

INFLUÊNCIA DO LAGO DA UHE TUCURUÍ SOBRE A BARRAGEM DE CONCRETO: UM ESTUDO SOBRE OS MTJ'S

TUCURUÍ POWER PLANT LAKE INFLUENCE ON CONCRETE DAM: A STUDY ABOUT THE TRI-ORTHOGONAL MEASURE JOINT (TMJ)

Markle Fernandes Vieira¹, Dilson Junior de Sousa Lopes², Aarão F. Lima Neto³, Rafael Suzuki Bayma⁴

¹ Pós-Graduado em Engenharia de Estruturas e Materiais, Engenheiro Eletricista - Eletrobrás Eletronorte em parceria com UFPA. E-mail: marklefv@gmail.com

²Graduando em Engenharia Elétrica, UFPA-CAMTUC. E-mail: dilsoneng2014@gmail.com

^{3,4}Professor Doutor do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia - Tucuruí. BR 422 KM 13 S/N, Canteiro de Obras, NDAE, Tucuruí, Pará. E-mails: aaron@ufpa.br, rafaelbayma@ufpa.br

RESUMO

A instrumentação de barragens é um item importante para assegurar um monitoramento constante das estruturas, trazendo mais segurança e confiabilidade quanto a estabilidade de suas estruturas e atendimento a legislação vigente no Brasil. Na UHE Tucuruí, um instrumento muito útil nessa constante verificação é o Medidor Triortogonal de Junta (MTJ), o seu funcionamento será detalhado neste artigo e será introduzida uma nova abordagem para as análises dos dados, utilizando um algoritmo desenvolvido através de técnicas de identificação de sistemas, que gera modelos de regressão polinomiais e identifica o grau de influência de agentes externos, blocos vizinhos e nível a montante, no instrumento escolhido.

Palavras chave: Instrumentação, UHE Tucuruí, MTJ, Modelos, Montante.

ABSTRACT

The instrumentation of dams is an important item to ensure constant monitoring of structures, bringing more safety and reliability as the stability of their structures and compliance with current legislation in Brazil. At UHE Tucuruí a very useful instrument in this constant checking is the tri-orthogonal measure joint (TMJ), its operation will be detailed in this article and a new approach to the data analysis will be introduced, using an algorithm developed by system identification techniques, which generates polynomials regression models and identifies the degree of influence of external agents, neighboring blocks and the level of the dam upstream, in the chosen instrument.

Keywords: Instrumentation, UHE Tucuruí, TMJ, Models, Upstream.

1. INTRODUÇÃO

A Usina Hidrelétrica (UHE) de Tucuruí, situada no ponto de coordenadas: Longitude 49°41'W e Latitude 3°45'S, no Km 250 do rio Tocantins, na bacia do rio Amazonas, no município de Tucuruí, estado do Pará, cerca de 400 km ao sul de Belém, é um marco na engenharia mundial de grandes barragens, e por sua magnitude é umas das maiores obras de engenharia na Amazônia. Com uma potência instalada de 8.370 MW, atualmente a UHE de Tucuruí é a maior hidrelétrica 100% brasileira. Na primeira etapa (casa de força I e vertedouros), foram utilizados aproximadamente 6.247.237 metros cúbicos de concreto especial e foram instaladas 12 Unidades Geradoras de 350 MW cada e 2 Geradores

Auxiliares de 22,5 MW, fornecendo uma potência total combinada de 4.245 MW. Já na segunda etapa (casa de força II), foram utilizados aproximadamente 1.558.800 metros cúbicos de concreto especial e instaladas 11 Unidades Geradoras de 375 MW cada, produzindo uma potência total combinada de 4.125 MW, totalizando 8.370 MW. A energia produzida em Tucuruí hoje representa 10% da energia gerada em todo Brasil. As duas casas de força e o vertedouro são mostrados na Figura 1.



Figura 1 – UHE Tucuruí
Fonte: ocantodobemtevi.blogspot.com.br

Por sua importância, a usina necessita que sua saúde estrutural seja constantemente monitorada, a fim de garantir um funcionamento seguro e eficaz. A instrumentação atualmente instalada atende às novas exigências legais, em decorrência da Regulamentação da Lei em Segurança de Barragens (**Lei nº. 12.334 de Setembro de 2010**) e possibilita a identificação precoce de comportamentos anômalos, auxiliando a tomada de decisão sobre manutenção. Para monitorar a UHE, foram instalados durante sua construção, vários dispositivos para auscultação da estrutura, tais como:

- Drenos de Fundação, Contato, Paramento e Junta;
- Extensômetro de Haste;
- Medidor Triortogonal de Junta;
- Medidor Elétrico de Junta
- Medidor de vazão;
- Pêndulo Direto;
- Piezômetro de Contato;
- Piezômetro Pneumático;
- Piezômetro de Tubo;
- Roseta de Deformação;
- Termômetro Elétrico de Massa.

O foco deste trabalho é sobre o Medidor Triortogonal de Junta (MTJ), que é um instrumento utilizado para medir o deslocamento em três direções da junção entre blocos de concreto. Os MTJ's são importantes instrumentos de auscultação, pois a análise de suas medições pode ajudar a perceber de forma preditiva anormalidades na estrutura da barragem e evitar, na pior das hipóteses, rompimento sem aviso prévio. Alguns trabalhos no Brasil que mencionam os Medidores de Junta, apresentam sua utilização em novas hidrelétricas (Pimentel, 2012), ou cruzam dados de vários instrumentos para Determinação de Modos de Falha (Silva, 2015), ou desenvolvem uma nova sugestão para realizar as leituras (Moraes, 2003), ou ainda fazem a validação dos deslocamentos através da topologia (Graça, 2016). No entanto é o primeiro a tentar relacionar os deslocamentos com o nível de montante.

