

**GRUPO - GGH**

**GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH**

**DETERMINAÇÃO NUMÉRICA DA PERDA DE CARGA DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO DE HIDROGERADORES COM VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL (MEDIÇÕES DE CAMPO)**

**Claudinei de Moura Altea (\*)**  
Voith Hydro / Escola Politécnica – USP

**Jurandir Itizo Yanagihara**  
Escola Politécnica – USP

**Marcelo da Silva Miranda**  
Voith Hydro

**RESUMO**

Neste trabalho apresenta-se a validação de um método numérico aplicado ao sistema de ventilação de hidrogeradores, comparando os resultados numéricos e dados experimentais obtidos a partir de medições de campo. O objeto de estudo é limitado à região mais importante do sistema de ventilação (canais de ventilação do núcleo do estator) para obter resultados de coeficiente de perda de carga. São apresentadas informações básicas sobre os parâmetros do cálculo numérico e estende-se com mais detalhes sobre a pioneira medição de campo da pressão do sistema de ventilação, realizada em um protótipo de hidrogerador a fim de se obter a perda de carga do escoamento entre os diâmetros interno e externo do núcleo do estator. Efetuada a comparação entre resultados numéricos e experimentais e observada considerável diferença entre eles, fica evidenciado que a hipótese mais razoável para este resultado é atribuída às altas incertezas das medições de campo. Finalmente, conclui-se que os resultados da comparação ajudam no entendimento do sistema de ventilação e que o potencial de melhoria deste estudo passa pela minimização das incertezas de medição por meio do desenvolvimento de tomadas de pressão definitivas.

**PALAVRAS-CHAVE**

Sistema de ventilação, cálculo numérico, medições de campo, perdas de ventilação.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Nos trabalhos de Altea et al. [1] e Altea e Yanagihara [2], é comentada a importância e a motivação para o estudo das perdas de ventilação, apresentando uma validação do cálculo numérico por dados experimentais publicados pela referência de Wustman [3]. No presente trabalho, tem-se uma sequência deste estudo, com o diferencial que a validação se dá por comparação com medições de campo, com diferenças notáveis na geometria da cunha frontal do estator (Figura 1.1), o que impacta significativamente na perda de carga no escoamento na entrada dos canais de ventilação. Os estudos mencionados ([1], [2]) e do presente trabalho, fazem parte de um projeto mais abrangente com o objetivo de melhorar o cálculo analítico do sistema de ventilação de hidrogeradores, publicado por Altea [4].

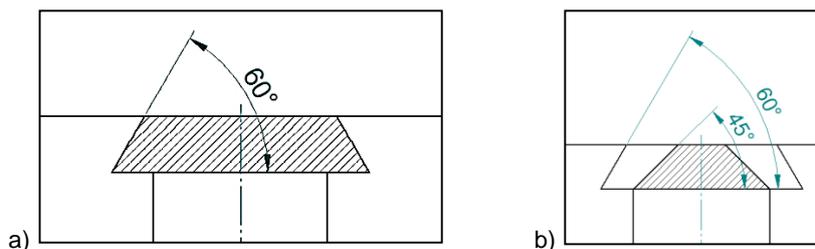


Figura 1.1 – a) Cunha frontal sem alívio (modelo de [1] e [2]). b) Cunha frontal com alívio (estudo atual).

## 2.0 - CÁLCULO NUMÉRICO

As simulações numéricas foram realizadas considerando escoamento isotérmico, tridimensional, em regime permanente, incompressível e turbulento para o ar de arrefecimento, o qual foi definido como um fluido Newtoniano com propriedades constantes. Para resolver as equações governantes do escoamento, cálculos numéricos foram realizados utilizando um código comercial (ANSYS CFX 14.5 [5]), que é baseado no método dos volumes finitos. Como a média temporal das propriedades do escoamento satisfaz as necessidades deste trabalho, os cálculos do escoamento turbulento foram realizados com procedimentos baseados nas equações de “*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*” (RANS). Como modelo de turbulência foi selecionado o SST (*Shear-Stress Transport*) K-Omega, conforme Menter [6].

### 2.1 Domínio Computacional, Condições de Contorno e Malha de Discretização

O cálculo numérico aplicado neste trabalho considera a geometria da região de interesse, a saber: 1 (um) Canal de Ventilação do Núcleo do Estator, Entreferro e Região a Jusante do Estator, como mostra a Figura 2.1 a. O domínio computacional é estendido a jusante cinco vezes para permitir a utilização da condição de contorno de saída de escoamento estabilizado.

