



**XXII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

11/GLT/11
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO – GLT

SISTEMA DE MONITORAMENTO DE CARGAS MECÂNICAS EM ESTAIS DE TORRES DE TRANSMISSÃO

Aureo Pinheiro Ruffier (*)
Mária Q. F. Balthazar **João Saad Junior**
Antônio Leite de Sá **Renato de O. Rocha**
CEPEL

Wendell P. de Oliveira
Daniele R. O. de Lima
FURNAS

João Antônio Ferreira
Alexsandra S. da Silva
F. Pe. LEONEL FRANCA

RESUMO

Neste IT é detalhada uma pesquisa, realizada por FURNAS em colaboração com o CEPEL, cujo objetivo é estabelecer bases que proporcionem uma investigação consistente acerca do problema de colapso de torres de transmissão ocasionado por tempestades severas.

A pesquisa consiste no desenvolvimento, instalação e acompanhamento de um sistema de monitoramento em tempo real, cujas medições correlacionem a intensidade dos ventos no local com a carga mecânica atuante sobre os estais das torres. Um protótipo deste sistema de monitoramento foi instalado em uma das torres do sistema de transmissão de Itaipu, para fins de avaliação de sua viabilidade técnica.

PALAVRAS-CHAVE

Monitoramento em Tempo-Real, Instrumentação, Compatibilidade Eletromagnética, Esforços Mecânicos, Torres de Transmissão.

1.0 - INTRODUÇÃO

Tempestades severas têm causado um impacto significativo sobre o setor elétrico nos últimos anos, em especial nos estados das regiões Sul e Sudeste do Brasil, sendo estas tempestades responsáveis por um grande número de eventos de quedas de torres das linhas de transmissão. No intuito de minimizar tais custos e ainda os danos não mensuráveis aos usuários com a interrupção do sistema, FURNAS decidiu, com a colaboração do CEPEL, desenvolver uma pesquisa para investigar a correlação dos esforços mecânicos nas estruturas das torres de transmissão com os fenômenos naturais oriundos de tempestades. Esta pesquisa consiste no desenvolvimento, instalação e acompanhamento de um sistema de monitoramento em tempo real, cujas medições correlacionem a intensidade dos ventos no local com a carga mecânica atuante sobre os estais das torres. Além disso, foi contemplada a transmissão remota dos dados do sistema de aquisição para uma estação central de armazenamento. Em uma primeira etapa, foi desenvolvido um protótipo do sistema de monitoramento para fins de avaliação de sua viabilidade técnica, estando a extensão da aplicação a outras torres condicionada aos resultados obtidos com este protótipo. Os locais para instalação do sistema, em sua fase piloto, foram selecionados em função da alta incidência de queda de torres, ocasionadas por ventos muito fortes, oriundos destas tempestades severas, no sudoeste do Paraná, próximos à fronteira com o Paraguai. Sendo assim, o protótipo do sistema foi instalado em uma torre da região de Foz do Iguaçu, mais precisamente em Medianeira, no mês de agosto de 2012, tendo-se com isto iniciado a formação de base histórica. Os resultados até agora obtidos mostraram-se altamente promissores. Espera-se, na época de apresentação do IT, já se dispor de uma consistente base de dados.

(*) Av. Horácio Macedo, n° 354 – sala 127 – Bloco AB – CEP 21.941-911 – Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 2598-6149 – Fax: (+55 21) 2260-1340 – E-mail: aureo@cepel.br

Posteriormente, para a segunda fase da pesquisa, pretende-se complementar as medições agora contempladas, com a medição da vibração da torre e das cargas nos cabos condutores. Para realização deste objetivo será feito um levantamento, durante esta primeira fase, da viabilidade técnica destas medições.

A nível do retorno do produto da pesquisa para o setor, identifica-se como benefício principal a disponibilização de uma infra-estrutura que viabilize o aprimoramento do processo de acompanhamento do comportamento das torres monitoradas, no sentido de diagnosticar as causas dos possíveis colapsos, assim como de prognosticá-los. Isso pode se traduzir, no longo prazo, em ganho de disponibilidade das mesmas para o sistema elétrico, com a redução de risco de colapso deste, a partir de uma tomada de decisão mais eficaz no que tange a procedimentos de prevenção.