A barragem de concreto da UHE Tucuruí foi construída em blocos, sendo o vertedouro constituído por 23 unidades, a casa de força 1 por 20 e a casa de força 2 por 11. Entre cada junta de transição, de todos os blocos, foi instalado um MTJ. O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia para analisar a informação proveniente dos MTJ's e que permita extrair informações úteis ao monitoramento da estrutura. A metodologia é baseada na construção de um conjunto de equações que relacionam medidas de diferentes MTJ's ao nível da montante do lago, eventualmente permitindo simulações do comportamento da barragem para cenários diversos da montante.

O trabalho está dividido da seguinte forma: um esclarecimento sobre o que são e como operam os MTJ's, a metodologia aplicada no desenvolvimento das ideias apresentadas e ferramentas usadas e a apresentação dos resultados.

2. OS MTJ'S

Na casa de força 1 e vertedouros, os MTJ's são compostos por duas partes: para um observador posicionado a frente do instrumento, uma haste em “L” é chumbada no bloco a esquerda e uma base no a direita como mostrado na Figura 2.1. Na casa de força 2, o aparelho é composto de uma haste em “L” chumbada no bloco a esquerda e uma haste em “T” no bloco a direita, Figura 2.

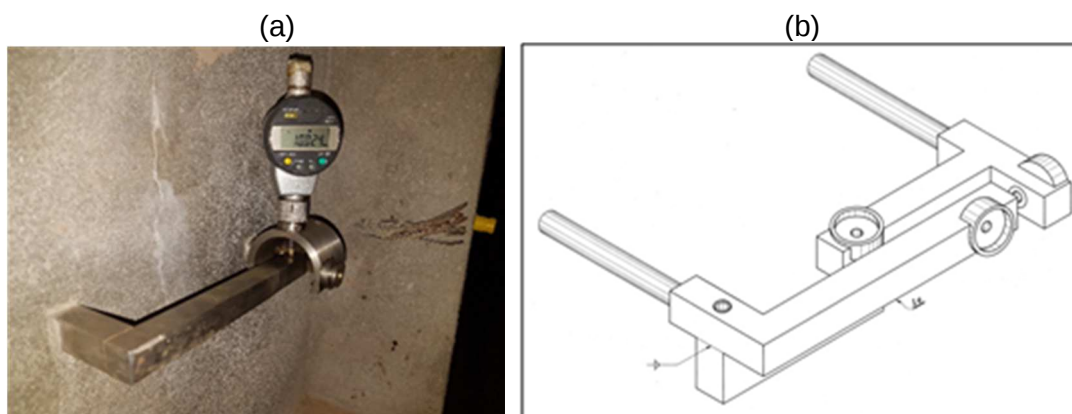


Figura 2 – (a) MTJ da 1ª Etapa e (b) MTJ da 2ª Etapa
Fonte: Arquivo técnico Eletrobrás Eletronorte (b)

Como apresentado nas figuras acima, Figura 2 – a e b, existem orifícios no instrumento, por onde passa a haste do aparelho, nas 3 direções X, Y e Z, por isso o nome Triortogonal, podendo assim o aparelho registrar as medidas para cada direção, o que permite fazer leituras de deslocamento relativo entre os blocos, transversal ao fluxo (X), na direção do fluxo da água (Y) e vertical (Z). Esses deslocamentos são da ordem de poucos micrometros e sua evolução no tempo é bastante lenta, sendo possível não observar nenhuma variação expressiva ao longo de semanas, como apresenta a Tabela 1.

Tabela 1 – Leituras de campo

DATA	BG04.TA13	BG03/BG04	BG02/BG03	BG01/BG02
02/08/1982	8,500	8,366	8,960	8,590
09/08/1982	8,490	8,339	8,920	8,590
16/08/1982	8,460	8,340	8,890	8,610
22/08/1982	8,495	8,368	8,899	8,636
23/08/1982	8,500	8,370	8,900	8,640
29/08/1982	8,502	8,353	8,893	8,658
30/08/1982	8,500	8,350	8,890	8,660
06/09/1982	8,500	8,350	8,880	8,670
15/09/1982	8,510	8,370	8,890	8,690
21/09/1982	8,490	8,362	8,850	8,680
28/09/1982	8,470	8,338	8,830	8,670

Os analistas da Eletrobrás Eletronorte convencionaram que quando os valores das leituras que variam no sentido avanço/recuo (direção do fluxo), serão positivos quando recuar (direção da jusante), para os valores no sentido abertura/fechamento (transversal ao fluxo), serão positivos quando houver a abertura e para os valores no sentido vertical (cima/baixo), serão positivos quando houver o recalque.

O funcionamento do arranjo pôde ser percebido com mais clareza no período entre 27/12/2002 e 23/12/2002, durante o enchimento do canal da enseadeira da 2ª etapa os blocos da Barragem de Gravidade (BG), que são os blocos de ligação mais próximos com os blocos da 2ª etapa, são instrumentados e a interseção (junta de transição) entre os blocos BG04 com CF13 e BG3 com BG04 ambos na cota 5,40, apresentaram expressivas variações, evidenciando o trabalho entre as estruturas e o funcionamento dos MTJ's. A figura 3, mostra um corte da visão superior dos blocos e as figuras 4 e 5 os deslocamentos apresentados.

