

Sistema de Transmissão de Dados para Monitoramento de Linhas de Transmissão da Eletronorte

José A. D. Rossi, Celso P. Saraiva, Paulo E. S. Faria, Rogério B. Romano, Valdir Cardinalli Jr., Victor Vellano Neto, William R. Heinrich, Antonio N. Valente e Jorge Cabuçu L. Freitas

Resumo - Este artigo apresenta os objetivos e resultados alcançados no projeto de pesquisa aplicada “Sistema de Monitoramento de Linhas de Transmissão”, realizado sob o âmbito do programa de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL no ciclo 2003/2004, com a participação e execução da Fundação CPqD e UFPA (Universidade Federal do Pará), da Eletronorte (Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A.), sendo esta última a proponente do projeto. Será apresentada uma descrição sucinta do desenvolvimento de um sistema composto de equipamentos/dispositivos para sensoriamento dos parâmetros pertinentes à decisão de um carregamento de uma linha de transmissão em alta tensão, além da comunicação e tratamento dos dados obtidos através de uma rede Ethernet, composta por duas tecnologias de acesso: óptica (via OPGW - Optical Power Ground Wire) e wireless (Wi-Fi em 2,4 GHz).

Palavras-chave - Monitoramento de Linha de Transmissão; Sensores de Linha de Transmissão; Transmissão de Dados via Wi-Fi e Sistema Óptico.

I. INTRODUÇÃO

A confiabilidade operacional de uma Linha de Transmissão (LT) pode ser incrementada a partir do monitoramento de parâmetros que representem adequadamente as variáveis do processo sob estudo. Neste contexto, o desenvolvimento de uma solução confiável para monitoração de carregamento de uma Linha de Transmissão passa por diversos desafios tecnológicos: a representatividade do conjunto de mensurandos em relação à grandeza objeto de efetiva gestão (que modelem adequadamente o fenômeno sob estudo), a medição/transdução em ambiente eletromagnético inóspito,

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (V CITENEL), realizado em Belém/PA, no período de 22 a 24 de junho de 2009.

Este projeto de P&D, que teve como proponente a Eletronorte - Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A., foi gerenciado inicialmente por Wady Charone (inicialização do projeto), depois por Antônio Nazareno Valente (nazareno@eln.gov.br) e, posteriormente, por Jorge Cabuçu Lima Freitas (cabucu@eln.gov.br).

No CPqD - Fundação Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações trabalham os seguintes autores: J. A. D. Rossi (e-mail: jrossi@cpqd.com.br), C. P. Saraiva (e-mail: celso@cpqd.com.br), P. E. S. Faria (e-mail: pfaria@cpqd.com.br), R. B. Romano (e-mail: botteon@cpqd.com.br), V. Cardinalli Jr. (e-mail: vcard@cpqd.com.br), V. Vellano Neto (e-mail: vellano@cpqd.com.br) e W. R. Heinrich (e-mail: heinrich@cpqd.com.br).

a transmissão da informação por mecanismos confiáveis e de baixo custo e o processamento das medidas para avaliar os parâmetros do processo sob gestão.

No intuito de obter esta solução confiável para monitoração de carregamento de uma LT, foi desenvolvido o projeto de P&D “Sistema de Monitoramento de Linhas de Transmissão”, cujo código ANEEL é 0372-040/2003, com a participação e execução da Fundação CPqD (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações), UFPA (Universidade Federal do Pará) e Eletronorte (Centrais Elétricas do Norte do Brasil).

II. OBJETIVOS

Os principais objetivos deste projeto de P&D foram os seguintes:

- Identificar as principais variáveis de influência no processo de monitoração e supervisão remota de Linhas de Transmissão;
- Pesquisar os principais transdutores que pudessem ser empregados no sensoriamento das variáveis relevantes do processo de supervisão de Linhas de Transmissão;
- Desenvolver um sistema de monitoração distribuído de baixo custo, modular e que permitisse a inclusão futura de novos transdutores para monitoramento de outras grandezas não previstas inicialmente;
- Empregar sistema de comunicação eficaz e confiável para transmissão dos valores das grandezas transduzidas;
- Desenvolver técnicas para aquisição e processamento das variáveis do processo;
- Desenvolver um sistema de tratamento das informações.

