

UHE Dona Francisca - Barragem 4.0

Eduardo SIMÕES

Mestre em Construção e Infraestrutura - UFRGS / BSE Engenharia Geotécnica e Ambiental

Murilo FONSECA

Mestre em Eng. Elétrica - Instituto SENAI de Inovação em Sistemas Embarcados

Ivan BOESING

Mestre em Eng. Mecânica - UPSENSOR

Camila SMIDERLE

Mestre em Eng. Civil - CEEE

RESUMO

Esse projeto descreve o desenvolvimento de um sistema inteligente de monitoramento da estrutura, reservatório e margens da barragem UHE Dona Francisca, permitindo uma resposta mais rápida aos fatores de risco geotécnicos, ambientais e hidráulicos, através da coleta, análise e tratamento dos dados. Os dados são obtidos de leituras remotas ou manuais aos diversos sensores instalados na barragem, bem como dados coletados por imageamento aéreo. O trabalho descreve avanços no desenvolvimento de novos sensores de medição eletrônica, avanços em um sistema de verificações e alertas baseados em inteligência artificial, no uso de algoritmos de previsão de nível e de vertimento da barragem com 24 horas de antecedência, na identificação automática de danos no vertedouro de concreto com o uso de processamento de imagens aéreas.

ABSTRACT

This project describes the development of an intelligent system for UHE Dona Francisca dam monitoring of its structure, reservoir and margins, allowing a faster response to geotechnical, environmental and hydraulic risk factors, through data collection and analysis. The data comes from the various manual and automated sensors installed in the dam as well as data collected through aerial imaging. This work describes advances in the development of new electronic measurement sensors, advances on a system of data checking and alerts using artificial intelligence tools, algorithms for a 24h reservoir water level forecasting and automatic damage identification on the concrete spillway using aerial images processing.

1. INTRODUÇÃO

Tecnologias na área de instrumentação, sensores e sistemas de monitoramento estão em constante evolução e sendo apresentadas em ritmo acelerado no mercado. O uso de conceitos como *Big Data*, *Artificial Intelligence (IA)*, *IoT (Internet of Things)* e computação na nuvem estão cada vez mais presentes no cotidiano dos engenheiros e empresas, compondo a chamada Indústria 4.0.

Em contraponto ao avanço tecnológico que rapidamente se transforma, evolui e aposenta soluções anteriores, existem estruturas que são projetadas e construídas para funcionarem por longos períodos de tempo, 75 a 100 anos [1], e, portanto, possuem longo histórico de dados e informações que não podem ser negligenciados e necessitam ser incorporadas às novas tecnologias disponíveis.

Nesse contexto, a manutenção dos dados da instrumentação é fundamental para assegurar a segurança dessas estruturas, em especial em barragens. Os novos sistemas devem ser construídos baseados no conceito da interoperabilidade, nas quais diferentes tecnologias devem ser integradas, devendo interagir entre si [2], sem perda da informação e garantindo o acesso e manutenção do histórico da estrutura.

Esse relato técnico apresenta os principais avanços tecnológicos obtidos no Projeto “Sistema de Monitoramento e Controle Inteligente para a Barragem da UHE Dona Francisca” [3], que abrangem a análise e integração de dados de instrumentação, automatização de sensores eletrônicos existentes, desenvolvimento de novos sensores, visualização de dados em tempo real, monitoramento de danos ao vertedouro por imageamento aéreo automático e uso de inteligência artificial para previsão de vertimento e nível da barragem. Este projeto foi desenvolvido pelo SENAI-SC, UFRGS, UPSENSOR, CEEE e DFESA. Contou com o apoio financeiro da ANEEL, EMBRAPPI e SENAI.

2. BARRAGEM UHE DONA FRANCISCA

A UHE Dona Francisca é uma das usinas hidrelétricas situadas no Rio Jacuí, localizada entre as cidades de Agudo do Sul e Nova Palma, no centro do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. O barramento foi construído em CCR, com corpo da barragem e vertedouro de soleira livre divididos em 36 blocos com comprimento médio de 20 m, e um comprimento total de aproximadamente 660 m. A altura máxima é de 63 m. A construção da barragem iniciou em 1998 e o enchimento do reservatório ocorreu em novembro de 2000, com a inauguração da usina em maio de 2001. A Figura 1 mostra a disposição da barragem.