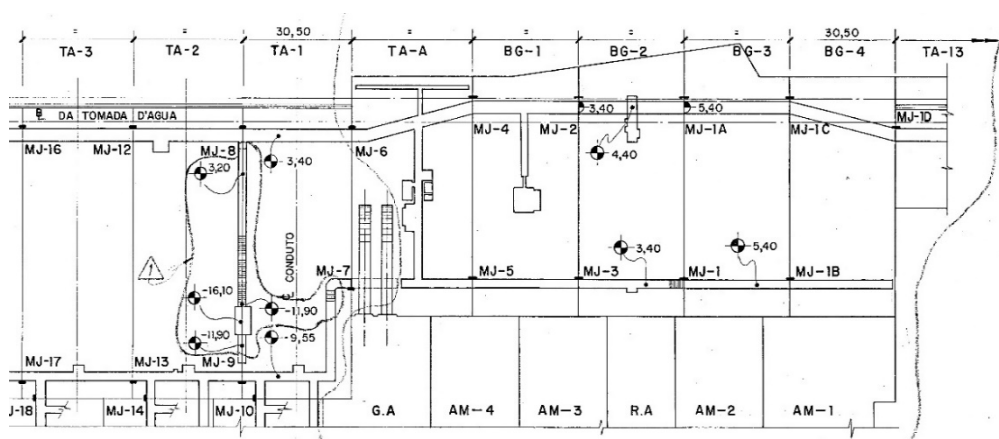


Figura 3 – Corte dos blocos do BG

Fonte: Arquivo técnico Eletrobrás Eletronorte

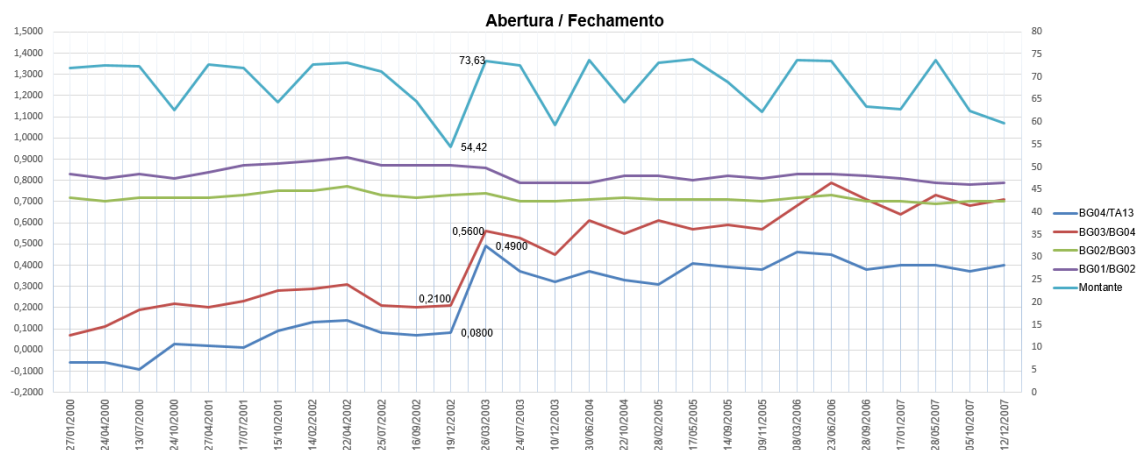


Figura 4 – Deslocamentos no sentido transversal ao fluxo.

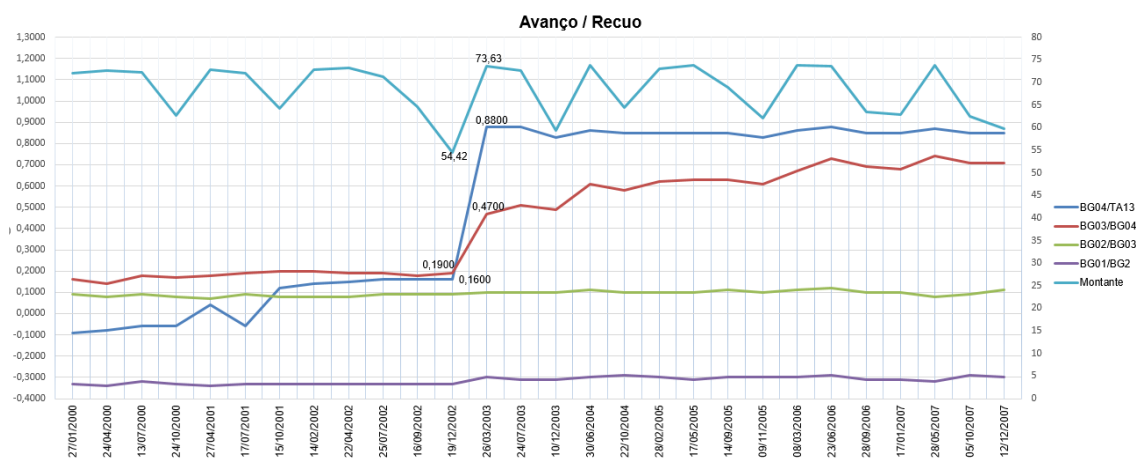


Figura 5 – Deslocamentos no sentido direção do fluxo.

É importante observar que em qualquer direção, os deslocamentos medidos pelos MTJ's são relativos, isto é, medem o espaçamento ocorrido entre os dois blocos onde o aparelho está instalado, de modo que medidas absolutas de deslocamento da estrutura não são possíveis com a atual instrumentação.

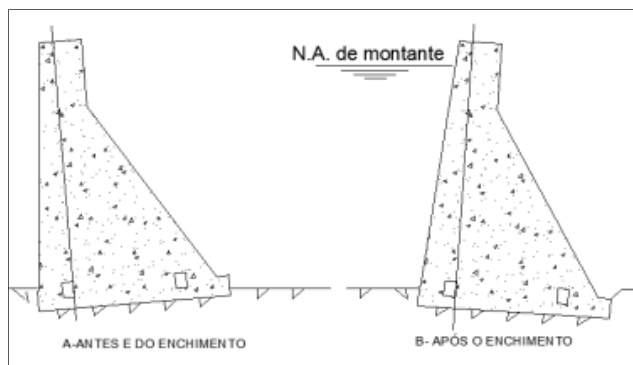


Figura 6 – Rotações sofridas pelos blocos.

Fonte: CALDAS, Silvio (2013).

A figura 6 ilustra de maneira simplificada o deslocamento que a estrutura sofre em consequência da carga que o lago exerce sobre a mesma. O Gestin, programa de banco de dados utilizado pela Eletrobrás Eletronorte, é responsável por manter as informações coletadas de todos os instrumentos instalados ao longo de todo o empreendimento, nele estão cadastrados 130 MTJ's, onde o MTJ com mais amostras tem 497, o primeiro instalado e o único com esse número de amostras, em média o número de amostras está na faixa de 310 amostras. As primeiras leituras datam 28/08/81, e são realizadas até o presente momento.

