

Monitoramento Remoto com Rede de Sensores Sem Fio para Auscultação de Barragens

Adriano B. da Cunha, Anísio R. Braga, Alberto de F. Gontijo, Pedro H. A. Maciel, Victor M. M. Pinto, Dener A. de L. Brandão, Alexandre V. de Melo, Jader R. de C. Oliveira, Edilson H. Caliman, Paula L. Divino.

Resumo – A auscultação civil de barragens é usualmente feita com instrumentos mecânicos portáteis e sensores primários instalados nas barragens e estruturas civis de geração para monitorar a segurança estrutural e funcional. Mudanças ambientais e efeitos da evolução natural do envelhecimento estrutural são escrutinados nas planilhas de dados coletados periodicamente para se avaliar variações e degradações incipientes que impactam a segurança das estruturas. Um sistema instrumentado de segurança com rede de sensores sem fio (RSSF) para auscultação de barragens é proposto como solução para uma caracterização precisa, de baixo custo e em tempo certo das condições geotécnicas e estruturais da barragem. Apresenta-se o cenário de auscultação com RSSF para a hidrelétrica de Miranda e testes preliminares da rede desenvolvida num ambiente controlado. Delineia-se também a proposta de integração com bancos de dados de gerenciamento de ativos industriais da CEMIG, de forma a viabilizar avaliações amplas das condições dos ativos de hidrelétricas.

Palavras-chave – Auscultação de barragens, segurança de barragens, instrumentação eletrônica, monitoramento remoto, rede de sensores sem fio autônoma.

I. INTRODUÇÃO

A auscultação civil de barragens é usualmente feita com instrumentos mecânicos portáteis e sensores primários instalados nas barragens e estruturas civis de geração para monitorar a segurança estrutural e funcional. Mudanças ambientais e efeitos da evolução natural do envelhecimento estrutural são escrutinados nas planilhas de dados coletados periodicamente para se avaliar variações e degradações incipientes que impactam a segurança das estruturas.

Diversas partes da estrutura de uma barragem, como con-

creto, fundação, aterro compactado são instrumentados para o monitoramento de variáveis que apresentam correlação com eventos geotécnico-estruturais impactantes [1]. As variáveis de auscultação de barragens típicas, em especial para reservatórios fio d'água, apresentam dinâmicas muito lentas com constantes de tempo maiores que 1 mês e variações cíclicas de 12 meses em fase com as estações do ano. As variações mensuradas requerem, e.g., precisão de dezenas de micrometros para pêndulos e juntas de dilatação, e de milímetros de coluna d'água para piezômetros. Assim, o maior desafio e problema da auscultação de barragens é o emprego de instrumentação de precisão (<0,1% de fundo de escala) e consistência para monitorar a longo prazo (>12 meses) variáveis que, embora apresentem diminutas mudanças, representam impactos significativos para as estruturas monitoradas. Além disso, tem-se o fato de que os locais monitorados são distribuídos bem distantes (>1.000m) entre si, de acesso restrito ou com risco (grandes alturas ou galerias úmidas e isoladas), incluindo também locais externos suscetíveis a intempéries.

Os dados medidos manualmente são registrados em planilhas de dados que ainda requerem pós processamento para ajustar escalas e validar medidas susceptíveis a erros de leitura ou calibração dos instrumentos utilizados. Para que a instrumentação assumam um papel importante na manutenção da segurança, é imprescindível não apenas que todos os instrumentos estejam funcionando bem e que a informação adequada seja coletada e documentada, mas, acima de tudo, que seja analisada em tempo hábil.

Neste contexto foi proposto o projeto “Monitoramento Remoto com Rede de Sensores Sem Fio para Auscultação de Barragens - código ANEEL PD-4951-0493/2012” para o desenvolvimento de um sistema de instrumentação e monitoramento eletrônico com redes de sensores sem fio (RSSF) de baixo custo, baixo consumo, com características de desenvolvimento aberto e incremental que se integre ao sistema de gerenciamento de informação de processos implantado na CEMIG.

A RSSF integrada ao sistema de gerenciamento de informações de processos PI-UFGM/CEMIG, bem como os protótipos de sensores de baixo custo desenvolvidos no âmbito do projeto de PeD, integram um sistema de auscultação de barragem com características abertas (protótipos de hardware, aplicativos de software e protocolos utilizados) e de propriedade intelectual dos parceiros UFGM e CEMIG com aplicabilidade ampla em outras usinas hidrelétricas e estruturas de barragem que demandem monitoramento intensivo.

O projeto de PeD proposto é, portanto, uma oportunidade

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 VIII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VIII CITENEL), realizado na cidade de Costa do Sauípe/BA, no período de 17 a 19 de agosto de 2015.

Este trabalho é apoiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), CEMIG Geração e Transmissão S.A (CEMIG GT) e Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

A. V. de Melo, J. R. de C. Oliveira, E. H. Caliman e P. L. Divino trabalham na CEMIG Geração e Transmissão S.A (e-mails: alexandre.melo@cemig.com.br; jrco@cemig.com.br; caliman@cemig.com.br; paulad@cemig.com.br).

A. B. da Cunha, A. R. Braga, A. de F. Gontijo, P. H. A. Maciel, V. M. M. Pinto e D. A. de L. Brandão trabalham na Universidade Federal de Minas Gerais (e-mails: adborges@ufmg.br; anisio.braga@gmail.com; alberto@coltec.ufmg.br; pedro_almeidamaciel@hotmail.com; victor-mmp@outlook.com; dener_prof@yahoo.com.br).

de atendimento às necessidades do setor elétrico com uma instrumentação eletrônica personalizável e automatizada de sistemas impactantes como o de auscultação de barragem. O sistema instrumentado de segurança baseado em RSSF para auscultação de barragem viabiliza em tempo hábil ('just in time') o monitoramento de variáveis chaves que descrevem as condições geotécnicas, geológicas e estruturais atuais e relevantes. Além disso, com a integração de sistemas de auscultação de barragens com RSSF aos sistemas de automação e supervisão de usinas hidrelétricas utilizando o sistema de gerenciamento de informação de processos industriais (PIMS), viabiliza-se uma validação ampla das condições dos ativos de determinada usina hidrelétrica. Nesta arquitetura integrada com um sistema PIMS, o processamento estatístico dos dados de auscultação de barragem e as interfaces gráficas de visualização constituem um sistema sem apêndices, que permite integração ampla de dados e monitoramento de ativos industriais em tempo certo.

O projeto "Monitoramento Remoto com Rede de Sensores Sem Fio para Auscultação de Barragens - código ANEEL PD-4951-0493/2012" se encontra atualmente em fase de execução e resultados parciais demonstram viabilidade técnica e econômica de implementação de uma rede de sensores, denominada Cemig Sensor Net (CSN) e baseada no padrão IEEE 802.15.4, em usinas com grandes dimensões de barragens e estruturas de concreto que demandam monitoramento frequente. A rede de sensores CSN está sendo desenvolvida para integração plena com sistemas de gerenciamento de informação da planta. O projeto é apoiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), CEMIG Geração e Transmissão S.A (CEMIG GT) e Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

II. DESAFIOS TÍPICOS DE SISTEMAS DE INSTRUMENTAÇÃO DE AUSCULTAÇÃO DE BARRAGEM

A. Abordagem Geral

As condições de segurança de uma barragem estão associadas a diferentes características construtivas, ambientais e operacionais da infraestrutura civil. O principal objetivo da instrumentação é ser fonte de informações sobre o comportamento das estruturas de uma barragem, contribuindo para o entendimento do seu desempenho e para a manutenção da sua segurança, ou seja, possibilita observar antecipadamente mudanças que possam comprometer a sua integridade.

As principais grandezas monitoradas em barragens são poro-pressões em aterros e fundações, vazões de percolação, deformações dos maciços e fundações, tensões nos aterros e empuxos de terra sobre estruturas de concreto. Sensores especiais para monitoramento ou auscultação de barragens são instalados na época de construção da usina, como no caso de sensores instalados no aterro compactado e fundação, tais como células de pressão hidrodinâmica e piezômetros. Outros sensores, em geral, com princípio de funcionamento mecânico, são instalados após finalizada a obra de fundação e concretagem como medidores de junta, pêndulos e sensores de vazão com indicação ou medição local apenas.

A criticidade e relevância de sistemas de auscultação de

barragens no Brasil é amplamente reconhecido, sendo destacável o investimento na usina hidrelétrica de Itaipu, que apresenta uma das mais minuciosas e intensivas instrumentações dedicadas ao monitoramento de estruturas de concreto e fundação desde a construção da usina [2]. Em Itaipu utiliza-se um sistema proprietário moderno de instrumentação eletrônica para a supervisão de variáveis consideradas críticas. A maioria das variáveis ainda é monitorada com visitas periódicas aos locais de medição. Todo o histórico de monitoramento desde a construção da usina é mantido em bancos de dados proprietários exclusivos para a auscultação de barragem.

Na CEMIG GT a demanda por monitoramento e auscultação de barragens apresenta um cenário desafiador, pois o parque de geração da CEMIG GT é bem diversificado, com usinas de grande e pequeno porte espalhadas geograficamente na região sudeste do Brasil, principalmente. Com relação a números de barramentos cadastrados para fins de geração de energia, a CEMIG GT é a maior empreendedora de barragens no Brasil. Atualmente, a CEMIG GT conta com 30 usinas instrumentadas, realizando anualmente uma média de 55.000 leituras nos 4.500 pontos de leitura em operação nas barragens e estruturas civis de geração.

