

**XXI CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SÃO PEDRO, ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL, OCTUBRE, 2004**

**MÉTODO DE GIBSON APLICADO ÀS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS
CONSIDERANDO O CÁLCULO DA VAZÃO DE FUGA**

Edson da Costa Bortoni

Professor adjunto da Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Minas Gerais - Brasil. Endereço: Avenida BPS, 1303
Bairro BPS, Itajubá - Minas Gerais, CEP 37500 – 903, Tel: (35) 36291401. email:

bortoni@iee.efei.br

Afonso Henriques Moreira Santos

Professor titular da Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Minas Gerais - Brasil. Endereço: Avenida BPS, 1303
Bairro BPS, Itajubá - Minas Gerais, CEP 37500 – 903, Tel: (35) 36291455. email:

afonso@iee.efei.br

RESUMO

O presente artigo apresenta uma metodologia desenvolvida para a medição de vazão em centrais hidrelétricas empregando o método de Gibson, considerando a vazão de fuga. O trabalho apresenta uma modelagem matemática da metodologia proposta e a aplica em testes em campo. Os resultados obtidos mostram a eficácia do método que, à priori, considera a existência de uma válvula de segurança a montante da turbina hidráulica que pode ser fechada segundos após o fechamento do distribuidor da turbina

ABSTRACT

This work presents a methodology developed for the leakage flow measurement when using Gibson method in hydro power plants. A mathematical modeling is presented and field tests were applied. The obtained results show the efficiency of the method that considers the existence of a downstream valve that can be operated after the guide vanes closing.

Palavras Chave: Medição de Vazão, Método de Gibson, Centrais hidrelétricas, Vazão de fuga.

INTRODUÇÃO

O método de Gibson, ou método pressão-tempo, para medição de vazões em tubulações foi proposto em 1923 por Normam Rothwell Gibson [1] e se fundamenta no fenômeno hidráulico denominado Golpe de Aríete e na segunda lei de Newton. Para tanto, o método faz uso de registro do comportamento da diferença de pressão entre dois pontos específicos da tubulação durante a ocorrência do processo transitório provocado quando o escoamento em uma tubulação é subitamente interrompido.

Dada a sua notória eficácia, o método é reconhecido pelas principais normas de testes e ensaios do mundo [2-4], encontrando particular aplicação na medição de vazão em testes de recepção de turbinas hidráulicas e determinação de rendimento de grupos geradores. Ao longo dos anos várias contribuições têm sido adicionadas ao método, no sentido de otimizar a sua aplicação, sempre que possível, lançado mão de modernas técnicas tecnologia da informação [5-7].

Não obstante a engenhosidade do método, a identificação e consideração da vazão de fuga têm se tornado um dos grandes desafios para a disseminação do método e a sua aplicação em larga escala. Tal vazão aparece quando o fechamento do elemento de interrupção de fluxo não é completo, normalmente o distribuidor da turbina, apresentando vazamentos ou mesmo quando a estanqueidade não é seguramente garantida.

Com valores máximos da ordem de 1,5% da vazão nominal nas centrais de alta queda, em geral a vazão de fuga é muito baixa, porém não desprezível, principalmente diante de embates comerciais onde exigências contratuais entre fabricantes e compradores impõem margens muito estreitas sobre as tolerâncias dos rendimentos, principalmente os relacionados às turbinas hidráulicas.

Neste sentido, este trabalho vem apresentar uma nova concepção de ensaio, aplicando o método de Gibson na medição de vazão em centrais hidrelétricas, considerando a vazão de fuga supondo-se, para tanto, a existência de uma válvula de segurança a montante da turbina hidráulica que possa ser fechada segundos após o fechamento do distribuidor da turbina.

DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE GIBSON

Considere o escoamento permanente estacionário mostrado na Fig. 1, com velocidade média v (m/s) e vazão Q (m³/s) no trecho 1-2, de uma tubulação reta de comprimento L (m), diâmetro interno D (m) e área de seção transversal A (m²).

Atuando-se na válvula V durante um tempo de fechamento t_v (s) em que a velocidade cai de v_i para v_f (m/s), dá-se origem ao Golpe de Aríete, representado pela elevação de energia Δp (m) entre os pontos 1 e 2, a qual varia segundo (A,B,F).