III. RESULTADOS ALCANÇADOS

A importância na monitoração de Linhas de Transmissão está relacionada com fatores referentes à manutenção de sua integridade mecânica, diminuição de desligamentos intempestivos, maximização da sua capacidade de transmissão de energia, avaliação de parâmetros ligados à qualidade de energia e outros. É possível separar esses fatores em três aspectos principais: técnico, econômico e humano.

O tipo de monitoramento tratado neste trabalho visa a maximização da utilização dos ativos das concessionárias de

energia elétrica e adiar ao máximo a necessidade de investimentos na construção de novas LT's [1].

Portanto, o monitoramento possibilita uma operação mais inteligente, mais segura, e mais econômica das linhas de transmissão.

É importante salientar que o aspecto humano, que motivou o referido trabalho, está relacionado com a segurança das pessoas que habitam, que trabalham (no campo), ou transitam (área urbana) nas proximidades das LT's. O carregamento cada vez maior das LT's e a urbanização crescente em torno de LT's antigas, anteriormente localizadas em área rurais hoje urbanizadas, têm posto em risco um contingente considerável de pessoas.

A. Identificação de Variáveis Monitoráveis em Linhas de Transmissão

No aspecto técnico, os sistemas de monitoração mais utilizados e respectivos parâmetros monitorados são aqueles voltados para [2]:

- a) Monitoração do carregamento da linha:
 - Medição da altura condutor - solo;
 - Tração mecânica do condutor;
 - Temperatura do condutor x corrente.
- b) Monitoração de parâmetros mecânicos ou prevenção de falha mecânica:
 - Corrosão nos condutores;
 - Corrosão nas estruturas;
 - Vibração eólica;
 - Localização de queimadas;
 - Localização de pontos quentes (mau contato).
- c) Prevenção de falha elétrica:
 - Inspeção visual;
 - Medição/inspeção para detecção de efeito corona;
 - Medição de corrente de fuga de isoladores;
 - Sistemas de localização de faltas;
 - Monitoração de descargas atmosféricas.
- d) Qualidade de Energia:
 - Medição de Corrente, Tensão, etc. (normalmente em Subestações).
- e) Parâmetros climáticos e ambientais:
 - Medição de temperatura ambiente, velocidade e direção de ventos, insolação, etc., utilizados no apoio a outros sistemas de monitoramento;
 - Medição de poluição.

B. Requisitos de Equipamentos Instalados em Ambiente de Linha de Transmissão

Genericamente, pode-se dizer que vários são os aspectos relacionados ao ambiente de instalação, que devem ser previstos por um equipamento, quando da elaboração de especificações a serem atendidas pelo mesmo para operar nesse determinado ambiente.

A complexidade de abordagem de determinado aspecto ambiental, qualquer que seja ele, é sempre alta, indo desde o tratamento estatístico dos dados medidos dos parâmetros até a percepção do usuário do equipamento com relação à expectativa de funcionamento do mesmo e do seu impacto econômico. Acrescenta-se aí a necessidade de se estabelecer

maneiras adequadas da verificação do equipamento quanto às características desejadas, de forma a garantir que seja representativa de fenômenos que realmente ocorrem em campo na utilização do equipamento.

Um aspecto bastante importante considerado na abordagem de fenômenos relacionados à compatibilidade eletromagnética, onde perturbações eletromagnéticas de interesse devem ser quantificadas adequadamente, são os procedimentos de levantamentos dessas grandezas, que apesar da complexidade devem permitir a reprodução mais fiel possível do fenômeno. No entanto, o detalhamento desses procedimentos não é normalmente encontrado em documentos e publicações. Assim, um dos poucos documentos especificamente elaborados sobre ambiente eletromagnético, a publicação IEC TR 1000-2-5 [3], ou mesmo alguns utilizados especificamente para ambiente de telecomunicações, como o ETSI TR 101 651 [4] e ITU Rec. 34, apresentam somente informações sobre as fontes de perturbação presente no ambiente, níveis das perturbações a serem considerados na análise e as condições de utilização de tais limites, não detalhando as formas com que foram medidas ou mesmo significado estatístico com relação às ocorrências.

