

Levantamento de Incertezas no Cálculo do Rendimento de um Grupo Gerador

Fonseca, A. R. Barroso, M. F. S.† / Soares, W. T. T. / Martinez, C.B. ‡ / Torres, L. A. B. † / Aguirre, L. A. †

‡Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos da UFMG

† Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica da UFMG

Avenida Presidente Antônio Carlos 6627, Pampulha, Belo Horizonte - MG. / CEP: 31270-010

Contato: aguirre@cpdee.ufmg.br

RESUMO

Na operação de uma usina hidrelétrica, a curva de rendimento dos grupos geradores pode vir a ser uma importante variável de auxílio na tomada de decisões. Por exemplo, conhecendo-se em que faixas de operação o rendimento é baixo, pode-se tentar evitar operar o sistema nessas condições.

O presente trabalho relata alguns resultados de um estudo de caso correspondente ao único grupo gerador existente na Usina de Ervália, MG, pertencente à Companhia Força e Luz Cataguazes Leopoldina. O objetivo é quantificar como as incertezas associadas às variáveis usadas na determinação do rendimento se refletem no valor final.

Devido à sua complexidade, não é prático tentar avaliar a influência das incertezas de forma analítica. No presente trabalho, por meio de simulações Monte Carlo, quantifica-se qual é o efeito, sobre o rendimento do grupo gerador, das incertezas associadas às variáveis usadas no cálculo. Na prática, esse conhecimento será útil para associar uma margem de confiança ao rendimento determinado. Uma das variáveis mais fundamentais no cálculo de rendimento é a vazão aduzida. Como tal variável não era medida pela Companhia, na primeira etapa deste trabalho desenvolveu-se um sistema de medição de vazão aduzida.

A metodologia seguida no trabalho é baseada em simulações Monte Carlo [5,7,8] uma vez que, devido à complexidade associada às equações no cálculo do rendimento, não é viável procurar uma expressão analítica que descreva o efeito das incertezas em cada variável independente sobre a variável dependente (o rendimento). A cada uma das variáveis de interesse é associada uma função de probabilidade. A média e variância de tais distribuições são ajustadas pelo usuário em função de testes e ensaios feitos em campo e no laboratório. No presente trabalho, todas as funções foram consideradas gaussianas. O resultado é uma função de probabilidade do rendimento cujas características estatísticas dependem das incertezas em cada variável independente.

Os resultados são úteis não apenas para fornecer um valor de rendimento com uma margem de confiança, mas também para detectar qual das variáveis independentes tem maior influência sobre o rendimento. Essa indicação será fundamental para efetuar futuros ajustes no sistema de determinação de rendimento.

I. INTRODUÇÃO

O rendimento de um grupo gerador depende de uma série de fatores que variam ao longo do tempo e que dependem de decisões de operação. É de interesse da Companhia Força e Luz Cataguazes Leopoldina ter a possibilidade de medir o rendimento de seus grupos geradores periodicamente, ou mesmo em tempo real (on line).

Com o objetivo de determinar o rendimento do grupo gerador citado foi desenvolvido um sistema de medição de vazão aduzida [2]. Optou-se por um sistema baseado em tubo de Pitot do tipo Cole em conjunto com um sensor de pressão diferencial do tipo piezoresistivo [2,4]. O valor medido é enviado para um microcomputador do tipo PC. Equações foram desenvolvidas para a determinação do rendimento via software. Tais equações fazem uso de variáveis tais como: vazão aduzida, perda de carga na tubulação de adução, parâmetros de calibração do tubo de Pitot, entre outros.

II. CÁLCULO DO RENDIMENTO

A partir da medição do valor da diferença de pressão oriunda do Pitot, determina-se, como será visto na seção 3, o valor da velocidade da água no centro da tubulação e do fator de velocidade. Para a realização desses ajustes, utilizam-se dados coletados experimentalmente [3].