A partir do princípio da quantidade de movimento, pode-se escrever [5]:

$$\Delta p \cdot \gamma \cdot A = -\rho \cdot L \cdot A \cdot \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

$$v_i - v_f = \frac{g}{L} \cdot \int_0^{t_v} \Delta p \cdot dt = \frac{g \cdot A_d}{L} \quad (2)$$

Operando-se convenientemente pode-se obter:

$$Q = \frac{g \cdot A_d \cdot A}{L} + q \quad (3)$$

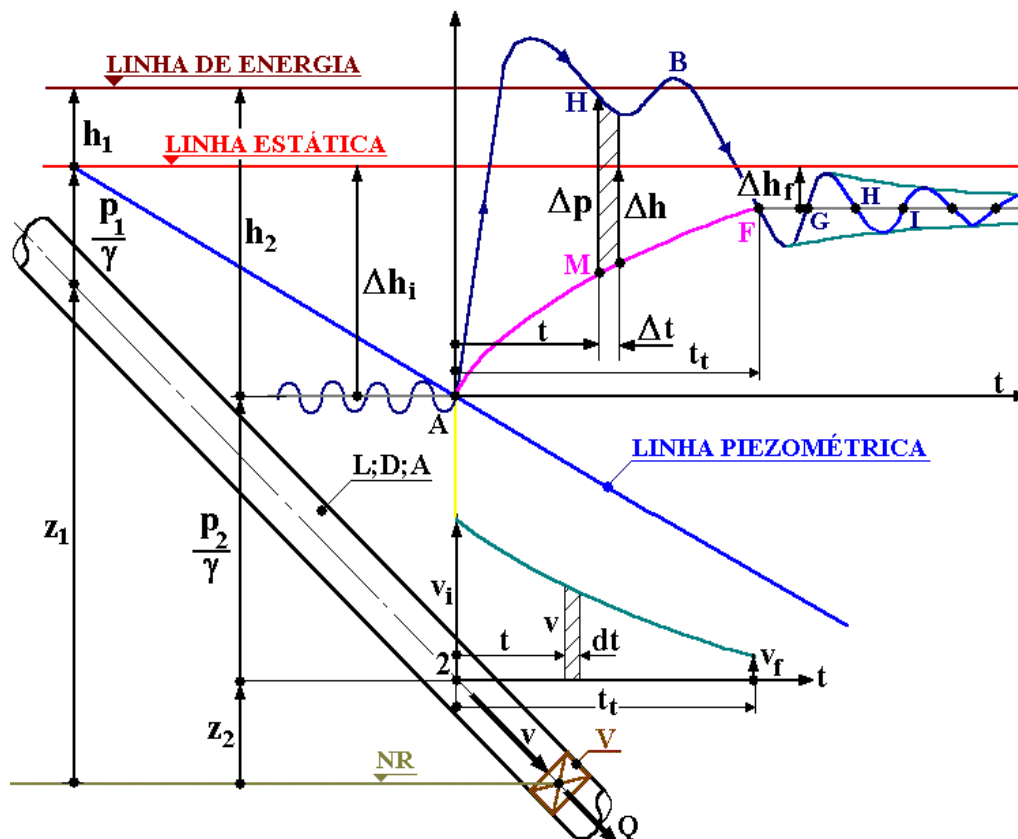


Figura 1 - Características geométricas, cinemáticas e dinâmicas do método de Gibson

Sendo assim, a vazão - Q (m^3/s) - poderá ser calculada desde que, previamente, seja conhecida a vazão residual - q (m^3/s) - e a área do diagrama - Ad - delimitada pelo segmento (A,B,F,A), a qual para ser determinada, exige o conhecimento da linha AF que pode ser traçada, considerando que a perda de carga e energia cinética, variam proporcionalmente com o quadrado das vazões [7].