O grande desafio geotécnico e a razão do bom projeto de instrumentação instalado na barragem foram as condicionantes geológicas e geotécnicas da fundação, em especial a presença de rochas brandas com descontinuidades (arenitos e siltitos da Formação Caturrita) sob o corpo do barramento. As demais estruturas, como a casa de máquinas, tomada d'água e ombreiras estão em contato com rochas basálticas da Formação Serra Geral. Algumas camadas com características de solo (arenitos e

siltitos brandos) no interior do maciço rochoso foram encontradas nas campanhas de investigação geotécnica, com espessuras variando entre milímetros e dezenas de centímetros [4].

Essas condicionantes desfavoráveis tanto sob o ponto de vista de deformação como de fluxo levaram à instalação de diversos instrumentos de controle da estrutura: piezômetros de tubo aberto e corda vibrante, medidores de vazão, pêndulo direto, extensômetros de hastes múltiplas e medidores triortogonais.



FIGURA 1 – Barragem UHE Dona Francisca.

3. GESTÃO DE DADOS – GERAÇÃO, AUDITORIA E ANÁLISE

O monitoramento da estrutura ao longo dos anos gera uma base de dados que subsidia as análises de comportamento, possibilitando a criação de correlações e previsões de comportamento baseados em cenários de carregamento. Contudo, a qualidade dessas análises está diretamente relacionada à qualidade dos dados, e esta relação torna-se ainda mais dependente quando se utilizam novas ferramentas de análises baseadas em Inteligência Artificial.

Por essa razão foi realizada uma abordagem sistemática na avaliação do banco de dados da UHE Dona Francisca, com intuito de qualificar o dado de entrada no sistema automático de análise, eliminando erros e dados espúrios. A metodologia utilizada é separada em três fases conforme apresentado na Figura 2.

A primeira consiste em mapear os processos envolvidos na rotina de monitoramento, isto é, conhecer as características e especificações dos instrumentos e sensores (range, acurácia, precisão, etc.), histórico da instalação e manutenção, calibração e, principalmente, o fluxo da informação. Muitos erros de medidas podem ser identificados a partir do entendimento de toda a cadeia geradora do dado, incluindo aspectos técnicos, como o procedimento de leitura, mas também fatores não técnicos relacionados à gestão e treinamento de equipe.

A segunda fase está relacionada à auditoria dos dados secundários para verificação e correção de possíveis erros. Essa análise é realizada a partir dos dados já convertidos mas não consolidados, ou seja, dados em unidades de engenharia. Ex: deslocamento (mm), poropressão (kPa), vazão (m³/h).

