



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

GLT - 06
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

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

AMPACIDADE ESTATÍSTICA – MEDIÇÕES EM LABORATÓRIO E DE CAMPO

**Carlos Pederneiras Raja Gabaglia*
Cláudia Menezes Fernandes de Oliveira**

Furnas Centrais Elétricas SA.

**João Ignácio da Silva Filho
Frederico Silva Moreira
Aureo Pinheiro Ruffier
Cepel
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica**

RESUMO

Dentre as principais ações envidadas internacionalmente para o melhor aproveitamento da capacidade de transporte das linhas de transmissão existentes, encontra-se o uso de banco de dados meteorológicos, que permite a adoção de critérios estatísticos no projeto e na operação. Há também a monitoração de parâmetros que descrevem a condição térmica da linha em tempo real.

Este Informe Técnico (IT) apresenta e analisa resultados de atividades teórico-experimentais que FURNAS e CEPEL estão desenvolvendo tanto num circuito experimental instalado nas dependências do CEPEL como numa linha de 138 kV do sistema de transmissão de FURNAS. A massa de dados coletada nas duas instalações é neste IT submetida às seguintes ações:

- Comparar os resultados de modelos matemáticos para cálculo da temperatura superficial de cabos condutores aéreos com os valores medidos experimentalmente;
- Analisar os valores de riscos térmicos obtidos por metodologia estatística em função dos valores medidos e calculados pelo circuito experimental;

PALAVRAS-CHAVE

Linhas de transmissão, ampacidade, temperatura e tensão mecânica de cabo condutor.

1.0 - INTRODUÇÃO

A otimização de projeto e operação de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica passa por uma definição adequada da sua capacidade de transporte. Essa correta definição torna-se cada vez mais importante na medida em que o crescimento da demanda, a redução de investimentos destinados à expansão de sistemas de transmissão e as restrições ambientais à ocupação de novas faixas de passagem acenam com a incidência de sobrecargas nos circuitos ora em operação.

Nos últimos anos, diversas publicações nacionais e internacionais vêm apresentando e discutindo metodologias que enfocam a ampacidade de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica segundo abordagens estatísticas [1,2]. Tais esforços permitem uma avaliação cada vez mais precisa da capacidade de transporte de linhas de transmissão e, ainda, da fluência, flecha e deterioração mecânica de cabos condutores. Essas ações específicas são possibilitadas pelo fato do enfoque estatístico considerar as variações da temperatura do cabo condutor com as reais condições climáticas da região em que se encontra a LT.

*Rua Real Grandeza, 219 - Bloco C - sala 1607.3 - CEP 22283-900 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil.
Tel: +55 (21) 2528-4206 - Fax: +55 (21) 2528-4857 - e-mail: raja@furnas.com.br

No Brasil, o assunto vem sendo abordado desde o final da última década de 80 quando foi criada, no âmbito dos então GCPS e GCOI, uma Força Tarefa conjunta que desenvolveu uma metodologia para cálculo da ampacidade segundo critérios estatísticos, utilizando o Banco de Dados Meteorológicos do CEPEL [1]. Vencida a etapa de desenvolvimento dessa metodologia estatística, os atuais esforços estão sendo direcionados para o seu aperfeiçoamento, aplicação prática, montagem de bancos de dados meteorológicos e validação experimental através de medições em laboratório e campo.

Na atividade experimental, FURNAS e CEPEL estão desenvolvendo um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) calcado em medições num circuito experimental instalado nas dependências do CEPEL, na Ilha do Fundão, e na linha de 138 kV que interliga as subestações de Santa Cruz e Angra dos Reis de FURNAS. As atividades desse projeto de P&D objetivam:

