

ESTUDO COMPARATIVO SOBRE GOLPE DE ARÍETE EM TUBULAÇÕES DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

Marcus Eduardo Deckert *
Maxwell Martins Menezes **

Resumo

O objetivo deste artigo é realizar um estudo comparativo sobre golpe de aríete em tubulações de pequenas centrais hidrelétricas. Para atingir o objetivo, efetuou-se uma revisão teórica e desenvolveu-se um *software* em Visual Basic para a automação e precisão dos cálculos bem como um comparativo entre os resultados dos principais métodos de cálculo existentes com os resultados obtidos na prática. O golpe de aríete é de grande importância no dimensionamento de condutos, portanto, determinar o seu menor valor possível com certa faixa de segurança pode garantir uma redução de custos significativa. Durante o trabalho, foram feitas análises sobre os métodos existentes bem como a viabilização da sua utilização em um *software* e então foram comparados os resultados obtidos através do *software* com os resultados obtidos em relatórios de comissionamento. A partir dos dados coletados, foram feitos estudos comparativos, deixando nítido qual método é o mais adequado para o cálculo do golpe de aríete em tubulações de PCHs.

Palavras-chave: Golpe de aríete. Transientes hidráulicos. Pequenas centrais hidrelétricas. Estudo comparativo.

1 INTRODUÇÃO

Desde a década de 1990, o consumo energético elétrico aumentou significativamente no Brasil em razão do crescimento da indústria; conseqüentemente, o Governo permitiu que a iniciativa privada gerasse energia elétrica. Em razão do rendimento de geração, as usinas hidrelétricas foram inicialmente as mais produzidas. Dentro das usinas hidrelétricas, encontram-se as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs); estas geram até 30MW, atendendo, assim, às necessidades de carga de centros urbanos e regiões rurais. Entre as suas principais vantagens, destacam-se: custo relativamente baixo, facilidades legislativas e tecnologia eficiente para a geração.

Quando se dimensiona a tubulação de uma PCH, considera-se uma série de fatores, entre eles: queda líquida, vazão existente, golpe de aríete (sobrepessão ou subpressão que ocorre no momento em que o escoamento sofre interferências e passa a se comportar como regime transiente), sendo este um dos fatores mais relevantes na hora de dimensionar uma tubulação.

Existem vários métodos para calcular o golpe de aríete, dos quais se destacam o método clássico, aritmético, gráfico e formulações empíricas. Até hoje não foi feito um estudo mais aprofundado sobre qual método é mais eficiente para o cálculo do golpe de aríete em tubulações

* Acadêmico do Curso de Engenharia de Produção Mecânica da Universidade do Oeste de Santa Catarina; marcus@semi.com.br

** Orientador do Curso de Engenharia de Produção Mecânica na Universidade do Oeste de Santa Catarina; maxwell.menezes@unoesc.edu.br

de PCHs. Normalmente, as fabricantes utilizam o método de cálculo proposto por Thomann (1931), considerando fatores de segurança da ordem de 40 a 50% em razão da incerteza na precisão do valor calculado. Porém, calcular o golpe de aríete por vários métodos requer tempo, que poderia ser otimizado caso houvesse conhecimento prévio do fabricante quanto ao método mais adequado de aplicação.

Mediante os argumentos mencionados, propõe-se fazer um estudo comparativo sobre alguns dos principais métodos para o cálculo do golpe de aríete, visando, assim, conhecer o método que mais se aproxima dos valores obtidos na prática. Dessa forma, pode ter, então, orçamentos mais exatos em relação ao dimensionamento da tubulação, proporcionando mais confiabilidade e economia para o cliente, reduzindo o trabalho da equipe de projeto e contribuindo para o desenvolvimento de projetos de PCHs.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 GENERALIDADES SOBRE CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

Desde os primórdios da humanidade, deslocar água de um ponto a outro vem sendo um desafio. O deslocamento de água pode ser utilizado para irrigações, abastecimentos e, mais recentemente, para a geração de energia elétrica por meio de centrais hidrelétricas.

