



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

CB/GGH/27

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - GGH

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

MONITORAMENTO REMOTO DE DESEMPENHO DE ESTRUTURAS HIDRÁULICAS ATRAVÉS DA AUTOMAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS, FERRAMENTAS DE ANÁLISE E RESULTADOS

**David C. Marques Jr. (*)
COPEL GeT**

**Élio D. Henklein
ENERGIA ENGENHARIA**

**Isabela C. de Oliveira
COPEL GeT**

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um estudo sobre a automatização do sistema de coleta e tratamento dos dados provenientes de instrumentos de auscultação instalados em barragens de usinas hidrelétricas. Baseado em uma arquitetura conceitual, são apresentados os instrumentos, equipamentos de aquisição de dados (*dataloggers*), sistemas supervisórios, comunicação e disponibilização das informações para o usuário final. Na sequência são apresentados os sistemas instalados em usinas da Copel GeT, e com base na experiência adquirida é analisado o atendimento dos sistemas para fins de avaliação da segurança das barragens. Por fim, considerações sobre as características técnicas deste sistema e perspectivas futuras fecham o escopo deste informe técnico.

PALAVRAS-CHAVE

Auscultação de barragens, Instrumentação, *Dataloggers*.

1.0 - INTRODUÇÃO

Dentre os tipos de barragens que fazem parte das usinas hidrelétricas, as mais comumente encontradas são as do tipo enrocamento e do tipo de concreto, dentre elas Concreto Compactado com Rolo (CCR). Em ambos os casos, é necessária a instalação de instrumentação para a fundação e para o concreto, visando a segurança destas barragens, abrangendo os períodos de construção, enchimento do reservatório e operação (1-4).

Barragens de concreto apresentam uma série de complexidades, dentre elas os materiais utilizados e os métodos construtivos adotados. A construção deve ser realizada em etapas através da execução de blocos e camadas, para prevenir que o comportamento térmico da estrutura possa ocasionar a fissuração do maciço e a consequente perda de resistência mecânica. Apesar dos blocos trabalharem como um conjunto, eles permitem uma melhor análise estrutural, pois eventuais anomalias podem ser observadas em pontos localizados. Além disso, o concreto, apresenta certa porosidade, permitindo a passagem de água em alguns pontos, a denominada água de percolação.

De acordo com os aspectos apresentados, pode-se listar algumas grandezas a auscultar em uma barragem de concreto: a temperatura individual de cada bloco (sensores de temperatura dentro do concreto), a variação dimensional das juntas de dilatação (extensômetros instalados entre os blocos) e a medição do volume da água de percolação (drenos em locais estratégicos). Estas grandezas dependem das reações químicas dos compostos empregados na barragem e também das condições climáticas (dia/noite, estações do ano, intempéries). Para posterior análise pelos profissionais da engenharia, estas medições são definidas como variáveis analógicas e precisam ser armazenadas por longos períodos de tempo.

Para tanto, são utilizados sistemas automatizados que envolvem a aquisição e armazenamento regular de amostras por longos períodos, com precisão suficiente para avaliar pequenas variações ao longo de dias, meses e anos (5-7). Devido ao grande volume de dados, normalmente utilizam-se servidores de bancos de dados e estações de gerenciamento. A partir dos dados deste sistema pode-se então gerar os gráficos de tendência e relatórios necessários para verificação da segurança das barragens.

2.0 - SISTEMAS AUTOMATIZADOS DE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGEM

Os sistemas automatizados de instrumentação de barragens possuem uma hierarquia que pode ser dividida em quatro níveis, conforme apresentado na Figura 1 – (a). Uma arquitetura orientativa também é apresentada na Figura 1 – (b). Os diferentes níveis e equipamentos serão apresentados na sequência.