As superfícies que definem os limites do volume modelado com as células vizinhas do lado superior e inferior foram conectadas entre si, tanto na região do entreferro como na região estendida à jusante. Na superfície de entrada do escoamento, foi aplicada ao fluido uma velocidade em componentes radial e tangencial, de acordo respectivamente com a velocidade rotacional do hidrogerador e a vazão de ar medida na saída do trocador de calor. Na superfície de saída, foi considerado um escoamento totalmente desenvolvido pela aplicação da condição de contorno de pressão de referência uniforme. Devido à elevada componente tangencial da velocidade do fluido na região do entreferro, e a remanescente componente tangencial da velocidade na região estendida à jusante do estator, as superfícies tangenciais estão acopladas com a condição de contorno de periodicidade rotacional (Figura 2.1 b).

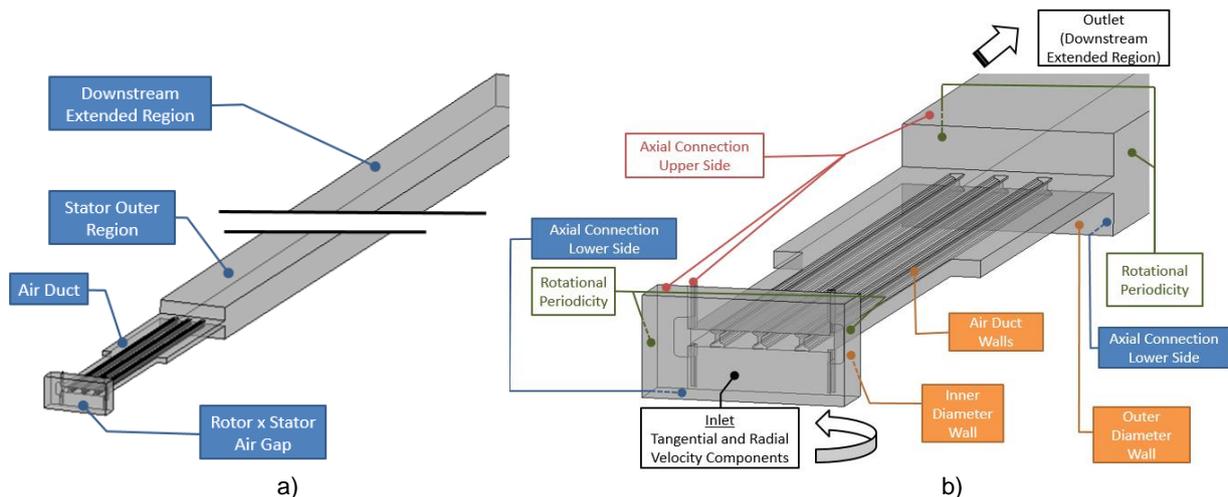


Figura 2.1 – a) Domínio computacional. b) Condições de contorno aplicadas ao canal de ventilação.

Em todas as interfaces entre o volume do canal de ventilação e os corpos sólidos (chapas do núcleo, espaçadores do canal de ventilação, isolamento da barra condutora e cunha frontal) foi aplicada a condição de conexão *Fluid X Solid*.

A malha aplicada às simulações numéricas é bloco-estruturada, com arestas concordantes, células O-grid nas camadas limites, com 847443 nós, 956680 células hexaédricas e foi criada com o código ANSYS ICEM V14.5 [7].

### 2.2 Resultados Numéricos

A simulação numérica pôde ser executada em 7 horas e 19 minutos, utilizando um computador com 4,00 GB de memória RAM e um processador de 2.10 GHz. Os resultados numéricos apresentados na Figura 2.2 foram obtidos aplicando um critério de convergência de resíduos para as equações do escoamento inferior a  $10^{-4}$ .