- Comparar os resultados de modelos de equilíbrio térmico para cálculo da temperatura superficial de cabos condutores, a partir de dados meteorológicos, com as medições experimentais da temperatura do condutor, velocidade e direção do vento, temperatura ambiente e radiação solar;
- Definir os requisitos e critérios para a medição de dados meteorológicos de forma que possam ser usados na aplicação prática da metodologia estatística;
- Comparar os riscos térmicos¹ teóricos da metodologia estatística com os verificados no circuito experimental e na linha de transmissão Santa Cruz-Angra dos Reis.
- Selecionar e instalar, dentre as tecnologias existentes, a instrumentação mais adequada para a medição, em tempo real, da temperatura superficial do cabo condutor ou de parâmetros correlatos numa linha de transmissão em operação, tais como, distância cabo-solo, flecha e tensão mecânica.
- Comparar as flechas reais ocorridas nessa linha de transmissão com os valores calculados por modelos teóricos, utilizando medições num vão isolado e num tramo com vários vãos contínuos.
- Aprimorar e difundir, entre as áreas de projeto e operação das empresas do setor elétrico, o uso da medição em tempo real da ampacidade face à sua promissora previsibilidade de limites de carregamento de LTs, nos horizontes de curtos e médios prazos.
- Cotejar os custos dos equipamentos comerciais, todos importados, para monitoração em tempo real da temperatura do condutor ou de parâmetro correlato.
- Sugerir um protótipo alternativo nacional de instrumento para monitoração em tempo real, que melhor atenda às necessidades do setor nos seus aspectos técnicos e econômicos.

As atividades do projeto de P&D encontram-se em execução, algumas em fase avançada, sendo que esse IT apresenta alguns resultados já alcançados.

2.0 - DESCRIÇÃO DAS INSTALAÇÕES EXPERIMENTAIS

2.1 Circuito experimental nas dependências do Cepel, na Ilha do Fundão

O circuito experimental encontra-se montado a 10 m de altura, no topo de um poste, com o cabo condutor formando um pentágono com 2,50 m de lado. A forma de pentágono foi escolhida por favorecer as investigações da influência da direção do vento na temperatura do condutor, pois a cada instante o vento forma diversos ângulos de ataque no cabo condutor.

O sistema de aquisição de dados mede a temperatura do condutor em cada lado do pentágono, através de termopares tipo J (ferro-constantan), a velocidade e direção do vento a 10 metros de altura, a temperatura do ar e a radiação solar global a 1,5 m de altura. A velocidade do vento é medida em dois anemômetros, um com o sensor em forma de concha e, o outro, em forma de hélice, ambos distantes 3 metros do condutor.

De uma forma geral pode-se, desde já, adiantar que medições feitas ao tempo por prazos dilatados trazem dificuldades as mais variadas e inesperadas. Por exemplo, neste caso específico, os principais problemas ocorridos nas medições experimentais têm sido a queima, por mais de uma vez, da placa analógico-digital do sistema de aquisição de dados, causada pela indução de descargas atmosféricas nos termopares e no cabo condutor; a oxidação das pontas dos termopares por agressão do tempo; e a falta de precisão das medidas dos anemômetros para ventos com baixa velocidade, o que é inerente aos dois sensores instalados. A propósito, foram feitas modificações no circuito eletrônico dos anemômetros, que efetivamente aprimoraram os seus desempenhos para ventos fracos. A instalação de um sensor de ultrassom, que já se encontra em curso, propiciará a solução técnica mais adequada. Por estarem expostos ao tempo, os termopares instalados têm que ser aferidos periodicamente, o que vem sendo feito com medições simultâneas através de termopares adicionais de aferição, de termômetros de mercúrio calibrados e de sistema de termovisão. A Figura 1 mostra o circuito

¹ Risco térmico é a probabilidade de que uma dada temperatura do condutor seja ultrapassada.

experimental submetido a uma medição com termovisor indicando a temperatura do condutor de 53,4°C num dos lados do pentágono.



FIGURA 1 – Aferição dos termopares do circuito experimental com auxílio de termovisor

2.2 Linha de transmissão em operação

Para a instalação experimental na linha de transmissão em operação, a primeira atividade foi comparar e seleccionar as possibilidades de parâmetros usuais de ampacidade e suas respectivas tecnologias de medição, para que a solução técnica mais adequada fosse escolhida. Uma vez feita a escolha, buscou-se, no sistema de transmissão de Furnas, uma linha que atendesse os requisitos técnicos da tecnologia e que ao mesmo tempo oferecesse uma boa logística de infra-estrutura para os estudos em campo.