O fator de velocidade quantifica quão plano é o perfil de velocidades dentro do tubo. Se o perfil fosse completamente plano, o valor do fator de velocidade seria 1. À medida que o fator de velocidade diminui, significa que o perfil torna-se mais pontiagudo [2]. A necessidade desse fator se deve ao fato que a pressão diferencial observada na saída do Pitot está relacionada ao quadrado da velocidade (não da vazão) do fluido no ponto em que o Pitot está instalado. De posse da velocidade central (v_c) e do fator de velocidade (F_v), é possível calcular o valor da vazão da seguinte forma [6]:

$$Q = F_v V_c C_{Pitot} \quad (1)$$

sendo que C_{Pitot} é um coeficiente constante relacionado ao Pitot, determinado experimentalmente. A potência bruta disponível na entrada do ducto (no nível da soleira do vertedouro) é

$$P_b = gH_t Q \quad (2)$$

sendo que g é a aceleração da gravidade e H_t é altura total.

Para o cálculo da potência que é efetivamente entregue ao turbo-gerador, potência líquida, é necessário descontar da potência bruta a perda de carga ao longo da tubulação [2]. Logo, a potência líquida é dada por:

$$P_l = g(H_t - \Delta_{hf}) Q \quad (3)$$

Assim, à semelhança da velocidade central e o fator de velocidade, a perda de carga (Δ_{hf}) é ajustado a partir de dados experimentais.

Finalmente, o rendimento é dado por

$$\eta = \frac{P_e}{P_l} \times 100 \quad (4)$$

sendo P_e a potência elétrica gerada, valor este disponível.

A Figura 1 resume a seqüência de passos necessários para a determinação do rendimento do turbo-gerador a partir da medição da pressão diferencial do Pitot e da potência elétrica produzida.

A Δ_p é associada uma distribuição normal com média igual ao valor em que se deseja avaliar a incerteza e com desvio padrão de 2% do fundo de escala (1200 mmH2O), conforme as especificações do equipamento utilizado para sua medição [2]. A partir das distribuições de Δ_p , são geradas novas distribuições associadas aos valores de F_v e V_c , obtidas usando-se as funções ajustadas. Ou seja, para cada valor de F_v e V_c , obtida de uma dada distribuição, é calculado o valor ajustado das variáveis dependentes e é somado a esse valor uma componente aleatória com desvio padrão igual àquele determinado pelo ajuste dos dados experimentais. O mesmo procedimento é feito para se conseguir uma distribuição para a partir da distribuição gerada para.

Os ajustes utilizados podem ser polinomiais ou exponenciais. O ajuste polinomial consiste em encontrar o polinômio que se ajuste aos pontos coletados minimizando o erro quadrático das distâncias entre os pontos coletados e o polinômio [1]. O procedimento para se determinar tais ajustes é mostrado na Figura 2. V_c

O ajuste exponencial pode ser entendido como um ajuste polinomial de variáveis transformadas (logaritmicamente). Ou seja, o ajuste é feito no plano $\ln(y) \times \ln(x)$, em que y é a variável dependente e x é a variável independente. O ajuste exponencial pode ser definido por um polinômio de qualquer ordem no plano