2.0 - DESAFIOS TÉCNICOS

A instrumentação de uma torre de transmissão de alta tensão apresenta relevantes desafios técnicos, como a de não empregar componentes externos intermediários entre os estais e a torre para medição da carga mecânica. Desta forma, células de carga comerciais, por exemplo, não seriam permitidas devido à possibilidade dos mesmos virem a representar um ponto de fragilidade na resistência mecânica do sistema de sustentação da torre. Por conta desta limitação, tiveram de ser desenvolvidas células de carga especiais, utilizando os suportes de roldana dos estais, que possibilitassem o monitoramento da carga de tração dos estais sem a necessidade da inserção de elementos estranhos à montagem padrão dessas torres. O sistema deveria ser alimentado de forma autônoma com um mínimo de manutenção local, exigindo o emprego de sistema fotovoltaico, além de ser confiável em ambiente eletromagnético e climático hostil. Tais requisitos obrigaram a cuidados especiais na compatibilidade eletromagnética e proteção mecânica para o abrigo de sistema de aquisição e transmissão de sinais sensível. Requisito adicional é a existência de um robusto sistema de alarme e controle, que possibilitasse sua operação remota a partir dos escritórios de FURNAS no Rio de Janeiro.

3.0 - DESCRIÇÃO DO PROJETO

3.1 VISÃO GERAL

Os componentes principais do sistema de monitoramento são:

- Hardware de condicionamento e aquisição de sinais específicos para o problema;
- Software para tratamento e visualização dos dados, de acordo com as necessidades de análise;
- Sensores de velocidade de vento e sensores de carga mecânica (células de carga), sendo estes últimos desenvolvidos no CEPEL no sentido de atender às necessidades específicas do projeto;
- Cabeamento e conexões;
- Gabinete especialmente concebido para colocação do equipamento instalado no alto das torres;
- Modem para transmissão dos sinais por telefonia celular;
- Servidor de banco de dados e de aplicação, para disponibilização do sistema aos usuários finais;
- Sistema de alimentação elétrica através de baterias e painéis fotovoltaicos.

3.2 EQUIPAMENTOS EMPREGADOS NO PROJETO

3.2.1 Gabinete

O gabinete tem o propósito de abrigar o sistema eletrônico composto pelo hardware de aquisição e tratamento de sinais e o equipamento de comunicação, devendo o mesmo ser apropriado ao ambiente climático e eletromagnético presente naquele ponto da torre. Foi projetado em aço carbono galvanizado de 2 mm de espessura, sem pintura, com porta possuindo dois fechos castelo com abertura para baixo e com coifa para entrada de ar. Adotou-se como proteção anti-corrosiva a galvanização tanto externa como interna. A figura 1 apresenta o gabinete.

A característica construtiva adotada no gabinete para minimizar os efeitos impostos pela radiação solar foi a de se utilizar um painel duplo em alumínio, com espessura de 2 mm, também sem qualquer processo de pintura, para sombreamento na parte superior do painel que é a parte mais exposta à incidência direta do sol nas horas de maior potência radiada.



Figura 1 – Gabinete

Os autores entenderam que as dimensões da caixa, a baixa resistência térmica do aço, as aberturas de passagem de ar, a localização da mesma em grande altura na torre e a dissipação interna permitiriam uma solução passiva através do próprio gabinete, conforme confirmado nos testes climáticos, descritos adiante.

3.2.2 Hardware de Aquisição de Sinais

Foi adotada, para a aquisição de sinais, uma arquitetura comercial específica para este fim. Esta solução foi definida em função de característica própria do sistema computacional empregado nesta aplicação (Sistema SOMA), desenvolvido pelo CEPEL.

O hardware adotado é industrial e modular para aquisição distribuída de sinais, além de robusto e de excelente relação custo/benefício. Foi especificada uma configuração que atendesse às necessidades do projeto, consistindo esta dos seguintes itens:

- Controladora programável com entradas seriais RS-485 e 232;
- Módulo de entrada analógica de 8 canais;
- Módulo para strain gauges de 8 canais.

3.2.3 Células de Carga

Por medida de segurança, decidiu-se por não empregar componentes externos intermediários entre os estais e a torre para medição da carga mecânica, como, por exemplo, células de carga comerciais, devido à possibilidade dos mesmos virem a representar um ponto de fragilidade na resistência mecânica do sistema de sustentação da torre. Dessa forma, optou-se por utilizar os suportes de roldana dos estais como células de carga, sendo a finalidade dessa transformação possibilitar o monitoramento da carga de tração dos estais, sem a necessidade da inserção de elementos estranhos à montagem padrão dessas torres.

A idéia básica para a utilização dos suportes para roldana como células de carga consiste em medir a deformação causada pela tração do estai sobre a chapa, relacionar a deformação com a tensão correspondente e, por fim, esta com a carga nos estais. Para a medição de deformação das chapas, adotou-se a instalação de uma ponte completa de strain-gauges, de forma a atender aos requisitos de precisão e de compensação da deformação de origem térmica.