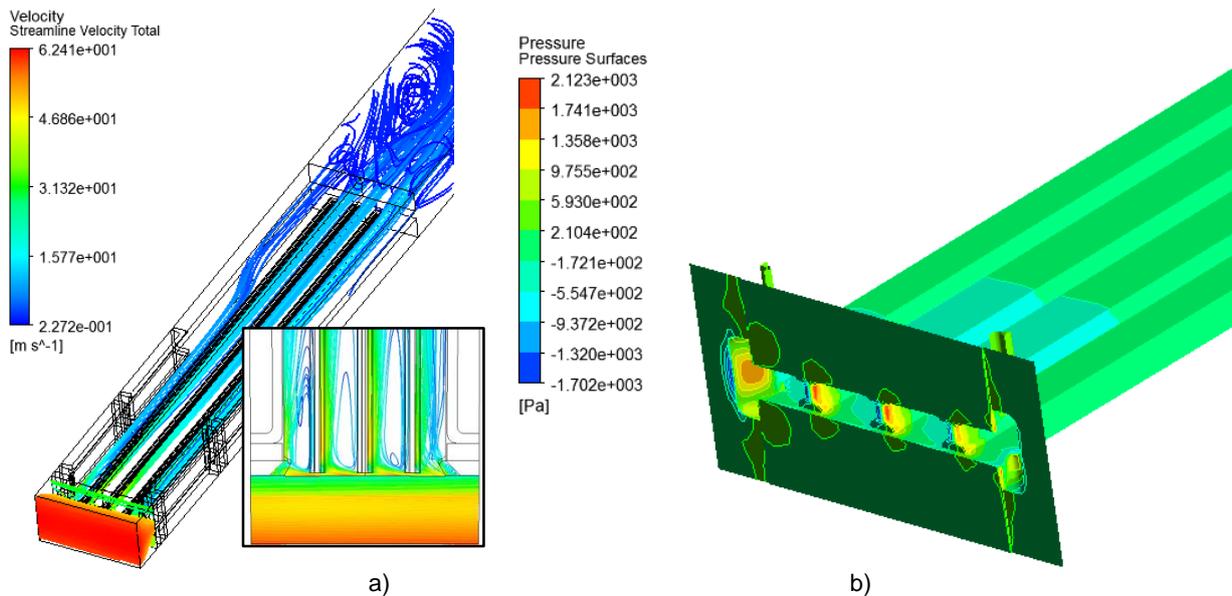


Figura 2.2 – a) Velocidade das linhas de corrente no núcleo do estator. b) Pressão estática.

### 3.0 - DADOS EXPERIMENTAIS

Os dados de referência utilizados para a validação do método numérico são resultados das medições de campo executadas em um hidrogenerador da UHE Teles Pires, que possui 96 polos salientes no rotor, 720 ranhuras no estator, frequência de rede de 60 Hz e rotação nominal de 75 RPM. A UG05 (Unidade Geradora número 5) desta usina foi equipada durante sua montagem para que, em funcionamento, fosse possível medir a perda de carga do ar entre os diâmetros interno e externo do estator.

#### 3.1 Desenvolvimento de Procedimentos e Dispositivos de Medição

Devido ao cronograma de montagem e comissionamento exíguo para este projeto, o que é normalmente exigido para um adequado retorno de investimento de um empreendimento desta magnitude, todos os procedimentos especiais para as medições, e a instalação de dispositivos para esta finalidade, foram pensados para um impacto mínimo, utilizando curtas janelas de paradas no planejamento de montagem e comissionamento.

Portanto, o plano de execução das medições e procedimento de instalação dos dispositivos (tomadas de pressão) foram previamente desenvolvidos e testados na fábrica, utilizando chapas do núcleo do estator de um projeto similar, conforme mostrado na Figura 3.1.

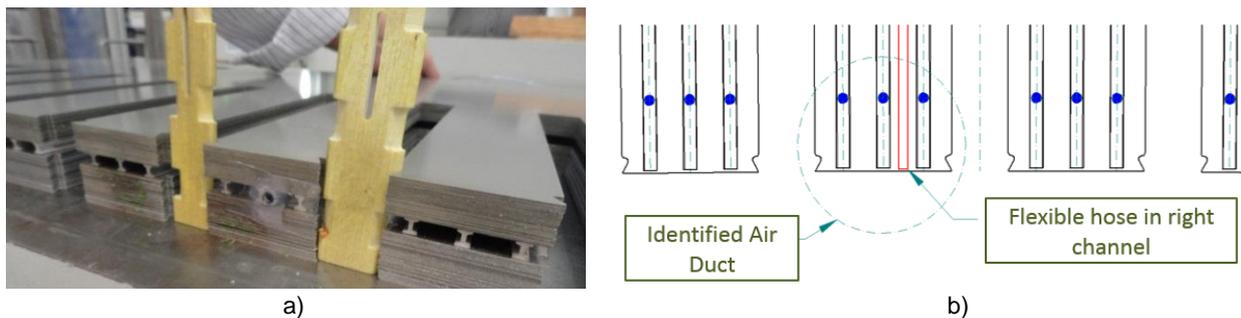


Figura 3.1 – a) Testes da instalação da tomada de pressão na fábrica. b) Instrução de instalação das tomadas de pressão na obra.

As tomadas de pressão foram definidas com mangueiras flexíveis e uma fina placa de plástico colada na ponta das mesmas (Terminal). A fixação do Terminal no diâmetro interno do núcleo do estator foi feita com uma fita industrial. Pasta de silicone foi utilizada para eliminar qualquer protrusão da ponta das mangueiras, o que causaria interferência nos valores medidos (Figura 3.2).