Um aspecto crítico para a realização dos cálculos e fundamental para o sucesso da aplicação do método de Gibson sendo, inclusive, fonte de divergência entre normais internacionais, é a determinação dos limites de integração. No entanto, em função de sucessivos casos estudados pelo autor, tem-se observado que há uma certa liberdade na escolha destes limites. Como o que se deseja, como produto final, é calcular a área do diagrama, quando se trabalha com valores médios, tem-se que oscilações que resultem em áreas acima da linha de variação de pressão são cancelados por oscilações que provoquem áreas abaixo da linha média. Com isto, resulta que somente haverá área significativa durante a sobre-pressão causada pelo fechamento da válvula. Sendo assim, a identificação do limite inicial e final de integração pode ser qualquer um desde que estejam, o máximo possível, afastados à direita e à esquerda do diagrama diferencial de sobre-pressão.

Outra questão que provoca dificuldade na obtenção da vazão é a determinação da vazão residual. O conhecimento do seu correto valor é de fundamental importância, uma vez que este atua diretamente sobre o valor da vazão calculada. No entanto, a sua identificação depende muito das condições físicas da instalação e do arranjo da central, além do fato de que os fatores que influenciam no seu valor muitas vezes se caracterizam por serem variáveis não controláveis. Uma proposta alternativa para a determinação da vazão residual é apresentada a seguir.

DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Como colocado anteriormente, a determinação da vazão residual é fundamental para o sucesso do emprego no método de Gibson para a medição de vazão em centrais hidrelétricas. Esta vazão residual surge principalmente em função da não estanqueidade do elemento restritor de fluxo, normalmente, o próprio distribuidor da turbina controlado pelo regulador de velocidade. Em geral, a eliminação total do fluxo é garantida por uma válvula localizada a montante da turbina hidráulica, cujo acionamento é feito quando, por segurança, deseja-se colocar o grupo gerador totalmente fora de operação.

É importante observar que esta válvula é dimensionada para suportar até mesmo um golpe de aríete provocado pelo seu fechamento em condições extremas de emergência, mesmo que, dificilmente, esta condição venha a ocorrer. O procedimento operacional em condições de emergência preconiza a redução do fluxo através do fechamento das pás do distribuidor para, depois de alguns segundos, quando o fluxo já assume valores muito pequenos, com intensidades da ordem do valor da vazão de fuga, aciona-se a válvula.

Com isso observa-se a redução da velocidade de fluxo desde o seu valor de operação (v_0) até zero em dois estágios. O primeiro estágio é feito pelo fechamento das pás do distribuidor e o segundo pelo fechamento da válvula a montante da turbina, nos tempos t_0 e t_2 , respectivamente, como ilustrado esquematicamente na figura a seguir.

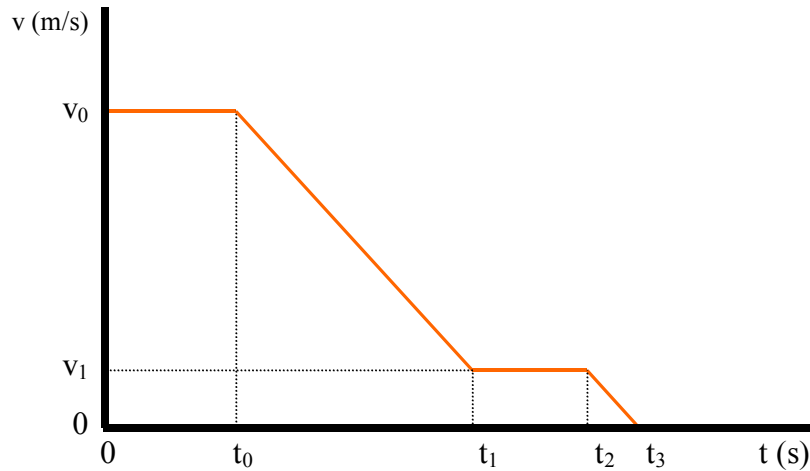


Figura 2 - Decaimento da velocidade de escoamento em duas etapas

Esta redução de velocidade em dois estágios irá provocar dois diagramas de pressão diferencial, um principal e outro secundário, de acordo com a equação (2), com áreas proporcionais à redução de velocidade, resultando nas expressões (4) e (5).

$$v_0 = (v_0 - v_1) + (v_1 - 0) = \frac{g}{L} \cdot \left(\int_{t_0}^{t_1} \Delta p \cdot dt + \int_{t_2}^{t_3} \Delta p \cdot dt \right) \quad (4)$$

A vazão fica:

$$Q = v_0 \cdot A = \frac{g}{L} \cdot (A_{d1} + A_{d2}) \cdot A \quad (5)$$

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

A metodologia proposta foi aplicada durante os ensaios de recepção da pequena central hidrelétrica Alto Jauru de propriedade da Arapucel S/A [6]. A figura 3 mostra o arranjo do ensaio, apresentando os condutos forçados preparados para a medição da pressão diferencial.