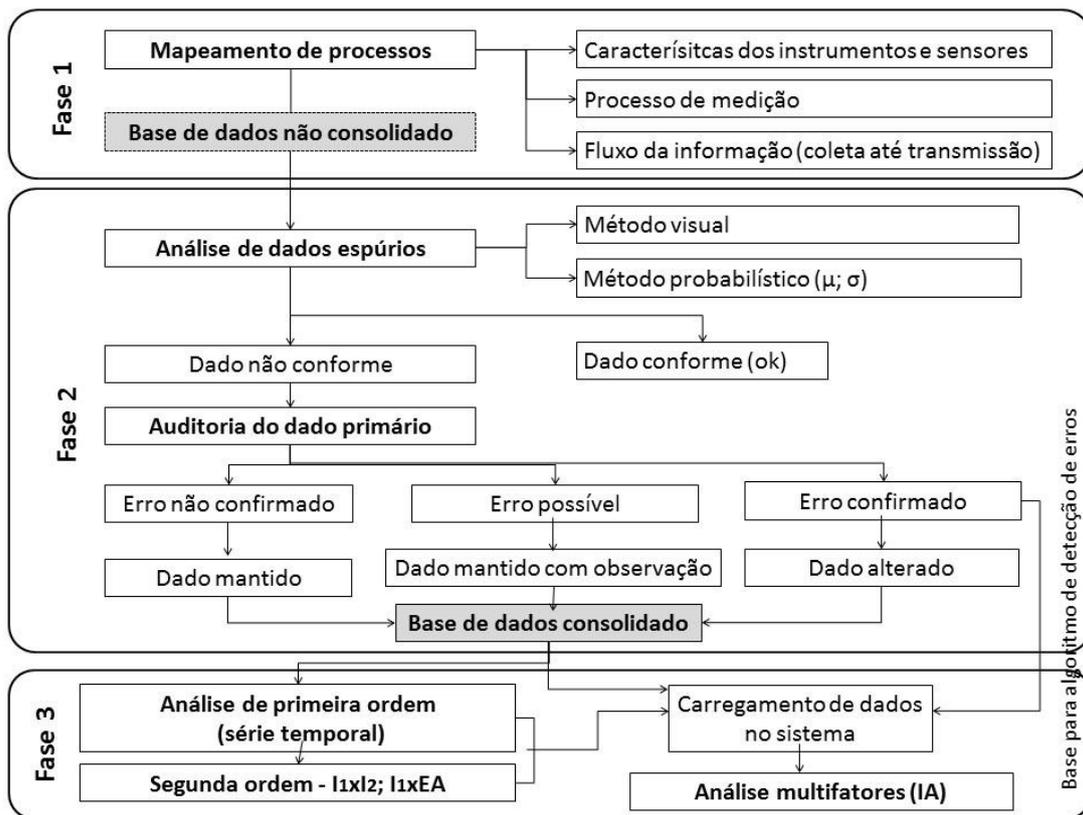


FIGURA 2 – Metodologia de análise do banco de dados

Na identificação dos dados “suspeitos” foram utilizadas duas abordagens: (i) análise visual de tendência - plotando a série histórica e observando-se a faixa de oscilação considerada normal do sensor, ou (ii) análise probabilística. A primeira, embora simples, é útil para séries de dados bem definidas, com baixa dispersão e onde erros se tornam evidentes, como valores fora do range do sensor. A segunda permite definir um ponto de corte em que todos os dados fora de uma probabilidade de 95% de ocorrência devem ser verificados.

A partir da definição dos dados suspeitos, foi realizada a auditoria do dado, verificando se houve algum erro entre o momento da leitura e a inserção no banco de dados (erro de digitação ou interpretação errada do dado escrito). Na confirmação da inconformidade o dado era alterado no banco de dados; caso contrário, mantido. Contudo, foram encontradas situações específicas em que o dado estava possivelmente errado, mas não havia evidências claras. Em muitos casos esses erros foram caracterizados tipicamente como erros de leitura do instrumento, troca de aparelhos de medição, ou anotação da leitura em lugar errado. Esses dados são de difícil auditoria, mas ainda passíveis de correções ou suspeição. Todas as correções foram devidamente registradas e notificadas. O resultado desse processo manual de verificação e correção de dados resultou em um banco de dados revisado e consolidado.

A auditoria permitiu a identificação dos principais erros e subsidiou a elaboração de algoritmos de identificação de erros, pois mesmo com o processo de automatização da instrumentação haverá ainda instrumentos com leituras manuais, de tal forma que

esse sistema de identificação permitirá a manutenção de um banco de dados qualificado.

A partir do banco de dados consolidado foi possível realizar análises mais confiáveis do comportamento das estruturas e estudos de correlações. Inicialmente, foram feitas análises de simples tendência com séries temporais, correlações cruzadas simples (resposta do instrumento a carregamentos já conhecidos - enchimento e esvaziamento do reservatório, diferenças sazonais de temperatura, etc.) até análise multifatores caracterizada pela interação de 'n' variáveis, nas quais se faz o uso de ferramentas computacionais de inteligência artificial.

4. AUTOMATIZAÇÃO DE INSTRUMENTOS – DO SENSOR AO DASHBOARD

Foram desenvolvidos equipamentos que permitem a telemetria dos dados, ou seja, que fazem a leitura automática dos sensores eletrônicos existentes (piezômetros e extensômetros de corda vibrante) com envio de leituras em frequência de 10 minutos, transferidas ao servidor para análise e armazenamento.

Em cada conector do painel MUX, que concentra as terminações elétricas dos sensores, foi conectado um multiplexador que está conectado num conversor de sinal de corda vibrante para sinal elétrico (de 4 a 20mA). A saída do conversor foi ligada a um controlador industrial (CLP) que executa o software de coleta de dados. O CLP está conectado em um switch, que permite a comunicação dos dados até um servidor através de comunicação Modbus TCP/IP usando fibra óptica como meio físico. A Figura 3 apresenta a arquitetura da solução simplificada e a Figura 4 a instalação de parte dos equipamentos na barragem.

