

# Sistema para Determinação de Vazão Aduzida e Rendimento de Máquinas Hidráulicas

Carlos Barreira Martinez<sup>1</sup>, Gilberto Ferratto Bezerra<sup>1</sup>, Antônio Elísio Oliveira<sup>2</sup>, Luis Antônio Aguirre<sup>1</sup>

## RESUMO

Este trabalho apresenta a pesquisa desenvolvida para a utilização do método de Winter-Kennedy para o monitoramento de vazão e determinação de rendimento em turbinas hidráulicas. Inicialmente é apresentado um estudo de mapeamento do posicionamento dos pontos de medição diferencial na carcaça de máquinas do tipo Francis com a obtenção de uma equação a partir de dados experimentais onde se contrasta a vazão e queda de pressão em várias seções de medição. Em seguida é mostrada uma análise metrológica do sistema de medição de pressão e das equações utilizadas. Ao final faz-se uma análise das incertezas das grandezas medidas, da incerteza da constante de Winter-Kennedy, e da medida da vazão ao se utilizar este método.

## PALAVRAS-CHAVE

Monitoramento de turbinas, rendimento de turbinas, comissionamento de turbinas.

## I. INTRODUÇÃO

Sabe-se que a solução do problema de medição de vazão on-line é de vital importância para os ensaios de recepção das turbinas hidráulicas, onde são verificados os rendimentos especificados pelo fabricante. Além disso, a determinação da vazão aduzida permite o monitoramento da turbina durante a sua operação.

Muito tem sido estudado com relação à determinação da vazão aduzida em grandes sistemas hidráulicos, entretanto boa parte dos estudos tem esbarrado no problema de desenvolvimento de um sistema de medição que permite a avaliação das vazões com uma boa precisão. Desta forma a iniciou-se uma pesquisa cuja função é o desenvolvimento de um sistema de medição de vazão

baseado em sensores do tipo piezoresistivos acoplados ao Winter Kennedy. Assim desenvolveu-se um protótipo para medição de vazão e uma metodologia para determinação de rendimento.

## II. MEDIÇÃO DE VAZÃO

Com o objetivo de levantar um banco de dados para análise do método de Winter Kennedy utilizou-se, em laboratório, de uma pequena máquina hidráulica. A bancada de ensaio utilizada é ilustrada na figura 1.

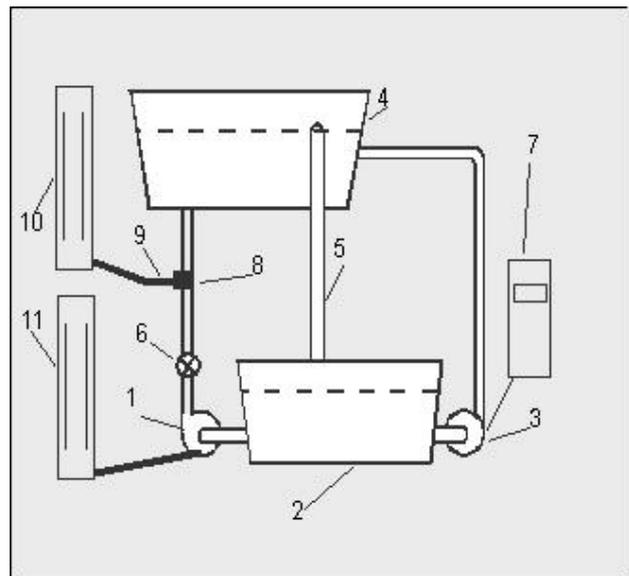


FIGURA 1 - Esquema da montagem do experimento, onde se vê: 1, turbina; 2, reservatório inferior; 3, bomba; 4, reservatório superior; 5, ladrão; 6, registro; 7, inversor de frequência; 8, tap; 9, tubo de Pitot; 10, manômetro; 11, manômetro; a linha tracejada indica o nível dos reservatórios.

No trecho reto da tubulação, abaixo do reservatório superior, colocou-se um "tap" para a instalação do tubo de Pitot.

As tomadas do tubo de Pitot foram ligadas a um manômetro de coluna líquida para a medição indireta da velocidade ao longo da seção transversal da tubulação. Na carcaça da turbina, instalaram-se os pares de orifícios de Winter Kennedy em oito seções radiais da caixa espiral. O posicionamento das seções de medição, em relação à seção de entrada são mostrados na figura 2.