O compartilhamento de propriedade intelectual com a CEMIG e a capacidade de integração de dados de diversas fontes, incluindo os sistemas de automação já em uso, sem a necessidade de novos apêndices tecnológicos proprietários, completam a demanda pelo desenvolvimento de soluções tecnológicas apropriadas para instalação em usinas com demandas de auscultação de barragens. Com tais motivações, foram definidos os seguintes objetivos para o projeto PeD: Desenvolver sensores de baixo custo apropriados para o monitoramento e auscultação de barragens; coletar dados de comportamento dinâmico lento (~12 meses) da barragem e estruturas civis de uma usina hidrelétrica de grande porte, de forma automática e remota; desenvolver um sistema integrado de análise de dados e processamento de sinais utilizando técnicas de controle estatístico de processos; e caracterizar eletromagneticamente os ambientes de uma usina hidrelétrica com foco em viabilidade técnica para se estabelecer rede de sensores sem fio (RSSF) de baixo consumo.

Os produtos do projeto PeD consistem em:

- Protótipos de sensores de vazão de canal aberto de baixo custo;
- Protótipo de sensor de deslocamento micrométrico de baixo custo com capacidade de comunicação sem fio e comunicação em rede;
- Protótipo de sistema microcontrolado com capacidade de comunicação em rede sem fio. Este protótipo consiste na integração e personalização por software de módulos microcontrolados e baixo custo para uso em RSSF para grandes distâncias (distância entre nós sensores de 1.000m);
- Protótipo de rede de sensores sem fio CSN - CEMIG Sensor Net, instalado na usina de Miranda, integrando sensores de auscultação de barragens utilizando diferentes tecnologias/fabricantes, sensores eletrônicos comerciais de uso geral e sensores de baixo custo de propriedade

intelectual da UFMG/CEMIG;

- GUIA (Guia Utilitário de Interface Assistente) personalizado para visualização e análise de dados em ambiente de navegador de Internet acessando banco de dados do sistema PI-UFMG/CEMIG.

Na Figura 1 é ilustrado o cenário de integração de variáveis de supervisão do SCADA (sistema de aquisição de dados e controle distribuído de processo) com os de uma RSSF CSN. Nesta arquitetura integrada com um sistema PIMS, o processamento estatístico dos dados de auscultação de barragem, bem como as interfaces gráficas de visualização implementados com as ferramentas do pacote PI da OSIsoft [3], e.g. Asset Framework, ACE – Advanced Computing Engine, WebParts, constituem um sistema sem apêndices que permite integração ampla de dados e monitoramento de ativos industriais em tempo certo.

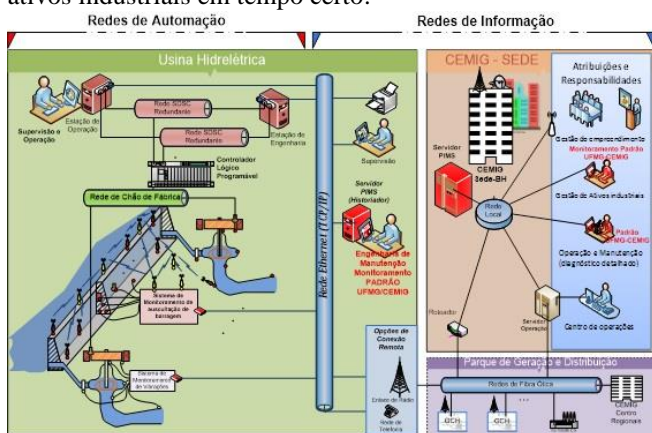


Figura 1. Arquitetura integrada dos sistemas de monitoramento mediante um servidor PIMS ou historiador local executado em Estação de Trabalho independente do sistema SCADA.

Os dados do SCADA e da CSN são coletados em uma mesma estação de trabalho com um aplicativo Interface PI-OSIsoft, que sincroniza dados automaticamente com um servidor PI-CEMIG localizado na sede, no centro de processamento de dados da empresa. Os dados armazenados no sistema PI podem ser acessados em navegadores de Internet com acesso à rede da empresa.

Para alcançar os objetivos do projeto PeD foi empregada a seguinte metodologia:

- Revisão bibliográfica dos sensores escolhidos para automatização nas usinas de referência (UHE de Miranda e de Nova Ponte);
- Revisão de tecnologias para redes de sensores sem fio com restrições severas de energia adequadas para aplicações industriais;
- Visita às usinas de Miranda e Nova Ponte para levantamento de “Como Construído” e mapeamento dos pontos a serem automatizados;
- Levantamento de requisitos da instrumentação instalada nas usinas de referência, junto à equipe de Gerência de Segurança de Barragens e Planejamento da Manutenção Civil, para avaliação da precisão das medidas a serem obtidas pelos sensores que serão projetados;
- Caracterização eletromagnética da usina selecionada para a realização de testes, planejamento e projeto da rede de sensores sem fio;
- Pesquisa bibliográfica e estudo de procedimentos de tes-

te, calibração, detecção e diagnóstico de degradação em sistemas de auscultação de barragens;

- Especificação de compra para sensores, módulos microcontrolados, componentes eletrônicos, partes e instrumentos; desenvolvimento de circuitos eletrônicos para condicionamento de sinais e interfaceamento com módulos da rede de sensores distribuídos;
- Ensaios em laboratório com sensores, módulos condicionadores de sinais e unidades microcontroladas conectados em rede de chão de fábrica interligada a um sistema de gerenciamento da informação;
- Testes experimentais em campo para validação de métodos, técnicas e RSSF integrados com eletrônica embarcada.

Sensores usados para auscultação de barragens são exemplos de sistemas impactantes na segurança de usinas hidrelétricas, que ainda carecem de automatização e monitoramento contínuo minucioso. Destaca-se também que os sistemas disponíveis atualmente no mercado são importados, de tecnologias proprietárias diferentes e de custo bem mais elevado. Com o uso de RSSF é viável automatizar medições relevantes em várias partes da estrutura de uma barragem caracterizada por ambientes com grandes dimensões, remotos e de difícil, normalmente restrito, acesso. Ressalta-se que as variáveis monitoradas nos sistemas de auscultação de barragens não estão atualmente integradas aos sistemas de supervisão e controle das usinas hidrelétricas da CEMIG, e que a integração destes sistemas apresenta desafios significativos.

Destacam-se desafios como a enorme quantidade de pontos de medição (2.000 pontos) numa única barragem, as distâncias envolvidas da ordem de quilômetros, a dificuldade de utilização de cabos para conexão em redes industriais e a baixa taxa de amostragem usualmente associada a sistemas geotécnicos com dinâmicas ultralentas, i.e., meses e anos.

Sistemas de supervisão e controle dos conjuntos eletromecânicos de usinas hidrelétricas apresentam, tipicamente, uma centena de variáveis de processo de dinâmicas rápidas, i.e., segundos, que contrastam com os movimentos ultralentos do envelhecimento de uma barragem (e.g. período de anos). Porém, eventos sísmicos ou climáticos podem impactar a estrutura de uma barragem com mudanças rápidas comparadas com as de longo prazo. Neste cenário os desafios para o desenvolvimento de um sistema de monitoramento automático para variáveis de auscultação de barragens devem atender as seguintes características: Monitoramento de longo prazo, e.g. período de meses e anos; amostragens esporádicas, com baixa periodicidade, e.g. intervalo de dias; amostragens baseadas em eventos com medições rápidas, i.e., intervalo de frações de segundos; baixo consumo de energia, e.g. operação com baterias por períodos de até 12 meses; baixo custo, e.g. viabilizar o monitoramento de um número significativo de pontos na estrutura, e.g. 3.000 pontos de medição; capacidade de comunicação sem fio, e.g. instalação em locais remotos e de acesso restrito ou de alto risco; operação em ambientes insalubres com elevada umidade relativa (e.g. em torno de 95%) e variações térmicas

em torno de 20°C da temperatura ambiente em casos extremos; e ambientes com severas restrições para propagação eletromagnética.

Portanto, as características de uma RSSF, tais como o baixo custo, o baixo consumo de energia, o tamanho extremamente reduzido e a capacidade de comunicação sem fio multissaltos tornam esta tecnologia ideal para se desenvolver e tornar viáveis sistemas de alta eficiência e confiabilidade para auscultação de barragens.

B. Definição da Usina de Referência para o Projeto Piloto

O projeto código ANEEL PD-4951-0493/2012 prevê que os protótipos para o sistema de auscultação de barragens desenvolvidos sejam testados e validados em uma UHE - usina hidrelétrica da CEMIG. A usina de Miranda foi selecionada por sua estrutura de automação e integração à rede digital de dados da CEMIG, pela proximidade com o centro regional de Uberlândia, pelas dimensões do sítio da usina e pela diversidade de pontos de medição de variáveis de auscultação de barragens, que permite a realização de testes e validação das técnicas de auscultação de barragens em desenvolvimento. A Figura 2 ilustra uma visão panorâmica da usina de Miranda onde se observa a barragem de terra/enrocamento, vertedouro, tomada d'água, condutos forçados e casa de força.