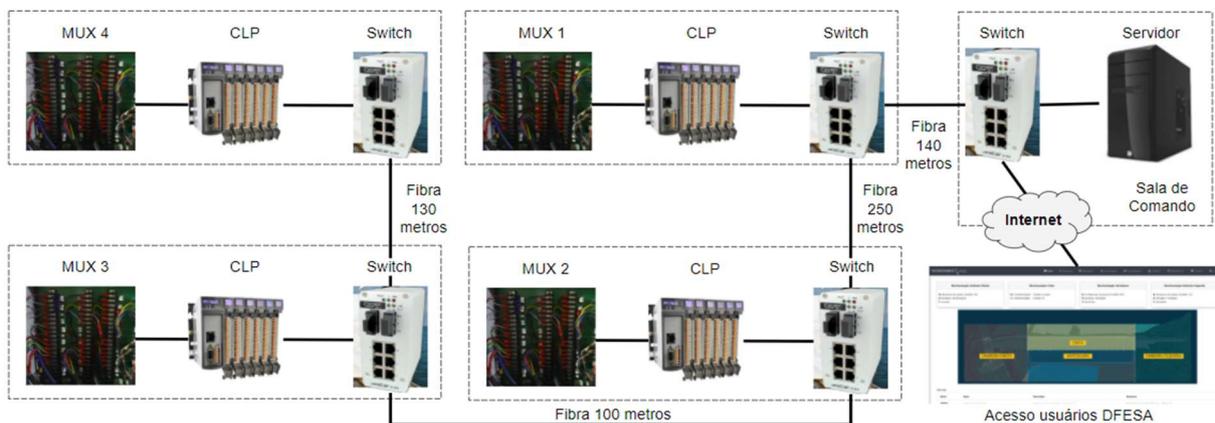


FIGURA 3 – Arquitetura da solução



FIGURA 4 – Equipamentos de coleta de dados e comunicação instalados

Outros instrumentos manuais foram automatizados com a implantação de novas tecnologias. Para os medidores triortogonais foi desenvolvido um sensor de efeito Hall que tem um acionamento semelhante ao de um relógio comparador, com intervalo de medição de 0 até 10mm e resolução de 0.01 mm (3 sensores para cada triortogonal, Figura 5).



FIGURA 5 – Automação de medidor triortogonal

Os drenos foram automatizados através de um sensor capacitivo que mede o nível de água vertente nos tubos de PVC, sendo possível correlacionar esta medida com a vazão em litros/minuto. O sensor é acoplado diretamente na saída dos drenos. Os sensores foram instalados em drenos que apresentaram historicamente vazões relevantes. Para os piezômetros de tubo aberto de pequeno diâmetro foram desenvolvidos sensores que medem a pressão em metros de coluna de água, com intervalo de medição de 0 a 1,0 m e resolução de 1 mm (Figura 6).



FIGURA 6 – Automação de drenos (esquerda) e piezômetros de tubo aberto (direita)

Todos os dados são disponibilizados em uma plataforma Web em tempo real. Nas telas de visualização estão incorporadas figuras das plantas e seções transversais da barragem com a localização dos instrumentos. A Figura 7 mostra um diagrama das principais funcionalidades. Os dados são inseridos no sistema de forma automática, seja diretamente através da leitura dos sensores instrumentados, ou por incorporação automática de planilhas preenchidas manualmente para os demais sensores.

Algoritmos de Inteligência Artificial (IA) processam essas informações, sejam individuais ou considerando dados de grupos de sensores, detectando erros de digitação, variações bruscas nos valores de medição ou valores que estão fora dos limites da instrumentação, acionando alertas no sistema. Algoritmos identificam a

direção dos movimentos da barragem e suas oscilações normais, além da previsão de nível de água do reservatório e vertimento da barragem com 24 horas de antecedência.