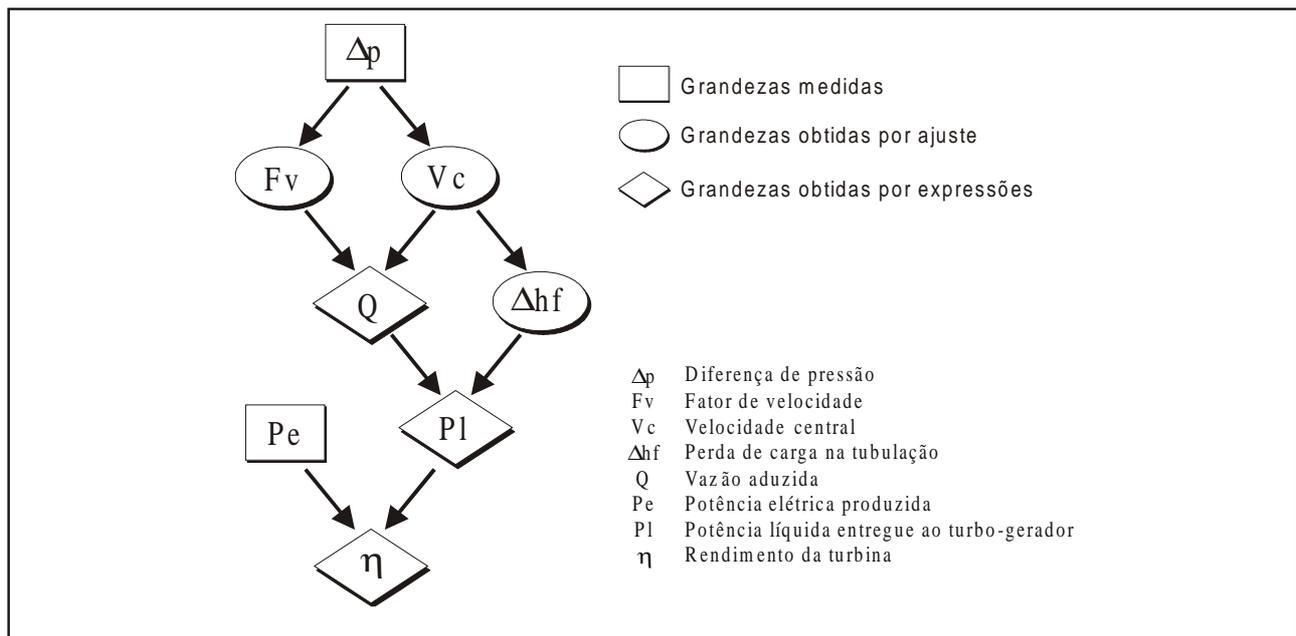


FIGURA 1: Passos para o cálculo do rendimento

III. DETERMINAÇÃO NUMÉRICA DA INCERTEZA

Para calcular a incerteza associada ao rendimento, é necessário o estudo da incerteza associada a cada uma das variáveis usadas no cálculo descrito na seção 2.

logarítmico. Se a ordem for maior do que dois a função resultante não tem inversa. Por outro lado, se o polinômio for uma reta, então é fácil encontrar uma expressão do tipo $y = ax^b$. O programa desenvolvido faz esse tipo de ajuste genericamente como na Figura 2.