Como medida prévia para uma melhor configuração da instalação dos strain-gauges no corpo das chapas metálicas, uma simulação computacional da solicitação estática dessas chapas quando submetidas à tração foi implementada em elementos finitos (ver figura 2), de maneira a se avaliar a localização dos pontos onde ocorrem as maiores deformações no corpo do suporte da roldana, possibilitando assim a definição da configuração mencionada e, conseqüentemente, maior resolução na leitura dessas medições.

Determinadas as regiões de maior deformação, foi projetada a montagem dos sensores strain-gauges, validada posteriormente através de ensaios mecânicos, que também serviram para calibração das células. Nas figuras 3 e 4 podem ser vistas, respectivamente, a montagem dos strain-gauges nas placas, bem como o aspecto final das mesmas.

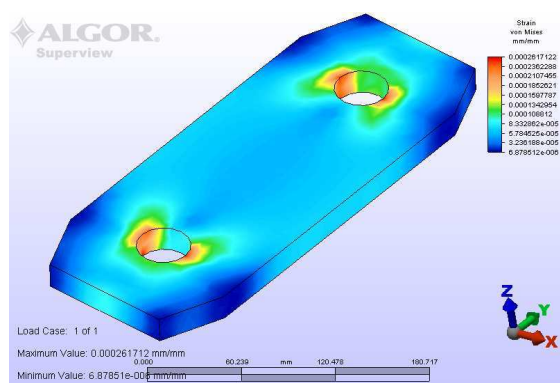


Figura 2 – Resultado da simulação computacional para a tração da chapa



Figura 3 – Célula de carga instrumentada com os strain-gauges



Figura 4 – Aspecto final das células de carga

3.2.4 Anemômetros

Foram utilizados anemômetros sônicos de dois tipos: tridimensional e bidimensional, sendo o primeiro para ser instalado no topo da estrutura da torre e o segundo para a posição a 10 metros do solo, altura esta seguindo o padrão de ventos de referência, estabelecido na norma ABNT 5422. Com o anemômetro tridimensional, pretende-se monitorar o vento descendente, oriundo de tempestades severas, durante o fenômeno da "micro-explosão" o qual pode chegar a velocidades bastante altas. Duas especificações importantes quanto aos anemômetros foram permitir medições sob condições de precipitações intensas (300mm/h) e possuírem capacidade de medição de intensidades entre 0 e 65 m/s.

3.2.5 Acessórios: Cabeamento e Conectores

Para instalação do protótipo do sistema de monitoramento deve-se estar atento às dificuldades de fixação do gabinete e do seu cabeamento na torre, não só quando da colocação inicial, como nas futuras manutenções. Assim, os cabos que interligam os sensores (anemômetros e strain-gauges) e elementos de alimentação possuem conectores nas extremidades. O cabo é flexível, resistente à umidade e a raios UV para que possa ficar exposto ao tempo. Além disso, apresenta dupla blindagem que garante proteção contra a indução de tensões nos circuitos internos a partir de campos eletromagnéticos e correntes de modo comum que podem apresentar espectro de frequências que vai da frequência industrial a perturbações impulsivas devidas a descargas atmosféricas. Os conectores especificados são circulares de alumínio, padrão militar, resistentes a intempéries (norma MIL-C-5015), à vibração e à rápida variação de temperatura e pressão.

3.2.6 Modem

Para fins de comunicação do sistema de monitoramento com um servidor de banco de dados remoto, foi utilizado o protocolo GPRS disponível para redes de telefones celulares GSM. Este sistema permite a comunicação dos dispositivos com o servidor através de vários protocolos de comunicação internet (HTTP, FTP, Socket, SMS, etc.).

O modem 3G adotado funciona nas seguintes condições:

- Tri-band UMTS/HSDPA, 850/1900/2100 MHz;
- Quad-band GSM/GPRS/EDGE, 850/900/1800/1900 MHz;
- HSDPA: até 3.6 Mbps download, até 384 Kbps upload.

3.3 SISTEMA COMPUTACIONAL – SISTEMA SOMA-TORRES

A aquisição, processamento, armazenamento, transmissão e apresentação dos dados do projeto ficaram a cargo do sistema computacional desenvolvido no CEPEL para este fim – Sistema SOMA.

O sistema SOMA é um sistema integrado que incorpora alguns produtos previamente desenvolvidos pelo CEPEL na linha de monitoramento, análise e diagnóstico de equipamentos, visando atender às empresas quanto ao aumento da disponibilidade e à redução dos custos de manutenção.

