filtro de partículas.

Para cabos sem revestimentos, algumas pequenas seções do mesmo foram pintadas com tinta preta fosca de emissividade térmica conhecida ($\epsilon \approx 0,90$), aumentando a precisão das medidas com a câmera. Esta técnica de medir a temperatura usando uma área com emissividade controlada é conhecida e normalmente usadas para obter a temperatura de uma superfície cuja emissividade é desconhecida. No presente trabalho, as medidas de temperatura usadas na modelagem por filtro foram obtidas com cabos cuja superfície externa foi revestida com uma tinta preta fosca, cuja emissividade térmica foi calculada em (8), tal que $\epsilon \approx 0,90$. A câmera termográfica mede a radiação térmica emitida pela superfície dos cabos e a transforma diretamente em valores de temperatura, considerando os parâmetros térmicos conhecidos (Ver Figura 2.b). Entre estes parâmetros, cita-se: a emissividade térmica, conhecida e calculada com valor máximo de 0.9, a temperatura ambiente uniforme igual a 25 °C, umidade relativa do laboratório igual a 60%, e a distância entre a câmera e a superfície do cabo, fixado sempre em 1 metro. A temperatura de reflexão, que corresponde à temperatura média dos objetos que podem causar reflexão, como objetos metálicos, os muros do laboratório, etc. Esta temperatura de reflexão foi fixada, sendo igual à temperatura ambiente do laboratório, 25°C.

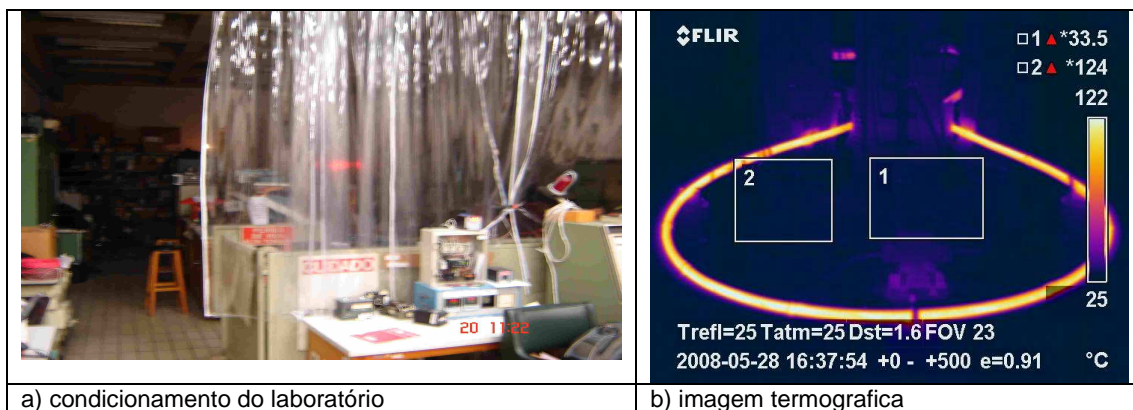


FIGURA 2 – Medições termograficas em laboratorio

2.2 Metodologia Numérica

A metodologia numérica será dividida no problema direto, em que a solução da equação de condução de calor é resolvida para se obter a distribuição de temperatura da forma tradicional. O segundo passo desta metodologia abrange a solução numérica usando o filtro de partículas

2.2.1. Problema Direto

O problema direto consiste em calcular a distribuição de temperatura da seção transversal do cabo da forma convencional, isto é, resolver a equação que governa o fenômeno térmico antes de aplicar o filtro de partículas. Para isto, assumem-se conhecidas as propriedades termofísicas envolvidas na formulação matemática do problema. A equação que governa a condução de calor do cabo é a equação de calor. As propriedades envolvidas nesta formulação são: as condutividades térmicas da região da alma e do condutor, k_{st} e k_{al} , respectivamente, as capacidades térmicas volumétricas de ambas regiões C_{st} e C_{al} , o coeficiente de transferência de calor total h_t que engloba a emissividade térmica, ε , e o coeficiente de transferência de calor por convecção h_{cv} .