As inspeções começaram a ser realizadas a partir de 1985 no seguinte padrão: mensais e trimestrais. Onde nas inspeções mensais são realizadas leituras de 09 MTJ's e na trimestral as leituras são realizadas em sua totalidade, 130.

3. METODOLOGIA

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver um modelo matemático baseado nas séries históricas dos MTJ's que permita simular e avaliar a saúde da estrutura da barragem diante de um determinado cenário de nível da montante. O nível do reservatório é escolhido como principal variável de efeito porque está diretamente associado à pressão exercida pela água armazenada pela barragem.

A modelagem experimental foi escolhida devido à grande complexidade estrutural do sistema de blocos, o que tornaria uma metodologia fenomenológica muito trabalhosa. Além disso, o modelo empregado foi do tipo estático, isto é, sem evolução temporal explícita dos sinais provenientes dos MTJ's. Isso se deve à evolução lenta dos deslocamentos relativos e principalmente devido ao número reduzido de amostras disponíveis para o desenvolvimento do modelo.

Neste cenário, a ideia básica do trabalho foi propor e ajustar um conjunto de equações algébricas da forma:

$$\begin{aligned}x_1 &= f_1(x_2, \dots, x_n, u) \\x_2 &= f_2(x_1, \dots, x_n, u) \\&\vdots \\x_n &= f_n(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, u)\end{aligned}\tag{1}$$

Onde $x_1, x_2, \dots, x_n$ representam leituras dos MTJs, u denota o nível da montante em metros e as funções $f_1, f_2, \dots, f_n$ são polinômios multivariáveis cujos coeficientes precisam ser ajustados, por exemplo:

$$f_1(x_2, \dots, x_n, u) = c_1 u + c_2 x_2 + c_3 x_2^2 + \dots + c_i x_2 u + c_{i+1} u^3\tag{2}$$

Observar que para a i -ésima função, a única variável que não deve constar entre os termos do polinômio é precisamente x_i .

Um modelo desta forma pode, em princípio, ser usado de duas maneiras: para prever um deslocamento específico, dados os deslocamentos de blocos nas suas proximidades e o nível da montante; ou prever o comportamento da estrutura inteira, dado o nível da montante. No primeiro caso, a i -ésima equação é utilizada diretamente, considerando que todos os outros deslocamentos x_n , $n \neq i$, são conhecidos. No segundo caso, o valor da montante é substituído simultaneamente em todas as expressões, gerando um sistema de equações algébricas, que deve ser resolvido para $x_1, \dots, x_n$ utilizando algoritmos especiais, tais como o método de Newton-Raphson.

O ajuste das equações através de dados experimentais é objeto de estudo da área de regressão linear e identificação de sistemas e é demonstrado na seção 3.2. Porém, antes de o modelo ter sido efetivamente identificado, os dados disponíveis necessitaram de pré-tratamento devido a lacunas

existentes na informação ocasionada por mudanças no período de amostragem dos aparelhos. As medidas faltantes foram complementadas utilizando interpolação por spline cúbica, que é brevemente descrita a seguir.

3.1. Interpolação Cúbica

Mencionado anteriormente os dados são adquiridos através de leituras em campo e são inseridos em um programa da Eletrobrás Eletronorte (Gestin) onde são armazenados. As inspeções programadas realizadas são a fonte de toda a informação, elas são iniciadas automaticamente pelo Sistema de Manutenção Programada da empresa e desde 1985 são divididas em mensal, bimestral e trimestral, onde em cada inspeção programada apenas em alguns MTJ's são selecionados para a leitura, portanto alguns outros ficam de fora, a única que é completa (feita a leitura de todos os MTJ's) é a trimestral. Por esse motivo não há o mesmo número amostra entre todos os medidores existentes.

A interpolação de dados utilizada foi do tipo *spline* cúbica. Trata-se de uma técnica de aproximação que consiste em se dividir o intervalo de interesse em vários subintervalos e aproximar o valor da função em cada um deles por polinômios de grau três. O polinômio pode então ser utilizado para estimar o valor da mesma função em outros pontos dentro do intervalo para o qual a curva foi ajustada. A vantagem desse tipo de abordagem é que a interpolação é local, o que garante ampla flexibilidade caso os dados tenham irregularidades difíceis de modelar por uma única função ao longo de todo o intervalo global de interesse.

Abaixo na Tabela 2, é apresentado um exemplo de como os dados ficaram após passar pelo processo de interpolação cúbica.

Tabela 2 – Amostra da interpolação cúbica

Data	TA03/TA04	TA03/TA04
25/06/1985	7.98	7,980
05/07/1985	7.97	7,970
12/07/1985	#N/D	7,965
25/07/1985	#N/D	7,965
05/08/1985	7.97	7,970
21/08/1985	#N/D	7,979
03/09/1985	#N/D	7,981
05/09/1985	7.98	7,980
16/09/1985	#N/D	7,971
02/10/1985	7.96	7,960
22/10/1985	#N/D	7,971
05/11/1985	7.98	7,980
19/11/1985	#N/D	7,978
03/12/1985	7.97	7,970
17/12/1985	#N/D	7,963
07/01/1986	7.96	7,960
22/01/1986	#N/D	7,965
04/02/1986	7.97	7,970
06/02/1986	#N/D	7,971
21/02/1986	#N/D	7,972
07/03/1986	7.97	7,970

3.2. Construção do modelo

Uma vez preenchidas as lacunas de dados, o modelo pôde ser ajustado. O ajuste de equações através de dados experimentais é objeto de estudo da área de regressão linear e identificação de sistemas. Técnicas de identificação de sistemas são empregadas nos mais diversos ramos das ciências aplicadas contemporâneas devido à ampla disponibilidade de dados em meios digitais e praticidade em empregá-las quando os problemas apresentam um cenário complexo, por exemplo, elevado número de variáveis ou leis físicas incertas. O uso de abordagem do tipo ARMAX e variantes lineares têm encontrado grandes utilidades no campo de controle preditivo e diagnóstico de faltas, por exemplo. Por outro lado, quando o sistema a ser modelado exibe dinâmicas complexas que não podem ser ignoradas, é mais conveniente optar por abordagens do tipo NARX, por exemplo, polinomial autorregressiva ou redes neurais. O ajuste de modelos estáticos é um caso particular destas abordagens e pode ser resolvido empregando-se basicamente as mesmas técnicas.