Entre os componentes de uma central hidrelétrica, destacam-se: barragem (a jusante), tubulação (conduto forçado), blocos de apoio, comportas (hidromecânicos), turbina (máquina motriz hidráulica), gerador (máquina motriz elétrica) e descarga (a montante).

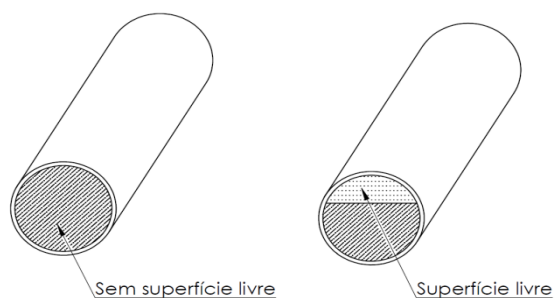
2.1.1 Condutos

Segundo Brunetti (2008, p. 35), “[...] conduto é qualquer estrutura sólida, destinada ao transporte de fluidos.” Estes são classificados em forçados e livres, de acordo com o comportamento do fluido em seu interior (Desenho 1).

Conduto forçado: O fluido que escoar em seu interior preenche totalmente a sua seção tocando toda a superfície da parede interna do conduto.

Conduto livre: O fluido que escoar em seu interior não toca todas as paredes internas do conduto.

Desenho 1 - Diferença entre conduto forçado e livre



Fonte: Brunetti (2008).

2.1.2 Dimensionamento de condutos forçados

A American Standarts Institute (2004, p. 36) recomenda a Equação 1 para o cálculo da espessura da parede de um conduto forçado:

$$es = \frac{P.D}{2.E} es = \frac{P.D}{2.E} \quad (1)$$

O golpe de aríete indicará qual o valor máximo da pressão, portanto, o valor que deve ir para a Equação 1 de dimensionamento do conduto é o valor da sobrepressão gerada pelo golpe de aríete.

2.2 GENERALIDADES ENVOLVENDO GOLPE DE ARÍETE

Define-se o golpe de aríete como o fenômeno correspondente à variação de pressão e de velocidade da água que ocorre nas tubulações quando as condições de escoamento são alteradas pela variação da descarga. O regime deixa de ser permanente e a equação de Bernoulli, sob sua forma canônica, não pode ser aplicada (MACINTYRE, 1983).

Portanto, toda a vez que eventos como fechamento de uma válvula, variações de vazão ou desligamento de uma bomba ocorrem, causam variação na velocidade de escoamento da água, alterando, assim, a sua força viva e a energia cinética correspondente.

Em um exemplo mais focado a tubulações de usinas hidrelétricas, quando é fechada uma comporta ou uma válvula de extremidade de tubulação, o regime que antes era considerado permanente se transforma em transiente. Consequentemente, a energia cinética que não pode ser anulada é transformada em energia de pressão, fazendo com que a pressão seja alterada em relação a que reinava antes de ocorrer o fechamento. Conforme Macintyre (1983, p. 421), “Esta sobrepressão que se propaga sob forma de ondas de choque é o “golpe de aríete”, um fenômeno transitório ou transiente hidráulico que é uma ocorrência no escoamento motivada pela variação de uma grandeza definidora do escoamento.”

Pode-se caracterizar então:

- a) Transiente hidráulico: “[...] o escoamento que inicia no ponto em que o regime deixa de ser permanente e termina quando o fluido volta à condição de regime permanente.” (BERGERON, 1950, p. 441);
- b) Escoamento oscilatório permanente: ocorre quando as condições de escoamento respeitam certa frequência, portanto, as condições se repetem em um intervalo de tempo constante;
- c) Golpe de aríete: termo usado para caracterizar regime variável, portanto, as condições de escoamento variam com o tempo.

A pressão resultante do golpe de aríete gera energia, esta, por sua vez é convertida em trabalho, comprimindo o fluido, deformando a tubulação e peças presentes no sistema que são atingidas pela onda de choque.