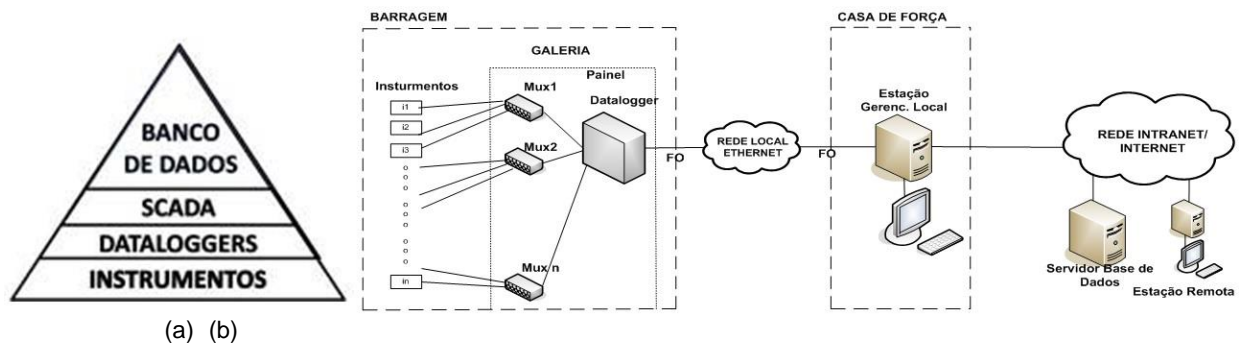


FIGURA 1 – Hierarquia e arquitetura orientativa para sistemas de instrumentação de barragens.

2.1 - Instrumentos

Com o objetivo de realizar a auscultação e avaliar a segurança da barragem, é necessária a instalação de instrumentos de medição no interior da barragem. Os instrumentos são normalmente classificados em dois tipos principais: para concreto e para fundação.

Entre os instrumentos utilizados para medição de grandezas do concreto, pode-se citar o pêndulo direto, pêndulo invertido, medidor elétrico de junta, base de alongômetro, deformímetro de armadura, tensômetro de concreto, deformímetro de concreto e termômetro de resistência. Entre os instrumentos usados para fundação, tem-se o medidor de vazão, extensômetro múltiplo de haste, piezômetro *Standpipe*, piezômetro elétrico, medidor de recalque, célula de pressão total, medidor triortogonal e medidor de nível d'água (8).

Os principais instrumentos utilizados pela Copel GeT em usinas hidrelétricas (UHEs) com barragens de concreto são descritos na sequência.

- Medidor de vazão: utilizado para medição de percolação/infiltrações de água oriundas de: fundação; regiões mais permeáveis do maciço de concreto; juntas entre blocos de contração; entre juntas de concretagem; e fissuras no maciço de concreto.
- Piezômetro elétrico: tem função de medir a subpressão no interior do maciço, da fundação e no contato concreto/rocha.
- Extensômetro de junta: mede os deslocamentos de abertura e fechamento de determinadas juntas de contração de estruturas de concreto.
- pêndulo direto: mede os deslocamentos horizontais de pontos dos blocos instrumentados da barragem em determinadas cotas, em relação à fundação da estrutura.
- Termômetro de concreto: possuem função de medição da temperatura no interior do maciço, para monitorar a variação e gradiente de temperatura entre os paramentos de jusante e montante, possibilitando avaliar a influência térmica no comportamento da estrutura de concreto.
- Medidor de pressão intersticial: tem função de medição da subpressão/poropressões no interior do maciço de concreto.

A coleta dos valores das medições realizadas pelos instrumentos pode ser manual ou automática. Considerando um sistema automatizado de instrumentação de barragem, a leitura destes instrumentos é realizada por equipamentos denominados *dataloggers*.

2.2 - Dataloggers

Um *datalogger* é um dispositivo eletrônico que registra dados ao longo do tempo através da leitura sistematizada de instrumentos e sensores, internos ou externos. Dependendo do tamanho da instalação, esta pode ter um ou mais *dataloggers* e ainda vários multiplexadores (Mux)¹. Um dos principais benefícios do uso de registradores de dados é sua capacidade de coletar medições automaticamente de forma contínua, sem supervisão local.

Adicionalmente, existem equipamentos portáteis para leitura dos instrumentos, denominados *readouts*. Eles possibilitam a leitura manual dos instrumentos em caso de alguma falha nos *dataloggers*, servidores ou estações de gerenciamento. Na Figura 2 são apresentadas fotos de um *datalogger*, um MUX e um *readout*.

¹ Um Mux é um dispositivo que seleciona as informações de duas ou mais fontes de dados num único canal de comunicação.