2.2.1 Sistemas considerados para monitoração da ampacidade em tempo real

A temperatura do cabo condutor de LTs aéreas pode ser medida em tempo real de forma direta ou indireta. As primeiras investidas, no contexto mundial, para a medição direta da temperatura superficial de cabos condutores aconteceram no final da década de 80. Nessa época, dentre outros organismos, o CEPEL desenvolveu o protótipo de um instrumento que media a temperatura superficial do condutor por contato e a transmitia, em tempo real, via rádio para um receptor instalado até a uma distância de 2 km. O protótipo passou por testes em laboratório e no campo, em uma LT de Furnas, foi patenteado, mas não chegou a ser comercializado, pois o preço, na época de US\$10,000.00, foi considerado alto pelo mercado nacional, tendo desencorajado a sua industrialização. Comparado aos preços dos atuais sistemas de medição esse valor chega a ser irrisório.

Na última década, a necessidade de aumentar a capacidade de transporte das LTs existentes, sem diminuir a sua confiabilidade operacional, trouxe ao mercado diversos métodos, instrumentos e sistemas de coleta em tempo real da temperatura do condutor, na sua forma direta ou indireta, através dos seguintes protocolos de medição:

a) direto

- temperatura pontual por contato através de um termistor ou termo-resistência, com transmissão via rádio;
- temperatura distribuída, ao longo de um trecho do condutor, por contato através de fibra ótica;

b) indireto

- tensão mecânica do cabo condutor e da temperatura de um bastão que simula o condutor sem corrente;
- temperatura, através de um bastão que simula o condutor sob a ação do ambiente;
- distância cabo-solo por trena eletrônica a laser ou a ultrassom;
- movimento do condutor, através de uma câmera de vídeo;
- flecha do condutor, pela diferença de dois GPS (Sistema Geográfico de Posicionamento) instalados no condutor e na estrutura, respectivamente;
- dados meteorológicos aplicados em modelos matemáticos.

Após análises técnicas e econômicas foi comprado um sistema que estima, de forma indireta, a temperatura do condutor. O sistema utiliza-se da medição da tensão mecânica do cabo, das temperaturas do ar e de um bastão que simula a ação do ambiente (radiação solar, vento e temperatura do ar) na temperatura de um condutor não energizado. Os dados medidos são transmitidos via rádio para uma unidade de processamento que está interligada a um sistema SCADA de onde recebe o valor da corrente, permitindo o cálculo da temperatura do condutor. O sistema comprado é fabricado pela The Valley Group e comercializado com o nome CAT-1.

2.2.2 Escolha da linha de transmissão

Com base nos requisitos de praticidade e de conveniência técnica, a linha escolhida é a que interliga as subestações de Santa Cruz e Angra dos Reis em 138kV, condutor Drake (795 MCM – 26/7), circuito vertical duplo,

sendo o local de fácil acesso, estando à cerca de 6,5 km da Usina Termoeletrica de Santa Cruz e com poucos obstáculos à telecomunicação entre os rádios instalados na torre e na subestação.

Do ponto de vista técnico, a instalação permite estudar o comportamento da tração mecânica do cabo condutor em um vão isolado e num tramo formado por 8 vãos contínuos. A disposição vertical das fases é propícia para o estudo da influência da variação da velocidade do vento com a altura na temperatura do condutor, pois os sensores de tração mecânica foram instalados, nas fases inferior e superior, com alturas diferindo de 7,0 m. A altura da fase inferior na estrutura é de 18,5 m. A Figura 2 apresenta um croqui da planta-perfil do trecho da linha em consideração.