C. Caracterização do Ambiente Eletromagnético em Linhas de Transmissão

Na busca das características do ruído eletromagnético ou perturbações eletromagnéticas relacionadas a linhas de transmissão, verificou-se alguns fenômenos relevantes como efeito corona, transitórios devido à descarga atmosférica, ruído devido a rompimento de isoladores e outros fenômenos específicos e que serão a seguir citados. Porém, não se consegue para linhas de transmissão a abordagem mais ampla envolvendo fenômenos presentes, mas que não estejam diretamente relacionados à linha de transmissão propriamente dita. Assim sendo, a abordagem desse ambiente leva à série de documentos da IEC 61000-2, que normalmente são utilizados para ambientes industriais, ambientes residenciais, de subestação e outros, onde diversos fenômenos relevantes para a definição de requisitos de equipamentos são considerados, sejam transitórios ou de radiofrequência, etc.

Foram desenvolvidos os temas onde as fontes de ruído estão ligadas diretamente à linha de alta tensão, sendo as demais perturbações aquelas eventualmente utilizadas para a definição de requisitos de equipamentos para ambiente industrial, o qual sugere-se como fonte de informação sobre demais fenômenos de interesse para linhas de transmissão.

Apesar de não se entrar em detalhes sobre levantamentos e resultados, é importante citar que as perturbações eletromagnéticas mais comuns de serem encontradas em instalações elétricas de alta tensão são:

- a) Transientes elétricos devido a operações de chaveamento de relés e disjuntores em circuitos elétricos de alta tensão;
- b) Transientes elétricos devido a rompimento de isolação (*insulation breakdown*) em circuitos de alta tensão ou abertura de arcos em *surge diverter* e *spark-gap*;
- c) Campos elétricos e magnéticos produzidos pela instalação de alta tensão;

- d) Variação de tensão devido a correntes de curto circuito;
- e) Transientes elétricos devido a descargas atmosféricas, particularmente devido à presença de estruturas de torres enterradas;
- f) Perturbações radiadas e conduzidas de alta frequência produzidas por outros equipamentos presentes nas instalações.

A partir do conhecimento das características destes fenômenos e outros considerados pela IEC em seu documento IEC 61000-2-5, foi publicado a IEC TS 61000-6-5 [5], que é uma especificação técnica que trata especificamente dos requisitos de imunidade eletromagnética para equipamentos instalados em estações e subestações de média e alta tensão.

D. Estudo Prospectivo de Sensores Aplicáveis ao Monitoramento de Linhas de Transmissão

Os aspectos predominantes na escolha dos sensores para uso neste projeto foram:

- Imunidade e confiabilidade operacional para uso em ambiente eletromagneticamente agressivo (EMC).
- Consumo, autonomia e tempo médio entre falhas (MTBF) teórico.
- Características do sinal transformado.

E. Estudo de Tecnologias de Transmissão Aplicáveis ao Monitoramento de LT's da EletroNorte

Foram realizados os estudos e obtidas as conclusões das análises efetuadas sobre determinadas tecnologias para transmissão dos sinais digitais, gerados pelos sensores e seus respectivos alarmes, e que serão recebidos por uma unidade do sistema de monitoramento, que estará instalada na subestação, localizada na extremidade da LT da ELETRO NORTE.

Baseada nos sistemas analisados (Óptico e Rádio), foi montada uma proposta de um sistema de monitoramento das LT's para a ELETRO NORTE. Os componentes desse sistema foram especificados e adquiridos para atender essa proposta.

F. Especificações e Testes Sistêmicos no CPqD

Nesse estágio do trabalho, foram obtidos os resultados dos testes do sistema desenvolvido até esse ponto. Esses testes sistemáticos foram realizados nas instalações do CPqD, objetivando analisar o comportamento do protótipo de sistema em ambiente externo e com distâncias próximas da realidade encontrada em campo.

A escolha do tipo de rede utilizada neste trabalho recaiu sobre a alternativa de uma rede de altas taxas baseada no protocolo Ethernet, incorporando:

- a) solução rádio comercial com *Access Point* 802.11b/g em 2,4GHz;
- b) solução óptica comercial, que utiliza conversores de mídia Gigabit Ethernet.