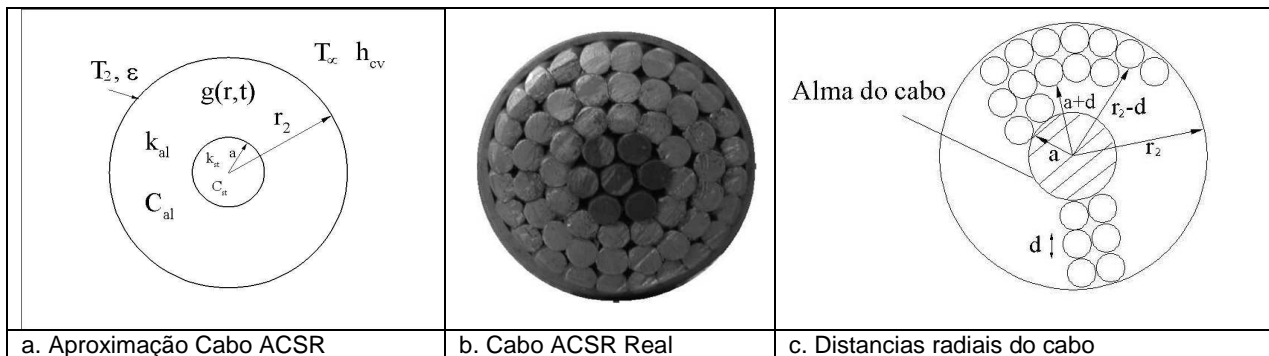


FIGURA 3. Modelagem numérica de cabos ACSR e distancias radiais das camadas do condutor em que foram inseridos os termopares.

Como ilustrado na Figura 3.a a modelagem considera o cabo ACSR como duas regiões cilíndricas homogêneas, mas com propriedades térmicas efetivas para as condutividades térmicas e as capacidades térmicas volumétricas. O modelo térmico usado nos cálculos da distribuição de temperatura também considera a distribuição irregular da densidade de corrente. Esta distribuição irregular de densidade de corrente é calculada considerando o efeito transformador de corrente (9).

2.2.1. Filtro de Partículas SIR

O filtro de partículas SIR, o qual é baseado no modelo de evolução de estado e no modelo de medições, é implementado com o intuito de estimar as variáveis de estado, denotadas como $\mathbf{T}(\mathbf{r}, \mathbf{t})$, o qual representa no nosso caso o campo de temperatura da seção transversal do cabo em função do tempo. Esta estimativa é feita usando-se apenas medições de temperatura na sua superfície, obtidas por meio de uma câmera de termografia por infravermelhos.

A estimativa do campo de temperatura considera um ruído no modelo numérico (problema direto) variando entre 1% e 10%. O ruído do modelo numérico ou modelo de evolução é definido em percentagem com relação à temperatura máxima, isto é, um ruído de 5% é representado como $0.05 \mathbf{T}(\mathbf{r}, t_{fim})$ Onde t_{fim} é o tempo final do experimento. Cabe ressaltar que o valor aproximado do ruído do modelo numérico não é conhecido com precisão. A inicialização do filtro consiste na geração de um número de partículas, N_{part} , para cada nó da malha ao longo do tempo até o tempo final do experimento t_{fim} . O número de partículas, N_{part} , é um dos parâmetros variáveis, sendo geralmente necessário atribuir um número grande para este parâmetro para uma estimativa mais precisa, como poderá ser visto na seção dos resultados.

3.0 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Quando o filtro de partículas SIR é aplicado, as propriedades termo físicas, tais como: as condutividades térmicas efetivas, as capacidades térmicas volumétricas efetivas e o coeficiente de transferência de calor total são considerados conhecidos e constantes. Para as estimativas apresentadas nesta seção, foram usadas apenas medições experimentais da temperatura da superfície do cabo obtidas com a câmera de termovisão. Como o método do filtro de partículas permite a estimativa da variação de temperatura em toda a seção do cabo, as

temperaturas estimadas nas posições onde estão instalados os termopares serão então comparadas com as medições experimentais para efeitos de validação da solução obtida.