Para construir o modelo algébrico de deslocamento dos blocos adotou-se a seguinte convenção de variáveis:

- u : nível da montante
- x_1 : leitura do MTJ vizinho a esquerda.
- x_2 : leitura do MTJ vizinho a direita.

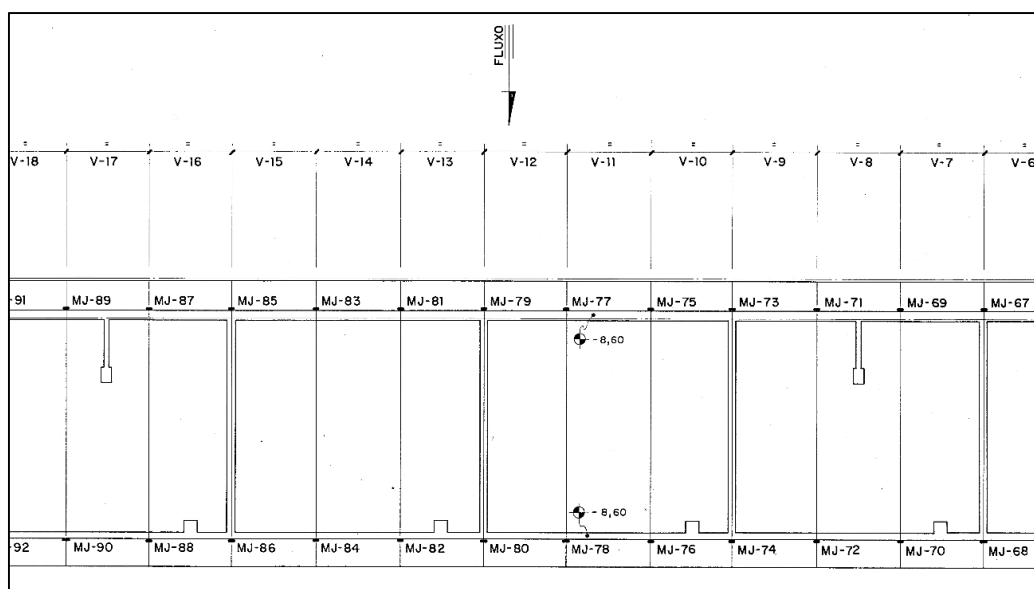


Figura 7 – Corte dos blocos do vertedouro, visão superior.

Fonte: Arquivo técnico Eletrobrás Eletronorte

A Figura 7, apresenta o desenho técnico de parte do vertedouro, onde se pode notar os blocos, as juntas entre eles e a posição da instalação dos MTJ's.

A ideia desta organização é que variáveis consecutivas representam blocos vizinhos. Isto é importante porque o modelo foi construído baseando-se na hipótese de que o deslocamento entre dois blocos depende principalmente dos deslocamentos mais próximos. Pelas evidências oferecidas até o presente momento, Figuras 4 e 5, e por ser uma hipótese razoável, ela também simplifica consideravelmente o procedimento de modelagem, uma vez que reduz o espaço de busca dos possíveis termos a compor cada equação.

As equações são ajustadas individualmente e independentemente das outras que compõem o modelo. Por exemplo, a equação para o aparelho 5 é ajustada considerando x_5 como variável de observação e x_4, x_3, x_6, x_7 e u como variáveis externas. Para o aparelho 6, x_6 torna-se a variável de observação e as demais tornam-se variáveis externas, inclusive x_5 .

A equação do i -ésimo aparelho é descrita de forma geral como o polinômio multivariável:

$$x_i = \sum_{m=1}^{M_i} c_m x_{i-2}^{p_i(m,i-2)} x_{i-1}^{p_i(m,i-1)} x_{i+1}^{p_i(m,i+1)} x_{i+2}^{p_i(m,i+2)} u^{q_i(m)} \quad (3)$$

Onde c_m é um coeficiente (número real) a se ajustar e $p_i(m, i-2), p_i(m, i-1), p_i(m, i+1), p_i(m, i+2)$ e $q_i(m)$ são expoentes inteiros não negativos.

Os termos de cada polinômio são estabelecidos a priori e posteriormente confrontados com os dados a fim de determinar sua relevância para descrever as observações do aparelho. Termos pouco relevantes são imediatamente eliminados. É importante observar que a natureza multivariável de cada polinômio tende a resultar em um número inicial de termos candidatos muito grandes, motivo pelo qual foi importante estabelecer a dependência do deslocamento apenas das leituras mais próximas e não de todas as da estrutura.

O cálculo dos coeficientes e a seleção de termos que constituem cada equação são feitos utilizando um algoritmo clássico de identificação por mínimos quadrados baseado em ortogonalização e taxa de redução de erro. A equação (1) é do tipo linear nos parâmetros e pode ser colocada na forma padrão matricial de problemas de regressão linear:

$$Y = \Psi \theta \quad (4)$$

Onde, para este problema específico, a matriz de regressão Ψ é gerada a partir dos termos polinomiais candidatos e dos dados disponíveis e o vetor θ contém os coeficientes c_m do polinômio a serem determinados. O vetor Y contém diversas amostras da variável observada em diferentes instantes de tempo, no caso, do aparelho que se deseja modelar.