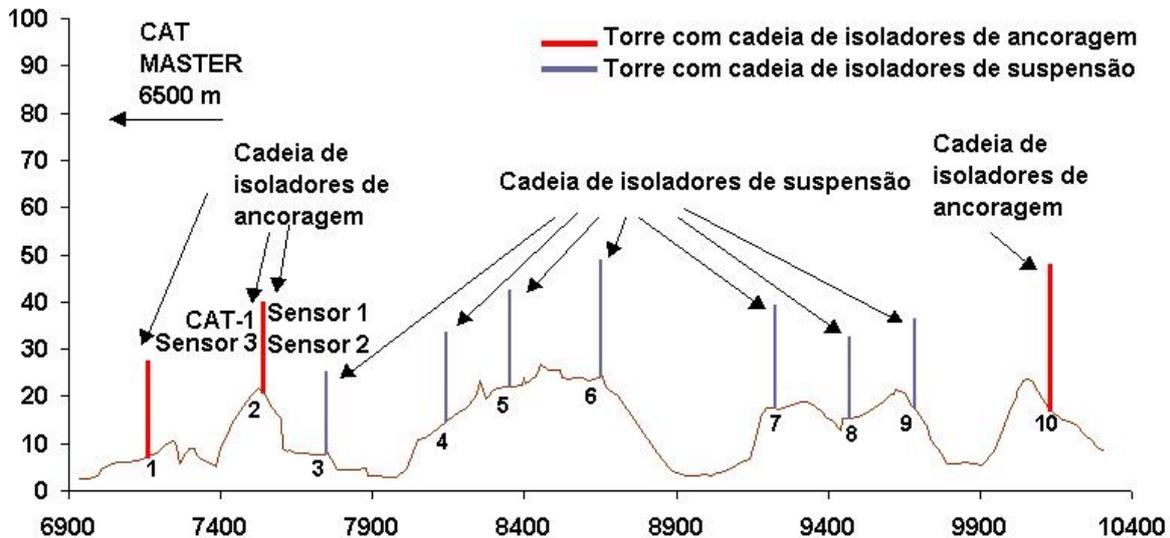


FIGURA 2 – Planta-perfil do trecho da LT selecionada (Santa Cruz – Angra dos Reis)

2.2.3 Instalação do sistema de medição e sua integração com o SCADA – SAGE

Na operação em tempo real, o CAT-1 deve ser conectado a um sistema SCADA ou EMS, do qual recebe o valor da corrente presente na LT e, após uma etapa de processamento, fornece a temperatura e a flecha atual do condutor. O sistema EMS-SCADA utilizado no estudo é o SAGE “Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia” desenvolvido no CEPEL.

Apesar de aparentemente simples, a instalação do CAT-1 na LT requer o envolvimento e dedicação de várias pessoas das áreas de estudo, projeto e manutenção de LTs, de telecomunicações, de operação de linhas e subestações e de integração ao sistema EMS-SCADA. Não raro, o envolvimento de várias pessoas faz com que o tempo gasto na instalação seja longo. No caso particular dessa instalação, desde a primeira ida ao campo para escolha do local até a conexão do CAT-1 com o SAGE, decorreram 4 meses.

Após a instalação do sistema, há, por parte do fabricante a necessidade de que uma amostragem piloto de coleta de dados seja realizada, para fins de aferição do seu modelo para cálculo da temperatura e da flecha do condutor. No mesmo período, de aproximadamente 1 mês, a linha deverá permanecer desligada por 24 horas. Os resultados aqui apresentados correspondem às primeiras medições, que subsidiarão a etapa de aferição do fabricante e, à época da apresentação plenária deste IT, resultados mais atuais e mais densos se farão presentes.

3.0 - RESULTADOS DAS MEDIÇÕES NO CIRCUITO EXPERIMENTAL DO CEPEL

Os dados utilizados neste IT referem-se ao ensaio do condutor Linnet (CAA 336,4 MCM – 26/7) no período de 13/09/2004 a 21/12/2004, sendo a corrente de ensaio de 450 A. No modelo matemático de equilíbrio térmico foram adotados os valores de 0,6 e 0,7 para os coeficientes de emissividade e absorvidade, respectivamente.

A título de ilustração, para as condições atmosféricas de radiação solar de 1000 w/m^2 , temperatura do ar de 32°C , ângulo de ataque do vento de 90° e velocidades do vento de 0, 0,6 e 1 m/s, os modelos matemáticos resultam nas temperaturas do condutor de 101°C , 69°C e 61°C , respectivamente.

A Figura 3 apresenta os histogramas de frequências das variáveis meteorológicas médias de 10 minutos medidas no período de ensaio, sendo a radiação solar global somente do período diurno, logicamente. A velocidade do

vento é a média entre as medidas dos dois anemômetros. Como informação complementar sobre as condições climáticas, durante o ensaio ocorreu vários períodos contínuos com chuva, o que está retratado no histograma da radiação solar.