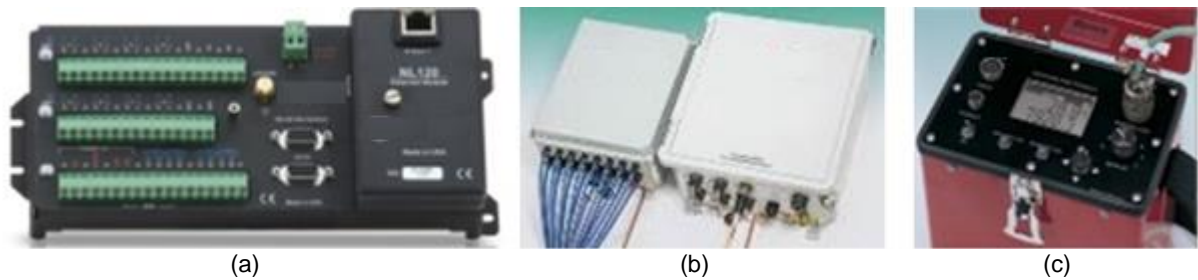


FIGURA 2 – Exemplo de equipamentos (a) *datalogger*, (b) Mux e (c) *readout*, utilizados na instrumentação de barragens da COPEL GeT.

Estes equipamentos precisam operar em condições elétricas e ambientais adversas, como é o caso das galerias de uma barragem, e devem ser completamente imunes a problemas como instabilidade de *software* e sistemas operacionais. É desejável ainda que não utilizem protocolos de comunicação proprietários, para garantir independência de fornecedores específicos.

2.3 – SCADA (computador local)

O sistema SCADA, do inglês *Supervisory Control and Data Acquisition*, também denominado sistema supervisor, são sistemas de supervisão e aquisição de dados, que no presente trabalho designa os *softwares* utilizados para realizar a leitura das variáveis adquiridas pelos *dataloggers* em intervalos programados de tempo, permitindo realizar o armazenamento em um banco de dados e também ao usuário verificar os valores medidos pelos instrumentos. Este sistema tipicamente emprega a topologia conhecida por mestre-escravo. Um exemplo de sistema SCADA utilizado para instrumentação de barragem é mostrado na Figura 3 – (a).

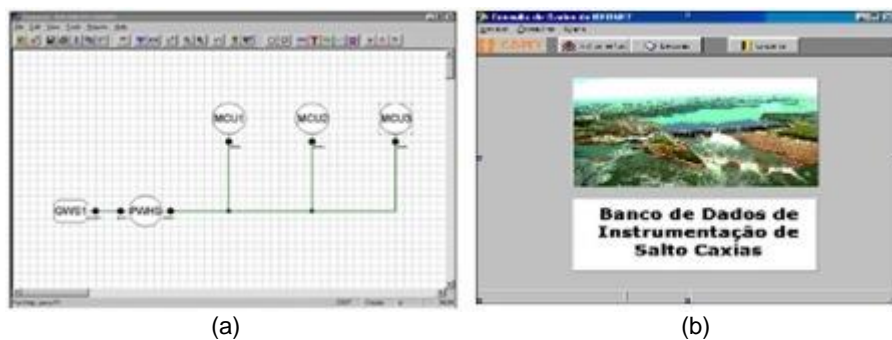


FIGURA 3 – Exemplo de (a) sistema SCADA e (b) *software* de integração do sistema SCADA com o banco de dados da instrumentação de barragem da COPEL GeT.

2.4 - Banco de dados (computador remoto)

O banco de dados do sistema de instrumentação da barragem deve ser capaz de armazenar todas as variáveis geradas pela instrumentação da barragem, desde a construção e enchimento do reservatório e posteriormente durante o período de operação da UHE. Preferencialmente as medidas são incluídas de forma automatizada no banco de dados, mas caso o sistema esteja operando de forma degradada, eventualmente o banco pode ser preenchido manualmente, com a transcrição dos dados obtidos através dos equipamentos do tipo *readout*.

O volume de dados gerados deve ser adequado à base existente seguindo a cultura estabelecida para realização de análise de tendências de longo prazo. Conforme mostrado na Figura 3 – (b), é desejável um *software* para integração do sistema SCADA ao banco de dados, permitindo ao analista de engenharia civil verificar as medidas e confirmar a segurança das barragens.

2.5 – Análise de Resultados

Após a coleta e o armazenamento dos dados, estes são analisados pela equipe de Segurança de Barragens através de planilhas e gráficos, utilizando-se diversos métodos de análise, normalmente baseados em inferências estatísticas e avaliação de dados históricos de forma a avaliar a confiabilidade dos dados e a correlação entre o comportamento apresentado pelos mais diversos instrumentos. Assim, é possível compreender o comportamento da estrutura de forma global. Como exemplo é apresentada a Figura 4.