A rede Ethernet possui as seguintes vantagens:

- a) baixo custo de implementação para produtos comerciais;
- b) protocolo auto-gerenciável - TCP/IP;
- c) altas taxas de transmissão de dados (até 1Gbps);
- d) sem limites de escalonabilidade;
- e) em função da banda disponível, a rede pode ser utilizada para diversas outras aplicações.

É importante salientar que, neste trabalho, foram desenvolvidos os empacotamentos mecânicos dessas soluções mencionadas acima para operarem no ambiente hostil das LT's (forte campo eletromagnético e condições climáticas severas). Foram realizados os testes de Compatibilidade Eletromagnética necessários, assim como as experiências com a alimentação elétrica dos componentes desse sistema.

O objetivo principal desse campo de teste no CPqD foi validar o sistema híbrido de transmissão de dados especificado neste trabalho, antes de testá-lo em linha de transmissão real. Uma das vantagens foi a possibilidade de corrigir falhas e atingir um patamar aceitável de qualidade técnica nos componentes desenvolvidos neste trabalho.

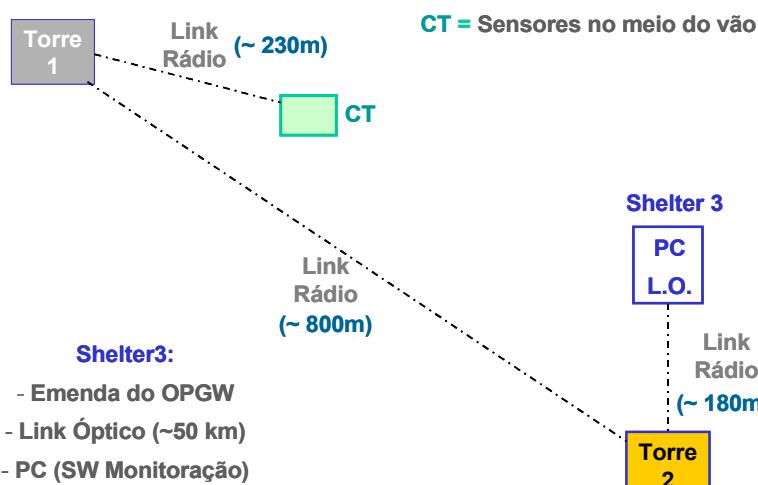


Figura 1. Esquema do teste sistemico da transmissão de dados no CPqD

O Shelter 3 desse Campo de Teste Piloto é um container climatizado, que oferece visada direta com a Torre 2 (metálica) do CPqD. No interior desse container, foram instalados os seguintes componentes da rede:

- Rádio de 2,4 GHz e sua respectiva antena;
- Armário especificado pelo projeto (para instalação na torre da linha de transmissão) contendo, principalmente, os conversores de mídia Gigabit Ethernet (vide figura 5);
- Link óptico de 50 km (aproximadamente);
- Microcomputador com o Software de Gerenciamento.

Figura 5. Vista interna do armário em teste (Shelter 3)



Figura 2. Dispositivo cilíndrico (em teste)

A Torre 1 desse Campo de Teste Piloto é a torre de concreto, denominada de prédio 38 do CPqD. Na parte superior dessa torre, foi instalado um armário metálico (figura 3) contendo:

- Estação meteorológica;
- Rádio de 2,4 GHz, e
- Antena do rádio.



Figura 3. Vista do armário (na Torre 1)

A Torre 2 desse Campo de Teste Piloto é uma torre metálica, que tem visada direta em uma diagonal do terreno do CPqD. Na parte superior dessa torre, foram instaladas: uma caixa polimérica, para proteger um rádio de 2,4 GHz, e uma antena do rádio (figura 4).



Na parte externa do Shelter 3, foi instalado um painel solar para a alimentação dos citados equipamentos.



Figura 6. Vista do Shelter 3 e Painel Solar

G. Ensaios de Imunidade a Campo Elétrico e Campo Magnético de 60 Hz

No laboratório específico, foram realizados, nos equipamentos do sistema proposto, os ensaios de imunidade a campo elétrico e campo magnético de baixa freqüência.

a) Imunidade a Campo Elétrico

- Especificação: 20,8 kV/m (60 Hz)
- Critério de Desempenho: Critério A - equipamento deve funcionar normalmente durante e após o ensaio.

b) Imunidade a Campo Magnético

- Especificação: 144,3 A/m (60 Hz)
- Critério de Desempenho: Critério A - equipamento deve funcionar normalmente durante e após o ensaio.