O sistema SOMA-Torres é uma aplicação específica do SOMA, que tem como objetivo monitorar as condições estruturais de torres estaiadas, através de aquisição de dados a partir de sensores analógicos e digitais, tais como a força exercida nos estais (deformação), temperaturas externa e interna do gabinete, velocidade e direção dos ventos, além dos sensores responsáveis pelo monitoramento da alimentação (energia solar): corrente dos painéis solares e a tensão das baterias.

O SOMA-Torres permite realizar remotamente todos os processamentos e conversões dos dados, além de gerenciar a transmissão dos pacotes de dados (históricos, alarme, logs, caixa-preta, comandos etc.) de acordo com seu nível de prioridade. Uma "caixa-preta" local para persistência dos dados coletados é mantida, de forma que estes possam ser recuperados em caso de acidente grave na torre. Um conjunto constituído de um programa monitor e uma placa de watchdog externo permitem a restauração da controladora do modem 3G.

A plataforma de hardware utilizada consiste em um equipamento de instrumentação virtual específico instalado na torre de transmissão a ser monitorada, e um servidor (que pode ser usado com o Sistema Operacional Windows, Linux ou Mac OS X). A interface visual foi desenvolvida usando metodologias de Orientação a Objetos e Design Patterns em ambiente WEB seguindo os padrões W3C.

As informações são apresentadas em interface visual adequada, usando processamento de eventos (click de mouse, drag-and-drop), gráficos, tabelas, textos, diálogos e formulários. Na figura 5 pode ser visto um exemplo da interface de análise exibindo um gráfico com os dados de velocidade (m/s) e direção (setas) dos ventos dos anemômetros 2D e 3D, medidas de deformação (tf) em um dos estais e, ao lado esquerdo, um esquema simbolizando a visão de cima da torre com seu posicionamento em relação ao norte.

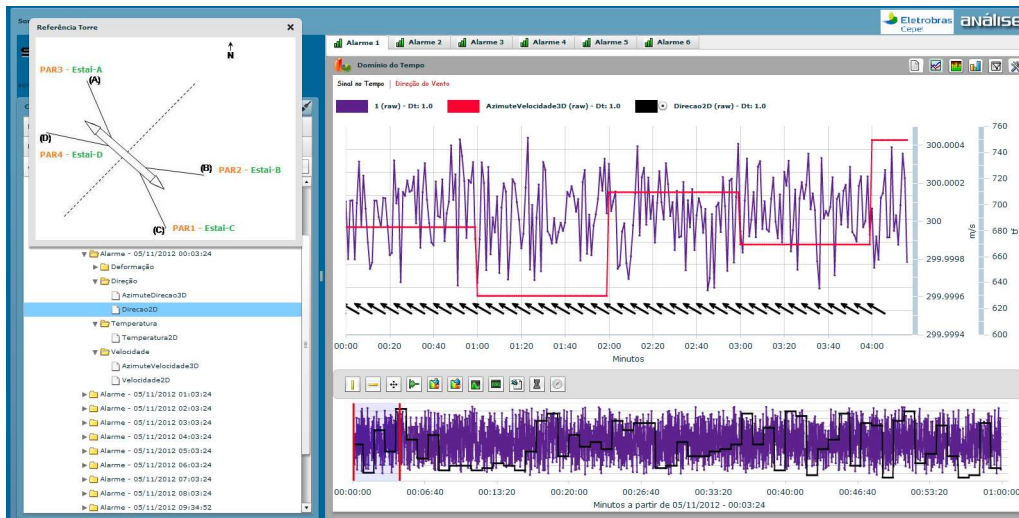


Figura 5 - Interface gráfica do SOMA-Torres

Segue, abaixo, uma lista de Funcionalidades Básicas do Sistema SOMA-Torres, além de uma breve descrição de algumas delas:

- Análise gráfica de dados históricos;
- Análise gráfica de dados brutos de alarme;
- Visão dos dados no domínio de tempo e frequência;
- Caixa-preta para armazenamento seguro dos dados coletados na controladora;
- Transmissão de dados por rede 3G e EDGE;
- Sistema de Watchdog;
- Monitoramento remoto do sistema de aquisição de dados;
- Gerenciamento da unidade remota de processamento.

Caixa-preta - Responsável por armazenar os pacotes de dados remotamente, em casos de indisponibilidade de rede no momento da transmissão. Posteriormente esses pacotes são transmitidos simultaneamente com os pacotes de dados das aquisições atuais. No caso de problema crônico de transmissão via 3G é possível resgatar os dados diretamente no cartão de memória da controladora de aquisição.

Sistema de Watchdog - Mecanismo que garante o restabelecimento automático da unidade remota ou do modem 3G e EDGE em casos de problemas inesperados como travamento, por exemplo.