Os diâmetros internos da tubulação e as distâncias entre as tomadas de pressão são, respectivamente, 3,2 (m) e 20,0 (m). A aceleração local da gravidade foi obtida de 9,783 (m/s^2). Utilizando um sistema de medição baseado em um computador portátil dotado de um cartão de aquisição de dados PCMCIA.



Figura 3 - Instalações para a medida de vazão usando o método de Gibson

Foram feitos alguns registros de diagrama pressão-tempo em condições específicas de carga. As figuras 4(a) e 4(b) mostram os diagramas obtidos para a condição de 90% de carga para as máquinas #1 (dois registros) e #2 (três registros), respectivamente.

Nestas figuras pode-se observar a sobre-pressão principal decorrente do fechamento do distribuidor da turbina hidráulica e a sobre-pressão secundária, de menor intensidade, mostrada também no detalhe,

resultante do fechamento da válvula de segurança, que se dá cerca de 20 segundos após o fechamento do distribuidor.

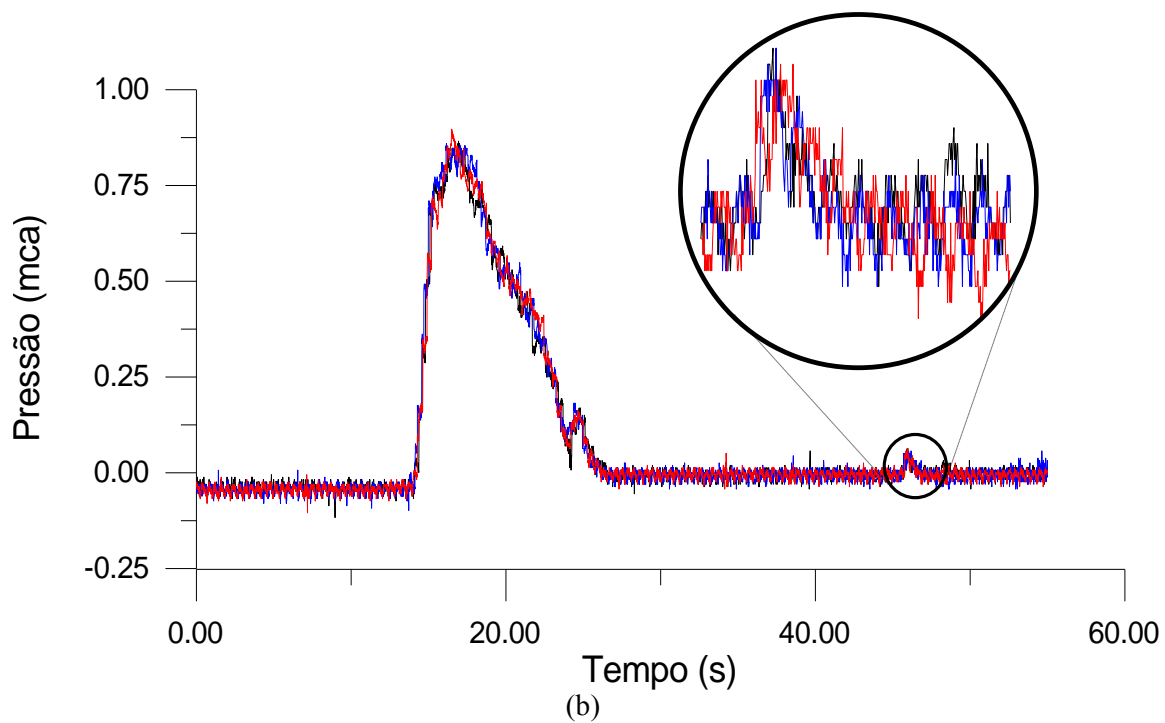
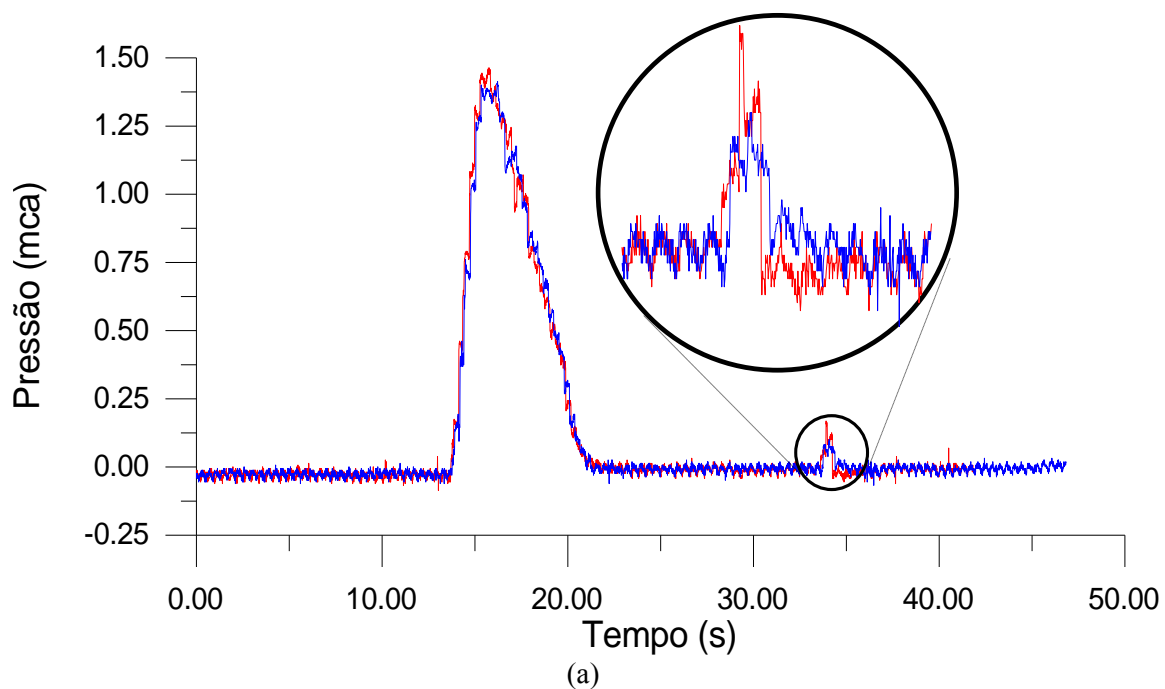