Uma vez aplicada a corrente, o aumento da temperatura do cabo foi medida com a câmera com um intervalo de 20 segundos entre cada imagem, durante todo o aquecimento do cabo até atingir o regime permanente. Na Figura 4 podem ser vistas algumas das imagens termográficas usadas no filtro de partículas para a estimativa da distribuição de temperatura, denotando instantes diferentes do aquecimento do cabo. A temperatura experimental medida com a câmera foi calculada como a média de uma pequena área (de aproximadamente 50 mm^2) da superfície externa do cabo, como mostrado nas imagens. Nota-se na Figura 4, o aumento uniforme da temperatura superficial ao longo do tempo, para uma corrente de 800 A, denotado pela cor mais brilhante e uniforme em todo o cabo.

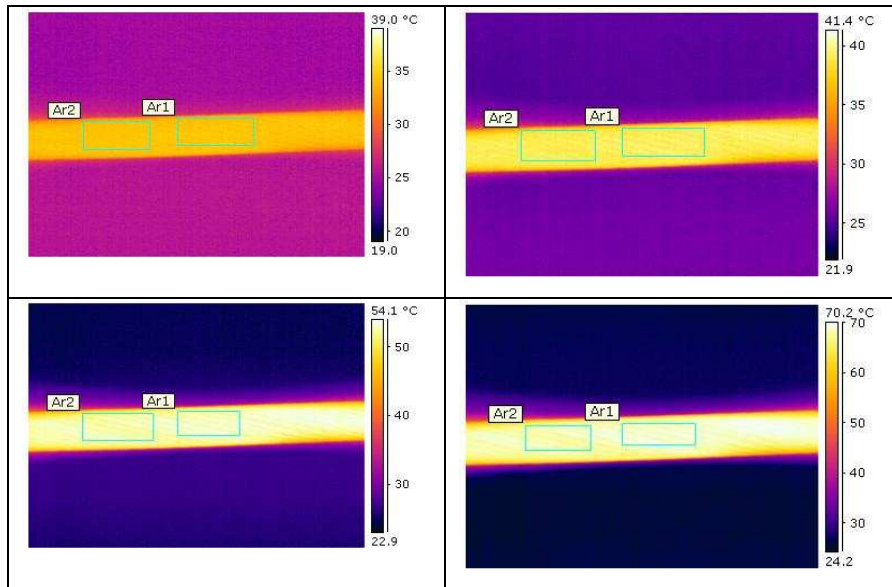


FIGURA 4. Imagens termográficas usadas para a estimativa do campo de temperatura. As figuras mostram a evolução em quatro instantes diferentes quando uma corrente de 800 A é aplicada.

A seguir serão apresentadas as estimativas da temperatura interna e externa de cabos condutores ACSR, variando-se a percentagem de erro considerado no modelo numérico e o número de partículas usadas no filtro. O tempo computacional gasto nestas estimativas varia segundo o número de partículas usado. Para um computador com processador corel duo, com 4.0 GB de memória RAM, o tempo computacional gasto quando 50 partículas são usadas foi de aproximadamente um segundo, para 500 partículas foi de 3 segundos e para 5000 partículas foi de aproximadamente 30 segundos.

Os gráficos da Figura 5 mostram as estimativas do campo de temperatura e seus intervalos de confiança em quatro posições ao longo do raio do cabo (ver Figura 3.c). Nesta figura, o campo de temperatura foi estimado com um número relativamente baixo de partículas, 50. A incerteza ou erro na solução do problema direto foi de $0.05T_{\max}$, ou seja, considerou-se 5% de ruído no modelo de evolução de estado, aplicando-se uma corrente de 800 A. Embora o número de partículas usado para este caso seja baixo, as estimativas na superfície do cabo, $r = r_2$, estão em muito boa concordância com os dados experimentais. Por outro lado, as estimativas internas de temperatura, usando 50 partículas, apresentam valores próximos a das medições feitas com os termopares, contudo, parecem ser insuficientes para uma melhor caracterização tanto do campo interno de temperatura, como dos intervalos de confiança, como mostram os gráficos da Figura 5.