3 MÉTODOS EXISTENTES PARA O CÁLCULO DO GOLPE DE ARÍETE

Segundo Macintyre (1983, p. 426), existem vários métodos para calcular o golpe de aríete, entre eles, destacam-se:

- a) Método clássico do fechamento da válvula a jusante, desenvolvido por Jukovski, Jouguet e Alliévi;
- b) Método aritmético, apresentado por George R. Rich;
- c) Método gráfico, desenvolvido por Lowy Angus, Bergeron, Jaerger, Parmakian, entre outros;
- d) Método das equações características: usado para cálculos em redes complexas de tubulações;
- e) Método algébrico: semelhante ao método gráfico;
- f) Método da impedância: aplicável aos casos que se encontra escoamento oscilatório permanente;
- g) Emprego de fórmulas empíricas. Exemplos destas são as fórmulas de Warren, Michaud-Vensano, Jouget, Johnson, Thomann e Sparre.

Macintyre (1983, p. 441) recomenda os métodos de Thomann, Sparre, Michaud-Vensano e Johnson.

2.3.1 Método de cálculo proposto por Thomann

O engenheiro alemão Thomann (1931) propõe um método de cálculo para o golpe de aríete. É indicado que primeiro se deve calcular a porcentagem de golpe de aríete por meio da Equação 2:

$$y_{\text{máx}} = \frac{2.T_f}{2.T - T_f} y_{\text{máx}} = \frac{2.T_f}{2.T - T_f} \quad (2)$$

A partir do momento em que se tem a porcentagem de sobrepressão, basta multiplicá-la pela queda bruta para obter o golpe de aríete em unidade de pressão.

2.3.2 Método de cálculo proposto por Sparre

Sparre deduziu empiricamente as equações para determinar a sobrepressão gerada pelo golpe de aríete. Para manobras lentas, tem-se a Equação 3:

$$h_1 = \frac{a.V_0}{g} \cdot \frac{1-\psi_1}{1+\frac{a.V_0}{2g.H_0}\psi_1} h_1 = \frac{a.V_0}{g} \cdot \frac{1-\psi_1}{1+\frac{a.V_0}{2g.H_0}\psi_1} \quad (3)$$

Sendo estipulado que para essas condições o golpe não pode ultrapassar 20% ou, em casos extremos, 25% da pressão inicial. Tal fator exige boa atenção por parte dos projetistas e, segundo Macintyre (1983, p. 443), muitas vezes é o causador de erros na escolha da equação para o cálculo.

Quando Sparre deduziu suas equações, ele supôs que as funções das manobras de fechamento fossem lineares. Baseado nisso, dividiu os cálculos de sobrepressão em duas formas, as Equações 4 e 5:

a) Altas quedas $\frac{a.V_0}{2g.H_0} \leq 1$ $\frac{a.V_0}{2g.H_0} \leq 1$

$$h_{\text{máx.}} = \frac{2L.V_0}{g.t_f} \cdot \frac{1}{\left[1 + \frac{a.V_0}{2g.H_0} \left(1 - \frac{2L}{a.t_f}\right)\right]} h_{\text{máx.}} = \frac{2L.V_0}{g.t_f} \cdot \frac{1}{\left[1 + \frac{a.V_0}{2g.H_0} \left(1 - \frac{2L}{a.t_f}\right)\right]} \quad (4)$$

b) Baixas quedas $\frac{a.V_0}{2g.H_0} > 1$ $\frac{a.V_0}{2g.H_0} > 1$

$$h_{\text{máx.}} = \frac{2L.V_0}{g.t_f} \cdot \frac{1}{\left[1 - \frac{L.V_0}{2g.t_f.H_0}\right]} h_{\text{máx.}} = \frac{2L.V_0}{g.t_f} \cdot \frac{1}{\left[1 - \frac{L.V_0}{2g.t_f.H_0}\right]} \quad (5)$$