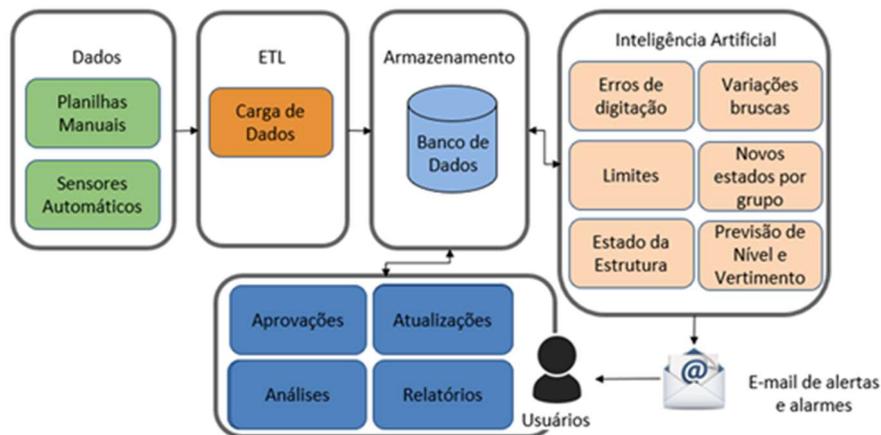


FIGURA 7 – Diagrama de funções do Sistema Web

Todos os dados são acessados pelos usuários através de Dashboards que permitem a visualização de séries temporais, análises, alertas e emissões de relatórios. Adicionalmente, os usuários podem fazer diversas configurações: cadastramento de e-mails para recebimento de alertas, alteração de constantes de calibração dos instrumentos em caso de troca do equipamento, alteração dos limites de alerta. A Figura 8 apresenta exemplos de telas do sistema (painel central, controle de alertas, agrupamento de sensores por grupos, séries temporais, plantas e cortes com a localização dos instrumentos).

Outro ponto importante a se destacar foi o desenvolvimento de um algoritmo que permite a previsão do nível de vertimento da barragem com até 24 horas de antecedência e a previsão do nível do rio a até 140 km à jusante da barragem. O modelo desenvolvido consegue prever o nível do reservatório e o vertimento com erros considerados pequenos (erro quadrático médio abaixo de 15 cm do nível do reservatório para 75% das previsões; erro quadrático médio abaixo de 14,6 m³/s de vazão para 75% das previsões). Cabe ressaltar que o modelo não utiliza dados meteorológicos, apenas dados disponíveis na barragem, como vazões afluentes (vazão que chega na barragem), vertimento (vazão liberada através do Vertedouro), vazão de turbina (para geração elétrica), nível (nível de água da barragem).

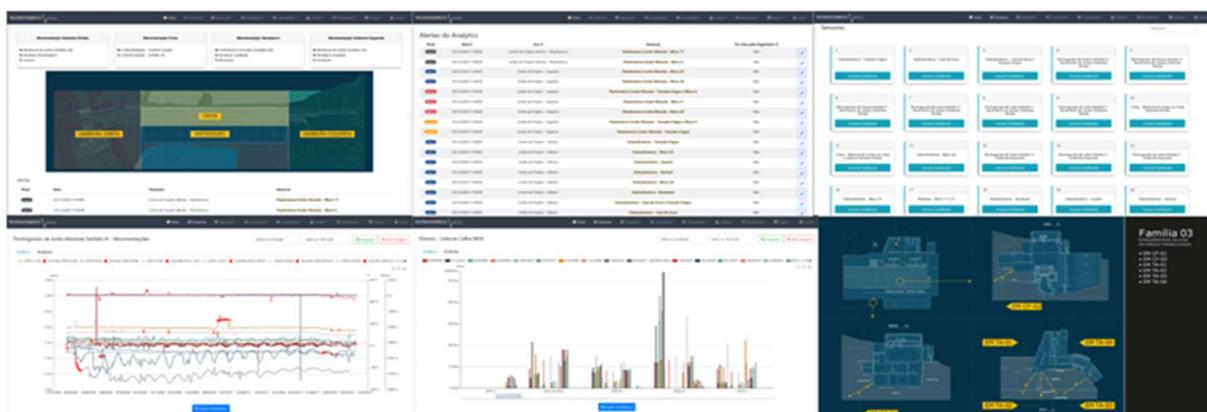


FIGURA 8 – Telas do Sistema Web

5. MONITORAMENTO AÉREO DO VERTEDOURO E MARGENS

O monitoramento aéreo do vertedouro de concreto em degraus perfil Creager surgiu pela necessidade de melhorar o método de inspeção, minimizando o risco de acidentes de trabalhadores durante as inspeções manuais com o uso de cordas. Esse sistema é composto por um drone comercial que realiza voos autônomos e um software que organiza as imagens e constrói um mapa 3D com detecção automática de danos no vertedouro. A Figura 9 apresenta as 6 rotas automáticas programadas e em operação.

O software de processamento organiza e monta mapas 3D, a partir das fotos obtidas pelo drone, analisa as imagens e disponibiliza marcadores para sinalizar possíveis danos e patologias que devem ser verificadas pelo Engenheiro responsável. A Figura 10 apresenta um exemplo de uma região em que o algoritmo identificou danos na estrutura. O software ainda organiza as imagens por região e data, permitindo a comparação da evolução das patologias de forma fácil no mapa 3D.



FIGURA 9 – Rotas de monitoramento aéreo automático.