Um problema deste tipo é resolvido minimizando a função soma dos quadrados dos erros:

$$E = (Y - \Psi \theta)^T (Y - \Psi \theta) \quad (5)$$

Para o qual a solução básica é obtida resolvendo a equação normal

$$\Psi^T \Psi \theta = \Psi^T Y \quad (6)$$

Contudo, devido à natureza polinomial e multivariável do problema, o número de colunas da matriz de regressão Ψ é geralmente muito grande o que inviabiliza uma solução numérica e estável do sistema (Chen et al., 1989). Um contorno desta situação foi proposto por Chen et al. (1989), através do uso de um modelo ortogonal equivalente:

$$Y = W g \quad (7)$$

Onde W é uma matriz ortogonal, i.e. $W^T W = I$, e g é um vetor de coeficientes transformado. (Chen et al., 1989) mostraram que é possível transformar o modelo original (4) em (7) através de mecanismos de ortogonalização, tais como o método modificado de Gram-Schmidt (Björck, A. pág. 305, 1992). Além disso, os autores mostraram que a relevância do i -ésimo termo do modelo original pode ser quantificada pela expressão:

$$[ERR]_i = \frac{\hat{g}_i^2 \langle \mathbf{w}_i, \mathbf{Y} \rangle}{\langle \mathbf{Y}, \mathbf{Y} \rangle} \quad (8)$$

Onde $\mathbf{w}_i$ representa a i -ésima coluna (regressor) de $\mathbf{W}$, $\hat{g}_i$ representa seu respectivo coeficiente (parâmetro) e $\langle \cdot \rangle$ denota produto interno. A métrica é denominada taxa de redução de erro (Error Reduction Ratio) e quantifica, em uma escala de 0 a 1, quanto o erro do modelo pode ser reduzido caso o i -ésimo termo seja introduzido (Korenberg et al., 1988; Billings et al., 1989). Isto fornece um critério para a inclusão de termos no modelo polinomial (3), uma vez que, termos com ERR muito baixo podem ser seguramente mantidos de fora, uma vez que sua inclusão pouco contribui para diminuir o erro de modelagem.

Esta metodologia de construção de modelos é relativamente bem consolidada, inclusive para modelos dinâmicos (com variação temporal). Ela atualmente encontra-se devidamente codificada em programas de computador desenvolvidos na UFPA que podem ser utilizadas de maneira relativamente transparente para construir modelos polinomiais estáticos ou dinâmicos a partir de dados experimentais.

4. RESULTADOS

Ao todo, foram identificados 50 modelos correspondentes a todos os MTJ's instalados nas galerias de montante da 1ª e 2ª etapa, na direção transversal ao fluxo (Y). A direção foi escolhida como objeto de modelagem devido a sua variação ser mais expressiva que as demais na média dos aparelhos. O ajuste utilizou metade dos dados disponíveis para calibrar o modelo; para validar, o conjunto completo de observações foi utilizado. Em todos os modelos construídos, a composição inicial de termos candidatos foi do tipo polinomial estático multivariável com termos de até grau três. Alguns dos modelos resultantes são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Descrição dos modelos de alguns instrumentos

Local	Importancia em %	Parcela da expressão	Variáveis
BG04/TA13	73,29906094	+2,4.x ₁	u = montante
	25,01777284	-3,2315.e ⁻³ .u	x ₁ = BG03/BG04
	1,22424695	-1,4948.x ₁ ²	x ₂ = BG02/BG03
	0,136415477	-4,3635.e ⁻⁵ .u ²	
BG03/BG04	50,61136872	-3,1958.e ⁻³ .u	u = Montante
	48,30036446	+3,9727.e ⁻¹ .x ₁	x ₁ = BG04/TA13
	0,239748737	+7,7918.e ⁻¹ .x ₁ ²	x ₂ = BG02/BG03
	0,183127378	-1,9438.x ₁ . x ₂	
BG02/BG03	90,14203619	-8,5593e ⁻³ .u	u = Montante
	1,772420534	+7,0635.e ⁻¹ . x ₁	x ₁ = BG03/BG04
	1,314098944	+3,9332.x ₁ .x ₂	x ₂ = BG01/BG02
	0,567347804	+1,0342.e ⁻² .u.x ₁	
	0,558905305	-1,3448.x ₂	
	0,551340057	-9,9636.e ⁻⁵ .u ²	
BG01/BG02	98,88949194	+2,6025.e ⁻¹ .u	u = Montante
	0,427678288	-7,5421.e ⁻⁰³ .u ²	x ₁ = BG02/BG03
	0,229953418	+6,3106.e ¹ .x ₂	x ₂ = TAA/BG01
	0,12020442	-7,1922.e ¹ .x ₁	

TAA/BG01	94,95728447	+0,0248.u	u = Montante
	2,086749402	+3,9924.x ₁	x ₁ = BG01/BG02
	0,935100025	+26,1265.x ₁ .x ₂	x ₂ = TA01/TAA
	0,200414447	-1,1713.x ₁ ²	
	0,163088984	+8,2879.x ₂	
TA01/TAA	79,52624189	-8,4690.e ⁻³ .u	u = Montante
	8,307335202	-1,749.x ₁	x ₁ = TAA/BG01
	7,345166303	-2,3580.e ⁻¹ .x ₂	x ₂ = TA02/TA01
	1,142638947	+4,5619.e ⁻⁵ .u ²	
	0,682541209	-8,4833.x ₁ .x ₂	
	0,209983553	-2,1760.e ⁻² .u.x ₁	
TA02/TA01	89,32835818	-6,6366.e ⁻⁴ .u	u = Montante
	6,268653869	+1,48.x ₁	x ₁ = TA01/TAA
	1,367514181	-4,6158.e ⁻³ .x ₂	x ₂ = TA03/TA02
TA03/TA02	92,46211911	+3,6608.e ⁻³ .u	u = Montante
	3,987164467	+2,1756.x ₁	x ₁ = TA02/TA01
	0,508379811	-2,7016.e ⁻² .u.x ₁	x ₂ = TA04/TA03
	0,452057238	-6,0433.e ⁻¹ .x ₂	
	0,415555456	+4,5533.e ⁻¹ .x ₁ ²	

Conforme esperado, a variável correspondente ao nível da montante aparece em todos os modelos, embora nem sempre possua o maior ERR. Na verdade, em alguns casos, o coeficiente correspondente é, em magnitude, relativamente pequeno, por exemplo, no aparelho BG04/TA13, onde o termo “u” contribui com 25,02% e possui um coeficiente de apenas -3,2315.e⁻³.