Os autores agradecem a Companhia Força e Luz Cataguazes Leopoldina / Companhia de Eletricidade de Nova Friburgo e a Universidade Federal de Minas Gerais (por meio de convênio de Desenvolvimento de Pesquisa apoiado pela Aneel) pelo apoio recebido neste projeto.

<sup>1</sup> Centro de Pesquisa Hidráulica e de Recursos Hídricos. Av. Antônio Carlos 6227, Belo Horizonte MG. CEP 31 270-901, martinez@cce.ufmg.br.

<sup>2</sup>Financiado pela, Companhia Força e Luz Cataguazes Leopoldina / Companhia de Eletricidade de Nova Friburgo, Pça Rui Barbosa 80, centro, Cataguazes MG. CEP 36 700-000; cataguazes@cataguazes.com.br.



FIGURA 2 - Posicionamento das seções de medição de pressão diferencial na caixa espiral.

Como se vê na figura 2, há oito seções de medição. A primeira seção foi localizada 15 graus a partir da seção de entrada, a distância angular entre essas seções de medição é a mesma, 15 graus, com isso, a oitava seção de medição está a 120 graus da seção da entrada. As figuras figura 3 e 4 ilustram o posicionamento dos pares de pontos em cada seção de medição. O ponto de menor pressão,  $P_i$ , encontra-se localizado mais internamente em relação ao rotor da máquina. As tomadas de pressão  $P_i$  formam um alinhamento de tomadas de pressão que aparece na frente na figura 3. As tomadas de maior pressão,  $P_e$ , mais externas em relação do rotor aparecem, na figura 3, atrás das tomadas  $P_i$  em cada seção de medição. O ângulo  $\alpha$  medido entre as tomadas de pressão tem como vértice o centro da parte circular da seção transversal, e mede 130°.

A figura 4 mostra o posicionamento de um par de pontos colocados numa seção de medição.

A fim de se fazer um mapeamento do comportamento da variação da pressão na caixa voluta da máquina escolheu-se 6 rotações de trabalho, quais sejam: 700 rpm, 800 rpm, 900 rpm, 1000 rpm, 1100 rpm e 1200 rpm. Para se medir a vazão acompanhou-se a sua velocidade de rotação com o auxílio de um tacômetro até se obter uma situação na qual a rotação fosse constante e sem flutuações. Após isso fez-se as leituras de pressão diferencial nas seções por meio de um manômetro invertido.

A vazão foi obtida através de Pitometria e permite posteriormente a determinação da equação do Winter Kennedy.

A tabela 1 mostra os valores de fator de velocidade (obtido para a tubulação de adução), de vazão e de velocidade média para as vazões correspondentes à velocidade de rotação de 700 rpm a 1200 rpm.

Os valores de fator de velocidade foram calculados de acordo com Delmé, 1983. As leituras da pressão diferencial para cada seção de medição foram obtidas sucessivamente por meio da ligação de cada um dos pares de pontos da caixa espiral a um manômetro invertido. Simultaneamente foram lidas as diferenças de altura das colunas líquidas

do manômetro ligado ao tubo de Pitot, para cada uma das posições da seção transversal da tubulação de adução.

Para cada uma das velocidades do ensaio, repetiram-se os procedimentos descritos anteriormente para medição da queda de pressão na caixa espiral e no tubo de Pitot.

TABELA 1

Medidas da Vazão Padrão

V.de Rotação (rpm)	Fv	Vazão Padrão x10 <sup>-3</sup> (m <sup>3</sup> /s)	V.média (m/s)
700	0,91	0,00413	1,21
800	0,90	0,00432	1,26
900	0,90	0,00459	1,34
1000	0,87	0,00483	1,41
1100	0,86	0,00527	1,54
1200	0,86	0,00553	1,62

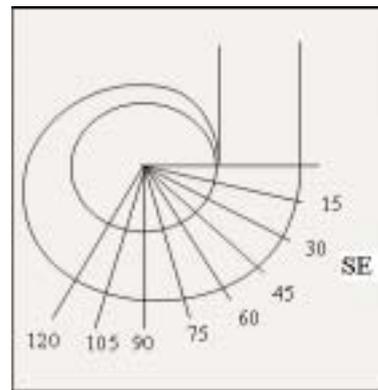


FIGURA 3 - Tomada de pressão instalada na caixa espiral.