Monitoramento e Restauração - O Sistema é robusto o suficiente para que identifique e, eventualmente, restaure seu estado operacional em caso de ocorrência de falhas internas. Existe acompanhamento de pontos essenciais do processo para que, na ocorrência de anormalidades, o sistema consiga identificá-los alertando o problema, e em determinados casos, restaurar o estado de normalidade. Estes mecanismos de monitoramento deverão ser usados pelos administradores do sistema para verificação periódica da saúde do processo.

Gerenciamento da unidade remota de processamento - Através de comandos, pode-se manipular a unidade remota alterando as configurações de alarme, históricos, data e hora, nível de log, reiniciando a aplicação e a unidade remota, ativando e desativando os transmissores de dados, coletores de sinais, a "caixa-preta", entre outros.

3.4 COMUNICAÇÃO REMOTA

O processo de comunicação remota para transmissão dos dados envolve quatro agentes: controladora; modem; servlet de gateway e sistema SOMA-Torres. Uma representação esquemática do mesmo pode ser vista na figura 6.

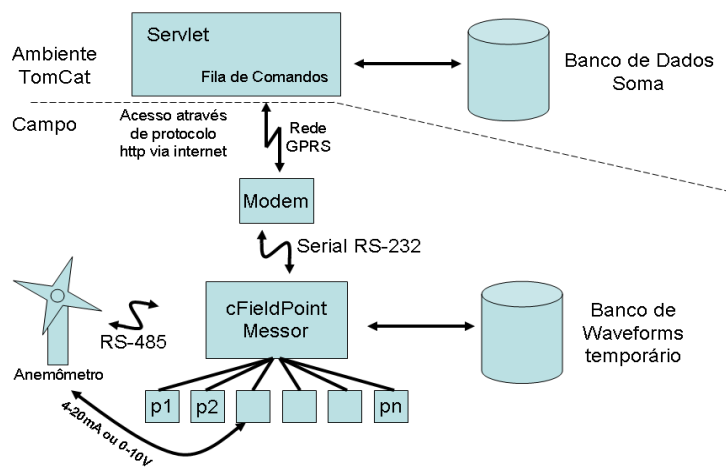


Figura 6 – Esquema de comunicação remota

3.5 ASPECTOS DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA

A compatibilidade eletromagnética do sistema eletrônico a ser instalado indica a capacidade do mesmo funcionar adequadamente no ambiente eletro-magnético gerado pela linha/torre de alta tensão em qualquer circunstância. As fontes deste ambiente eletromagnético são: as altas tensão e corrente à frequência industrial, o efeito corona e as descargas atmosféricas diretas (linha ou torre) ou próximas. Estes dois últimos são responsáveis pelo acoplamento de perturbações em altas frequências, de centenas de kHz a alguns MHz, tanto permanentes como transitórias.

A unidade de aquisição atende a importantes normas IEC de compatibilidade eletromagnética (61000-4-2; 61000-4-3; 61000-4-4; 61000-4-5; 61000-4-6; 61000-4-11), o que confere uma certa robustez ao núcleo de processamento. Porém, os sinais transmitidos pelos cabos são oriundos de strain-gauges, com nível de variação de tensão de dezenas de milivolts sobre sinal de 5V, a baixa frequência. Adicionalmente, a comunicação dos anemômetros é através da interface RS 485, também de baixo nível, apesar de balanceado. Consequentemente, a necessária compatibilidade eletromagnética entre os sinais de baixo nível e o ambiente eletromagnético local agressivo demandou cuidados especiais no projeto do gabinete e no tipo de cabos. O gabinete foi construído de forma a proporcionar uma gaiola de Faraday para a blindagem dos equipamentos internos. Para tanto, teve de ser garantida uma continuidade elétrica em toda a sua superfície metálica, para que o gabinete blinde eficientemente possíveis perturbações eletromagnéticas em frequências de 60Hz a vários MHz. A continuidade elétrica entre a porta e o corpo do gabinete foi obtida através do emprego de gaxetas condutivas (TECKNIT pat nº 79-10780) que são de material adequado para proporcionar, também, a vedação contra água e poluição.

No tocante aos cabos de interligação entre o gabinete e sensores/alimentação, estes também são blindados por serem elementos bastante sensíveis ao acoplamento de perturbações pelo efeito antena quando submetidos aos campos eletromagnéticos espúrios. Porém, um ponto crítico na manutenção da eficiência das blindagens tanto de gabinete como dos cabos é a garantia da continuidade elétrica entre gabinete e blindagens dos cabos, sujeitas às correntes induzidas pelo ambiente eletromagnético externo, sobretudo nas descargas atmosféricas. Neste caso, foi empregado um passa-cabos especial da ROXTEC, conforme mostrado na Figura 7, que proporciona um caminho de baixa impedância de transferência (baixa indução interna) para as correntes de modo comum das blindagens. Esta solução garante contato elétrico de qualidade entre a blindagem do cabo e a superfície do gabinete ao longo de 360°, preservando a continuidade da superfície metálica de toda a área ocupada pelo passa-cabos.