2.3.3 Método de cálculo proposto por Mihcaud-Vensano

Em cálculos onde se necessita calcular rapidamente o golpe de aríete, com certa faixa de segurança, pode-se usar a Equação 6 de Michaud-Vensano:

$$h = \frac{2L.V}{g.t_f} h = \frac{2L.V}{g.t_f} \quad (6)$$

Conforme Macintyre (1983, p. 447), os resultados obtidos com essa fórmula são alturas geradas superiores às obtidas na prática, porém, isso não impede a sua aplicação, quando se deseja calcular o golpe de aríete rapidamente com certa faixa de segurança. A Eletrobras (1997, p. 232) recomenda a utilização do método de Michaud-Vensano para o cálculo da pressão máxima no golpe de aríete.

2.3.4 Método de cálculo proposto por Johnson

Johnson deduziu a Equação 7 para quedas baixas e médias:

$$h_{m\acute{a}x.} = \frac{L \cdot V_0}{2 \cdot g^2 \cdot H_0 \cdot t_f^2} \cdot \left[L \cdot V_0 + \sqrt{4 \cdot g^2 \cdot H_0^2 \cdot t_f^2 + L^2 \cdot V_0^2} \right]$$
$$h_{m\acute{a}x.} = \frac{L \cdot V_0}{2 \cdot g^2 \cdot H_0 \cdot t_f^2} \cdot \left[L \cdot V_0 + \sqrt{4 \cdot g^2 \cdot H_0^2 \cdot t_f^2 + L^2 \cdot V_0^2} \right] \quad (7)$$

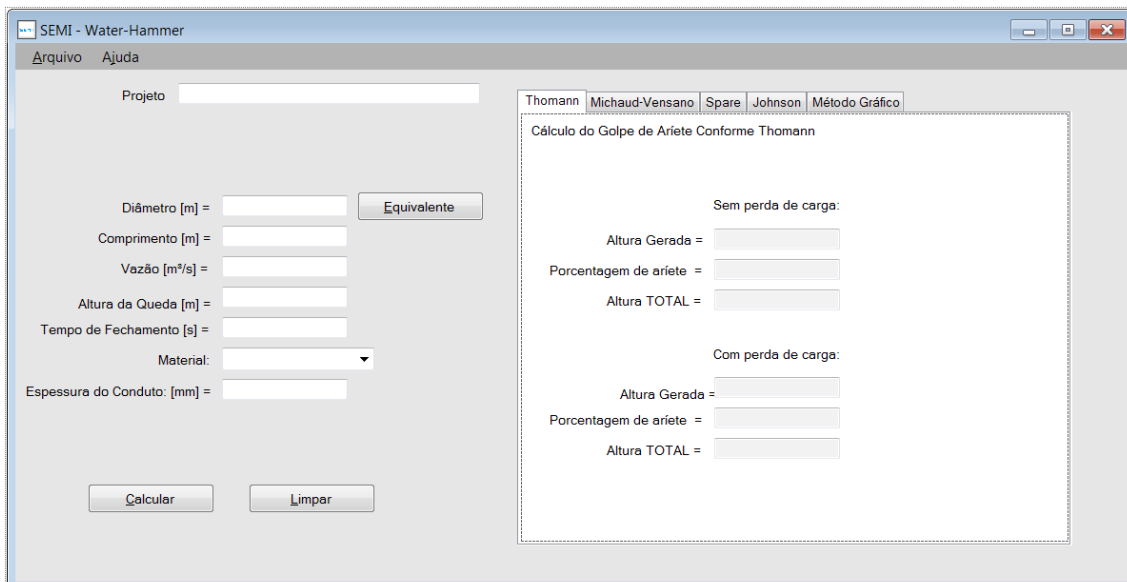
3 METODOLOGIA

Nessa etapa será apresentada a metodologia aplicada para o desenvolvimento do estudo comparativo, serão mostradas as ferramentas de cálculo utilizadas, bem como uma explicação do seu desenvolvimento.