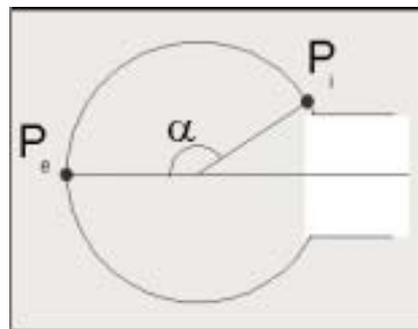


FIGURA 4 - Representação de uma seção radial da caixa espiral mostrando duas tomadas de pressão  $P_e$ ,  $P_i$  e o  $\alpha$  ângulo entre elas.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Além do registro de queda de pressão na caixa espiral e vazão aduzida mediu-se a pressão estática nas tomadas de pressão mais distantes do rotor em trono da caixa espiral. A figura 5 mostra o gráfico da pressão estática nas tomadas de pressão localizadas periféricamente na caixa espiral com a máquina rodando a 1200 rpm.

Os valores resultantes da medição de pressão diferencial em mm c.a., efetuados nas oito seções de medição na caixa espiral, posicionadas em acordo com a figura 2 podem ser visualizados na figura 6. Nesta observa-se que

o maior diferencial de pressão é verificado a uma distância angular de 60° em relação à seção de entrada.

A vazão padrão e as medidas de queda de pressão nas seções de medição na caixa espiral são utilizadas para se calibrar o Método de Winter Kennedy. Os valores da vazão padrão foram calculados em acordo com o Método para o Cálculo da Vazão Padrão.

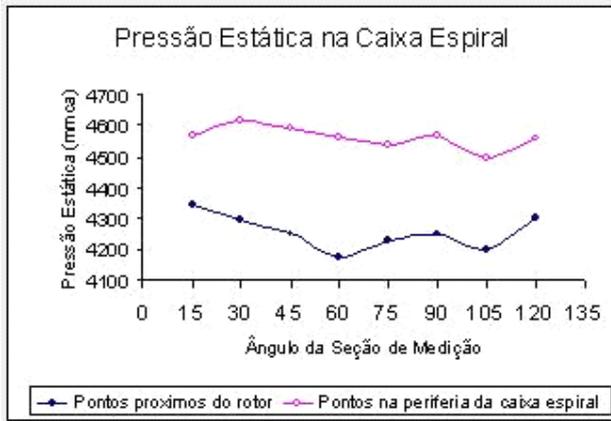


FIGURA 5 - Pressão estática nas tomadas periféricas da caixa espiral.

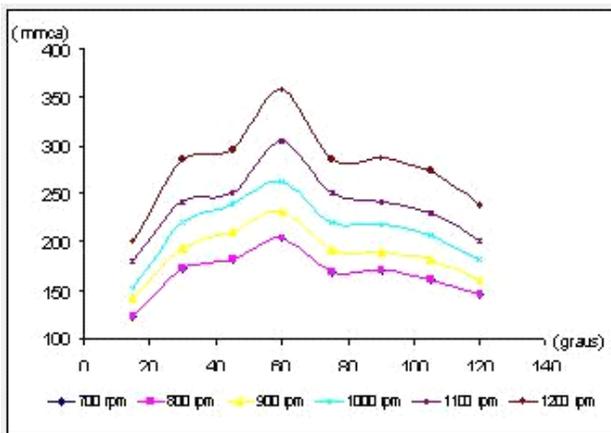


FIGURA 6 - Valores de pressão diferencial em torno da caixa espiral.

As medidas de queda de pressão nas várias seções de medição e a vazão aduzida padrão permitem que sejam obtidas as equações que se ajustam aos dados experimentais para cada seção de medição.

As equações dos ajustes aos dados experimentais são apresentadas na tabela 2.

TABELA 2

Medidas da Vazão Padrão

Ângulo	Equação
15	$y = 0,0118x^{0,5046}$
30	$y = 0,0098x^{0,4838}$
45	$y = 0,0096x^{0,4995}$
60	$y = 0,0084x^{0,4539}$
75	$y = 0,0095x^{0,4739}$
90	$y = 0,0096x^{0,4805}$
105	$y = 0,0098x^{0,4779}$
120	$y = 0,0109x^{0,5054}$

**IV. INCERTEZA NA MEDIÇÃO DA VAZÃO COMO MÉTODO DE WINTER KENNEDY**

A qualidade dos resultados, quantificada pelo cálculo da incerteza é obtida por meio do confronto dos valores de vazão aduzida padrão com os valores de vazão fornecidos pelas equações obtidas.