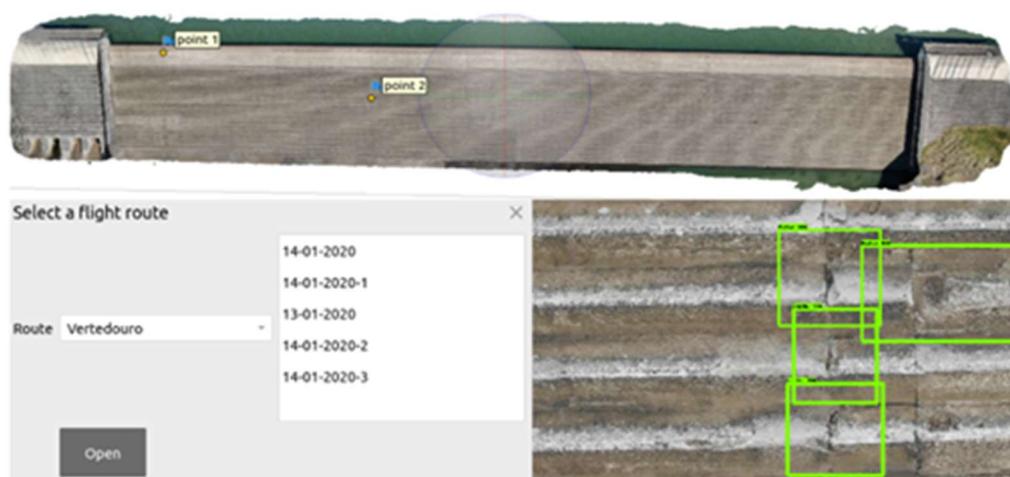


FIGURA 10 – Mapa 3D e sinalização de danos no Vertedouro.

7. CONCLUSÕES

O atual cenário regulatório gerado como resposta aos últimos desastres ocorridos nas cidades de Mariana e Brumadinho demonstram a necessidade de soluções para monitoramento da segurança de barragens on-line, com uso de instrumentos

automatizados, algoritmos de inteligência artificial e sistemas que coletam, processam e disponibilizam informações relevantes em tempo hábil para que riscos sejam percebidos com antecedência e que ações possam ser realizadas de forma antecipada.

O projeto contribuiu nesse sentido ao gerar uma solução completa de monitoramento, que está instalada e operando na barragem da UHE Dona Francisca. O projeto trouxe diversas inovações, através da criação de procedimentos de análise de dados, criação de sensores, algoritmos e sistemas computacionais. O sistema poderá ser utilizado no monitoramento de outras barragens, adequando-se às situações específicas de projeto ou tipos construtivos, tanto no setor elétrico como no setor de mineração, suprimindo uma lacuna importante.

A inserção do setor barrageiro na indústria 4.0 já é uma realidade, e deve ser baseada no conceito de interoperabilidade, integrando e conectando diversas tecnologias em um único ambiente de controle, sem perda da informação e garantindo o acesso e manutenção do histórico da estrutura.

8. PALAVRAS-CHAVE

Monitoramento da segurança de barragem, monitoramento aéreo de barragem com drone, monitoramento de barragem por inteligência artificial, sensores eletrônicos aplicados à segurança de barragens, previsão de nível e vertimento de barragem.

9. AGRADECIMENTOS

O projeto teve o apoio financeiro da ANEEL, do sistema SENAI/EMBRAPII e a participação de diversos pesquisadores e técnicos das diversas instituições envolvidas, a quem agradecemos.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] GALLAHER, M. P.; O’CONNOR, A.; DETTBARN, J.; GILDAY, L. (2014) – “Analysis of Inadequate Interoperability in the U.S.”, Capital Facilities Industry. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.

[2] BRESSANI, L. A.; SIMÕES, E. B.; OGURA, A. T.; BOESING, I. J.; HANAUER, D. S.; BALBINOT, G. (2018) – “A Monitoring System for Landslides and Geotechnical Works Using Statistical and Artificial Intelligence Models”, 10th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Rio de Janeiro, Brasil.

[3] BRESSANI, L. A.; FONSECA, M.L.; BOESING, I (2020) - Sistema de Monitoramento e Controle Inteligente para a Barragem da UHE Dona Francisca - SMCI UDF. Relatório final do projeto de P&D da ANEEL com código PED-00667-0003/2018. Dezembro de 2020, diversos capítulos. Não publicado.

[4] SOBRINHO, J. A.; ALBERTONI, C. A., TAJIMA, R., MORAES, R. B.(1999) “Investigação dos materiais de fundação da UHE Dona Francisca.” XXIII Seminário Nacional de Grandes Barragens. Belo Horizonte. Anais... CBDB, Rio de Janeiro. Vol. 1. p.229-236.

--	--