Figura 7 – Sistema de passagem de cabos da ROXTEC

No que diz respeito aos cabos que interligam os transdutores ao hardware de aquisição no gabinete, optou-se por um tipo com blindagens individuais por par de fios de sinal, e uma blindagem geral externa, composta por uma camada de malha de cobre estanhado e uma camada de filme de poliéster metalizado, ambas isoladas entre si. A redução de acoplamentos magnéticos requer uma blindagem aterrada em ambas as extremidades, sendo para isso usada a blindagem geral externa em malha de cobre estanhado. Como as correntes na blindagem externa podem ser ofensivas aos sinais do cabo de valor muito baixo (gerados pelos strain-gauges), a existência das blindagens individuais aterradas de forma radial se justifica para a blindagem destes sinais à ação das correntes da blindagem externa. As blindagens individuais foram aterradas no lado dos equipamentos e sensores. Como reforço desta proteção, a fita de poliéster metalizada externa, usada para a blindagem em frequências mais altas (vários MHz), também foi aterrada apenas no lado dos equipamentos e sensores. Adicionalmente, as blindagens individuais internas reduzem possíveis interferências entre sinais de um mesmo cabo (cross-talk).

3.6 ASPECTOS CLIMÁTICOS

Considerando-se a severidade do ambiente em que os equipamentos do projeto foram instalados e permanecerão em operação, tomou-se o cuidado de especificá-los tomando por base este aspecto, assim como de realizar testes de avaliação no CEPEL. Para avaliar o desempenho térmico do gabinete, foi montada internamente uma configuração próxima da instalação definitiva com o hardware de aquisição de sinais a ser empregado, porém agregando-se um sistema de aquisição de dados para o monitoramento da temperatura interna do gabinete composto de um sistema de aquisição de dados e 4 sensores de temperatura da Analog Devices (AD590LH).

Para o monitoramento das condições climáticas externas, foi utilizada uma estação meteorológica instalada próxima ao gabinete, e conectada a um sistema de aquisição de dados (datalogger). Nesta estação foram medidas a temperatura e a umidade relativa, a velocidade do vento e a intensidade da radiação solar. A aquisição foi realizada a cada 2 minutos. Observou-se que a velocidade do vento durante o ensaio foi pequena, no máximo 0,3 m/s, não havendo, portanto, grande influência no resfriamento da superfície externa da caixa devido ao vento. A umidade relativa durante o dia ficou com aproximadamente 50%, chegando a 96% nas primeiras horas da manhã,

com pouca influência sobre a dissipação, se comparado com a influência dos demais parâmetros. Os resultados mostraram que, durante o período de baixa incidência de radiação solar, a temperatura interna acompanhou a temperatura externa com uma diferença menor que 2°C. Esta diferença aumentou cerca de 10°C no período de maior incidência de radiação solar, caindo mais lentamente do que a radiação devido à elevação da temperatura ambiente. Ficou evidente que, conforme esperado, a temperatura interna é influenciada prioritariamente pela temperatura externa e pela radiação solar. O teste ocorreu durante o final de outono, portanto, com baixa intensidade de radiação solar, isto é, máxima em torno de 630 W/m². Extrapolando-se para 1 kW/m² e de forma conservadora (considerando-se que a maior parte da energia é devido à radiação solar), pode-se prever uma diferença de temperatura máxima de 15,8°C, o que significa uma temperatura interna de 55,8°C para uma temperatura externa de 40°C, abaixo da temperatura máxima de operação dos módulos (60°C e 70°C). Consequentemente, conclui-se que o gabinete atende ao projeto sem prejuízo de seu funcionamento, principalmente considerando-se que dificilmente a temperatura externa na altura prevista para o gabinete e em locais descampados atingirá este valor.

3.7 ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA

A energia para a alimentação da plataforma de aquisição de dados remota foi obtida através da conversão da radiação solar existente no local em energia elétrica. O sistema básico de geração de energia é composto por três painéis fotovoltaicos e um banco armazenador de energia com duas baterias de descarga profunda. O projeto foi dimensionado para prover a energia necessária para o perfeito funcionamento da plataforma remota de aquisição de dados durante as vinte e quatro horas do dia, incluindo todos os sensores e o sistema de comunicação GSM, mesmo em dias em que não ocorra insolação direta. Além disso, o módulo de armazenamento foi dimensionado para suprir a energia suficiente para manter o sistema operando normalmente, com até 120 horas de ausência de radiação solar.