A constante de Winter Kennedy foi obtida por medição indireta da mesma maneira que se procedeu para o cálculo da constante do tubo de Pitot. A aplicação da lei da propagação de incerteza, na equação para os pontos de Winter Kennedy, equação, e os cálculos das sensibilidades levam a uma equação para o cálculo da incerteza padrão combinada para a vazão calculada com o método de Winter Kennedy, escrita como segue:

$$u_c(Q) = \sqrt{(\Delta h^n u_c(C))^2 + (nC\Delta h^{(n-1)} u(\Delta h))^2} \quad (1)$$

Sendo:

$u(\Delta h)$  = a soma da incerteza devido à resolução do manômetro mais a dispersão das leituras de  $\Delta h$ ;

$u(C)$  = a incerteza da vazão padrão;

$n$  = o expoente da equação do ajuste de uma equação aos dados experimentais pelo método dos mínimos quadrados;

$Q$  = a vazão calculada pela equação para os pontos de Winter Kennedy;

$C$  = a constante da equação de Winter Kennedy obtida indiretamente.

A figura 7 apresenta uma superfície que corresponde ao valor da incerteza expandida das equações de Winter Kennedy com suas constantes obtidas indiretamente. A maioria dos pontos da superfície da incerteza expandida relativa estão entre 5% e 5,5% do valor da vazão padrão em toda as seções de medição e vazão experimentadas.

O gráfico da figura 8 mostra a tendência, em termos percentuais de todas as equações ajustadas aos dados experimentais em cada uma das seções de medição. As equações ajustadas para 90 graus, 105 graus e 120 graus foram as que melhor representaram os dados experimentais.

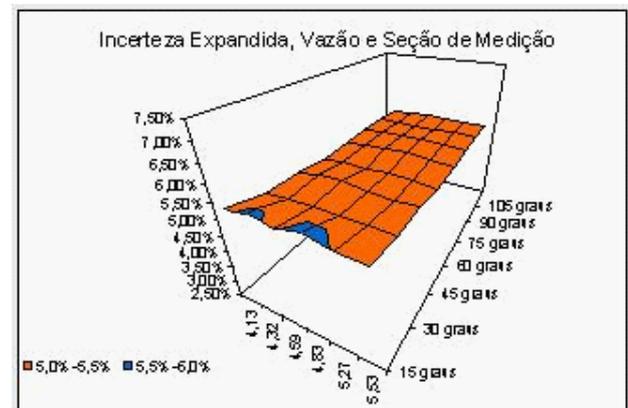


FIGURA 7 - Gráfico da Incerteza expandida relativa, vazão e distância angular da seção de entrada.