Ao final dos ensaios realizados, pode-se concluir que os equipamentos ensaiados, segundo os procedimentos adotados, foram imunes aos campos elétrico e magnético especificados.

IV. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DO SISTEMA DE MONITORAMENTO DE LT's

Como já mencionado anteriormente, neste projeto, foi dada uma ênfase no assunto “carregamento de LT's”. Para auxiliar a tomada de decisão operacional de um carregamento adicional em uma determinada LT, os parâmetros que são medidos através do sistema desenvolvido são:

- Altura do condutor ao solo em vão crítico entre duas torres;
- Temperatura do condutor de fase;
- Parâmetros ambientais (temperatura, umidade, pressão atmosférica, velocidade e direção dos ventos).

Esses parâmetros são medidos por diferentes sensores instalados na(s) torre(s) e no(s) condutor(es) de vão(s) designados pelo operador deste sistema de monitoramento.

A transmissão dos dados transduzidos e digitalizados é realizada por 2 (dois) subsistemas:

- Wireless - com Access Point 802.11b/g em 2,4GHz;
- Óptico - utilizando conversores de mídia Gigabit Ethernet.

Basicamente, a solução wireless utilizada nesse sistema, cujos equipamentos já são comercializados no mercado nacional a um custo relativamente baixo, possui uma interface “aberta” e realiza a transmissão dos dados no trecho entre os equipamentos colocados no meio do vão crítico da LT e o concentrador dos sensores instalados em um armário na torre dessa LT, onde há uma caixa de emenda óptica do cabo OPGW (*Optical Power Ground Wire*) da Linha de Transmissão a ser monitorada. Nesse ponto, deve ocorrer a conversão eletro-óptica dos sinais digitais desta solução. Por sua vez, o sistema óptico permite a transmissão no comprimento de onda de 1550nm de duas fibras ópticas, disponibilizadas no respectivo cabo OPGW, até as subestações interligadas por essa LT.

V. TESTE PILOTO NO PARÁ

A validação do sistema de monitoramento ocorreu em um Teste Piloto na LT Guamá-Vila do Conde de 230 kV, no Estado do Pará.

A altura do condutor ao solo entre duas torres foi monitorada pelo dispositivo cilíndrico desenvolvido neste projeto e montado para 2 condutores tipo fase (figuras 7 e 8).



Figura 7. Vista interna do empacotamento mecânico dos sensores no meio do vão da LT



(a)



(b)



(c)

Figura 8. Etapas da instalação do empacotamento mecânico dos sensores no meio do vão da LT

Outros sensores foram instalados em um armário (figuras 9 e 10), juntamente com outros equipamentos do sistema de monitoramento (câmera de vídeo, conversores, *access point*, etc.)