4.0 - INSTALAÇÃO NO CAMPO

Devido ao ineditismo deste trabalho, que consistiu em desenvolver um sistema de aquisição de dados usando uma arquitetura comercial embarcada em um gabinete especialmente projetado para suportar o ambiente elétrico rigoroso (topo de uma torre de transmissão de 750 kV – ver figura 8a), além da instrumentação, alimentação com baterias e painéis fotovoltaicos, cabeamento e conexões especiais, houve especial atenção na sua instalação. Esta instalação foi um trabalho conjunto da equipe operacional de FURNAS e uma equipe multidisciplinar do CEPEL, já que envolvia não só a instalação física como os testes de software.

O gabinete foi instalado sobre um suporte fixado à torre e os cabos de entrada do mesmo foram fixados a outro suporte, preso à torre abaixo do gabinete (figura 8b). O suporte do anemômetro tridimensional foi instalado sobre a cantoneira transversal superior próxima ao gabinete, no topo da torre (figura 8c) e o bidimensional sobre o mastro da torre, a 10 m do solo (figura 8d).

Os suportes dos estais com as células de carga foram enviados previamente junto com o seu “manual de instalação” para que a sua instalação fosse realizada com antecedência pela equipe de FURNAS (figura 8e), procurando evitar atrasos na instalação final.

A caixa com as baterias foi instalada próximo ao gabinete e os painéis fotovoltaicos sobre as vigas no topo da torre (figura 8f). Os painéis foram montados sobre suportes em “L” para atender a declinação necessária para uma melhor eficiência.

A última etapa consistiu na instalação dos cabos, sendo esta realizada de forma criteriosa, pois a interconexão poderia trazer prejuízo ao instalador, devido a torre estar submetida a alta tensão e a campos eletromagnéticos que poderiam ser induzidos nos cabos manipulados. Por motivo de segurança, todo cabo que fosse lançado e afixado ao longo da torre teria uma extremidade inicialmente aterrada na mesma. A forma de fixação dos cabos ao longo das vigas da torre foi desenvolvida usando abraçadeiras. Isto facilitou a sua instalação, sem haver necessidade de ser realizada qualquer furação, que poderia interferir na estabilidade da torre.

5.0 - ANÁLISE DE RESULTADOS

Pelos resultados já obtidos, verifica-se uma forte correlação entre os esforços observados nos estais, e a intensidade e direção do vento. Maiores detalhes destes resultados serão exibidos quando da apresentação do IT. Conclui-se, então, que os parâmetros escolhidos para serem monitorados mostraram-se suficientes, e com a estabilidade necessária para a correlação entre ventos e esforços mecânicos atuantes na estrutura.

Em uma segunda fase da pesquisa pretende-se complementar as medições agora contempladas, através da instalação de acelerômetros, inclinômetros e células de carga na torre, nas cadeias de isoladores e nos cabos condutores, que possibilitem medições da vibração da torre e das cargas mecânicas naqueles cabos, bem como também da implantação de uma maior taxa de amostragem na medição dos esforços.



Figura 8 – Aspectos do sistema instalado

(a) visão geral da torre instrumentada; (b) gabinete; (c) anemômetro tridimensional e painéis fotovoltaicos; (d) anemômetro bidimensional; (e) suportes dos estais com as células de carga; (f) sistema de alimentação

6.0 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto descrito apresentou desafios até então inéditos para as nossas empresas, em função das naturais dificuldades de se instrumentar uma torre de alta tensão em ponto remoto de nossos centros de análise, e sujeita a influências eletromagnéticas e climáticas de grande intensidade. As primeiras podem interferir na aquisição direta dos dados locais, enquanto as climáticas apresentam desafios próprios à disponibilidade do sistema a longo prazo frente a problemas de vibrações mecânicas e infiltração de umidade em conexões elétricas sensíveis e importantes. Por estas peculiaridades, foi necessária a formação de uma equipe multidisciplinar, envolvendo pesquisadores e técnicos com especialização nas áreas de estruturas, mecânica, eletrônica, compatibilidade eletromagnética, meteorologia, comunicação e desenvolvimento de software. Os resultados foram considerados bastante satisfatórios para um trabalho em sua primeira versão, onde apenas no curso do desenvolvimento se toma contato com dificuldades inerentes à execução de tarefa desafiante. A experiência adquirida neste projeto e os avanços técnicos nos instrumentos atualmente disponíveis, permitem adotar-se, futuramente, formas mais compactas e rápidas de aquisição de dados na instrumentação de outras torres.