Esta interpretação é equivocada porque os termos onde o nível da montante aparece explicitamente quantificam apenas sua influência direta sobre o aparelho. A influência total depende do acoplamento que existe entre junções vizinhas, o que garante um efeito distribuído da montante ao longo de toda a barragem, o que é bastante sensato.

As Figuras abaixo de 8 a 11, demonstram os modelos descritos na Tabela 3.

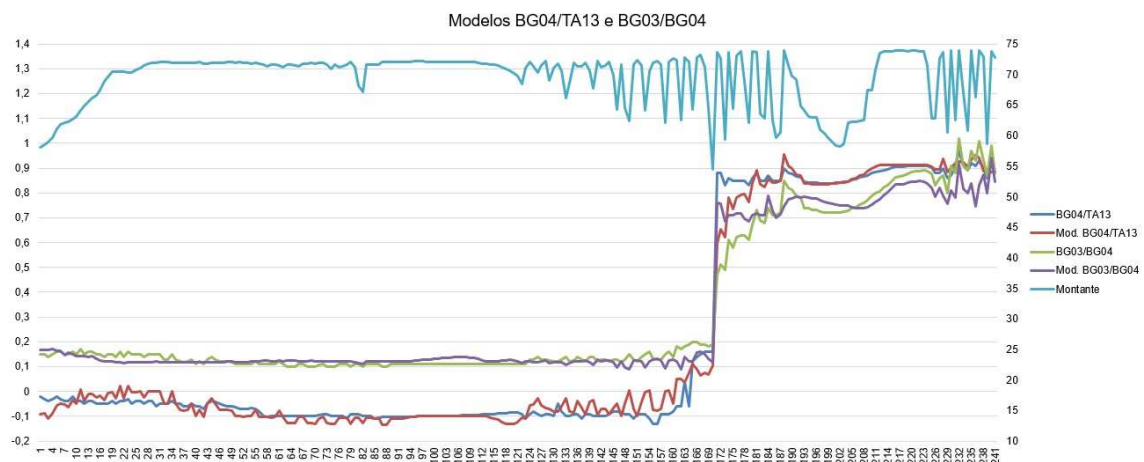


Figura 8 – Modelos do BG04/TA13 e BG03/BG04

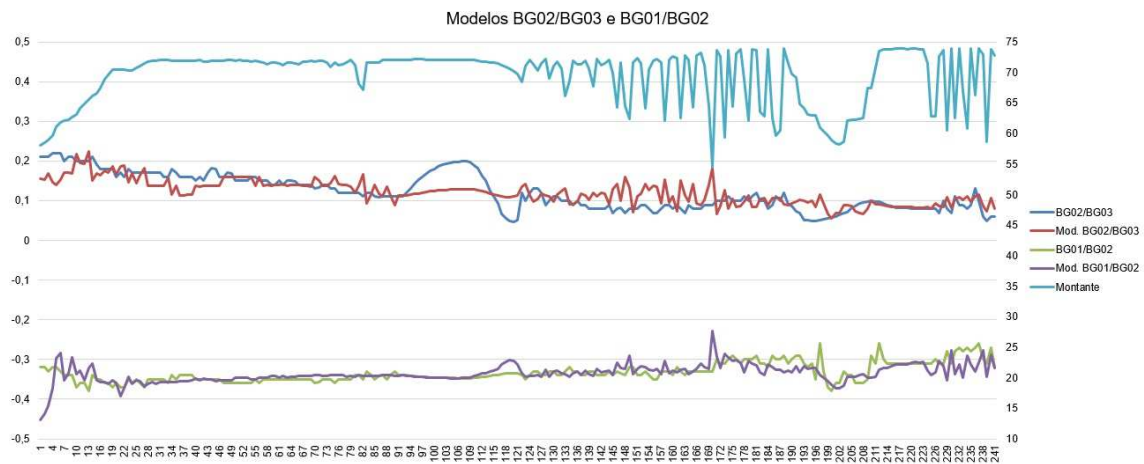


Figura 9 – Modelos do BG02/BG03 e BG01/BG02

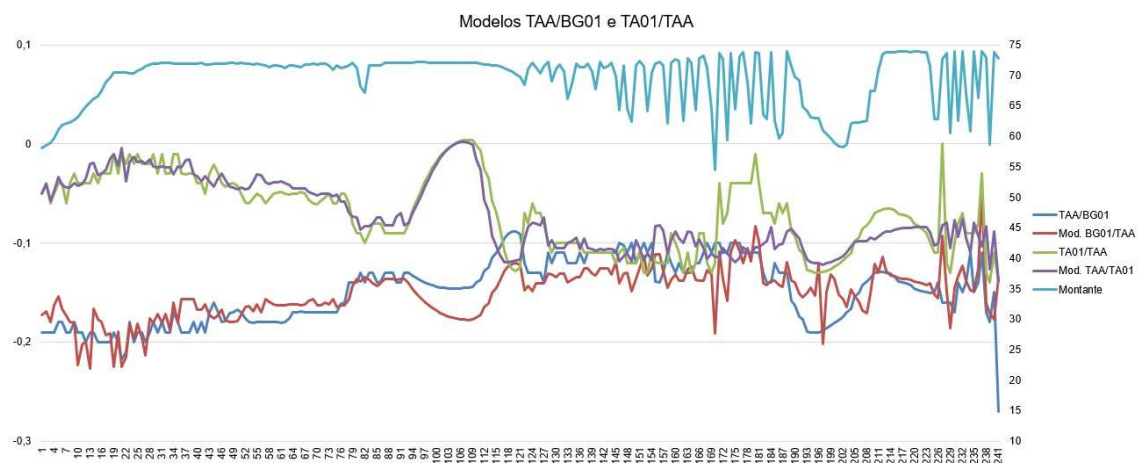


Figura 10 - Modelos do TAA/BG01 e TA01/TAA

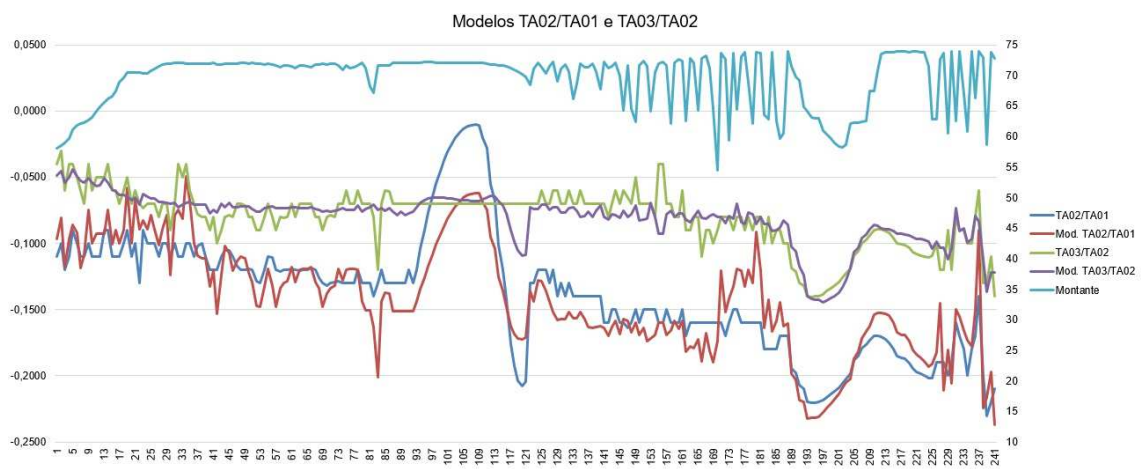


Figura 11 - Modelo do TA02/TA01 e TA03/TA02

5. CONCLUSÃO

Foi verificado que o método de modelagem estática aplicado é viável, se pode perceber que de fato o nível da montante exerce influência nos deslocamentos apresentados nas juntas da UHE Tucuruí, porém em duas parcelas. Uma direta, através de um termo que representa o nível montante, que aparece explicitamente nas equações. E uma indireta, através do acoplamento entre os blocos apresentado pelos vários termos que compõem o sistema de equações algébricas. Pois trata-se de uma influência distribuída, o que faz grande sentido já que se pode considerar a barragem como um sistema com distribuição de massa. Apesar do baixo número de amostras existentes e do uso de técnicas para preencher as lacunas existentes, os modelos gerados foram muito bons e bem próximos das series originais, até porque em Sistemas de Informações se o modelo for exatamente igual ao original, é um sinal que pode ter sido feito algo errado no processo.

Ao longo da construção do artigo foi notado que apesar de muitos anos o histórico de dados é muito curto, poucas amostras, 320 em média e desse universo foi usado apenas 241, período que o lago começou a exercer influência na estrutura, e por isso não foi possível usar o algoritmo para modelar um sistema dinâmico, que apresentaria resultados mais definitivos e interessantes, uma vez que se pode verificar as possíveis frequências naturais dos blocos. Com os dados atuais e pelo fato do sistema estudado ser lento, não se pode afirmar categoricamente que se possa fazer previsões sobre o comportamento das estruturas, para isso, dependeria da Eletrobrás Eletronorte melhorar o sistema de aquisição de dados dos aparelhos e através de novas equações algébricas dinâmicas, e o desenvolvimento algébrico destas, tentar desvendar como seria essa relação direta entre as estruturas e o nível da montante.