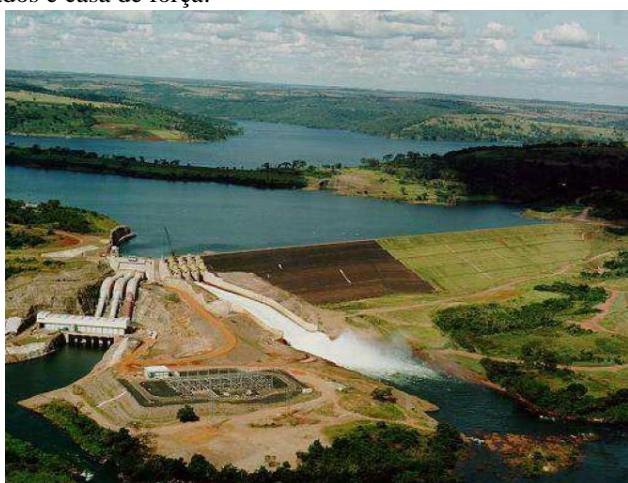


Figura 2. Vista panorâmica da usina de Miranda com a barragem de terra/enrocamento, vertedouro, tomada d'água, condutos forçados e casa de força.

O desafio de automatização e telemetria de variáveis de auscultação de barragens é estabelecer uma rede de módulos de monitoramento sem fio em pontos distantes, sendo alguns sujeitos a intempéries e, em princípio, sem alimentação de energia elétrica da rede de distribuição.

A princípio estabelecem-se dois cenários para um sistema automatizado de auscultação de barragens.

1. Automatização de medições contínuas remota, i.e., sem visita aos pontos de medição.
2. Automatização da coleta de dados com sistemas de anotações eletrônicas e visita periódica aos pontos de medição.

Os dados oriundos de ambas as abordagens são então armazenados em uma interface local (servidor de dados) com capacidade de sincronismo automático com os servidores de dados tipo PIMS (PI - OSIsoft) localizado na sede da CEMIG e no campus da UFMG. Desta forma, o analista dos

sistemas de barragens e estruturas poderá monitorar e analisar remotamente o comportamento dos sistemas, medidores em tempo certo alertando mudanças abruptas e incipientes.

Destaca-se que atualmente o monitoramento permite apenas o acompanhamento de mudanças incipientes, pois os processos de medição são manuais e, em média, quinzenais, sujeitos a erros de medição e precisão com limitações.

C. Sistema de instrumentação eletrônica para auscultação de barragem na usina de Miranda

A Tabela I apresenta relações típicas entre variáveis de processo a serem monitoradas com medidores eletrônicos e respectivos impactos que podem ser inferidos com as medições em tempo real na Usina Hidrelétrica de Miranda.

Os medidores de vazão utilizados convencionalmente são do tipo canal aberto com vertedouro em V instalados em calhas situadas no pé da barragem. A variável primária medida nestes medidores de vazão é a altura H da coluna d'água cuja relação com a vazão Q (1) é aproximadamente calculada como:

$$Q = 1,4 \times H^{\frac{5}{2}} \quad (1)$$

Tabela I. Relações típicas observadas entre variáveis monitoradas e respectivos impactos na estrutura.

Impactos na estrutura / Sensores											
		Escorregamento	Recalque diferencial	Subsidência terreno	Distensão à montante	Cortina de injeção deficiente	Obstrução drenos de fundação	Obstrução drenos concreto	Fissuração térmica	RAA	Infiltração excessiva pelo concreto
Concreto	Pêndulo direto	X	X	X					X	X	
	Medidores de Junta		X							X	
	Medidores de Vazão						X				X
Fundação	Piezometria	X	X	X	X	X					
	Medidores de junta										
	Extensometria	X	X	X							
	Medidores de vazão					X	X				

A Figura 3 ilustra um medidor de vazão de canal aberto da usina de Miranda. O processo de medição de vazão tradicional é feito com a leitura da altura da coluna d'água numa régua instalada a 1m de distância do vertedouro em V.

A Figura 4 ilustra o projeto de instalação de um sensor de nível dentro de um tubo tranquilizador para medição eletrônica da vazão. Em Miranda existem 8 medidores de vazão com características similares as do medidor ilustrado na

Figura 3. Um sensor capacitivo com precisão de milímetros, baixíssimo consumo e integrado a um nó microcontrolado da CSN está sendo testado em laboratório para posterior instalação e testes em campo. Os locais de medição de vazão em uma usina hidrelétrica são majoritariamente remotos e não há fornecimento de energia elétrica próximo a estes pontos de medição. Portanto, a característica primordial de um sensor de vazão é baixo consumo de energia, precisão de milímetros e consistência nas medições, mesmo com temperaturas de até 50°C. Um sensor de temperatura é instalado em cada nó sensor da rede CSN para monitoramento e eventual necessidade de compensação das medidas.



Figura 3. Foto de um medidor de vazão de canal aberto e do processo manual de leitura da altura da coluna d'água na régua.

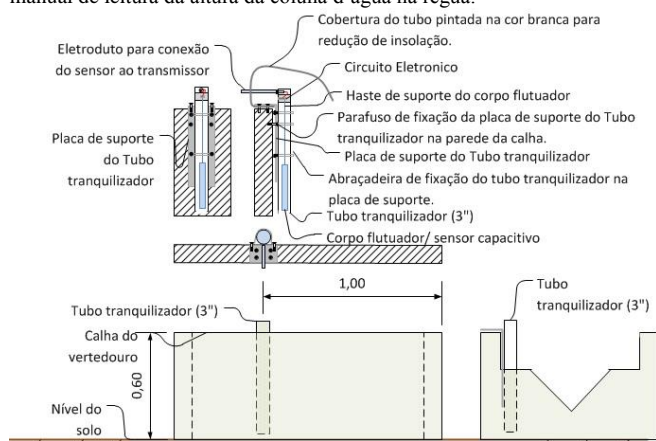


Figura 4. Diagrama de montagem de um medidor de vazão canal aberto com tubo tranquilizador e circuito eletrônico sensor de nível.

A Figura 5 ilustra o processo de medição manual de um medidor triortogonal de juntas. Como este processo está sujeito a várias fontes de erro (e.g. posicionamento do relógio e paralaxe) é desejável instalar um micrômetro eletrônico de baixo custo e conectado a rede de sensores de auscultação de barragem para que o monitoramento possa ser realizado automaticamente sem a necessidade de intervenção humana. Um sensor de deslocamento de princípio capacitivo foi desenvolvido para atender as demandas de precisão e instalação nos medidores de junta padrão CEMIG existentes em Miranda. O circuito eletrônico utilizado no sensor micrométrico de deslocamento compartilha o mesmo projeto eletrônico do sensor de nível usado nos medidores de vazão de canal aberto, diferindo na calibração e no modo como a capacitância é mensurada.

Os sensores eletrônicos para automação das medidas de piezômetros requerem uma construção sofisticada e, portanto, utilizam-se sensores tipo sondas de nível com princípio de funcionamento baseado em células de pressão piezo-

resistivas encapsuladas em corpos metálicos cilíndricos com diâmetro apropriado para instalação nas tubulações existentes na usina de Miranda. A interface destas sondas de nível com a CSN é feita com o uso de conversores analógico-digitais de 14 bits e alimentação de 7V_{DC}. Estes sensores não são sensores de baixo consumo e, portanto, demandam baterias de maior capacidade ou alimentação de energia da rede elétrica. Na usina de Miranda, os locais de monitoramento dos piezômetros estão próximos à rede elétrica de baixa tensão, facilitando a instalação destes sensores.



Figura 5: Foto ilustrando o processo de medição com micrômetro tipo relógio comparador de uma junta triortogonal em Miranda.

A Figura 6 ilustra o sensor de deslocamento projetado em testes de bancada de calibração. A precisão medida em bancada foi limitada a do sensor micrômetro de referência utilizado, que era de 10μm.



Figura 6: Micrômetro eletrônico capacitivo em teste de calibração com um micrômetro mecânico.

Os medidores de deslocamento de haste são monitorados com micrômetros tipo relógios comparadores. O micrômetro eletrônico com princípio capacitivo é apropriado para automação destes pontos também. Porém, a montagem destes sensores em locais expostos a intempéries é crítica devido à variação de temperatura e serão automatizadas em uma segunda fase. Os sensores de deslocamento eletrônicos serão usados como medidores eletrônicos portáteis nesta fase do projeto.

III. DESENVOLVIMENTO DA REDE DE SENSORES SEM FIO PARA AUSCULTAÇÃO DA BARRAGEM DA UHE DE MIRANDA

O desenvolvimento de uma RSSF autônoma consiste na seleção de um módulo microcontrolado com um determina-

do padrão de rádio embutido para comunicação sem fio e protocolos de comunicação em rede para estabelecimento de elos de rádio e troca de mensagens de forma segura e robusta, i.e., com capacidade de recuperação de perda de pacotes de dados e reconfiguração dinâmica da rede.

A seguir detalha-se a Cemig Sensor Net – CSN, a caracterização eletromagnética do sítio da usina Hidrelétrica de Miranda, testes preliminares da rede no prédio do COLTEC/UFG e uma avaliação do desempenho da rede de sensores.