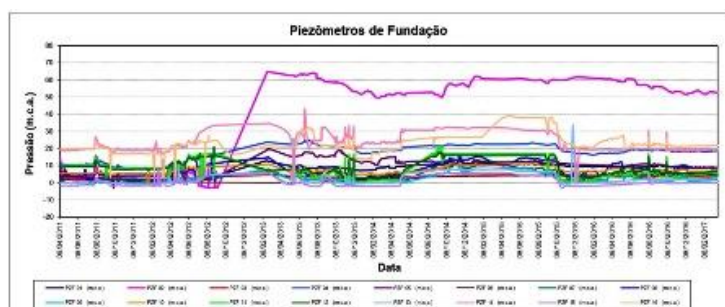


FIGURA 4 – Exemplo de gráfico de análise de dados de instrumentação de auscultação automatizada

3.0 - ESTUDO DE CASO DA COPEL GET

Este trabalho é baseado principalmente na experiência adquirida com a implantação e manutenção dos sistemas de leitura automatizada da instrumentação de barragens instalados na UHE Salto Caxias (UHE GJR – Governador José Richa) e na UHE Mauá (UHE GJC - Usina Governador Jaime Canet). Visto que ambas as barragens são construídas em CCR, elas tem características de concepção semelhantes, como a existência de galerias com drenos e canaletas para medição do volume de água percolada. Além destas usinas, atualmente a Copel GeT está implantando os sistemas automatizados de instrumentação em barragens existentes, iniciando pela UHE Guaricana (UHE GNA). Na Tabela 1 estão apresentados alguns dos instrumentos instalados nas barragens destas três UHEs da COPEL GeT (UHE GJR, UHE GJC e UHE GNA), cuja obtenção de dados é ou será automatizada.

TABELA 1 – Instrumentos para leitura automatizada em usinas da COPEL GeT.

	UHE GJR (S. Caxias)	UHE GJC (Mauá)	UHE GNA (Guaricana)
Medidor de vazão	8	9	3
Piezômetro elétrico	64	16	7
Extensômetro de junta	28		
Pêndulo direto	3		
Termômetro de concreto	64		2
Medidor de pressão intersticial			2
TOTAL	167	25	14

3.1 - UHE Salto Caxias

A Usina Salto Caxias, mostrada na Figura 5, foi inaugurada em fevereiro de 1999 e possui 1.240 MW de potência instalada. Está situada no rio Iguçu, no município de Capitão Leônidas Marques/PR, a 600 km de Curitiba. A barragem é do tipo gravidade, feita em CCR, com 1083 metros de comprimento e 67 metros de altura máxima, permitindo a formação de um reservatório com 131 km² de superfície.



FIGURA 5 – Foto da UHE Salto Caxias (UHE GJR).

O sistema automatizado de instrumentação foi adquirido em 1998, como pacote fechado (fornecimento, instalação e comissionamento), de uma empresa norte-americana líder no segmento na época. A equipe de engenharia de construção da Copel GeT forneceu a infraestrutura para a instalação do sistema e acompanhou a instalação. Uma vez que o sistema estava totalmente operacional, a engenharia de segurança de barragens da Copel recebeu os projetos, manuais e características técnicas detalhadas, permitindo assim realizar a operação e análise das informações obtidas pelo sistema.

A configuração original do sistema, mostrada na Figura 6, era composta de uma rede de comunicação serial sobre cabo metálico, ligando a estação de gerenciamento (GWHS) aos três *dataloggers* (MCUs) instalados na barragem. Foi utilizado um cabo metálicos da casa de força à barragem, ultrapassando mil metros de comprimento. O equipamento definido como PWHS é basicamente um *datalogger* com papel de gateway entre as MCUs para a estação de gerenciamento, onde se encontra instalado o sistema SCADA.