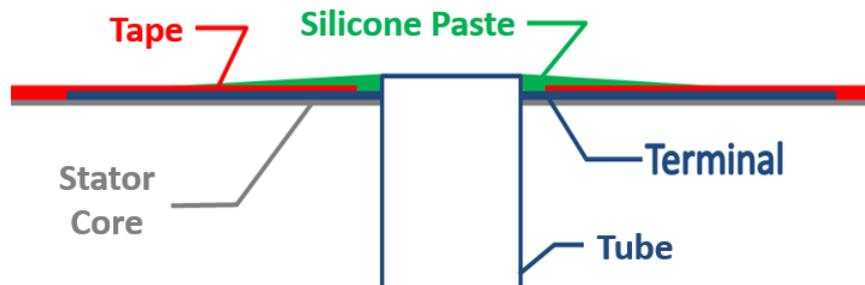


Figura 3.2 – Esquema de instalação das tomadas de pressão.

### 3.2 Instalação dos Dispositivos de Medição na Obra

A carcaça do estator foi concebida com 12 colunas, cada qual com uma janela de inspeção com acesso ao diâmetro externo do núcleo do estator. Portanto, as mangueiras de medição foram instaladas com os respectivos terminais no diâmetro interno do núcleo do estator, alinhadas com as janelas de inspeção, conforme mostrado na Figura 3.3.

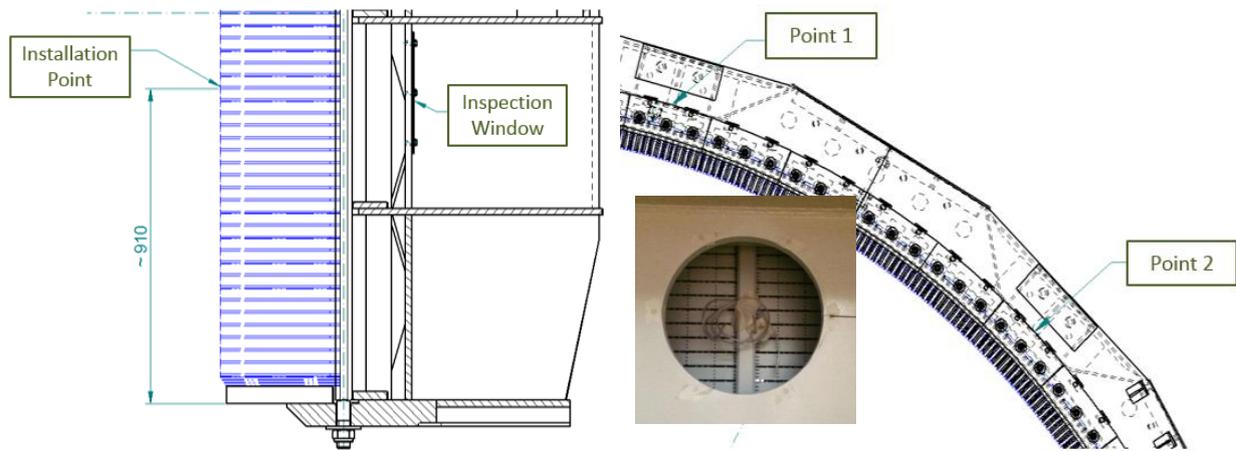


Figura 3.3 – Localização axial e tangencial de instalação das tomadas de pressão.

### 3.3 Medições de Campo

As medições foram executadas durante os testes de comissionamento da quinta unidade geradora da UHE Teles Pires, ocorridos no dia 31 de março de 2016. O gerador não estava conectado à rede e não havia corrente de excitação, ou seja, não havia carregamento eletromagnético.

A velocidade rotacional da unidade geradora foi gradativamente elevada, parando em patamares de 25, 50, 75 e 100% da rotação nominal (75 RPM), para medições da perda de carga entre os diâmetros interno e externo do núcleo do estator. Para cada patamar, a perda de carga do ar foi medida em todas as doze instalações das tomadas de pressão, conforme mostrado na Figura 3.4a.

Paralelamente às medições de perda de carga, foram medidas: a vazão volumétrica do ar passando por um trocador de calor selecionado, a temperatura e a umidade relativa do ar, para cada patamar de velocidade rotacional da unidade.

A vazão volumétrica do ar passando por um trocador de calor selecionado foi medida por um anemômetro, colocado em cada uma das 24 áreas delimitadas, conforme mostrado na Figura 3.4b. Os resultados de velocidade foram multiplicados pelas áreas conhecidas (definidas pelo comprimento ( $L_1$ ) e altura ( $L_2$ )) e todos os dados foram somados para se chegar ao montante da vazão volumétrica de ar.