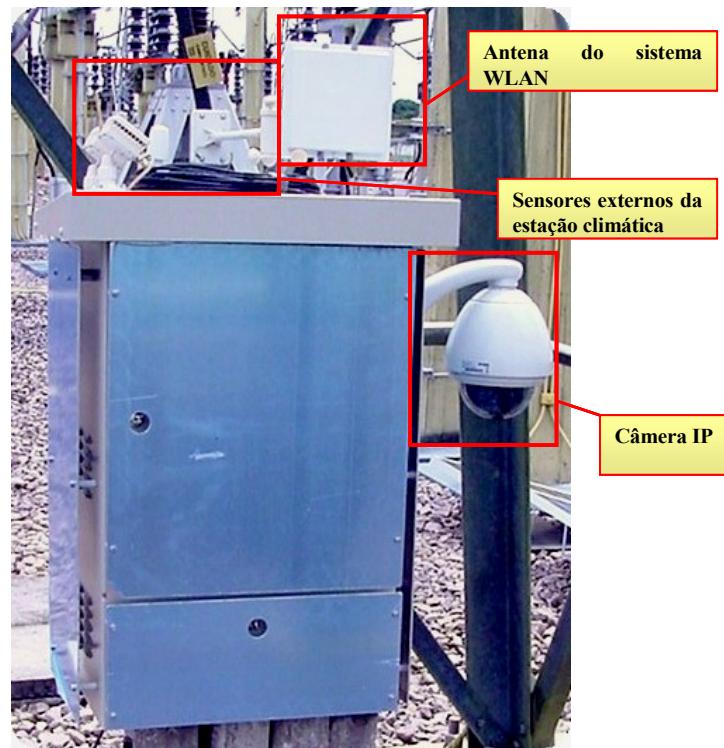


Figura 9. Vista externa do armário para instalação na torre da LT

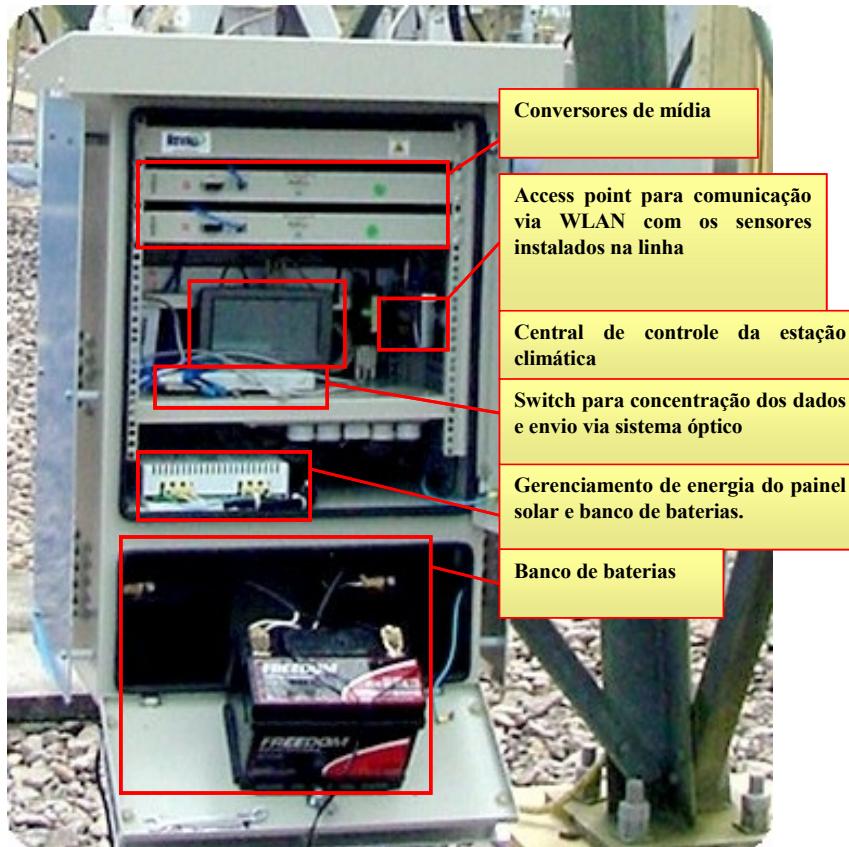


Figura 10. Vista interna do armário para instalação na torre da LT

Em uma sala designada da SE Guamá, nas proximidades da cidade de Belém (PA), foi instalado um microcomputador dedicado ao software de monitoramento de LT's, que apresenta uma tela similar à da figura 11.