Figura 4 - Diagramas pressão-tempo

As áreas sob estas curvas são proporcionais às vazões a serem determinadas, de modo que a relação entre a área menor e a área total dá uma idéia do valor percentual da vazão de fuga. Aplicando-se estes dados ao software desenvolvido que implementa o método proposto, obtêm-se as tabelas 1 e 2 que sumarizam os resultados das análises destes diagramas.

Tabela 1 – Análise do diagrama pressão-tempo para a máquina #1

	Máquina #1	A_{d1} (m.s)	A_{d2} (m.s)	q (m³/s)	Q (m³/s)	q (%)
Registro 1	5,6885	0,0573		0,2260	22,6716	1,008
Registro 2	5,5680	0,0491		0,1936	22,1638	0,873
Média	5,6283	0,0532		0,2098	22,4177	0,936
Std Dev	0,0852	0,0058		0,3590	1,096	

Tabela 2 – Análise do diagrama pressão-tempo para a máquina #2

	Máquina #2	A_{d1} (m.s)	A_{d2} (m.s)	q (m³/s)	Q (m³/s)	q (%)
Registro 1	5,3473	0,0372		0,1467	21,2463	0,690
Registro 2	5,5037	0,0307		0,1213	21,8378	0,555
Registro 3	5,5937	0,0287		0,1130	22,1848	0,509
Média	5,4816	0,0322		0,1270	21,7563	0,584
Std Dev	0,1247	0,0044		0,0176	0,4745	0,094