Figura 3.4 – a) Exemplo da execução das medições de campo. b) Áreas delimitadas para medição de vazão volumétrica de ar passando por um trocador de calor.

### 3.3.1 Instrumentos de Medição e Arranjo dos Equipamentos

Os instrumentos de medição e dispositivos aplicados nas medições de pressão, vazão volumétrica, temperatura e umidade relativa do ar estão listados abaixo na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Instrumentos de medição e dispositivos para medição de pressão

Tipo de Instrumento / Dispositivo	Fabricante / Modelo	Características e Configurações Adotadas
Transmissor de Pressão	Emerson / Rosemount 1151	- Faixa de pressão utilizada: 0 – 500 Pa - Alimentação: 24 VDC - Corrente de saída: 4 – 20 mA
Sistema de Aquisição de Dados	Delphin / AMDT V2.0	- Corrente de entrada: 4 – 20 mA - Taxa de saída: 1 Hz (utilizando cabo LAN) - Alimentação: 24 VDC
Fonte	Balluff / BAE0005	- Entrada: 220 VAC, 60 Hz - Saída: 24 VDC
Anemômetro	Minipa / MDA 11	- Faixa de temperatura: 0 – 50 °C - Faixa de velocidade: 0 – 30 m.s <sup>-1</sup>
Termo-higrômetro	Minipa / MT 242	- Faixa de temperatura: 0 – 50 °C - Faixa de umidade relativa: 20 – 90 %

Os instrumentos de medição e dispositivos utilizados nas medições de pressão foram dispostos e conectados conforme mostrado na Figura 3.5.

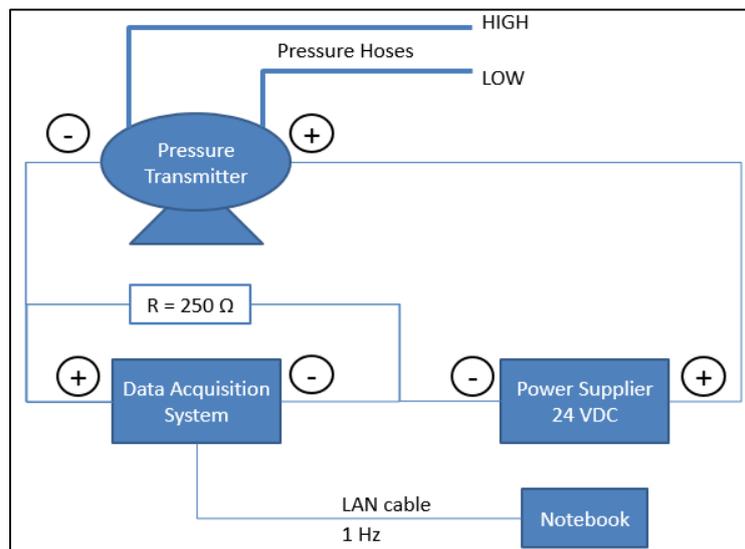


Figura 3.5 – Arranjo dos instrumentos de medição e dispositivos.

### 3.3.2 Análise das Incertezas das Medições de Campo

A análise das incertezas foi feita considerando incertezas de Avaliação Tipo A e Tipo B, conforme INMETRO [8]. As incertezas de Avaliação Tipo A devem ser estimadas a partir da distribuição estatística de um conjunto de valores medidos e são definidas pelo desvio padrão experimental ( $s(X_j)$ ), e a média do mesmo ( $s(X_m)$ ), como mostrado abaixo para uma quantidade genérica  $X_j$  e  $N$  valores medidos.

$$s(X_m) = \frac{s(X_j)}{\sqrt{N}} \quad (3.1)$$

A incerteza de Avaliação Tipo A foi aplicada aos dados medidos de pressão, substituindo  $X$  por  $P_1$ , e de velocidade, substituindo  $X$  por  $V_1$ . As incertezas padrão de Avaliação Tipo B são baseadas na precisão dos instrumentos de medição e dispositivos, e em outros parâmetros impactantes no resultado, conforme mostrado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2– Incertezas padrão de Avaliação Tipo B dos instrumentos de medição e dispositivos