A. Definição das Métricas para a Rede de Sensores Sem Fio da CEMIG – CEMIG Sensor Net

Após a identificação e a caracterização dos pontos de medição da UHE de Miranda, foram definidas as métricas para a rede de sensores sem fio da Cemig, denominada Cemig Sensor Net (CSN). A CSN deve apresentar as seguintes características: baixíssimo consumo de energia, escalabilidade, tamanho reduzido, baixo custo, ser reutilizável e de fácil implantação, operar em rede sem fio com a capacidade de comunicação multissaltos e possibilitar o desenvolvimento e a implementação de funções de autogerenciamento, tais como, autoconfiguração, autocura, auto-otimização e auto-proteção [4]-[6]. Essas características compõem as redes de sensores sem fio autônomicas, base tecnológica para a Internet das Coisas [7], e são encontradas em soluções que têm como base o padrão IEEE 802.15.4 [8], utilizado na pilha de protocolos ZigBee [9]. Como resultado, as seguintes métricas foram consideradas para a escolha da unidade de comunicação de cada um dos nós sensores da CSN: tipo de antena; frequência de operação da rede; consumo de energia; sensibilidade do receptor; potência de transmissão; segurança – criptografia utilizada; taxa de transferência; topologias de rede; dimensões; faixa de tensão de operação; faixa de temperatura de operação; possibilidade de programação; tipo de processador ou microcontrolador; amplificador de saída; capacidade de memória; nº de entradas e saídas digitais; periféricos e interfaces disponíveis; certificações regionais e custo (preço da solução).

Com as métricas já definidas, fez-se uma pesquisa dos módulos de comunicação existentes no mercado, que foram dispostos na forma de tabelas comparativas. Foram avaliados os modelos A2530E24AZ1 e A2530R24AZ1 da Anaren [10]; ZE51 e ZE61 da Telit [11]; ETRX35x-LRS e ETRX357 da Telegesis [12]; ATZB-24-B0/A2 e ATZB-A24-UFL/U0 da Atmel [13]; RC2400, RC2400HP, RC2300/1/2/4 e RC2201HP da Radiocrafts [14]; ZB, PRO – ZB, Programmable PRO® ZB, DigiMesh® 2.4, Pro DigiMesh® 2.4, 802.15.4 (Series 1) e Pro 802.15.4 (Series 1) da Digi [15]; e F U-BEEMAX e U-Bee da Fractum [16].

Os modelos foram comparados e constatou-se que a opção que atendia o maior número de métricas estabelecidas para a CSN foi a solução da Telegesis [12]. Foi adquirido o kit de avaliação da Telegesis [12] para se efetuar um teste em campo e o detalhamento das métricas.

Para consolidar a escolha pela solução da Telegesis [12] foram feitas análises do funcionamento prático dos módulos. Portanto, fez-se o estudo mais aprofundado das características de alcance dos módulos. Este estudo foi feito por meio

de experimentos que buscavam testar os módulos em situações similares àquelas nas quais eles serão expostos na usina. Dessa forma, os resultados desses experimentos fornecem um perfil mais detalhado das características de alcance de cada módulo, consolidando a escolha do módulo mais adequado ao projeto.

Os testes práticos são importantes, pois as informações obtidas em um catálogo mostram os valores das métricas de um produto em situações favoráveis. Estas métricas são analisadas em ensaios realizados em laboratórios, que são elaborados apenas para a definição desses valores. Dessa forma, justificam-se os testes práticos dos módulos em aplicações similares à aplicação final. O intuito da aplicação final é fazer com que cada nó sensor da CSN transmita o maior nº de dados possível, o mais rápido possível e volte, o quanto antes, a dormir (modo “sleep”), de modo que o consumo de energia de cada um deles seja o menor possível para aumentar o tempo de vida da rede. Com esses testes práticos pode-se então traçar um perfil das métricas dos módulos de uma forma mais detalhada e fiel ao perfil a ser observado na aplicação final do projeto.

A aplicação desenvolvida para cada módulo os mantinha ligados o menor tempo possível de ser configurado. Os módulos faziam a leitura de uma das entradas analógicas de seus conversores A/D. Após a medição, o valor medido era enviado pela rede. Depois do envio da mensagem, o módulo entrava em modo “sleep” três segundos e então reiniciava o ciclo de funcionamento.

Foram realizados testes de alcance para avaliar o desempenho dos módulos de comunicação da Telegesis [12]. Portanto, fez-se necessário um experimento prático que fosse capaz de testar a qualidade das conexões realizadas para diferentes distâncias e em um local onde houvesse a possibilidade de interferências na frequência de operação do sistema. O refinamento dos dados de alcance foi feito a partir de uma aplicação similar àquela em que os módulos serão utilizados. Os testes de alcance foram realizados em uma via de pouco movimento e com uma visada máxima de até 600m, próxima ao Campus Pampulha da UFG, em Belo Horizonte-MG.

Posicionaram-se dois módulos em pontos separados. As distâncias utilizadas estão relacionadas na Tabela II e foram escolhidas de acordo com as rotas propostas na Figura 8. Um dos módulos foi configurado como coordenador da rede, enquanto o outro foi configurado como um dispositivo final. O teste consistia em enviar uma mensagem para o dispositivo final por meio do coordenador. O dispositivo final recebia a mensagem e a retransmitia de volta. Com a mensagem recebida pelo coordenador obtinham-se as informações de RSSI (indicador da intensidade do sinal recebido), LQI (indicador da qualidade do enlace) e número de sucessos e falhas (perdas de pacotes) para a menor potência configurável nos módulos sem se perder a conexão. A Tabela II apresenta os resultados dos testes de alcance.

Os testes de alcance com uma potência mínima de -1 dBm foram bem-sucedidos, exceto para a distância de 600 m, cuja a potência de transmissão foi de 5 dBm. Apesar de operar com potência de -1 dBm, os módulos da Telegesis

[12] apresentaram RSSI superiores à sensibilidade do receptor de rádio, que é de -100 dBm. Este resultado mostra que o desempenho dos módulos da Telegesis [12] em campo será satisfatório, além de apresentar um menor consumo de energia, pois estão configurados com uma potência de transmissão de apenas -1 dBm.

Tabela II. Resultados dos testes de alcance para os módulos da Telegesis.

Telegesis									
Distância (m)	60		100	200		400	500		600
Potência (dBm)	18	-1	-1	-1	5	-1	-1	5	5
RSSI (dBm)	-52	-74	-72	-80	-74	-86	-88	-80	-84
LQI	255	255	255	255	255	249	199	252	255
Sucesso	178	175	103	180	194	133	172	192	178
Falha	0	13	0	0	0	0	0	0	0

Levando-se em conta que os módulos da Telegesis [12] terão maior taxa de sucesso com uma menor potência de transmissão, o que também implica em um menor consumo de energia, além de apresentarem outras características superiores às outras opções avaliadas, tais como conversor A/D de 14 bits, mais opções de topologias de rede, melhor microcontrolador, maior quantidade de memórias e o menor custo final no Brasil, dentre as principais, o resultado final da análise é que a solução da Telegesis [12] é a escolha tecnicamente mais adequada para a CSN.

B. Caracterização Eletromagnética da UHE de Miranda

Antes da viagem para a realização da caracterização eletromagnética da UHE de Miranda, foram estudadas e elaboradas 4 alternativas de rotas para a referida usina. A 1ª alternativa de rotas utiliza uma topologia ponto a ponto entre os dispositivos finais e o coordenador da rede, sem o uso de roteadores. A 2ª e 3ª alternativas de rotas utilizam apenas um roteador, na crista da barragem para a 2ª e na torre de observação para a 3ª, para interconectar os dispositivos finais ao coordenador. A 4ª alternativa de rotas propõe a ideia de dois ou mais roteadores ao longo da crista da barragem para interconectar os dispositivos finais ao coordenador da rede, conforme ilustrado na Figura 8.

Levando-se em conta que há disponibilidade de energia elétrica ao longo da crista da barragem, o que possibilita a instalação de roteadores, a topologia da Figura 8 foi a escolhida para a rede, pois apresenta rotas com distâncias iguais ou inferiores a 600 m, que possibilitam a configuração de potências de transmissão menores e, portanto, com menor consumo de energia. Além disso, a existência de um “backbone” ao longo da crista da barragem torna a topologia da CSN bastante flexível, pois qualquer nó adicional na rede sempre terá uma rota, via “backbone”, para seu coordenador. Ainda nessa perspectiva e levando-se em conta os pontos de medição da usina de Miranda visitados, foram estabelecidos quatro roteadores na crista da barragem da UHE de Miranda, conforme ilustrado na Figura 10. Também foram identificados os pontos de medição dentro da galeria da barragem, conforme ilustrado na Figura 11. Todos os pontos de medição, barragem e galeria, estão identificados na Tabela III.

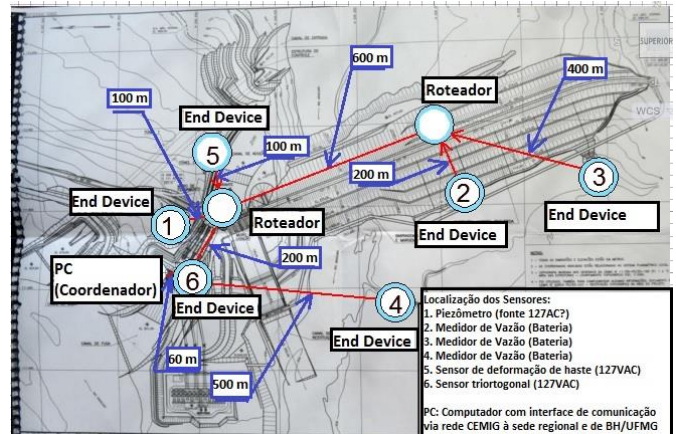


Figura 8: Alternativa de rotas escolhida para a topologia da Cemig Sensor Net.