3.1 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE EM VISUAL BASIC

O Visual Basic (VB) é uma linguagem de programação produzida pela Microsoft, um aprimoramento da linguagem BASIC; esta é incorporada ao pacote Microsoft Visual Studio. O VB permite o desenvolvimento de *softwares* para diversas aplicações, conforme as necessidades do projeto. Conta com bibliotecas para a realização de funções matemáticas e se comunica com bancos de dados, permitindo, assim, a criação de tabelas e gráficos.

Imagem 1- Tela inicial do *software*



Fonte: os autores.

3.2 FERRAMENTAS ESTATÍSTICAS PARA A COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Segundo Moore (2000, p. 2), “A análise de dados consiste em métodos ideais para organizar e descrever dados mediante a utilização de gráficos, resumos numéricos, e descrições matemáticas mais elaboradas.”

3.2.1 Exame das distribuições dos resultados

Para a análise da distribuição dos resultados foi construído um gráfico de barras com os resultados obtidos no *software* para os métodos de cálculo e resultados obtidos no fechamento de emergência de um estágio no comissionamento, sendo possível notar visualmente qual método de cálculo mais se aproximou do resultado real.

Todos os testes serão feitos com os dados obtidos no fechamento de emergência, que compreende um fechamento de um estágio, com vazão nominal e tempo de fechamento mais rápido de todo os testes de comissionamento; teoricamente é o fechamento mais crítico.

3.2.2 Cálculo do desvio padrão

Para calcular o desvio padrão foi utilizada a Equação 8:

$$\sigma = \frac{\sqrt{\text{Erro}^2}}{n} \quad \sigma = \frac{\sqrt{\text{Erro}^2}}{n} \quad (8)$$

O desvio padrão servirá para demonstrar qual método de cálculo mais se aproximou do resultado obtido no comissionamento. Segundo Moore (2000, p. 33), “O desvio padrão mede a dispersão considerando quão afastadas da média estão as observações.” Pode-se caracterizá-lo como um método de obter a medida da dispersão.

Quanto mais próximo a zero for o desvio padrão, menor é a dispersão. Portanto, este é uma ferramenta de análise estatística de grande valor para o trabalho, pois quanto menor for o desvio padrão de cada método, mais próximo este estará em relação ao valor medido na prática.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ESTUDOS COMPARATIVOS

Esta seção apresentará os estudos comparativos de relatórios de comissionamento corriqueiramente cedidos por uma empresa fabricante de centrais hidrelétricas, com atuação internacional, e os respectivos resultados obtidos com o *software*.

4.1.1 Dados das PCHs analisadas

No Quadro 1 são mostradas as variáveis necessárias para o cálculo do golpe de aríete de todas as PCHs analisadas.