Instrumento / Dispositivo	Parâmetro	Incerteza Padrão	Fonte
Transmissor de Pressão	$P_2$ : Pressão	$\pm 0.12 \%$	Calibração
Sistema de Aquisição de Dados	$I$ : Corrente de aquisição da pressão	$\pm 0.01 \text{ mA}$ e $\pm 0.05 \%$	Precisão do instrumento
Anemômetro	$V_2$ : Velocidade do ar	$\pm 3 \%$ do fundo de escala	Precisão do instrumento
Termo-higrômetro	$T$ : Temperatura do ar	$\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	Precisão do instrumento
Termo-higrômetro	$U$ : Umidade relativa do ar	$\pm 5 \%$	Precisão do instrumento
-	$L_1, L_2$ : Comprimento / altura da passagem de ar	$\pm 0.02 \text{ m}$	Experiência do pessoal de campo
-	$\eta$ : Velocidade rotacional	$\pm 5 \%$	Limites do controle do regulador de velocidade

As incertezas padrão, antes de combinadas, são definidas como:

$$\text{Tipo A: } \mu(X_i) = s(X_m) \quad (3.2)$$

$$\text{Tipo B: } \mu(X_i) = \text{conforme Tabela 3.2} \quad (3.3)$$

As incertezas padrão são combinadas conforme a seguir:

$$\left(\frac{\mu_{comb}(Y)}{Y}\right)^2 = \sum_{i=1}^M \left(p_i \frac{\mu(X_i)}{X_i}\right)^2 \quad (3.4)$$

A equação genérica de um mensurando é definida por:

$$Y = X_1^{p_1} \cdot X_2^{p_2} \dots \cdot X_M^{p_M} \quad (3.5)$$

Quando aplicada à pressão, a equação do mensurando é definida por:

$$P = P_1 \cdot P_2 \cdot I \quad (3.6)$$

Quando aplicada à vazão volumétrica, a equação do mensurando é definida por:

$$Q = V_1 \cdot V_2 \cdot L_1 \cdot L_2 \quad (3.7)$$

As incertezas padrão de pressão e vazão volumétrica são combinadas (incluindo outras incertezas padrão de Avaliação Tipo B) para se chegar à perda de carga por meio da equação do mensurando abaixo:

$$\Delta P = P \cdot Q^2 \cdot \eta \cdot T^{-1} \cdot U \quad (3.8)$$

### 3.4 Resultados das Medições de Campo

Pelos resultados das medições de campo, foi possível identificar que nove das doze tomadas de pressão instaladas trabalharam adequadamente. As outras três aparentemente sofreram algum dano durante a montagem da máquina ou durante o próprio funcionamento (giro) do gerador.

Os resultados das medições para a perda de carga (diferença de pressão entre o diâmetro externo e interno do núcleo do estator) em função da velocidade rotacional, para cada um dos nove pontos operantes, as respectivas incertezas padrão e curva média, estão mostrados na Figura 3.6.

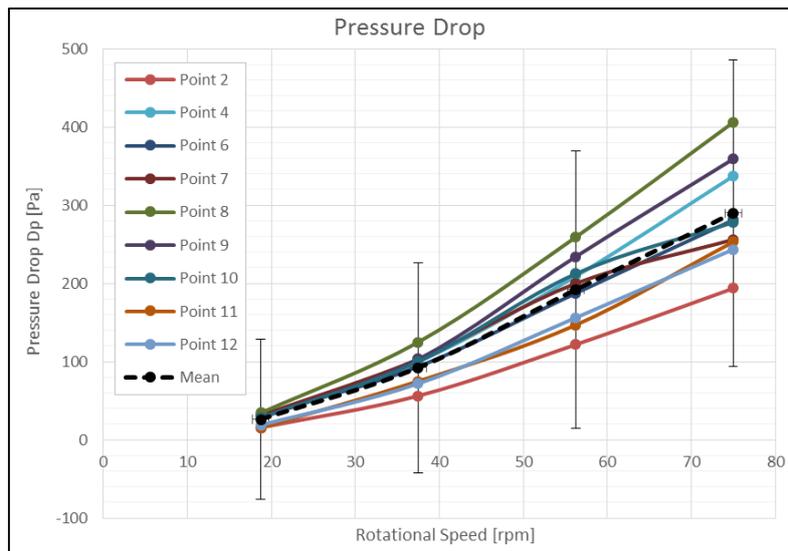


Figura 3.6 – Resultados das medições para a perda de carga, as respectivas incertezas padrão e curva média.