Tabela III. Identificação dos nós sensores da Cemig Sensor Net e a relação com os pontos de medição.

Identificação do Nó	Descrição	Local Instalado	Mastro a ser Instalado	Disponibilização de Energia
1	sensor de vazão	MRBTVV-002	3 metros	-
2	sensor de vazão	MRBTVV-003	3 metros	-
3	sensor de vazão	MRBTVV-004	3 metros	-
4	sensor de vazão	MRBTVV-006	3 metros	-
5	sensor de vazão	MRBTVV-008	3 metros	-
6	sensor de vazão	MRBTVV-009	3 metros	-
7	sensor de vazão	MRBTVV-001	3 metros	-
8	roteador da rede	Estaca 51	1,5 metro	sim
9	roteador da rede	Estaca 44	1,5 metro	sim
10	roteador da rede	Estaca 30	1,5 metro	sim
11	roteador da rede	Estaca 17	1,5 metro	sim
12	roteador da rede	Torre da Barragem	-	sim
13	sensor de nível piezômetro	próximo aos pontos MRCAPC(905, 904 e 903)	3 metros	-
14	sensor de nível piezômetro	MRCAMN-903	3 metros	-
15	roteador da rede	Paredão 1	-	sim
16	roteador da rede	Paredão 2	-	sim
17	roteador da rede	Poste próximo à casa de força	-	sim
18	roteador da rede	Poste próximo à casa de força – Redundância	-	sim
19	roteador da rede	Vertedouro	-	sim
20	roteador da rede	Casa de Força (Externo)	-	sim
GALERIA				
21	roteador da rede	Casa de Força / Rede Galeria	-	sim
22	medidor triângulo	MRCMMT-007	-	sim
23	pendúlo direto	MRCMPE-003	-	sim
24	medidor triângulo	MRCMMT-008	-	sim

Foram posicionados dois módulos em pontos separados, um na crista e outro na base da barragem, onde fica o ponto de medição. Cada um deles foi montado em torres de madeira com altura definida para 1,5 metros, conforme ilustrado na Figura 9. Foram utilizadas antenas omnidirecionais com ganho de 8 dBi.

Um dos módulos foi configurado como coordenador da rede (Figura 9), enquanto o outro, que está localizado no ponto de medição de nível, na base da barragem, foi configurado como um dispositivo final. O teste consistia em enviar uma mensagem para um dispositivo final por meio do coordenador. O dispositivo final recebia a mensagem e a retransmitia de volta. Com a mensagem recebida pelo coordenador pôde-se obter as informações de RSSI, LQI, número de sucessos e falhas de pacotes para a menor potência configurável nos módulos sem que se perdesse a conexão.

Os testes foram feitos para todos os pontos de medição das Figuras 10 e 11. A Figura 10 também apresenta o resultado da caracterização eletromagnética da barragem da UHE de Miranda.

Para cada uma das transmissões realizadas e indicadas pelas setas foram registradas as seguintes informações: potência de transmissão, RSSI, LQI (255 é o maior valor e indica que a conexão entre transmissor e receptor está excelente) e a TS (Taxa de Sucesso – relação entre o nº de paco-

tes recebidos e o nº de pacotes transmitidos, ou seja, 100% indica que não houve perda de pacotes).

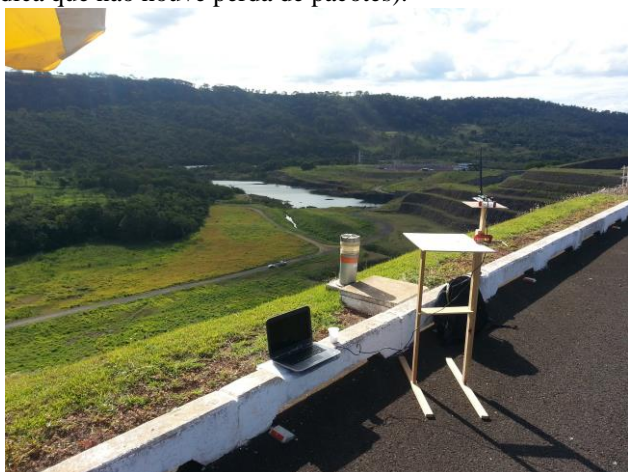


Figura 9: Montagem para a caracterização eletromagnética da barragem da UHE de Miranda - vista da crista da barragem.

A potência de transmissão escolhida foi de -1 dBm, pois esse valor foi o menor nível de potência possível sem que houvesse erros de transmissão, ou seja, a TS se manteve em 100%. Experimentos preliminares demonstraram que a TS se mantinha em 100%, desde que o RSSI fosse superior a -80 dBm e LQI igual a 255. O roteador da torre da barragem (ponto 12) foi a única exceção, sendo configurado com 5 dBm de potência de transmissão, de modo a aumentar a sua taxa de sucesso, já que este roteador concentra todos os pacotes de dados transmitidos pelos demais nós sensores da barragem. A redundância para esse roteador é o roteador do ponto 19. Dispositivos finais (pontos 4 e 6) que se localizavam entre nós sensores que tiveram transmissões bem-sucedidas, não foram testados, pois teriam desempenho similar. Para que a rede ficasse robusta foi planejado que cada dispositivo final tivesse, no mínimo, dois roteadores como opção para transmissão de seus pacotes de dados. Os roteadores dos pontos 17 e 18 (um é redundância do outro) são responsáveis pelo encaminhamento de todas as medidas efetuadas ao longo da barragem para a sala de controle, que se encontra na casa de força. Testes de propagação eletromagnética demonstraram que não há visada com a sala de controle (teste do ponto 18, com potência de 18 dBm). Além disso, houve a preocupação de que poderia haver interferência eletromagnética nos equipamentos utilizados dentro da casa de força. Diante desses fatos, a melhor solução foi encaminhar os dados da CSN para a sala de controle via cabo coaxial. O cabeamento já foi adquirido e será passado pela tubulação já existente para telefonia, que conecta uma antena no telhado da casa de força, via cabo coaxial, à sala de controle. Para minimizar as perdas no cabo coaxial e conectores, será utilizada uma antena Yagi com ganho de 25 dBi. Finalmente, para se determinar a potência de transmissão necessária para a conexão bem-sucedida entre roteadores mais distantes, também foi realizado o teste entre os pontos 8 e 19. Neste caso, a potência necessária foi de 14 dBm. A ideia é avaliar a possibilidade de implementação de uma função de autogerenciamento que possa ajustar a potência de transmissão automaticamente, caso os roteadores intermediários saiam da rede. O teste realizado refere-se ao pior

caso.

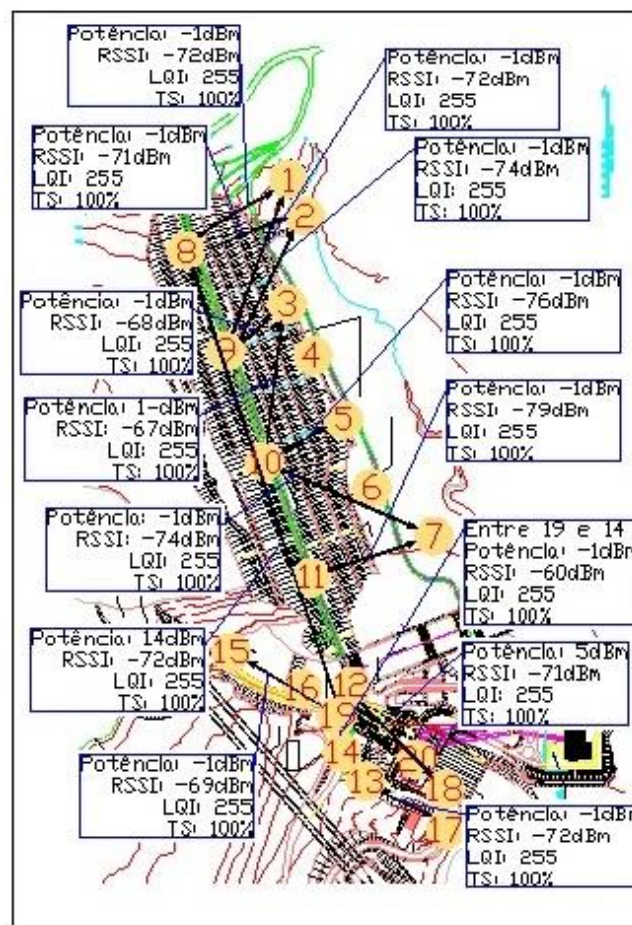


Figura 10: Resultado da caracterização eletromagnética da barragem da UHE de Miranda.

A Figura 11 apresenta os resultados da caracterização eletromagnética dentro da galeria da UHE de Miranda.