Apesar do formato de pentágono, o lado em que o condutor sobe e desce para ser conectado à fonte de alimentação não tem a mesma dimensão dos demais e por isto não será aqui considerado. Na Figura 3, na rosa de ventos com a frequência de ocorrência da direção do vento estão identificados os lados 1, 2, 3, e 4 que serão aqui considerados.

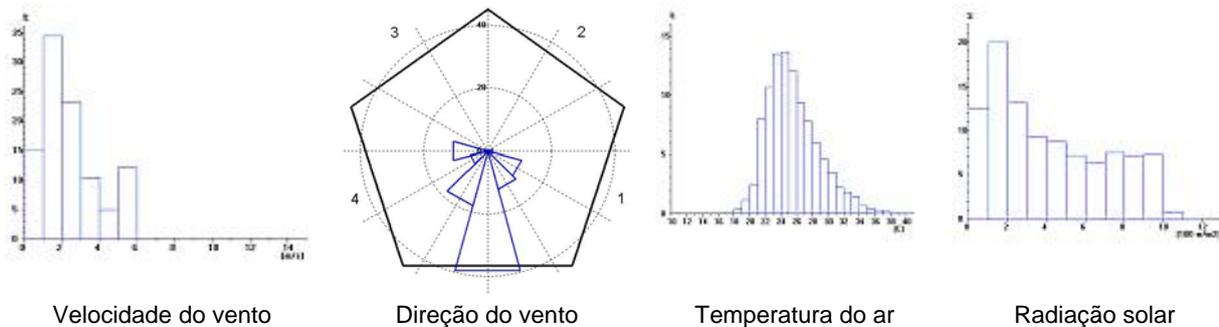


FIGURA 3 - Histogramas de frequência das variáveis meteorológicas

3.1 Comparação dos dados medidos com as temperaturas calculadas por modelo de equilíbrio térmico

A comparação objetivada será feita com o modelo sugerido pelo Cigre [3]. A comparação será feita com base nos histogramas das temperaturas medidas no lado 2 do pentágono e as temperaturas calculadas para uma LT que tem um azimute de 45° . Optou-se pela comparação com base em histogramas por sua robustez e pelo seu uso na metodologia de ampacidade estatística. A comparação a cada instante, ou simultânea, entre essas duas temperaturas apresenta em vários casos diferenças entre si, principalmente para ventos com baixa velocidade. Espera-se minorar as diferenças com anemômetros mais sensíveis aos ventos ditos fracos. A Figura 4 apresenta os histogramas anteriormente mencionados.

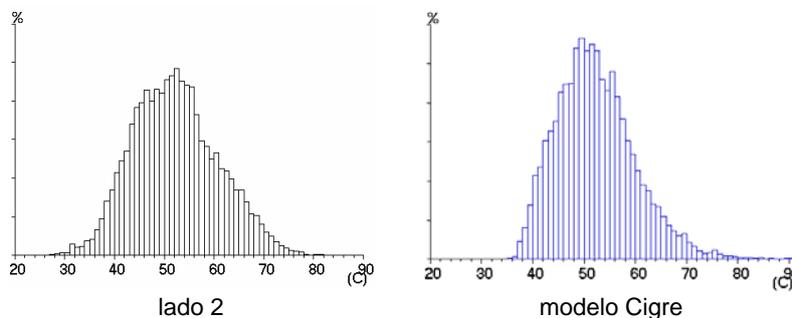


FIGURA 4 – Histogramas das temperaturas do lado 2 do pentágono e do modelo térmico do Cigre.

De uma forma geral, as diferenças entre os dois histogramas da Figura 4 estão em suas caudas. O histograma do modelo tem a cauda direita mais alongada, provavelmente causada pela deficiência na medição dos ventos com baixa velocidade. Já, o histograma do lado 2 do pentágono tem a cauda esquerda mais alongada, que é uma consequência dos dias de chuva quando a temperatura do condutor fica próxima da temperatura do ar, situação não considerada no modelo. Para fins de cálculo do risco térmico o interesse está nas temperaturas mais altas e, portanto, não é influenciado pelos dias com chuva.