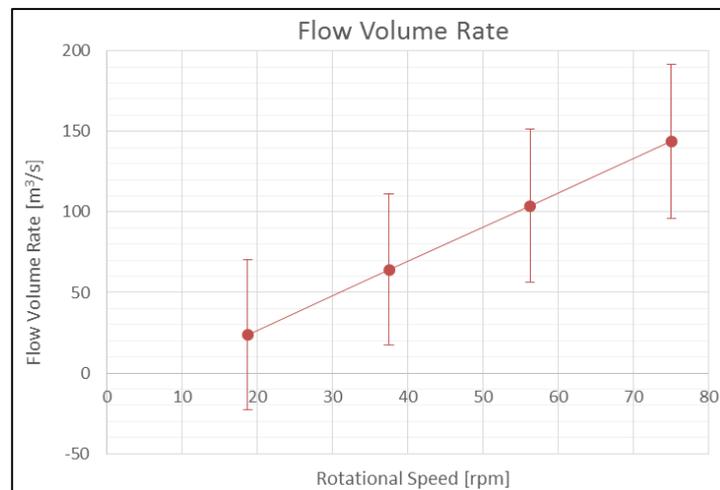


Figura 3.7 – Resultados das medições para a vazão volumétrica de ar e as respectivas incertezas padrão.

Os resultados das medições para a vazão volumétrica de ar, isto é, a somatória de todas as vinte e quatro áreas delimitadas, multiplicado por doze (quantidade total de trocadores de calor) e as respectivas incertezas padrão, estão mostrados na Figura 3.7.

As incertezas dos resultados das medições de pressão foram afetadas principalmente pela própria distribuição estatística dos valores obtidos (incerteza padrão de Avaliação Tipo A), enquanto que as incertezas dos resultados das medições de vazão volumétrica de ar foram mais afetadas pela pouca precisão do anemômetro (incerteza padrão de Avaliação Tipo B).

#### 4.0 - COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS NUMÉRICOS E MEDIÇÕES DE CAMPO

A Figura 4.1 mostra que a diferença entre as medições de campo e os resultados numéricos para a perda de carga é alta, principalmente para altas velocidades rotacionais, atingindo um valor de 77% na rotação máxima. No entanto, os resultados numéricos ainda são cobertos pelas incertezas das medições, para toda a faixa de rotações analisadas.

A hipótese mais razoável para a alta discrepância entre a medição de campo e os resultados numéricos é a própria existência das incertezas das medições. Isso pode ser observado pelo fato de tanto as incertezas quanto a discrepância aumentarem juntas com a velocidade rotacional.

A segunda razão pode ser atribuída à qualidade das tomadas de pressão. Isto porque não foram projetadas durante a concepção da máquina, mas instaladas posteriormente com algumas adaptações. A instabilidade das tomadas de pressão pode ser observada pela variação dos resultados da medição e o fato de que três delas (25%) foram consideradas inoperantes.

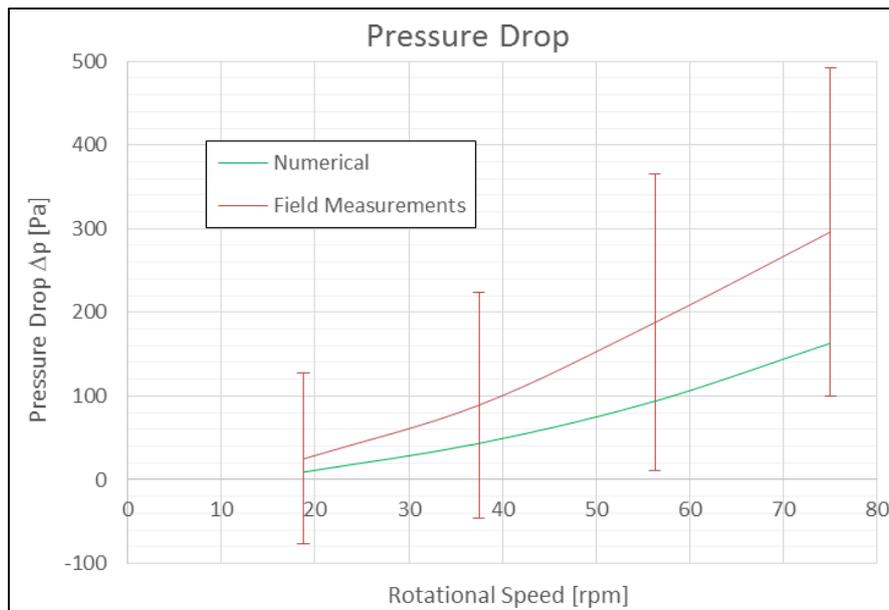


Figura 4.1 – Comparação entre resultados numéricos e medições de campo para a perda de carga.

## 5.0 - CONCLUSÃO

A medição pioneira de perda de carga no núcleo do estator de um hidrogerador protótipo foi um desafio por vários aspectos: logística, planejamento e preparação, impactos no cronograma de obra, condições ambientais desfavoráveis (não controladas) e incertezas de medição.