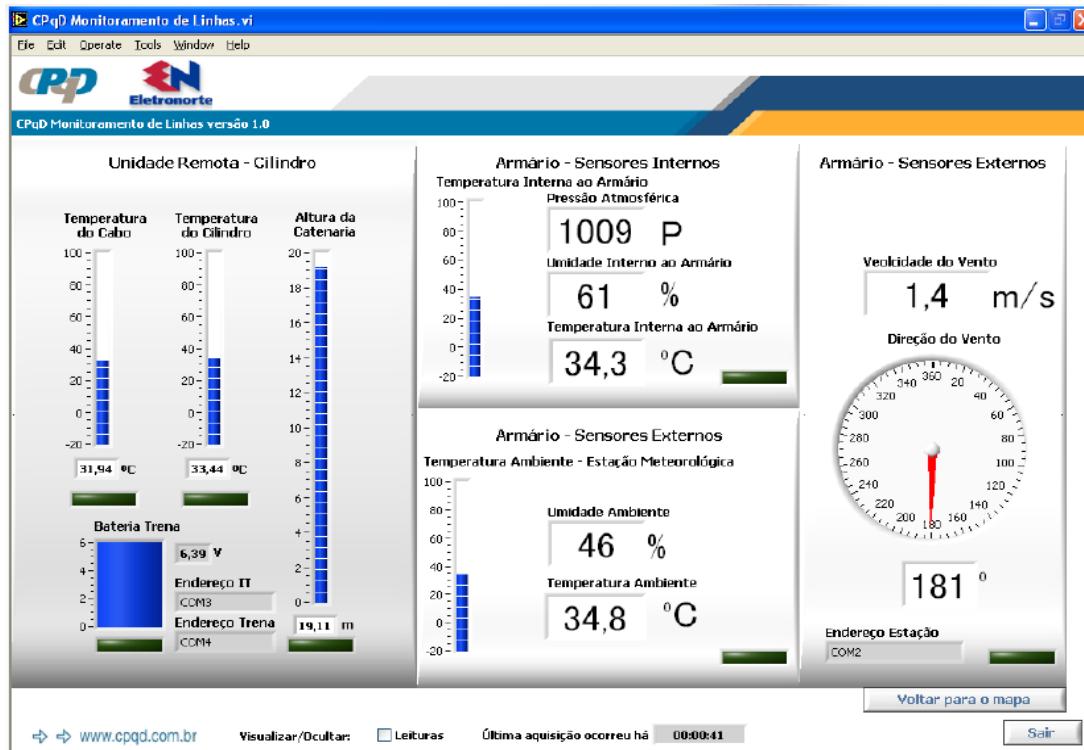


Figura 11. Informações dos sensores exibidas pelo software de monitoramento de LT's

VI. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

É importante salientar que este tipo de solução para monitoramento de LT's da Eletronorte tem as seguintes vantagens em relação a outras soluções encontradas no mercado e na literatura:

- Permite a inclusão de diferentes sensores e pontos de monitoramento com facilidade;
- O meio de comunicação pode ser utilizado para outras aplicações (exemplos: vídeo, voz e transmissão de dados em altas taxas);
- Permite a sua interligação com a rede corporativa da Concessionária.

Devem ser destacados outros dois pontos inovadores: a utilização sistemática de equipamentos comerciais e com uma relação custo-benefício bastante vantajosa para a Eletronorte; e o desenvolvimento de empacotamentos mecânicos dessas soluções eficientes para operarem no ambiente hostil das LT's (forte campo eletromagnético e condições climáticas severas).

A primeira instalação deste sistema de monitoramento foi realizada em uma Linha de Transmissão entre Vila do Conde e Guamá (no Estado do Pará), nas proximidades da cidade de Belém (PA).

Além dos parâmetros citados anteriormente, foi implementada a transmissão de sinais de vídeo, obtidos através de

uma câmera instalada em uma torre, informando a situação real da infra-estrutura na sua redondeza para os operadores das subestações interligadas.

Diante dos bons resultados apresentados neste projeto, a Eletronorte e o CPqD estão atualmente planejando um projeto P&D ANEEL, tipo "cabeça-de-série," para o aperfeiçoamento deste sistema desenvolvido e a avaliação do seu potencial de mercado.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. M. Alexandre, R. M. Carvalho, "Tecnologias de monitoramento em tempo real para elevar a capacidade de linhas aéreas", Revista Eletricidade Moderna, p. 66-76, Julho 2004.
- [2] J. R. Carvalho, R. Vivekananda, M. Luz, S. F. Sciammarella, "Desenvolvimento de dispositivo de telemonitoração de pontos críticos de LT's", II CITENEL, 2004.
- [3] International Electrotechnical Commission, "Electromagnetic Compatibility (EMC). Environment. Classification of Electromagnetic Environments. Basic EMC Publication", IEC TR 1000-2-5, 1995
- [4] European Telecommunications Standards Institute, "Electromagnetic Compatibility and Radio Spectrum Matters (ERM); Classification of the Electromagnetic Environment Conditions for Equipment in Telecommunication Networks", ETSI TR 101 651.
- [5] International Electrotechnical Commission, "Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 6.5: Generic Standard - Immunity for Power Station and Substation Environments", IEC TS 61000-6-5, 1995.