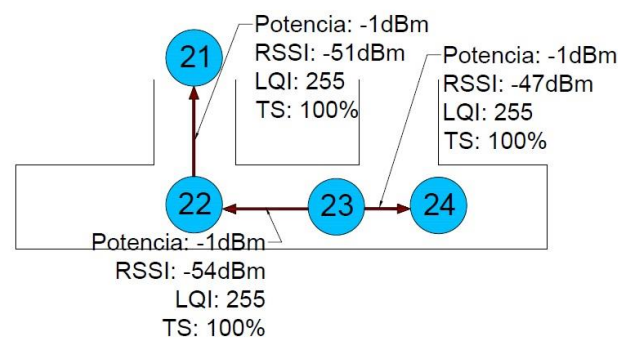


Figura 11: Representação esquemática da localização dos pontos de teste da caracterização eletromagnética da galeria da UHM.

A potência de transmissão foi mantida em -1 dBm, mas os valores de RSSI foram superiores a -60 dBm, ou seja, o desempenho da rede na galeria foi excelente. Assim como ocorreu com a rede da barragem, não havia visada do corredor da galeria para a sala de controle e também havia a preocupação de que poderia haver interferência eletromagnética em equipamentos utilizados na casa de força. Portanto, os dados da galeria também serão encaminhados via cabo coaxial para a sala de controle. Neste caso, também há tubulações que conectam a galeria à sala de controle, de modo que o cabo coaxial deverá ser passado através delas até a sala de controle. Para compensar as perdas no cabeamento e nos

conectores serão utilizadas duas antenas Yagi, com ganho de 25 dBi cada, no corredor do ponto 21.

Os resultados da caracterização eletromagnética da UHE de Miranda foram bem-sucedidos e ratificam a viabilidade técnica e econômica de implementação da Cemig Sensor Net baseada no padrão IEEE 802.15.4 [8]. O menor nível de potência obtido, sem que houvesse perdas de pacotes de dados, foi de -1 dBm e implica em um consumo de energia reduzido por nó sensor e, consequentemente, aumento do tempo de vida da rede. Por se tratar de uma rede autônoma, a estimativa é que a solução final da rede a ser instalada possa prover a autonomia de, no mínimo, um ano de operação livre de intervenção humana.

C. Teste da CSN no Prédio do COLTEC/UFG

Antes da realização de testes em campo e a efetiva instalação da CSN na usina de Miranda, são necessários testes preliminares da rede desenvolvida num ambiente controlado, de modo a avaliar o seu desempenho e realizar as melhorias necessárias. A topologia da rede deve ser similar à topologia que será empregada na usina de Miranda (Figura 10) e deve realizar medidas a partir de periféricos e interfaces que serão utilizados na aquisição das medidas em campo. Além disso, o ambiente de teste deve submeter a rede a condições variadas de interferência na sua faixa de frequência de operação.

Para atender essas condições, a rede de teste foi implantada no sítio do COLTEC/UFG, ilustrada na Figura 12. Ela consiste em 5 dispositivos: 1 coordenador (UFGM-COLTECSN0-200-LITE), 2 roteadores (UFGM-COLTECSN0-301-BIB e UFGM-COLTECSN0-302-SAUT) e 2 dispositivos finais (UFGM-COLTECSN0-303-SELT e UFGM-COLTECSN0-304-SINF). O coordenador é o dispositivo responsável por criar e coordenar a rede. Além disso, é também responsável por receber os dados que são coletados pelos outros dispositivos e transmiti-los a um computador através de uma interface de comunicação (serial ou USB). Os roteadores são dispositivos que, além de encaminhar os pacotes de outros dispositivos na rede, de forma a estabelecer a interconexão entre todos os dispositivos, são também responsáveis por coletar as medidas de suas tensões de alimentação e de temperatura no interior de suas caixas herméticas. Essas medidas foram obtidas pelo conversor A/D do nó sensor.

Já o dispositivo final é responsável apenas por coletar dados através dos sensores de tempos em tempos, economizando o máximo de energia entre os intervalos de envio. Neste caso, foram obtidas as tensões das baterias (duas pilhas em série em cada um deles), via conversor A/D e um dos dispositivos finais da rede em teste também media a capacitância de um sensor capacitivo, via interface I²C, conforme ilustrado na Figura 13.

A rede ficou em operação durante aproximadamente 27 dias e as medidas foram realizadas de 15 em 15 minutos, aproximadamente. O coordenador foi configurado com a potência de transmissão de 8 dBm (já que é o principal elemento da rede), os roteadores com 3 dBm e os dispositivos finais com -1 dBm, pois deveriam economizar o máximo de energia, já que são alimentados por pilhas.

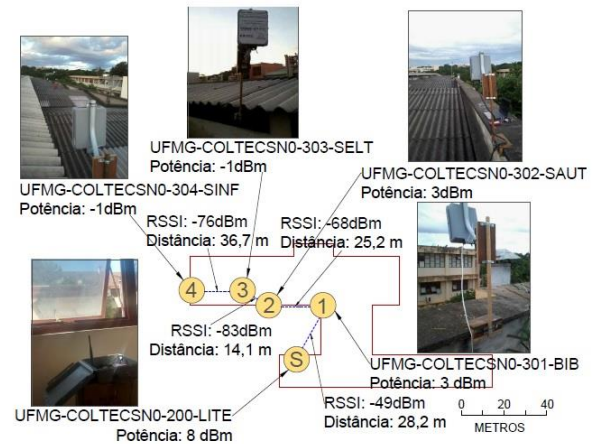


Figura 12: Diagrama ilustrando a rede CSN em teste no prédio do COLTEC/UFG.

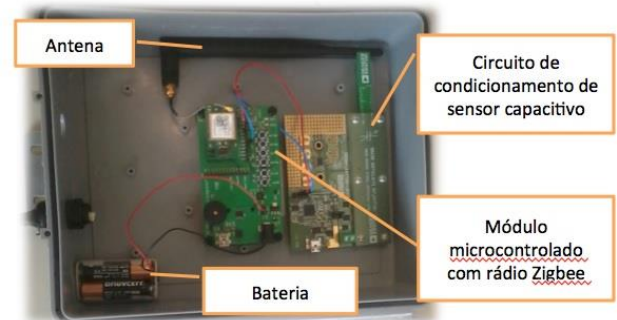


Figura 13: Ilustração do módulo microcontrolado da rede CSN e do circuito de prototipação de sensor capacitivo de deslocamento usados nos testes de monitoramento.

Analisando-se o mapa da rede da Figura 12, observa-se que o roteador UFGM-COLTECSN0-302-SAUT não tem comunicação com o coordenador UFGM-COLTECSN0-200-LITE. Isto ocorreu por causa de uma obstrução entre os dispositivos, de forma que não havia visada entre eles.

Todos os dispositivos da CSN em teste realizaram medidas de temperatura. O sensor usado para os testes foi o LM61 da Texas Instruments [17]. Os gráficos das Figuras 14 e 15 mostram como a temperatura no interior das caixas herméticas variou ao longo dos dias para a 1ª semana do teste.

Observa-se que os valores de temperatura entre os dispositivos foram aproximadamente os mesmos, seguindo a mesma tendência. Os valores medidos são de extrema importância para a avaliação do desempenho da CSN, pois revelam como se comporta a temperatura no interior das caixas herméticas quando expostas ao ambiente (sol e chuva). Durante o período de teste da CSN, a temperatura variou entre 18°C (mínima) e 53°C (máxima), sem que houvesse comprometimento do desempenho da rede, ou seja, nenhum dos nós sensores deixou de funcionar ou teve mau funcionamento devido à temperatura.

As medidas de capacitância foram obtidas pelo dispositivo final UFGM-COLTECSN0-303-SELT utilizando-se uma placa de avaliação do conversor AD7746 da Analog Devices Inc. [18]. Essa placa tem uma demonstração de uso do sensor capacitivo associado ao comprimento de uma régua que é colocada no interior de duas placas metálicas paralelas. Como a régua é feita de um material dielétrico, a variação

de sua posição no interior das placas causa uma variação na medição da capacitância entre essas placas. A régua foi fixada em uma posição para que as medidas tivessem um valor fixo de capacitância, com o objetivo de avaliar o desempenho do sensor capacitivo em relação à temperatura, conforme ilustrado na Figura 16.

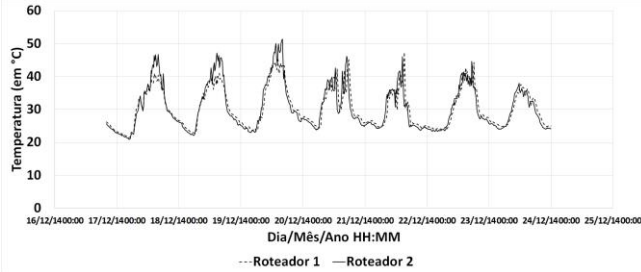


Figura 14: Temperatura no interior das caixas herméticas dos roteadores da CSN para a 1ª semana do teste.

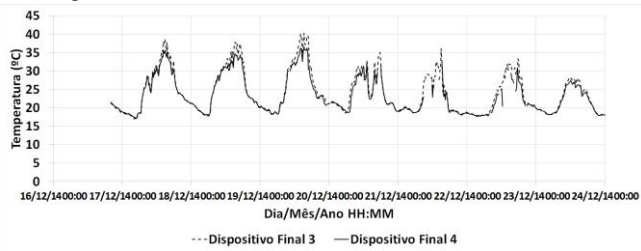


Figura 15: Temperatura no interior das caixas herméticas dos dispositivos finais da CSN na 1ª semana do teste.