3.2 Influência da direção do vento

Para analisar a influência da direção do vento, a Figura 5 apresenta em forma gráfica a ocorrência simultânea das temperaturas do condutor nos lados 1 e 2 e nos lados 3 e 4 do pentágono. Essa figura mostra que as temperaturas têm o mesmo tipo de comportamento. Entretanto, medidas simultâneas das temperaturas em um dado instante podem diferir de 10°C a 15°C , devido exclusivamente ao ângulo de ataque do vento. Por exemplo, para a temperatura de 60°C no lado 2 os valores ocorridos no lado 1 variaram de 51°C a 66°C ; já para uma temperatura de 60°C no lado 4 os valores ocorridos no lado 3 variaram de 53°C a 65°C . Extrapolando essa observação para uma LT, que por si só muda de direção ao longo da rota, num dado instante pode ocorrer uma considerável variação da temperatura do cabo condutor ao longo da linha.

Todavia, apesar dessas diferenças em um dado instantâneo, a comparação entre os histogramas de freqüências das temperaturas do condutor nos lados do pentágono não apresentam diferenças consideráveis entre si, conforme pode ser observado na Figura 6. Em outras palavras, isto quer dizer que, se fossem instalados pontos de medições ao longo da linha, a coleta de longo prazo mediria as mesmas freqüências de ocorrência das temperaturas em todos os pontos, dentro de uma região climatologicamente homogênea.

Essas constatações se refletem de forma diferenciada no projeto e na operação de LTs. Para o projeto de ampacidade estatística, o interesse está no risco térmico do condutor o qual pode ser determinado em um único ponto de medição representativo do clima da região. Para a operação com monitoramento em tempo real, todos os pontos críticos da LT deveriam ser monitorados, pois só assim se evitariam distorções causadas por extrapolações em tempo real das medições.

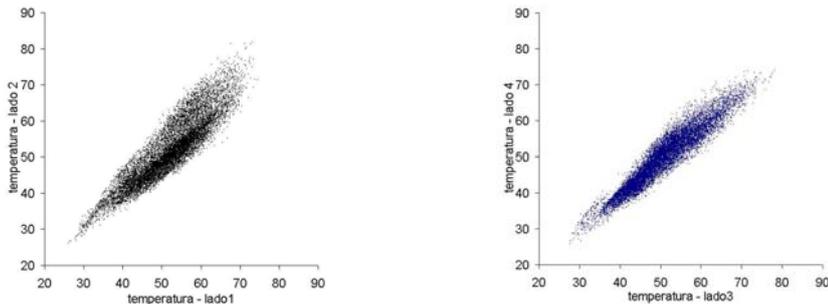


FIGURA 5 – Comparação da variação da temperatura do condutor em função da direção do vento

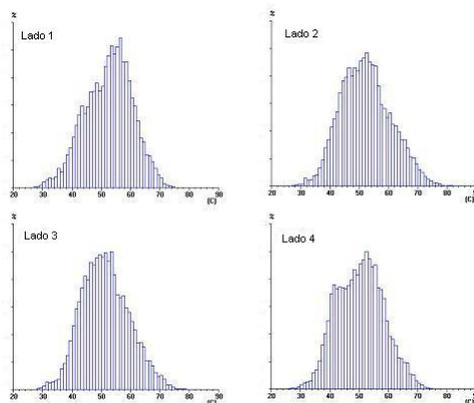


FIGURA 6 – Histograma das temperaturas do condutor em 4 lados do pentágono

Ainda com relação à direção do vento buscou-se identificar aquela mais representativa para os 4 lados do pentágono, considerando os dados meteorológicos medidos e os ângulos de ataque de 30° , 45° e 60° , aplicados ao modelo de equilíbrio térmico para regime permanente descrito em [3]. Os resultados apresentados graficamente na Figura 7 permitem constatar que o ângulo de ataque de 45° é o que melhor representa os valores medidos nos 4 lados do pentágono.