Quadro 1 – Dados das PCHs analisadas

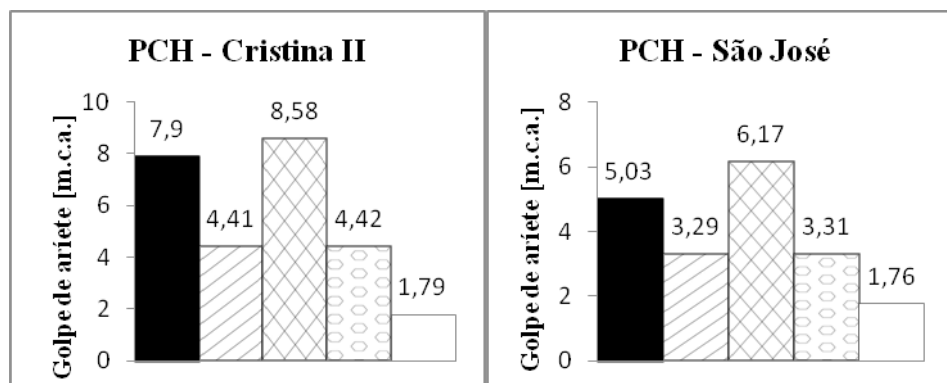
Altura Bruta [m]	72	Cristina II	Material	Aço
Vazão [m ³ /s]	3,1		Espessura [mm]	7,9375
Comprimento [m]	140		Fechamento [s]	6,7
Diâmetro [m]	1,40		Sobrepressão [m.c.a.]	7,9
Altura Bruta [m]	25	São José	Material	Aço
Vazão [m ³ /s]	10,96		Espessura [mm]	12,7
Comprimento [m]	50		Fechamento [s]	4
Diâmetro [m]	2,40		Sobrepressão [m.c.a.]	5,03
Altura Bruta [m]	42	Divisa	Material	Aço
Vazão [m ³ /s]	15,08		Espessura [mm]	12,7
Comprimento [m]	59		Fechamento [s]	45
Diâmetro [m]	2,05		Sobrepressão [m.c.a.]	11,7
Altura Bruta [m]	24	Chupinguaia	Material	Concreto
Vazão [m ³ /s]	26,25		Espessura [mm]	500
Comprimento [m]	78		Fechamento [s]	6 s
Diâmetro [m]	3,78		Sobrepressão [m.c.a.]	5,13
Altura Bruta [m]	79	Santana I	Material	Aço
Vazão [m ³ /s]	11,02		Espessura [mm]	12,7
Comprimento [m]	330		Fechamento [s]	6,3
Diâmetro [m]	2,947		Sobrepressão [m.c.a.]	15,3
Altura Bruta [m]	81,85	Esperança	Material	Aço
Vazão [m ³ /s]	3,58		Espessura [mm]	15,875
Comprimento [m]	660,5		Fechamento [s]	15
Diâmetro [m]	1,187		Sobrepressão [m.c.a.]	21,75

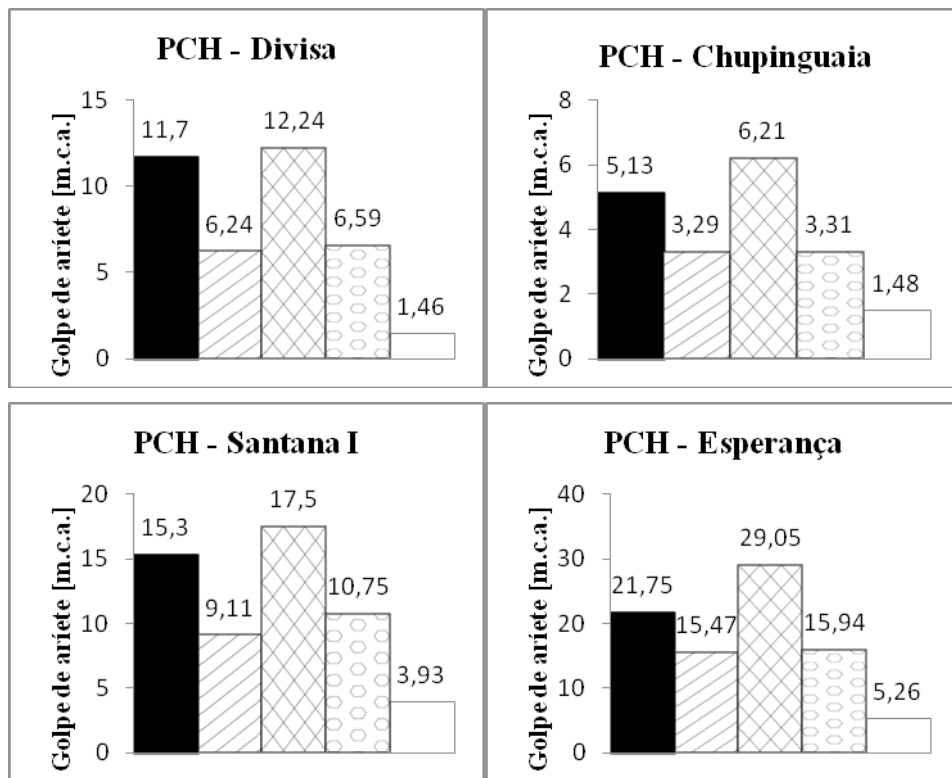
Fonte: os autores.