Observa-se pelos gráficos da Figura 16 que as variações de capacitância são provocadas pelo aumento de temperatura no interior da caixa devido à dilatação sofrida pela régua da placa de avaliação. Essas variações representam cerca de 1,18% do valor da escala total medida, ou seja, apesar da variação causada pela temperatura, medidas com boa precisão ainda foram obtidas.

Todos os nós sensores instalados também tiveram medidas da tensão de alimentação. O gráfico da Figura 17 mostra a tensão de alimentação dos roteadores UFMG-COLTECSN0-301-BIB e UFMG-COLTECSN0-302-SAUT. Esses dispositivos foram alimentados com fontes de alimentação com as seguintes especificações: entrada de 100 a 240V_{AC} e saída de 3,3V_{DC}/500mA.

O esperado era que as fontes tivessem um valor fixo, por volta de 3,3 V_{DC}, durante a sua operação. Porém, a influência da variação da temperatura na regulação da tensão de saída e os ruídos na rede elétrica caracterizados pelo uso de outros equipamentos causaram variações durante os dias. Apesar dessas variações, as fontes mantiveram a tensão de alimentação dentro da faixa operacional dos nós sensores (entre 2,1 e 3,6V_{DC}) e não foi constatado nenhum impacto negativo no funcionamento dos roteadores ao longo do período de realização do teste da CSN.

Os dispositivos finais COLTECSN0-303-SELT e COLTECSN0-304-SINF da CSN também tiveram medidas da tensão de alimentação. Foram obtidas medidas da tensão de um par de pilhas alcalinas colocadas em série em cada dispositivo. O gráfico da Figura 18 mostra o comportamento da tensão das pilhas para cada um deles.

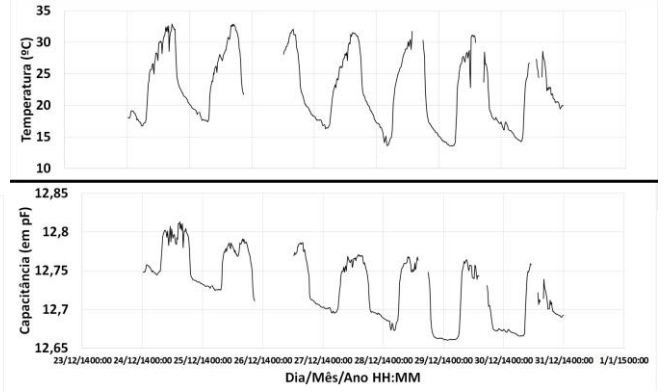


Figura 16: Temperatura e capacitância do dispositivo final UFMG-COLTECSN0-303-SELT da CSN na 2ª semana do teste.

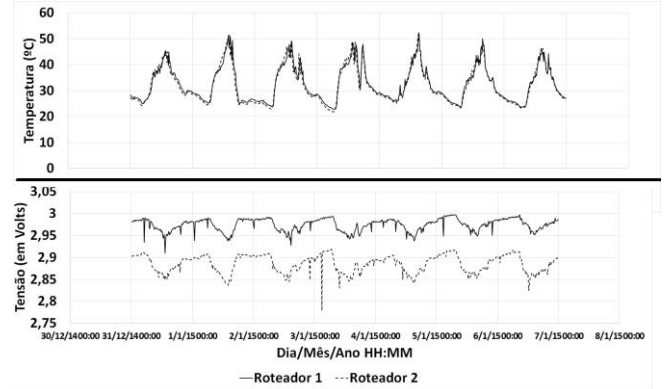


Figura 17: Tensão das fontes de alimentação dos roteadores UFMG-COLTECSN0-301-BIB e UFMG-COLTECSN0-302-SAUT da CSN na 3ª semana do teste.

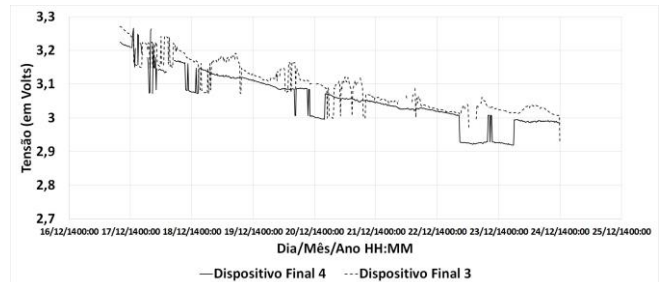


Figura 18: Tensão das pilhas alcalinas dos dispositivos finais UFMG-COLTECSN0-303-SELT e UFMG-COLTECSN0-304-SINF da CSN na 1ª semana do teste.

Observa-se que, com o passar dos dias e das semanas, a tensão de ambos os pares de pilhas decresceu continuamente durante a descarga e, apesar de sua medição ser economicamente e computacionalmente mais barata, a relação entre o nível de tensão e a capacidade residual da bateria varia amplamente. Portanto, para implementar a consciência de disponibilidade energética [19] na CSN, será utilizado o Modelo Comportamental de Baterias Alcalinas (MCBA) [20], que é baseado na contagem de Coulomb e leva em conta os efeitos da taxa de descarga, auto-descarga, efeito de relaxação e temperatura. A tensão da bateria será utilizada como parâmetro de entrada do MCBA para identificar a tensão mínima de operação dos nós sensores (2,1V_{DC}).

D. Análise dos resultados parciais e desempenho da CSN

Antes da efetiva instalação da CSN na usina de Miranda é necessário que a rede seja testada e validada. Apesar de ainda não haver nenhuma medida diretamente relacionada à auscultação da barragem da UHE de Miranda, as medidas de

temperatura, tensão das baterias e de capacitância serão mantidas quando a CSN for instalada na usina. As duas primeiras serão utilizadas no MCBA para estimar a capacidade residual das baterias dos dispositivos finais e a última, a capacitância, será utilizada nos medidores de vazão tipo canal aberto com vertedouro em V ainda em desenvolvimento no projeto. Além desse objetivo, essas medidas também foram escolhidas para testar o funcionamento do conversor A/D (temperatura e tensão) e da interface de comunicação I²C (sensor capacitivo) dos nós sensores, uma vez que todas as medidas de auscultação da barragem demandarão a utilização de um deles. Tendo em vista que as medidas foram bem-sucedidas, o funcionamento do periférico e da interface foi validado pelo teste.

Quanto ao desempenho da CSN, o roteador UFMG-COLTECSN0-301-BIB funcionou normalmente durante todo o período de teste da CSN, sem que houvesse reinicializações ou saída da rede, ou seja, não houve falhas deste roteador. O roteador UFMG-COLTECSN0-302-SAUT travou e se reiniciou automaticamente 2 vezes durante o período de teste, voltando imediatamente para a rede. O dispositivo final UFMG-COLTECSN0-303-SELT apresentou um número maior de falhas devido à complexidade do sistema, que apresentava um dispositivo a mais – o sensor capacitivo. Ele apresentou duas falhas distintas: a primeira se caracterizou pelo travamento do dispositivo, sendo que ele se reiniciava automaticamente após este travamento e também, automaticamente, retornava para a rede. O segundo é uma pausa do envio dos dados devido a um mal contato ou falha na comunicação do módulo com o sensor capacitivo, que foi identificado e resolvido. Portanto, essas falhas não ocorrerão na versão final do hardware e do software embarcado da CSN. O dispositivo final UFMG-COLTECSN0-304-SINF funcionou corretamente durante todo o período de teste da CSN.

Como resultado da implementação inicial da função de autocura, todas as falhas que ocorreram foram solucionadas automaticamente e sem necessidade de intervenção humana.

Após o teste da CSN, verificou-se a necessidade de implementar novas funções de autogerenciamento, além de melhorar algumas já implementadas.

Será implementada uma função de auto-otimização para que a CSN seja capaz de detectar eventos críticos, como uma variação brusca de uma determinada medida, que necessite de maior atenção. Ao detectar eventos desse tipo, a CSN poderá tomar decisões, como por exemplo, alertar a quem estiver monitorando a rede, aumentar a taxa de aquisição dos dados, etc.

Um outro aspecto é melhorar a função de autocura da CSN. Embora a rede tenha apresentado uma boa capacidade de se regenerar, com os dispositivos voltando rapidamente para a rede sempre que algo a afetava, é necessário fazer com que este processo se torne mais eficiente do ponto de vista de tempo de regeneração da rede. Como o consumo de energia é uma das metas da CSN, este processo também deve ter o menor consumo possível. Outra função que deverá ser implementada é a capacidade de cada nó da rede de tomar decisões quando este perde a conexão com os dispositi-

vos vizinhos, tais como tentar se reconectar a outro dispositivo, aumentar momentaneamente a potência de transmissão, etc.

Também deverá ser implementada uma função de auto-configuração para que a CSN possa recalibrar os seus sensores a cada período de tempo, sem intervenção humana, ou ao menos gerar alertas, avisando o momento que os operadores da rede devam fazê-lo.

Além dessas melhorias, é importante revisar a programação dos módulos de forma a corrigir ou melhorar algumas funções, principalmente na parte de comunicação I²C com o sensor capacitivo. Isto se faz necessário considerando que o único módulo que usou comunicação serial com um sensor foi o UFMG-COLTECSN0-303-SELT e foi este módulo que apresentou mais falhas.