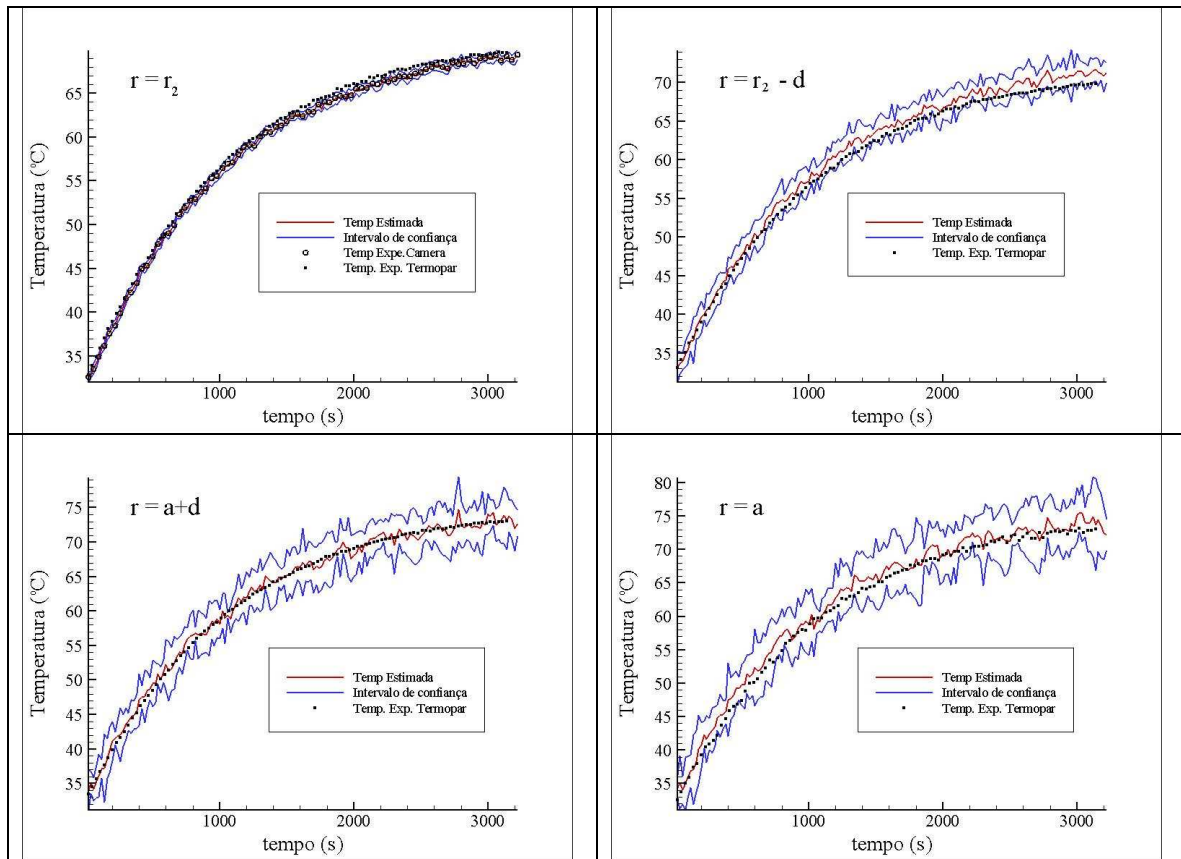
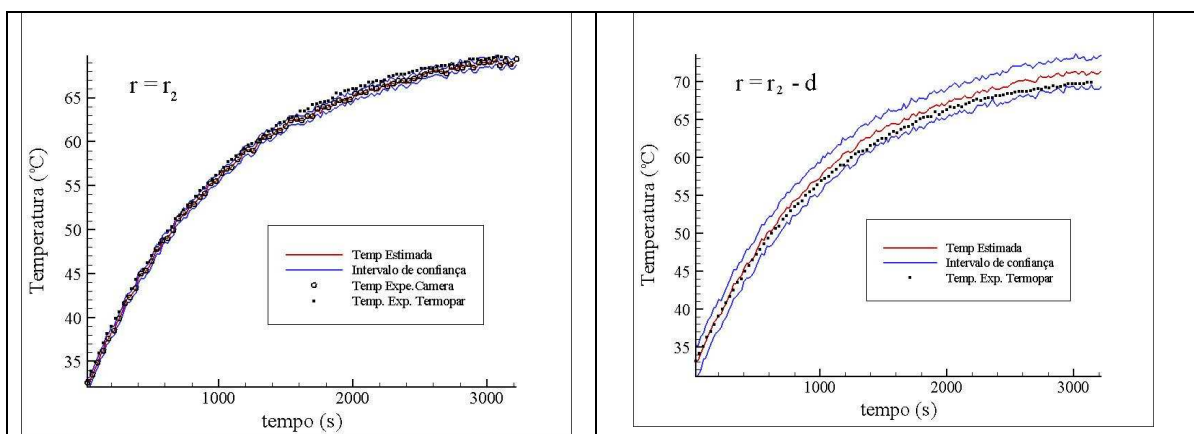