4.1.2 Exame das distribuições dos resultados

O Gráfico 1 demonstra a distribuição dos resultados obtidos nos métodos de cálculo estudados e a medição obtida no fechamento de emergência do comissionamentos das PCHs analisadas.

Gráfico 1 – Gráficos comparativos





Legenda:

- Comissionamento
- Thomann
- Michaud-Vensano
- Sparre
- Johnson

Fonte: os autores.

4.2 ANALISE DE DESVIO PADRÃO DOS MÉTODOS

4.2.1 Comparação dos resultados obtidos com o desvio padrão

A Tabela 1 representa o comparativo entre os resultados obtidos para o desvio padrão dos métodos de cálculo estudados.

Tabela 1 – Comparativo entre os métodos

Método	Desvio Padrão
Thomann	4,59
Michaud-Vensano	3,2
Sparre	4,06
Johnson	9,72

Fonte: os autores.

Os valores da Tabela 1 foram obtidos por meio da Equação 8, comparando os resultados obtidos entre os métodos de cálculo e o comissionamento, mostrando que o método proposto por Michaud-Vensano obteve o menor desvio padrão entre os métodos comparados.

Observando os gráficos da Imagem 1, nota-se que em quedas mais altas o método proposto por Michaud-Vensano sobredimensiona o golpe de aríete. Observando todos os Gráficos comparativos, percebe-se que em nenhum caso os demais métodos calcularam a sobrepressão maior ou igual à medida na prática.

5 CONCLUSÃO

Ao término da fase de comparação e análise de resultados, verificou-se que os métodos normalmente utilizados para calcular o golpe de aríete não apresentam grande precisão se comparados à prática, sendo os mais usados o método de Thomann, Michaud-Vensano, Sparre e Johnson.

O desenvolvimento do *software* para a automação do processo de cálculo se mostrou uma grande ferramenta, proporcionando condições para que mais estudos sejam feitos com precisão nos cálculos e em tempo reduzido, economizando, assim, tempo da equipe de projeto e garantindo um resultado correto.

Com os resultados dos comparativos, é possível afirmar que o método de Johnson se mostrou o menos confiável, tanto pelo valor baixíssimo que este quantifica para o golpe de aríete quanto pelo fato de ser o método com o maior desvio padrão.

Os métodos de Thomann e Sparre se mostraram próximos em relação aos valores calculados, ambos se situam abaixo do medido na prática. Estes métodos podem ser utilizados seguindo as recomendações de utilização de fatores de segurança.

Os resultados obtidos mostram que o método proposto por Michaud-Vensano é o mais confiável na hora de determinar a sobrepressão, sendo este o único método que calculou o golpe de aríete acima do ocorrido na prática. Também o método de Michaud-Vensano se mostrou mais confiável quanto à exatidão dos resultados, pois foi o que obteve o menor desvio padrão nos estudos comparativos realizados.

Para trabalhos futuros, propõe-se realizar um número maior de relatórios a serem comparados, podendo retirar relações mais conclusivas a respeito das relações existentes entre variáveis e a aproximação dos métodos de cálculo do golpe de aríete.

REFERÊNCIAS

AMERICAN STANDARDS INSTITUTE. **American Water Works Association (AWWA) M11: Penstocks**. Denver, 2004, 60 p.

BERGERON, Louis. **Etude des variations de regime dans les conduites d'eau: Solution graphique generale**. Paris: Reve generale de l'hydraulique, 1939. 441-447 p.

BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos fluidos**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 431 p.

ELETROBRAS. Manual de Minicentraís Hidrelétricas. Brasília, DF: Ministério das Minas e Energia, 1997, 530 p.

MACINTYRE, Archibald Joseph. Máquinas motrizes hidráulicas. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983. 649 p.

MOORE, David. A estatística básica e sua prática. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 482 p.

THOMANN, Robert. Die Wasserturbinen. Stuttgart: Konrad Wittwer, 1931. 365 p.