IV. INTEGRAÇÃO DE DADOS COM SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE INFORMAÇÃO DA PLANTA

A integração de dados de diferentes fontes em uma base de dados centralizada e de acesso universal é a forma mais utilizada por empresas e indústrias que precisam gerenciar ativos industriais complexos e geograficamente distribuídos. Um sistema PIMS como o PI-OSIsoftTM [3] utilizado pela CEMIG oferece infraestrutura de software para a implantação de bancos de dados temporais e de interfaces gráficas para visualização de dados. A Figura 19 ilustra uma tela de monitoramento com cálculos estatísticos de média, desvio padrão, valores máximos e mínimos e histograma utilizados para avaliar o comportamento da tendência histórica de uma série de dados a partir do banco de dados do sistema PI-UFMG/CEMIG.

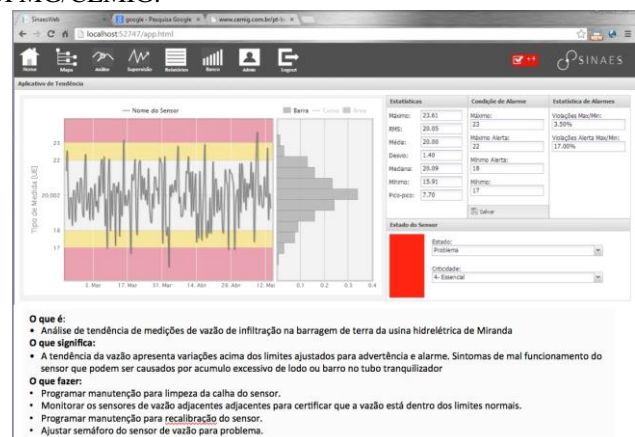


Figura 19: Análise estatística de dados realizada através de ambiente de navegador da Internet utilizando a plataforma PI-UFMG/CEMIG.

Os dados da CSN utilizados para auscultação de barragens na usina de Miranda serão enviados automaticamente para os bancos de dados temporais do PI-UFMG/CEMIG. GUIAs (Guia Utilitário de Interface Assistente) estão sendo desenvolvidos para viabilizar a análise personalizada de dados de auscultação de barragens coletados tanto pela CSN quanto pelas equipes de coleta de dados em campo que realizam medições em campo. Dados oriundos dos sistemas de automação da usina (e.g. nível de reservatório, energia gerada, vibração, etc) poderão também ser reconciliados com os dados de auscultação em uma mesma interface gráfica.

O procedimento para cada análise estatística, conforme

ilustrado na Figura 20, prevê que o analista relate os resultados com 3 focos: (i) O que é? (ii) O que significa? (iii) O que fazer? Ao se detectar alguma inconsistência nos dados analisados o semáforo de componente e medida do sensor examinado pode ser ajustado para reportar uma das seguintes condições: Normal, Alerta, Problema, Degradado, Manutenção, Desligado ou Desconhecido.

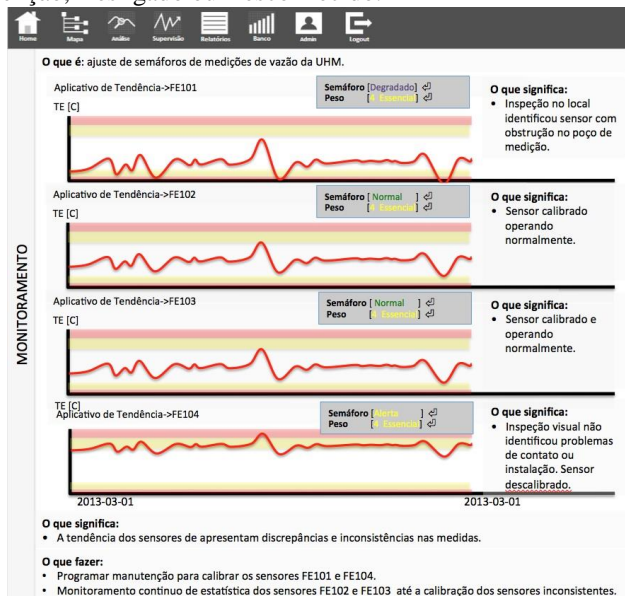


Figura 20: Análise de múltiplos sensores com dados simulados realizada através de ambiente de navegador da Internet utilizando a plataforma PI-UFGM/CEMIG.

V. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

O projeto de automação de sistemas instrumentados de auscultação de barragens apresentado ilustra viabilidade técnica e vantagens de uso de sensores eletrônicos de baixo custo conectados em redes sem fio de baixo consumo e com capacidade de autogerenciamento e configuração de elos de comunicação. Testes em ambiente controlado demonstraram a capacidade da rede CSN implementada para a coleta de dados de dinâmica lenta (1 mês) de forma automática e remota. Apesar da grande diversidade de instrumentos demandados para o monitoramento de impacto em estruturas de barragens, o conjunto de sensores eletrônicos selecionado ilustrou os procedimentos requeridos para a implantação de uma rede de sensores sem fio autônoma adequada para complementar os processos de mensuração manuais típicos da auscultação de barragens.

A tecnologia implementada e testada tem potencial de aplicações em diversos sistemas de instrumentação cujo cenário seja caracterizado por vasta distribuição espacial, ausência ou restrição de fontes de alimentação conectadas a rede elétrica e caracterizado por processos dinâmicos lentos.

Trabalho futuro inclui instalação da rede de sensores sem fio CSN na usina de Miranda/CEMIG para validação dos sensores durante um período de 12 meses e depuração da integração dos dados de auscultação de barragens com o sistema PIMS da CEMIG. Almeja-se também realizar como estudo de caso uma avaliação de custos e de retorno de investimento do projeto visando subsidiar a expansão da tecnologia para outras usinas.

Uma rede de sensores sem fio necessita de manutenção e projetos futuros incluem o monitoramento dos dados da rede instalada para aprimorar e avaliar degradações e periodicidade adequada para calibração dos sensores eletrônicos.

VI. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos aos ex-bolsistas, Pedro Eugênio Rocha Medeiros e Afonso Liberato Braga, pelas valiosas contribuições na fase inicial do projeto e ao COLTEC-UFGM pela contrapartida aportada e autorização para uso de instalações para testes dos sistemas desenvolvidos.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. F. Buzzi, "Avaliação das correlações de séries temporais de leituras de instrumentos de monitoração geotécnico-estrutural e variáveis ambientais em barragens estudo de caso de Itaipu", dissertação de mestrado, Dept. de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, 2007.
- [2] A. B. da Cunha, Anísio R. Braga e Alberto de F. Gontijo, "Relatório de Visita Técnica à Usina Hidrelétrica de Miranda, à Usina Hidrelétrica de Nova Ponte e à Usina Hidrelétrica de Itaipu," Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Relatório Técnico. GT493, Nov. 2013.
- [3] OSIsoft, "The PI System", <http://www.osisoft.com>, 2014.
- [4] P. Horn, "Autonomic Computing: IBM's Perspective on the State of Information Technology", IBM Corporation, http://www.research.ibm.com/autonomic/manifesto/autonomic_computing.pdf, 2001.
- [5] D.A. Norman, A. Ortony, and D.M. Russell, "Affect and machine design: Lessons for the development of autonomous machines", IBM Systems Journal, Vol 42, nº 1, pp. 38-44, 2003.
- [6] R. Sterritt and D. F. Bantz, "PAC-MEN: Personal Autonomic Computing Monitoring Environment", Proceedings of the 15th International Workshop on Database and Expert Systems Applications (DEXA'04), 2004.
- [7] Qazi Mamoon Ashraf and Mohamed Hadi Habaebi, "Autonomic schemes for threat mitigation in Internet of Things", Journal of Network and Computer Applications, vol. 49, pp. 112-127, 2015.
- [8] IEEE 802.15 WPAN™ Task Group 4 (TG4), "IEEE 802.15.4 Features", <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>, 2013.
- [9] ZigBee Alliance, "ZigBee Stack", <http://www.zigbee.org>, 2013.
- [10] Anaren, "SOC 2530 Series", <https://www.anaren.com>, 2013.
- [11] Telit Wireless Solutions, "ZE51 and ZE61 modules", <http://www.telit.com>, 2013.
- [12] Telegesis, "ETRX35x-LRS and ETRX357 modules", <http://www.telegesis.com/>, 2013.
- [13] Atmel Corporation, "ATZB-24-B0/A2 and ATZB-A24-UFL/U0 modules", www.atmel.com, 2013.
- [14] Radiocrafts Embedded Wireless Solutions, "RC ZigBee modules", <http://www.radiocrafts.com>, 2013.
- [15] Digi International Inc., "ZigBee modules", <http://www.digi.com/xbee>, 2013.
- [16] Fractum indústria e Comércio de Equipamentos Eletrônicos, "Módulos F U-BEEMAX e U-Bee", <http://www.fractumrf.com>, 2013.
- [17] Texas Instruments, "LM61 temperature sensor", www.ti.com, 2013.
- [18] Analog Devices Inc., "AD7746 - 24-bit, 2 Channel Capacitance to Digital Converter", <http://www.analog.com>, 2013.
- [19] A. B. da Cunha, "Uma Abordagem para a Modelagem da Consciência de Disponibilidade Energética em Nós Sensores de Rede de Sensores Sem Fio", tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.
- [20] A. B. da Cunha e D. C. Silva Junior, "Behavioral Model of Alkaline Batteries for Wireless Sensor Networks", Revista IEEE América Latina, v. 10, p. 1295-1304, 2012.