FIGURA 5. Temperatura Estimada com ruído de 5% e 50 partículas

Nos gráficos da Figura 6 são mostradas as estimativas da temperatura ao longo do raio do cabo, para um ruído no modelo de 5% e 500 partículas usadas no filtro. Com esta quantidade de partículas, as estimativas mostram uma melhora significativa em relação ao caso anterior, principalmente para as estimativas internas de temperatura. Os intervalos de confiança são maiores para erros maiores no modelo, assim as temperaturas experimentais recaem dentro destes intervalos, como mostrado nas figuras abaixo. Em todos os casos, a temperatura experimental se situa dentro do intervalo de confiança calculado. Como pode ser observado na Figura 6, as temperaturas estimadas e medidas atingem valores muito próximos, principalmente nas regiões mais internas do cabo, isto é, $r = a$ e $r = a+d$. Note que em $r=a+d$, as temperaturas estimadas e experimentais estão em excelente concordância. Para o caso de $r=r_2-d$ a temperatura experimental atinge o regime permanente num valor menos de 2 °C abaixo dos valores estimados.



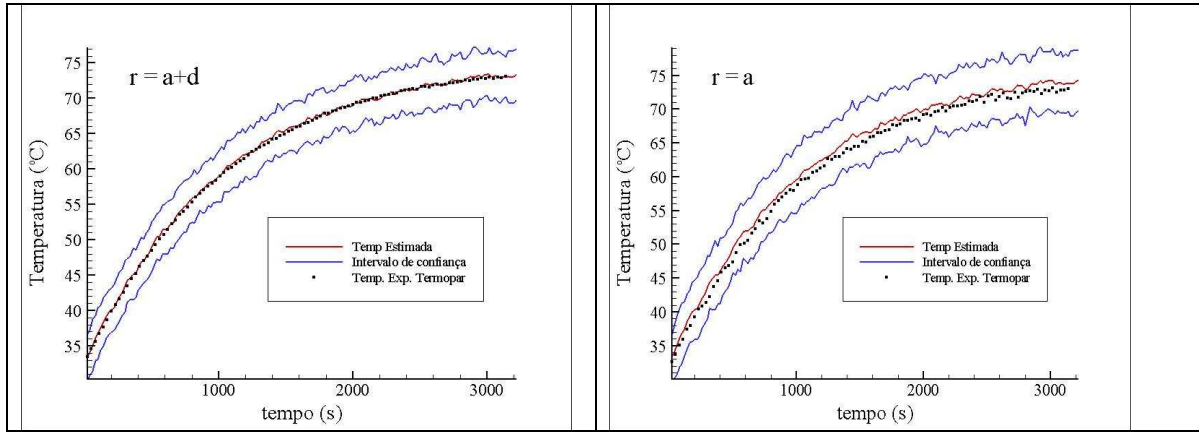


FIGURA 6. Temperatura Estimada com ruído de 5% e 500 partículas