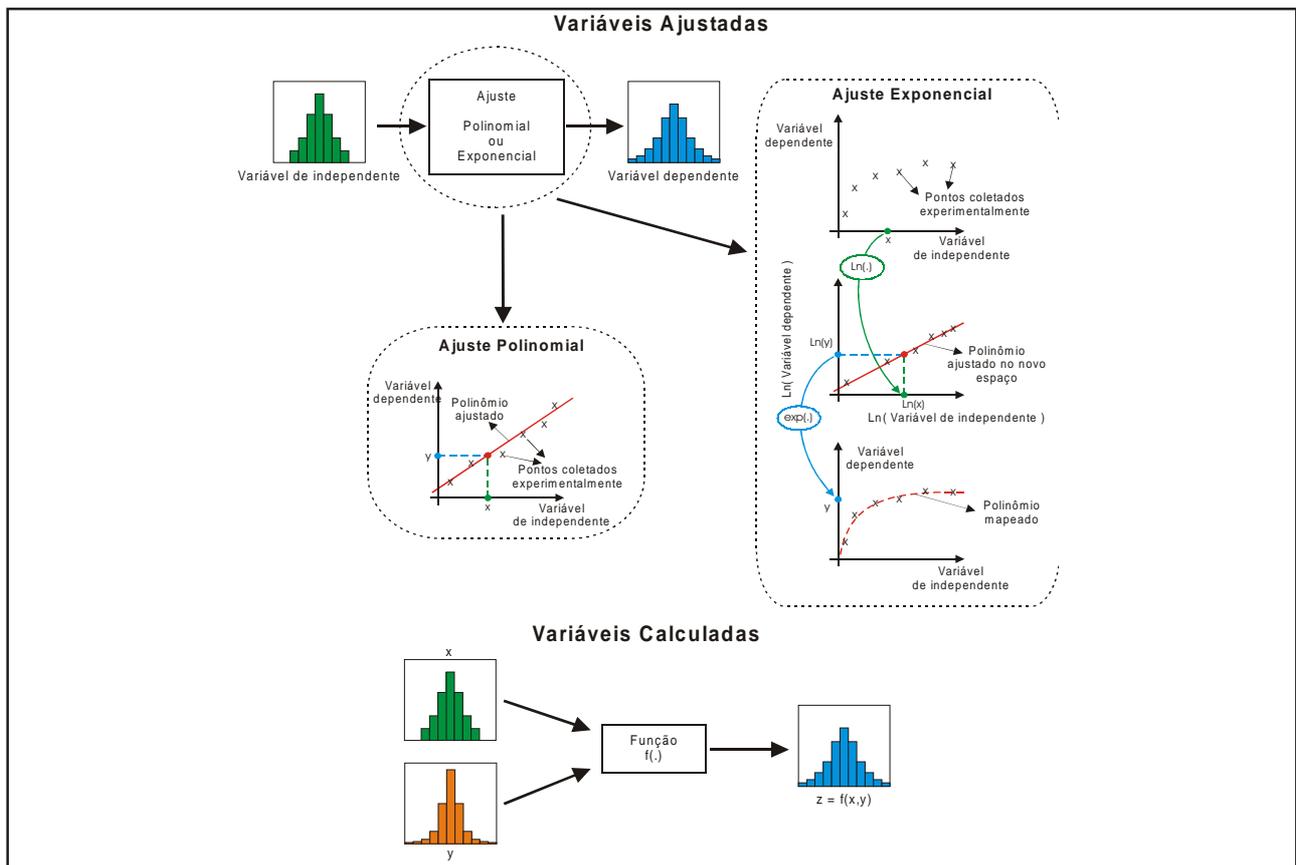


FIGURA 2: Esboço da obtenção das variáveis ajustadas e calculadas.

As variáveis restantes (Q , Pl e η) não são obtidas por meio de ajustes de curvas e sim analiticamente através de equações físicas, como visto na seção 1. O cálculo de funções de probabilidade associadas a essas variáveis também é ilustrado pela Figura 2. Se z representa uma dessas variáveis e, além disso, x e y representam as variáveis independentes, ou seja, $z = f(x,y)$, calcula-se numericamente uma distribuição de pontos para z a partir de distribuições de x e de y .

Para obter as distribuições associadas a P_e , optou-se por coletar uma série de dados históricos e realizar um ajuste de curva entre Δ_p e P_e . Finalmente, para cada ponto de operação (definidos, por exemplo por Δ_p tem-se uma distribuição de probabilidade para o rendimento η .

IV. O PROGRAMA E EXEMPLO SIMULADO

Todos os cálculos descritos, bem como o procedimento seguido, foram implementados em um programa que roda na plataforma MATLAB, que permite um ambiente gráfico muito conveniente.

Apesar de ser uma linguagem interpretada, a velocidade de execução é suficiente para se avaliar um conjunto de milhares de realizações em poucos segundos em um micro computador do tipo PC convencional.

Além disso, o programa é bastante interativo com o usuário, que pode facilmente avaliar a influência, sobre o rendimento calculado, do uso de instrumentos com melhor ou pior precisão. Em sendo assim, a presente ferramenta, que surgiu como sub-produto do procedimento de cálculo

de rendimento e sua incerteza associada, passa a ser útil para o setor de instrumentação e automação da Companhia.