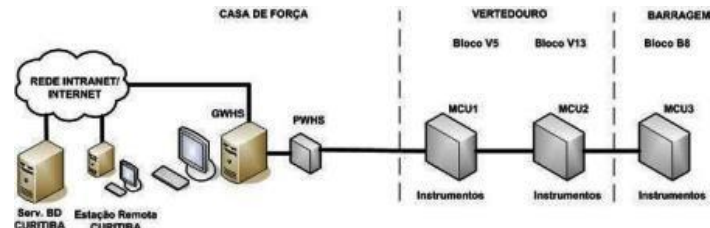


FIGURA 6 – Arquitetura original do sistema automatizado de instrumentação da barragem da UHE Salto Caxias.

Em 2008, com a deterioração do cabo metálico, a solução mais viável foi a transposição da estação de gerenciamento do sistema para dentro da barragem, conforme mostrado na Figura 7. Foi utilizado um cabo óptico para chegar com a rede de dados (corporativa) até o interior da barragem, resolvendo assim a dificuldade da longa distância através de cabo metálico. A incerteza desta solução se encontrava nas condições elétricas (alimentação) e ambientais disponíveis para equipamento dentro da barragem. Esta alternativa manteve-se relativamente estável, com parte da comunicação com os *dataloggers* ainda em par metálico. O inconveniente passou a ser a manutenção de um computador em uma área pouco favorável, que se tornou muito mais frequente, com alguns travamentos e eventual substituição do computador.

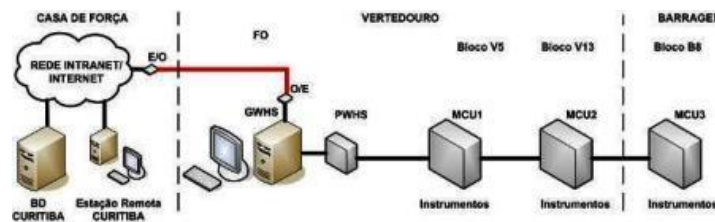


FIGURA 7 – Arquitetura modificada do sistema de monitoramento da barragem da UHE Salto Caxias.

Em 2014, após a inundação parcial da galeria inferior da barragem, parte dos equipamentos de automatização da leitura dos instrumentos (*dataloggers*, multiplexadores, entre outros) foi danificada. Dos três blocos de instrumentos coletados automaticamente no projeto original, dois deles passaram a ser coletados manualmente com dispositivos e instrumentos portáteis. A base de dados obtida ao longo dos anos permanece sendo alimentada com as medidas obtidas de forma manual *in loco*, e têm sido utilizada para estudos e avaliação da segurança de barragens (9).

Atualmente a engenharia da Copel GeT busca uma solução com o fornecimento de um novo sistema, que possua robustez para coletar as informações no interior da barragem, mas também permita fácil comunicação e integração com o *software* de análise e consistência, e integração com sistemas do tipo PIMS (*Plant Information Management System*).

3.2 - UHE Mauá

A UHE Mauá, mostrada na Figura 8, foi inaugurada em 2012 e possui 363 MW de potência instalada. Está situada no rio Tibagi, no município de Telêmaco Borba/PR, a 250 km de Curitiba. A barragem é do tipo gravidade, feita em CCR, com 745 metros de comprimento e 85 metros de altura máxima, permitindo a formação de um reservatório com 84 km² de superfície.



FIGURA 8 – Foto da barragem da UHE Mauá (UHE GJC).

Em meados de 2010, durante a fase de construção, foi concebido o sistema automatizado de instrumentação da barragem. De fabricante diferente do utilizado na UHE Salto Caxias, a configuração deste sistema é mostrada na Figura 9.

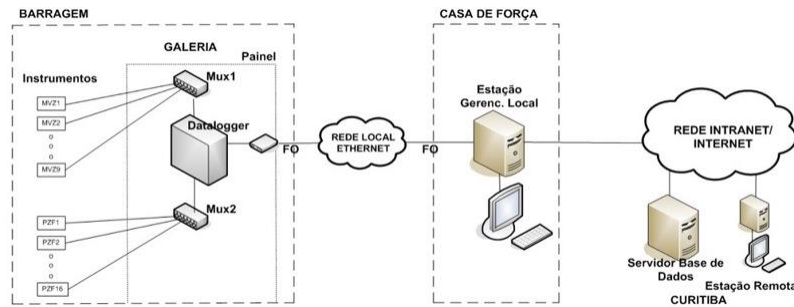


FIGURA 9 – Arquitetura projetada para o sistema automatizado de instrumentação da barragem da UHE Mauá.