A seguir serão mostradas as estimativas do campo de temperaturas do cabo considerando um caso em que o modelo de evolução de estado apresenta uma incerteza alta, de 10%. Os gráficos da Figura 7 Mostram as estimativas da temperatura ao longo do raio do cabo, usando 500 partículas no filtro, e as temperaturas experimentais. Na superfície, $r = r_2$, a concordância entre as temperaturas estimadas e as temperaturas experimentais são muito boas, mesmo para um alto erro no modelo numérico e um número não muito grande de partículas. Em todos os casos, as temperaturas experimentais recaem dentro do intervalo de confiança calculado, atingindo valores muito próximos aos valores estimados. Contudo, nota-se pelas curvas das estimativas dos pontos internos do cabo uma variância alta dos intervalos de confiança, em função da grande incerteza associada ao modelo de evolução de estado. Assim, a seguir serão mostrados resultados com um número bem maior de partículas e serão comparados com os resultados obtidos com 500 partículas.

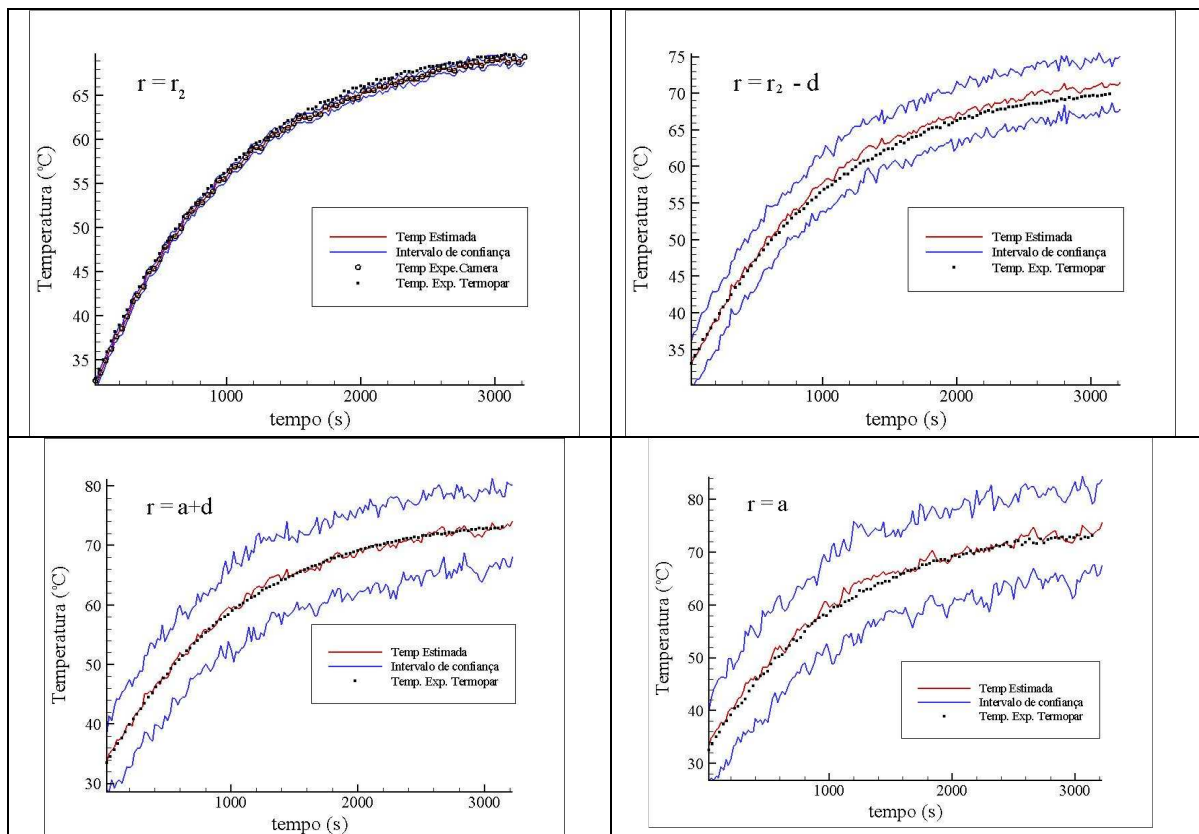


FIGURA 7. Temperatura Estimada com ruído de 10% e 500 partículas

Finalmente, apresentam-se na Figura 8 as estimativas do campo de temperatura de cabos para uma incerteza no modelo de 10 %, com 5000 partículas usadas no filtro. No caso das estimativas na superfície externa do cabo, nota-se a perfeita concordância entre as estimativas e as medições experimentais. Nas regiões internas do cabo, as estimativas mostram curvas mais suaves e com intervalos de confiança mais uniformes, mostrando que o