Indubitavelmente, um legado adicional deste trabalho foi a experiência gerencial na condução de atividade que envolve, não só o aspecto tecnológico, como também a interface com equipes de campo e a logística necessária para sua instalação e manutenção.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

**Aureo Pinheiro Ruffier**

Nascido no Rio de Janeiro (1957). Engenheiro Civil Estrutural (UFRJ–1979), com Mestrado (1985) e Doutorado (1999) na área de métodos numéricos aplicados à Geotecnia pela COPPE/UFRJ. Pesquisador do CEPEL, onde trabalha desde 1976 em projetos e pesquisas estruturais e mecânicos de linhas de transmissão de energia elétrica, professor universitário da UNESA e membro de diversas associações técnico-científicas, com destaque para o CIGRÉ.

**Mária Quintaes Fasura Balthazar**

Nascida em Nova Friburgo, RJ (1958). Engenheira Eletrônica (UFRJ–1982), com Mestrado em Engenharia Elétrica (2004) na área de medição eletrônica de energia elétrica pela COPPE/UFRJ. Pesquisadora do CEPEL, onde trabalha desde 1983 em projetos, pesquisas e ensaios na área de Compatibilidade Eletromagnética.

**João Saad Júnior**

Nascido no Rio de Janeiro (1955). Engenheiro Eletrônico (UFRJ–1978), Mestrado (Engenharia de Sistemas- COPPE/UFRJ, 1984), foi gerente de projetos de pesquisa do CEPEL. Atua desde 1984 em compatibilidade eletromagnética (EMC) de equipamentos eletrônicos em usinas e subestações de energia elétrica. Ministrou cursos do tema em concessionárias do setor, assim como atuou junto às mesmas na adequação dos seus processos para a operação com equipamentos sensíveis.

**Antônio Leite de Sá**

Nascido em Portugal (1949). Engenheiro Eletrônico (Universidade Santa Úrsula – 1980). Pesquisador do CEPEL, onde trabalha desde 1977 em projetos e pesquisas de energia elétrica, autor do primeiro Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (2001) e especialista em produção de energia elétrica a partir da força dos ventos.

**Renato de Oliveira Rocha**

Nascido no Rio de Janeiro (1962). Engenheiro Mecânico (UERJ–1987), com Mestrado (1992) e Doutorado (1996) em Engenharia Mecânica pela COPPE/UFRJ na área de Dinâmica e Vibrações com ênfase em máquinas rotativas. Atua profissionalmente como pesquisador no CEPEL desde 1990 e como Professor Adjunto em tempo parcial do Departamento de Eng. Mecânica da Universidade do Estado do Rio de Janeiro desde 1996.

**Wendell Porto de Oliveira**

Nascido no Rio de Janeiro (1978).
Formação: Graduação em Engenharia Industrial Mecânica (CEFET-RJ), Mestrado em Tecnologia (CEFET-RJ) e Doutorado em Engenharia Mecânica (COPPE-UFRJ).
Experiência Profissional: Engenheiro Mecânico (ELETROBRAS FURNAS - desde 2004)

**Daniele Rodrigues Ornelas de Lima**

Nascida em 1976 no rio de Janeiro. Graduada em Meteorologia pela UFRJ (2000) e Mestre em Ciências Atmosféricas em Engenharia pela COPPE/UFRJ (2005). Meteorologista em FURNAS, desde 2000, tem atividades voltadas ao apoio às áreas de geração de energia elétrica e de operação e manutenção do sistema de transmissão de energia da empresa; atendimento às condicionantes ambientais; gerência de projetos de P&D.

**João Antônio Ferreira**

Nascido em Assaí, PR (1957). Graduação em Física (UFRJ–1981), Pós Graduação em Análise de Sistemas (PUC-RIO–1984), MBA em Gestão de Empresas e Negócios (FGV-RJ/EBAPE–2003). Certificação da Lotus/IBM Notes/Domino Developer e Notes/Domino Administrator. Atuando como Arquiteto de Sistemas de TI no CEPEL em parceria com a PUC-RIO, desde 2006 no desenvolvimento de software de automação industrial e WEB.

**Alexsandra Santana da Silva**

Nascida em Recife, PE (1976). Graduação em Análise de Sistemas (UNESA-2005). Certificação da National Instruments-NI em 2012. Atuando profissionalmente como Analista de Sistemas no CEPEL em parceria com a PUC-RIO, desde 2009 no desenvolvimento de software para projetos nas áreas de Geração e Transmissão de Energia Elétrica.