Por ser uma barragem em CCR, seria natural que apresentasse muitas semelhanças ao último projeto deste tipo, UHE Salto Caxias. Apesar de ser um fornecedor diferente, as semelhanças trouxeram consigo dificuldades já enfrentadas pela Copel GeT. Os sistemas são tecnologicamente muito semelhantes, tendo em comum elementos de projetos das décadas de 80 e 90 – como a comunicação serial RS-232 entre o *datalogger* e a estação de gerenciamento que executa o SCADA. Embora com um número menor de sensores, as distâncias entre a barragem e a casa de força complementar da UHE Mauá são da mesma ordem de grandeza dos valores encontrados na UHE Salto Caxias, e a solução adotada consistiu em alocar a estação de gerenciamento dentro da barragem.

Após o fim do prazo de garantia, a equipe de engenharia da UHE Mauá desenvolveu outro meio de comunicação *datalogger*-estação baseado em rede *Ethernet*. Desta forma a estação de gerenciamento foi instalada na casa de força. Atualmente o sistema atende satisfatoriamente suas funções. As dificuldades encontradas estão detalhadas na sequência.

3.3 - UHE Guaricana

A UHE Guaricana, mostrada na Figura 10, foi inaugurada em 1957 e possui 36 MW de potência instalada. Localiza-se na margem esquerda do rio Arraial, no município de Guaratuba/PR, na Serra do Mar, a 84 km de Curitiba. A barragem é de concreto armado do tipo gravidade, com 95 metros de comprimento e 29,5 metros de altura máxima, permitindo a formação de um reservatório com 7 km² de superfície.



FIGURA 10 – Foto da UHE Guaricana (UHE GNA).

O sistema automatizado de instrumentação da barragem está em fase de implantação (em 2017), e consiste nos elementos representados na Figura 11.



FIGURA 11 – Arquitetura projetada para o sistema automatizado de instrumentação da barragem da UHE GNA.

Neste caso, o produto fornecido integra *datalogger* e Mux em um único módulo em um formato voltado a sistemas de pequeno porte (até 16 pontos), e possui baixo custo se comparado aos demais sistemas já empregados pela Copel GeT. A interface fornecida é padrão RS-485 entre o *datalogger* e a estação de gerenciamento local, tornando inviável substituir o cabo metálico por cabo óptico. A estação de gerenciamento ficará alocada em um cubículo junto à guarita existente na margem esquerda da barragem, com infraestrutura de comunicação com a rede corporativa através de meio óptico.

4.0 - CONCLUSÃO

Ainda que alguns sensores sejam insubstituíveis por estarem embutidos no concreto da barragem, para UHEs é desejável que a vida útil do sistema de instrumentação da barragem supere dez anos. Lembrando que a auscultação da barragem torna-se mais relevante para longos períodos de amostragem das informações dos instrumentos, a Copel GeT verificou que isto só pode ser realizado pela substituição sistemática de componentes passíveis de deterioração e falhas. Vale ressaltar que danos ocorridos isoladamente na automação, não implicam em riscos à segurança da barragem, mas implica em custos, uma vez que a obtenção de dados precisa ser feita de forma manual, diminuindo a confiabilidade dos dados, que ficam mais sujeitos a erros.

A experiência adquirida pela Copel GeT ao longo dos anos mostrou que a descrição bastante detalhada dos requisitos de projeto e especificações técnicas são fatores essenciais para a implantação de um sistema automatizado de instrumentação da barragem. A interligação entre o *datalogger* e a estação de gerenciamento local dever ser preferencialmente via padrão *Ethernet*, facilitando a interligação por meio óptico. É desejável que os *dataloggers* possuam padrão industrial, com protocolos de comunicação abertos, que permitam a substituição por outro disponível no mercado. O *software* SCADA da estação de gerenciamento local, quando diferente do padrão adotado pela empresa, deverá permitir fácil comunicação e integração com o *software* de análise e consistência remoto. Como exemplo, comunicação OPC (OLE for Process Control) para interconectividade entre plataformas e principalmente com sistema PIMS (*Plant Information Management System*) é interessante para futuros desenvolvimento, assim como fornecimentos integrem instrumentos ópticos e sensores em fibra óptica dedicada (redes de Bragg).