número de partículas utilizado neste caso é suficiente para uma boa estimativa. As temperaturas experimentais recaem dentro destes intervalos em todos os pontos de medição interna. Nos pontos de medição $r = a$ e $r = a+d$, os valores estimados e as medições experimentais estão em excelente concordância, melhores e mais precisas que no caso anterior. Com estes resultados pode ser concluído que para casos com incertezas grandes no modelo, um grande número de partículas deve ser utilizado para se ter estimativas satisfatórias, aplicando o filtro de partículas SIR.

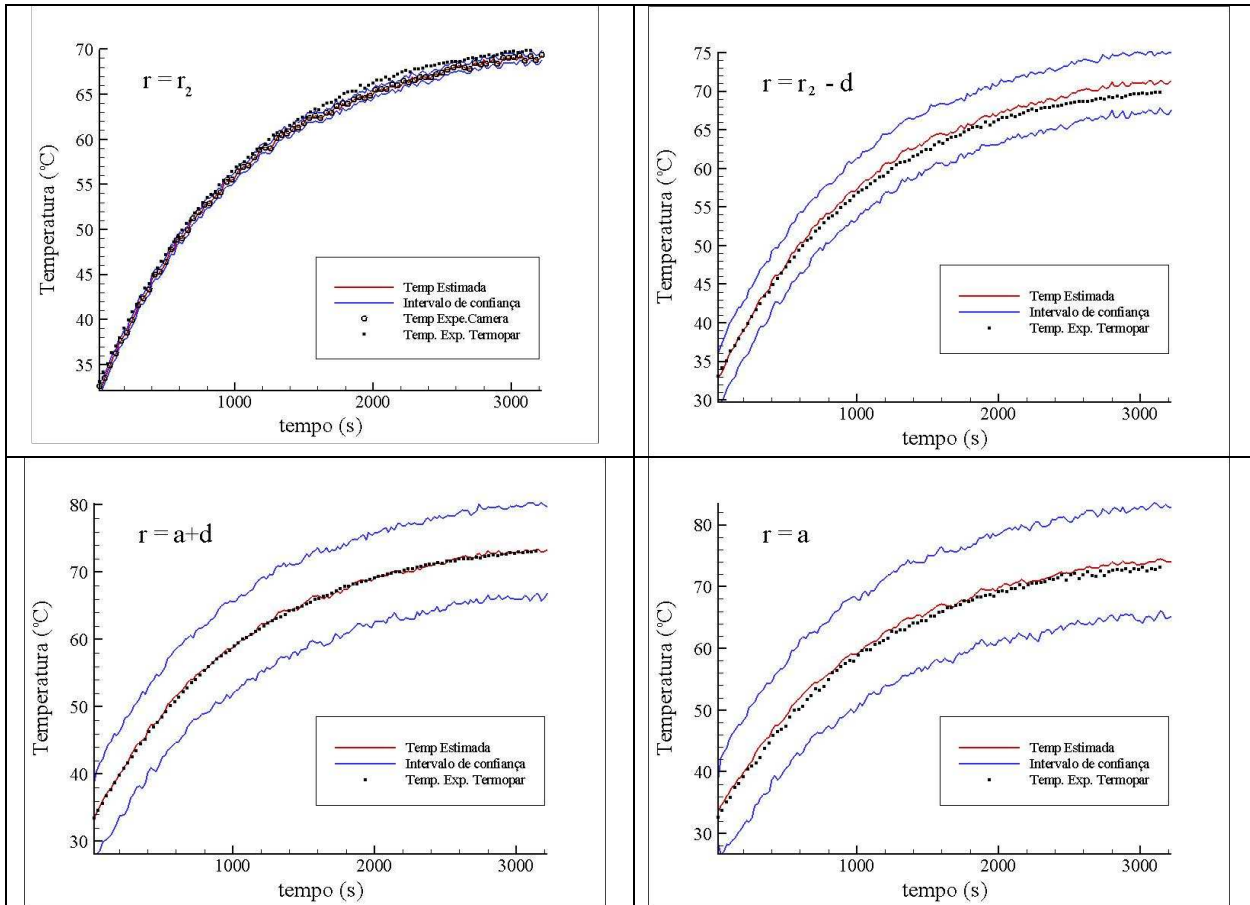


FIGURA 8. Temperatura Estimada com ruído de 10% e 5000 partículas.

4.0 - CONCLUSÕES

O filtro de partículas SIR, método estatístico baseado na inferência Bayesiana, foi aplicado para estimar a distribuição de temperatura de cabos usados nas linhas de transmissão de energia elétrica. Entre as vantagens desta metodologia inovadora está o fato que as estimativas resultantes levaram em consideração as incertezas tanto da modelagem térmica, como das medições de temperatura usadas no filtro. As medições experimentais de temperatura foram obtidas dentro de um laboratório fechado de condições controladas, usando duas técnicas diferentes. A primeira foi usada para medir a temperatura interna por meio termopares inseridos entre as camadas do condutor, e, a segunda técnica, para medições superficiais de temperatura, por meio de uma câmera de termografia por infravermelho. As medidas obtidas com a câmera foram combinadas com o filtro de partículas, estimando de forma precisa, como mostraram os resultados, a temperatura interna e externa do cabo e seus intervalos de confiança.