Como ilustração, a Figura 3 mostra algumas distribuições de Δ_p e Q . A partir da geração de várias distribuições de Δ_p pode-se traçar a curva da Figura 4 que relaciona Q e Δ_p .

As curvas pontilhadas da Figura 4 definem a faixa de confiança de 95%, correspondente a mais e menos dois desvios padrão, uma vez que foi assumido que a distribuição de probabilidade é gaussiana. Essa margem de confiança é determinada numericamente a partir da variância de cada uma das distribuições de Q que foram usadas [7].

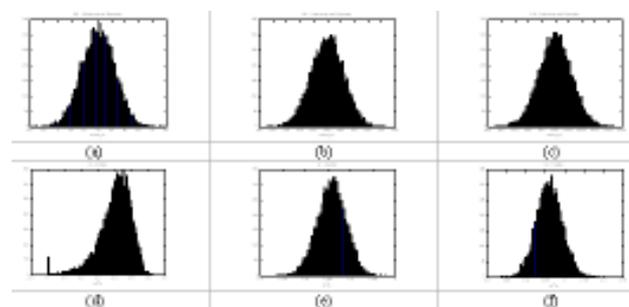


FIGURA 3 - Os gráficos (a), (b) e (c) representam distribuições de diferença de pressão geradas em torno de 30, 150 e 1000 mmH₂O, respectivamente. Os gráficos (d), (e) e (f) representam as distribuições para as vazões que foram calculadas a partir das distribuições (a), (b) e (c). Apesar da distribuição em (a) ser gaussiana, a distribuição (d) não o é. Isso se deve ao comportamento do Pitot para baixos valores de velocidade [4]. Ver também Figura 4.

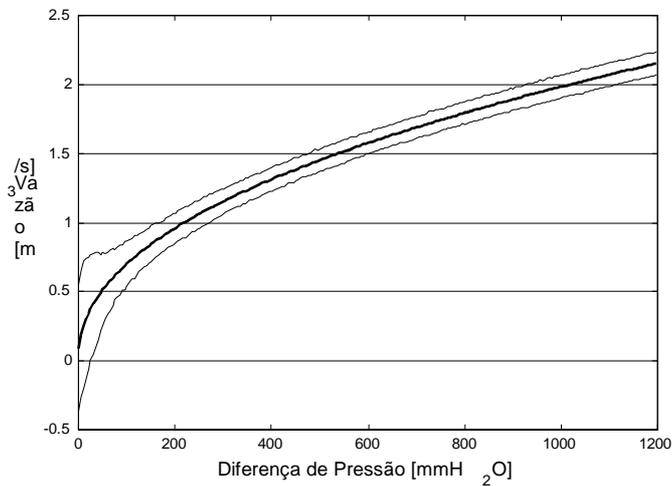


FIGURA 4 - Curva de vazão gerada a partir da geração de sucessivas distribuições de diferença de pressão e de vazão como ilustradas na Figura 3. As linhas pontilhadas representam a faixa de confiança definida por mais e menos dois desvios das distribuições de probabilidade de vazão, para cada valor de Δ_p

A Figura 5 mostra a curva do rendimento em função da potência elétrica gerada. A incerteza do rendimento para valores abaixo de 2300kW é grande em função da grande incerteza associada ao Δ_p fornecido pelo Pitot, conforme é constatado na literatura [4]. Essa figura sugere que o rendimento do grupo turbo-gerador pode ser inferior a 90% em níveis de carga inferiores a 3MW. A rigor, em 3MW o rendimento esperado pode variar entre 87% a 94%, com maior probabilidade em 90,5%. Vale a pena notar o aumento de incerteza associado valores mais baixos de carga. Isso se deve ao aumento de incerteza na medição de vazão aduzida.