Por fim, mostra-se importante buscar sistemas automatizados de instrumentação de barragem que utilizem *hardware* genérico, visando encontrar equipamentos intercambiáveis com disponibilidade estabelecida no mercado nacional. Isto se aplica principalmente aos *dataloggers*, redes de comunicação, de e estações de gerenciamento e servidores de base de dados. Da mesma forma, os *softwares* de aquisição devem adaptar-se às mudanças de sistemas operacionais e *hardware* ao longo dos anos, empregando para isso o *hardware* de informática mais genérico possível. Estas medidas mínimas devem aumentar a vida útil do sistema, tornando o cliente independente do fornecedor do sistema.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) FONSECA, A. R., Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica – Estudo de caso das barragens da UHE São Simão, *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Ouro Preto, 2003, Brasil.
- (2) SILVEIRA, J. F. A., Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento, Ed. Oficina de Textos, 416 pg, 2006, Brasil.
- (3) SILVEIRA, J. F. A., Instrumentação e comportamento de fundações de barragens de concreto, Ed. Oficina de Textos, 320 pg, 2003, Brasil.
- (4) Automated Dam Monitoring Systems - Guideline and Case Histories, International Commission on Large Dams, 2000 – França.
- (5) SOARES, M. A., HENKLEIN, E. D., ORLOWSKI, E. A. G. , SANTI, M. R. A., FERREIRA, E. Automação dos instrumentos de barragem um sistema cada vez mais necessário, XVIII SNPTEE, 2005, Curitiba/PR, Brasil.
- (6) BOGADO, C. A. C., Sistema Automático de Monitoração de Barragem de Itaipu Binacional, XXI SNPTEE, 2011, Florianópolis/SC, Brasil.
- (7) VELOSO, L. A. C. M., *et al.*, Projeto de pesquisa e desenvolvimento tecnológico (P&D) para a automação da instrumentação das obras civis da UHE Tucuruí, XXVII SNGB, 2007, Belém/PA, Brasil.
- (8) ITAIPU Binacional, <https://www.itaipu.gov.br/>, acessado em 28/03/2017.
- (9) LACERDA, L. A., *et al.*, Análise termo-mecânica de barragens de concreto compactado com rolo, II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica,

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



David Carlos Marques Junior é natural de Curitiba/PR, nascido em 1974. Possui formação de técnico Industrial em Eletrônica pelo CEFET/PR (1997). Trabalha na COPEL GeT desde 2003, onde atuou na manutenção eletrônica da UHE Salto Caxias (2003-2009) e agora atua na área de Engenharia Eletromecânica da Geração (2009-atual). Possui experiência e atuação em diversos projetos e implantação de Sistemas de Supervisão e Controle, Sistemas de CFTV, Sistemas de Controle de Comportas de Vertedouro, Sistemas de Movimentação de Cargas, sistemas eletrônicos para instrumentação de barragem, entre outros equipamentos eletrônicos de UHEs. Possui participação e apresentação de diversos trabalhos nos últimos Encontros Técnicos da Copel GeT (ETGET).

Élio Daniel Henklein é natural de Jaraguá do Sul/SC, nascido em 1950. Possui graduação em Engenharia Elétrica modalidade Eletrônica e Telecomunicações (1976). Trabalhou na Companhia Paranaense de Energia (COPEL GeT) de 1978 a 2009, tendo feito parte da equipe de construção das usinas hidrelétricas GBM (Foz do Areia), GNB (Segredo), GJR (Caxias), Derivação do Rio Jordão, Dona Francisca, Foz do Chopim, Santa Clara, Fundão e Mauá na implantação de Sistemas de Supervisão, Controle, Proteção, Telecomunicação e Segurança (CFTV). Atuou nas etapas de concepção, projeto básico, especificação, análise de propostas, *workstatement*, comissionamento em fábrica e em campo destes projetos. Foi professor na SPEI-Sociedade Paranaense de Ensino e Informática e na UFPR-Universidade Federal do Paraná. Atualmente é sócio-proprietário da empresa Energia Serviços de Engenharia Ltda.

Isabela Cristina de Oliveira

Natural de Curitiba, nascida em 1987. Graduada em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Paraná (2009), Mestre na área de Materiais de Construção Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da UFPR (2013). Engenheira civil da Companhia Paranaense de Energia, atuando no setor de manutenção civil de usinas, especificamente no Setor de Engenharia de Segurança de Barragens (GET/SGE/DPEG/VECM/STSEBI).