Embora a metodologia apresentada requeira conhecimentos avançados em processos estatísticos, sua implementação numérica para a caracterização térmica de cabos foi relativamente simples e com um custo computacional baixo, o que em teoria possibilita sua aplicação em processos reais de transmissão de energia, isto é, possibilita o monitoramento da temperatura interna e externa dos cabos em tempo real. Contudo, esta aplicação em campo exigiria um estudo mais amplo devido, principalmente, à natureza estatística de algumas variáveis do modelo térmico, como velocidade do vento, temperatura e corrente, tornando neste caso o problema do filtro de partículas mais complexo.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Morgan V. T. – The Radial Temperature Distribution and Effective Radial Thermal Conductivity in Bare and Stranded Conductors. IEEE Transaction in Power Delivery. Vol 5. Issue 3. 1990.
- (2) Douglas D. A. – Radial and Axial Temperature Gradients in Bare Stranded Conductor. IEE Transactions on Power Systems. Vol. PWRD-1, No. 2. , 1986.
- (3) Kaipio J., E. Somersalo. - “Statistical and Computational Inverse Problems”, Springer, New York. 2004.
- (4) Orlande, H. R. B., Duliktavich, G., Colaço, M.J. - “Application of Bayesian Filters to Heat Conduction Problems” *EngOpt 2008 - International Conference on Engineering Optimization, Rio de Janeiro*. 2008.
- (5) Ristic, B., Arulampalam, S., e Gordon, N. - “Beyond the Kalman Filter: Particle Filters for Tracking Applications”, Artech House. 2004.
- (6) Andrieu, C., Doucet, A., Robert, C. - “Computational advances for and from Bayesian analysis”, Statistical Science, 19, pp. 118-127. 2004.
- (7) Absi Salas F. M., Domingues L. A. M. C., Filho J. I. S., Orlande H. R. B. - *Temperature Measurements in an Overhead Electric Power Cable*, 8th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Lisbon., 2013.
- (8) Absi Salas, F ; Domingues, L. A. M. C. ; Moreira, F. S. ; S. Filho, J. I. - Comportamento Térmico em Cabos de Linhas de Transmissão- Medições Experimentais. EletroEvolução (Rio de Janeiro), v. Março, p. 17-24, 2010.
- (9) Barret, J. S., Fehervari, C. J., Findlay, R. D. - “A New Model of AC Resistance in ACSR Conductors.”, IEE Transactions on Power Systems. Vol. PWRD-1, No. 2. , 1986.