A comparação entre os resultados numéricos e as medições efetuadas na UHE Teles Pires mostrou uma diferença considerável. No entanto, dois pontos devem ser ponderados: 1) os resultados numéricos estão cobertos pelas altas incertezas dos dados de medição de campo; 2) o comportamento do escoamento do cálculo numérico (aumento da perda de carga em função da velocidade rotacional) segue a mesma tendência das medições de campo e confirma o entendimento teórico sobre o sistema de ventilação.

A análise de incertezas das medições de campo, afetadas principalmente pela própria distribuição estatística dos valores obtidos, mostrou que há um grande potencial de melhoria na instalação das tomadas de pressão no núcleo do estator. Para isto, em trabalhos futuros recomenda-se o desenvolvimento e instalação de tomadas de pressão definitivas nas cunhas frontais do estator.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Altea, J. Yanagihara, M. Miranda e T. Hildinger, "Determinação Numérica e Validação Experimental do Coeficiente de Perda de Carga para o Cálculo do Sistema de Ventilação de Hidrogeradores," em *CIGRÉ - ENAM 2016 - VII Encontro Nacional de Máquinas Rotativas*, Rio de Janeiro, 2016.
- [2] C. Altea e J. Yanagihara, "Validation of a Numerical Method Applied to the Calculation of a Hydrogenerator Ventilation System," em *ABCM - ENCIT - 15th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*, Belém, 2014.
- [3] W. Wustmann, *Experimentelle aerodynamische Untersuchungen des Kühlluftkreislaufes eines Generators zur Bestimmung von Verlustbeiwerten*, Dresden: Technical University of Dresden, 2005.
- [4] C. Altea, *Computational Determination of Convective Heat Transfer and Pressure Drop Coefficients of Hydrogenerators Ventilation System*, São Paulo: Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, 2016.
- [5] ANSYS CFX, Inc., "ANSYS CFX 14.5 - Theory Guide," 2012.
- [6] F. R. Menter, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications," *AIAA Journal*, Vol. 32, pp. 1598-1605, 1994.
- [7] ANSYS ICEM, Inc., "ANSYS ICEM CFD 14.5 - User's Manual," 2012.
- [8] INMETRO, *Guia para Expressão da Incerteza de Medição*, 2008.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



- Claudinei de Moura Altea
  - Nascido em São Paulo (1981).
  - Graduado em Engenharia Mecânica pelo Instituto Mauá de Tecnologia (2006) e mestrado em Engenharia Mecânica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (2016).
  - Está no mercado de hidrogeração desde 1999, com passagens pelas áreas de projeto executivo de hidrogeradores, desenvolvimento (cálculos estruturais e resfriamento de máquinas elétricas), engenharia de aplicação hidráulica (turbinas), fabricação de componentes elétricos / mecânicos e coordenação de projetos, atuando em unidades da Voith Hydro no Brasil, Alemanha, Estados Unidos e China. Atualmente é Coordenador Técnico de Projetos de Hidrogeradores da Voith Hydro Brasil, atuando também com pesquisador sobre resfriamento de hidrogeradores.
- 
- Jurandir Itizo Yanagihara
  - Nascido em Caraguatatuba (1962)
  - Graduado em Engenharia Mecânica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), M.Sc. e Ph.D. em Engenharia Térmica pela *Yokohama National University*, Livre-Docente e Professor Titular pela EPUSP.
  - Coordena o Laboratório de Engenharia Térmica e Ambiental (LETE) e o Centro de Engenharia de Conforto (CEC) da EPUSP. Desenvolve pesquisas e presta consultoria nas áreas de engenharia térmica, simulação e otimização de sistemas térmicos, instrumentação e bioengenharia, com financiamento de órgãos de fomento e de importantes empresas do Brasil e do mundo. Formou 14 doutores e 20 mestres, publicou mais de 150 trabalhos técnicos e científicos e tem 3 patentes.
- 
- Marcelo da Silva Miranda
  - Nascido em Osasco (1975).
  - Graduado em Engenharia Mecânica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em 1998 e MBA em Conhecimento, Tecnologia e Inovação pela Fundação Instituto de Administração (FIA) em 2010.
  - Atualmente responsável pela engenharia de hidrogeradores da Voith Hydro Brasil e membro do *Generator Technical Committee* (GTC) da Voith Hydro. Possui experiência no segmento de hidrogeração por mais de 20 anos. Atuou nas áreas de cálculo estrutural, cálculo hidrodinâmico de mancais e ventilação de hidrogeradores, projeto e fabricação, além de experiência internacional na Suíça e China.