No momento pode-se dizer que a barragem apenas responde a grandes variações no nível da montante, o que provavelmente não seja uma verdade de fato, e a busca por essas informações é uma oportunidade de para trabalhos futuros.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer pelo apoio a esta e a outras pesquisas à: Universidade Federal do Pará (UFPA); ao Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia (NDAE); ao Campus de Tucuruí; à Eletrobrás Eletronorte; e às Agências de fomento CNPq, CAPES e FAPESPA.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIRRE, Luis Antonio. INTRODUÇÃO À IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS: Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais. Ed. UFMG, 2000.

BILLINGS, S. A., CHEN, S. e KORENBERG, M. J. Identification of MIMO non-linear systems using a forward-regression orthogonal estimator. *International Journal of Control*, 49(6):2157-2189 (1989).

BJÖRCK, A. Numerics of Gram-Schmidt Orthogonalization. 13 de Dezembro de 1992.

CALDAS, Silvio; LUZ, Gilson Machado. Lições aprendidas com a instrumentação da UHE Tucuruí por ocasião do enchimento da 2ª etapa. XXIX Seminário Nacional de Grandes Barragens. Abril de 2013.

CHEN, S.; BILLINGS, S.A.; LUO, W.. Orthogonal least squares methods and their application to nonlinear system identification. Agosto de 1988.

GRAÇA, Niarkios Luiz Santos de Salles; FAGGION, Pedro Luis. Validação da determinação de deslocamentos relativos e barragens utilizando Topografia e Medidores Triortogonais de Junta. Rev. Bras. Geom., v.4, n. 2, p.096-105, 2016.

KORENBERG, M., BILLINGS, S. A., LIU, Y. P. e MCILROY, P. J. Orthogonal parameter estimation algorithm for non-linear stochastic systems. International Journal of Control, 48(1):193-210. (1988).

MORAIS, E. L. Desenvolvimento de um Medidor Triortogonal Instrumento para Monitoração de Fissuras e de Juntas em Barragens de Concreto. Anais do II CITENEL, 2003.

PIMENTEL, Ricardo. A Barragem de Jusante do Baixo Sabor. Aspectos Relevantes de Projecto e Construção. Encontro Nacional Betão Estrutural, Outubro de 2012.

SILVA, Orlando Catarino Da; SANTOS, Cleverson Gonçalves Dos. Estudo da Variabilidade dos Instrumentos Instalados em Blocos Chave da Barragem de ITAIPU para Determinação de Modos de Falha. XXX – Seminário Nacional de Grandes Barragens. Maio de 2015.