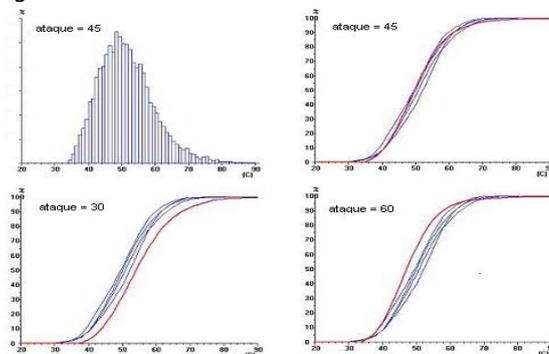


FIGURA 7 – Temperaturas do condutor para as condições meteorológicas ocorridas no ensaio e ângulos de ataque do vento de 30° , 45° e 60° - Modelo de cálculo da Cigre [3] corresponde a linha vermelha

3.3 Variação do risco térmico com o período do dia

A Tabela 1 apresenta os riscos térmicos de 15, 5 e 1% para os períodos diurnos, noturnos e todo tempo. A análise comparativa dos valores da tabela constata que as temperaturas para os riscos térmicos em consideração são as mesmas em todos os lados do pentágono. Quanto a variação diária, há um pequeno aumento das temperaturas no período noturno de aproximadamente 2°C. Este aumento de temperatura do condutor no período noturno, apesar da ausência da radiação solar e da diminuição da temperatura do ar, reflete a diminuição da velocidade do vento no período noturno.

Quanto aos riscos obtidos pelo modelo do Cigre, observa-se que para o risco de 15%, as temperaturas medidas e calculadas são praticamente as mesmas. Entretanto, para os riscos de 5 e 1% as diferenças entre os valores medidos e calculados aumentam, chegando a 30°C para o caso de 1%. Mais uma vez, essas diferenças podem ser creditadas à deficiência da medição dos ventos fracos.

TABELA 1 – Temperatura para os riscos térmicos considerados no estudo

	dia			noite			tempo todo		
	15%	5%	1%	15%	5%	1%	15%	5%	1%
lado 1	60	64	72	62	66	70	61	66	70
lado 2	61	67	73	63	68	73	62	68	73
lado 3	59	65	70	62	67	72	61	66	71
lado 4	58	63	68	60	65	70	59	64	69
Cigre	60	67	76	61	68	103	61	68	102

4.0 - RESULTADOS DAS MEDIÇÕES NA LT 138 KV DE FURNAS

Conforme dito anteriormente, a instalação do sistema de medição da tração mecânica e da temperatura do bastão que simula o condutor sem corrente está na fase de coleta de uma amostra para a determinação, pelo fabricante, dos parâmetros do modelo que calcula a temperatura e a flecha do cabo condutor. É expectativa dos autores poderem apresentar no plenário do seminário os resultados elaborados com base nos dados medidos nos próximos meses ao atual, fevereiro de 2005.

A título de ilustração, as primeiras medições do sistema CAT-1 nas duas fases do tramo, com 8 vãos, encontram-se na Figura 8, onde se observa uma pequena diferença na variação ao longo do tempo das trações medidas nos condutores das fases superior e inferior. Quando a tração é convertida em temperatura, Figura 9, essa diferença praticamente desaparece. Lembrando que a diferença de altura entre os dois condutores é de aproximadamente 7 metros, numa primeira análise os resultados indicam que a variação esperada da velocidade do vento com a altura não foi reproduzida na temperatura do condutor. Questões semelhantes serão estudadas, analisadas e apresentadas futuramente, relacionadas tanto com a temperatura como com a flecha do condutor.