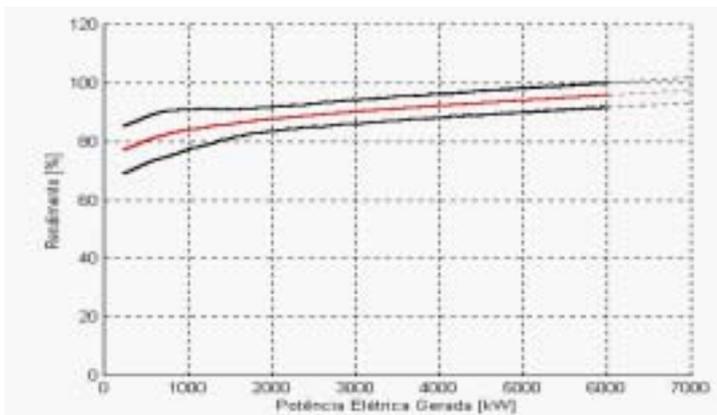


FIGURA 5 - Resultado do cálculo de rendimento em função da potência elétrica gerada. A curva central corresponde ao valor médio das distribuições determinadas por simulação Monte Carlo e as faixas laterais correspondem aproximadamente a mais e menos dois desvios padrão. A potência nominal do conjunto turbo-gerador é de 6,8MW.

V. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O desempenho da ferramenta desenvolvida é influenciado pelos diversos ajustes de curva feitos ao longo do cálculo. Depois de exaustivas simulações observou-se um melhor desempenho para ajustes exponenciais de ordem um. Possivelmente essa constatação se deve ao fato de se ter relativamente poucas medidas (em torno de sete a dez) para cada ajuste. O levantamento de dados em campo mostrou-se uma tarefa difícil e demorada, mas compensadora. Entende-se que uma coleta de dados exaustiva seria importante para melhorar a qualidade dos ajustes realizados.

O ajuste da potência elétrica gerada em função da diferença de pressão é o que mostrou maior influência no cálculo final do rendimento. Assim, em futuras coletas de dados, essa variável deve receber especial atenção. O fator de velocidade, por sua vez, mostrou ser uma das variáveis cuja incerteza também influencia fortemente o cálculo da vazão aduzida e conseqüentemente do rendimento.

Algumas mudanças importantes a serem investigadas no futuro são: levantamento experimental de aproximações para as funções de probabilidade, ao invés de considerá-las gaussianas. Levantamento detalhado da precisão do equipamento utilizado para medição de pressão diferencial por faixa de operação, ao invés de considerar que sua precisão é constante e igual a 2%, que na realidade é a precisão média.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao corpo técnico da Companhia Força e Luz Cataguazes Leopoldina pela assistência nos procedimentos de medição em campo.

VII. BIBLIOGRAFIA

- [1] AGUIRRE, L. A. Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2000.
- [2] AGUIRRE, L. A., MARTINEZ, C. B. Estudo de um Sistema de Vazão Aduzida em Máquinas Hidráulicas: Relatório do ciclo 2000-2001. Belo Horizonte, 2002.
- [3] ANDRADE, L. A. Calibração de um tubo de Pitot Cole para a medição de grandes vazões utilizando anemometria LASER. 2002. (Dissertação de Mestrado, PPGEMM) - Universidade Federal de Minas Gerais.
- [4] DOEBELIN, E. O. Measurement Systems: Application and Design. New York: McGraw-Hill, 1990.
- [5] PEREIRA, M. V. F. et al. Monte Carlo Based Composite Reliability Evaluation: Modeling Aspects and Computational Results, in Reliability Assessment of Composite Generation and Transmission Systems. IEEE Tutorial Course 90EH0311-1-PWR, 1990.
- [6] MARTINEZ, C. B. et al. Sistema automático para medição de rendimento de grupos hidro-geradores aplicado a pequenas centrais hidrelétricas. In SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2001.
- [7] MEYER, P. L. Probabilidade: Aplicações à Estatística. 2ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 1983.
- [8] SALDERI, L. Monte Carlo Simulation Techniques, In Reliability Assessment of Composite Generation and Transmission System, IEEE Tutorial Course 90EH0311-1-PWR, 1990.