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A norma internacional IEC estabelece um produto velocidade-comprimento mínimo de 50 (m²/s) [3]. Nenhuma informação, no entanto, apresenta a origem deste valor. Entretanto, o autor freqüentemente emprega a simples fórmula a seguir para estimar a máxima diferença de pressão a ser observada durante a aplicação do método de Gibson.

$$\Delta P_{\max} = \frac{L \cdot v_0}{g \cdot t_v}$$

Através desta expressão fica claro que quanto maior o produto $L \cdot v_0$, maior será a diferença de pressão observada. Considerando que a velocidade média em uma tubulação de aço em centrais hidrelétricas é da ordem de 3 (m/s), t_v de 10 (s) e um comprimento mínimo de 10 (m), resulta em uma máxima diferença de pressão de aproximadamente 0,3 (m). Se o valor 50 (m²/s) for aplicado conforme preconizado em norma, obtém-se uma diferença de pressão máxima de 0,5 (m), valor este facilmente detectado pela sensibilidade dos modernos sensores de pressão diferencial.

Existem casos em que mesmo para um produto $L \cdot v_0$ pequeno, pode-se obter elevadas pressões diferenciais reduzindo-se substancialmente o tempo de fechamento dos distribuidores. Neste sentido as normas poderiam sofrer uma atualização no sentido de incluir o tempo de fechamento e considerar propriamente o seu efeito sobre a pressão diferencial. Esta questão é particularmente interessante do ponto de vista do diagrama de pressão secundário, onde um rápido fechamento da válvula garantiria pressões da mesma ordem de grandeza das obtidas na maioria dos diagramas de pressão primárias, mesmo com uma reduzida vazão de fuga.

CONCLUSÕES

A metodologia apresentada permite a determinação da vazão de fuga em centrais hidrelétricas aproveitando o diagrama pressão-tempo obtido durante os testes empregando o método de Gibson, desde que uma válvula de segurança possa ser operada segundos após o fechamento do distribuidor da turbina hidráulica.

O método se mostrou bastante preciso em função da excelente repetitividade apresentada. Uma maior exatidão dos resultados poderá ser obtida com o aumento da distância entre as tomadas de pressão, resultando em uma maior diferença de pressão durante o transitório hidráulico principal e secundário ou com uma redução do tempo de fechamento da válvula.

O arranjo da central, isto é, se é uma central de represamento ou uma central de desvio com câmara de carga ou chaminé de equilíbrio, influenciará decisivamente sobre o intervalo de tempo entre o fechamento do distribuidor e o fechamento da válvula necessário para se obter resultados confiáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N.R. Gibson; "The Gibson method and apparatus for measuring the flow of water in closed conduits". Paper No 1903, *Transaction of the ASME-45*, pp. 343-392, 1923.
- [2] ABNT; "P-4:07.02-020 - Turbinas Hidráulicas - Aceitação no Campo". *Associação Brasileira de Normas Técnicas*. RJ- Brasil, 1998.
- [3] IEC; "IEC-41-1991-11 - Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines". *International Electrotechnical Commission*. Swiss, 1991.
- [4] ASME; "ASME PTC-18 – Hydraulic Turbines – Performance Test Code 18". NY-USA, 1992.
- [5] C. Tran; J.M. Lévesque; "Hydro-Québec's experience on turbine flow and efficiency measurements by the pressure-time method". *16th Symposium of the IAHR*. São Paulo, Brasil, 1992.
- [6] C.W. Almquist; P.A. March; J.F. Kirkpatrick; "Modernizing the Gibson method of flow measurement". *Hydro Review*, june 1990, pp. 86-91.
- [7] E.C. Bortoni; Z. Souza; A.H.M. Santos; "Modernização do método de Gibson para medição de vazões" in *IV ELAF - Encontro Latino-Americano em Fluidomecânica*. Itajubá/MG - Brasil, 1997.
- [8] G.L. Tiago Filho; E.C. Bortoni; A. Stano; "Ensaio de rendimento da PCH Alto Jauru (Relatório)". *Fapepe*, 2003.