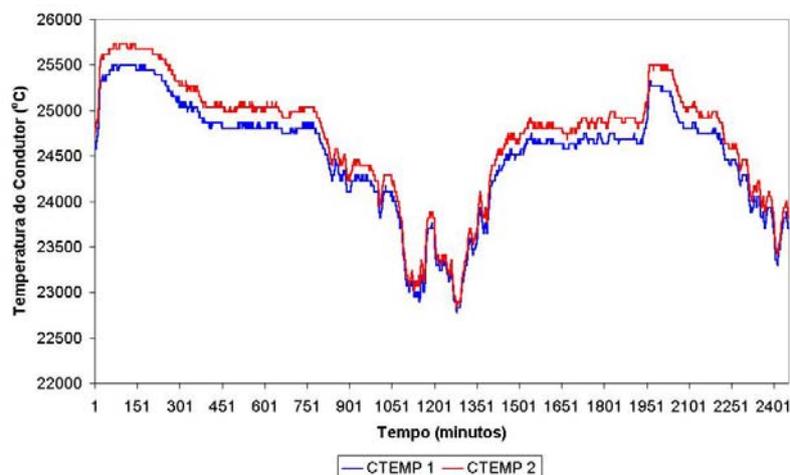


FIGURA 8 – Tração mecânica dos condutores do tramo com 8 vãos contínuos

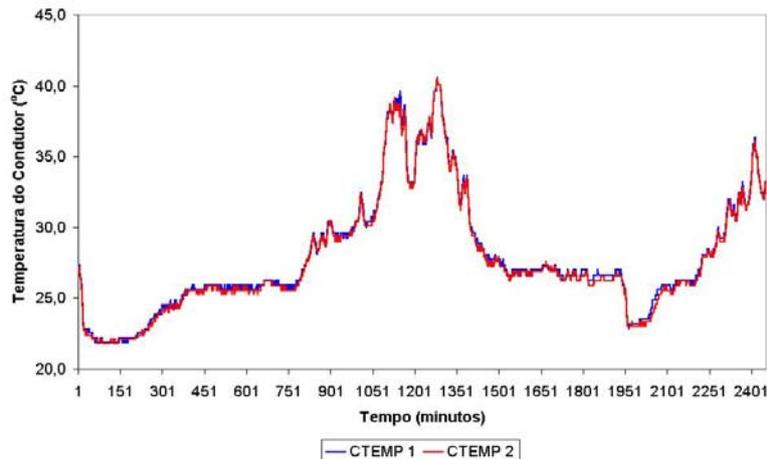


FIGURA 9 – Temperatura dos condutores do tramo com 8 vãos contínuos

5.0 - CONCLUSÕES

O IT descreveu as atividades de campo e de laboratório para instalação de equipamentos para monitorar parâmetros que regem o fenômeno da ampacidade de condutores de LTs. Entre os instrumentos recomenda-se em estudos futuros, o uso de anemômetro que meça ventos de baixa velocidade com melhor precisão que os de uso comum em estações meteorológica.

Os histogramas de freqüências das temperaturas, médias de 10 minutos, medidas em quatro lados de um circuito experimental com o cabo condutor formando de um pentágono de 2,50 m de lado, não apresentaram diferenças significativas para os riscos térmicos de 15, 5 e 1%, valores de riscos considerados nos estudos de ampacidade estatística. A comparação entre as temperaturas medidas e as calculadas pelo modelo do Cigre com base nos dados meteorológicos, constatou ser o modelo mais conservador, principalmente para o risco de 1%. Medidas realizadas em um mesmo momento, nos diversos lados do pentágono, apresentaram diferenças de 10 a 15^oC devido à direção do vento.

As temperaturas do condutor medidas no período noturno foram pouco maiores que as medidas no período diurno.

O sistema de monitoramento das tensões mecânicas de condutores instalado na LT está em fase de aferição de seus parâmetros. O IT apresenta os resultados das primeiras medições do sistema e espera-se que à época da apresentação plenária, resultados mais atuais e mais densos se façam presentes.

6.0 - AGRADECIMENTOS

A instalação do sistema de medição da tração mecânica dos cabos condutores mobilizou várias equipes de Furnas das áreas de estudo, projeto e manutenção de linhas, de telecomunicações e de operação de linhas e subestações. Além disto, o sistema de medição foi integrado ao sistema EMS – SAGE “Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia”, o que requereu que a instalação tivesse a participação da equipe do Cepel responsável pelo desenvolvimento do SAGE. Os autores do IT agradecem a colaboração e dedicação zelosa dessas equipes que, sem dúvida, possibilitaram o bom êxito da instalação do CAT-1 no campo.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “Critérios e Procedimentos para Cálculo da AMPACIDADE ESTATÍSTICA de Linhas Aéreas de Transmissão com Cabos Alumínio-Aço” - Força Tarefa Conjunta de Ampacidade Estatística, GCPS/GCOI, Agosto de 1993.
- [2] “Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica - Procedimentos” - NBR5422, 1985.
- [3] “The Thermal Behaviour of Overhead Conductors”, WG 22.12, Electra No. 144 October 1992;