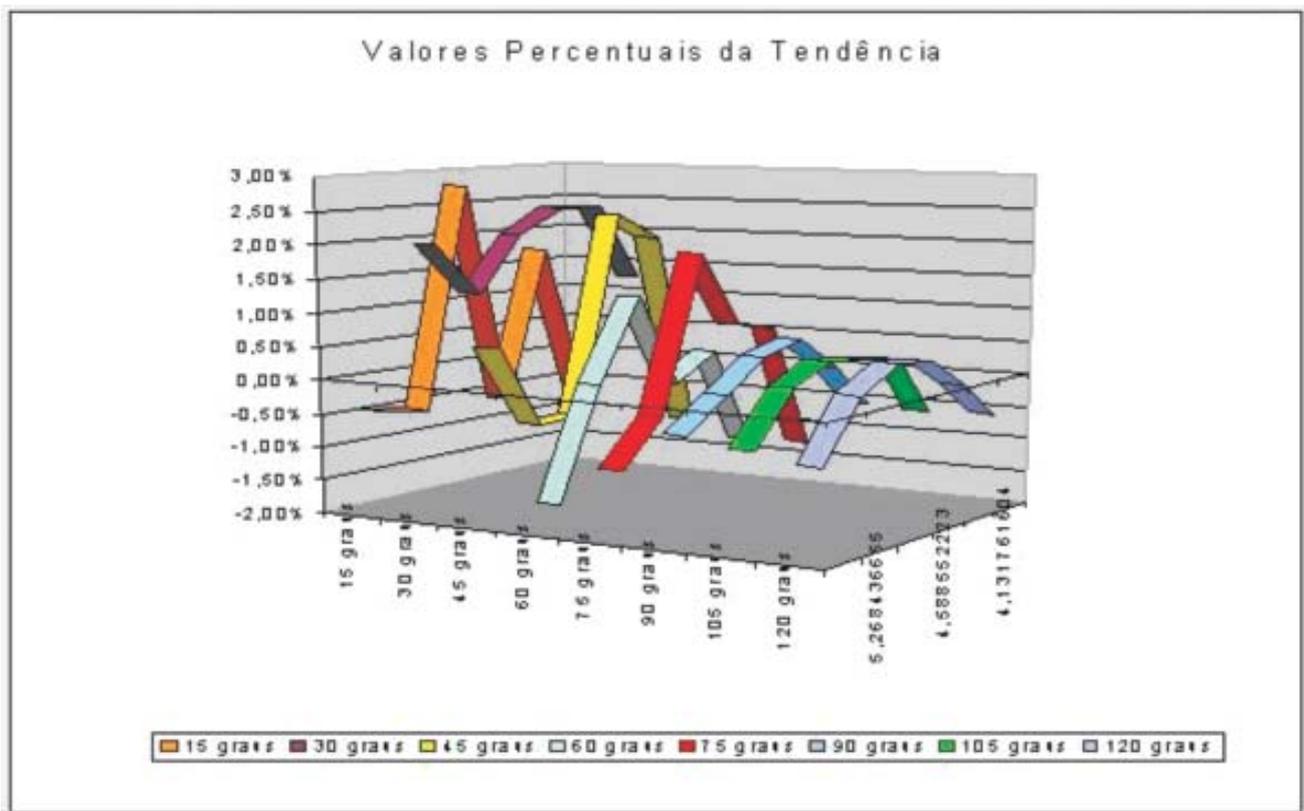


FIGURA 8 - Gráfico dos valores percentuais da tendência das equações de Winter Kennedy em relação à vazão padrão

## V. DISCUSSÃO

Para a mesma vazão o diferencial de pressão ao longo das seções de medição aumenta a partir de 15°, tem crescimento suave entre 30° e 45°, é máxima em 60°. Então, a melhor seção de medição, sob o ponto de vista do diferencial de pressão, está em torno de 60° a partir da seção de entrada. Para um ângulo de 120° a partir da seção de entrada obtém-se um diferencial de pressão da ordem de 2/3 do obtido a 60°. A escolha final do ponto de tomada deve ser feita em função do arranjo físico e da faixa de aplicação dos sensores de pressão disponíveis. A discussão sobre a incerteza dos resultados obtidos é feita a partir do peso das contribuições relativas aos termos vazão e pressão medida indiretamente pelo método de Winter Kennedy.

A equação 2 abaixo, mostra que a incerteza relativa da vazão medida com o método de Winter Kennedy é dominada pela incerteza relativa da vazão padrão. A incerteza relativa da pressão tem menor peso porque o expoente  $n$  é sempre um número em torno de 1/2.

$$\left(\frac{u_c(Q)}{Q}\right)^2 = \left(\frac{u_c(Q^*)}{Q^*}\right)^2 + 2\left(\frac{u_c(Q^*)}{Q^*}\right)\left(n\frac{u(\Delta h)}{\Delta h}\right) + 2\left(n\frac{u(\Delta h)}{\Delta h}\right)^2 \quad (2)$$

Em relação à vazão padrão, o método de cálculo de vazão padrão utilizou a equação [3] que é o resultado da simplificação do procedimento de medição da vazão. Para uma tubulação estudada bastaria o conhecimento do valor da velocidade central para que a vazão padrão pudesse ser calculada. A simplificação do procedimento de medição da

vazão traz o indesejável efeito de aumentar a incerteza de medição da vazão padrão.

$$Q^* = AF_c V_c^* \quad (3)$$

O cálculo com a vazão padrão também pode ser feito diretamente por meio da velocidade média e da área, tal como mostrado na equação 4.

$$Q^* = AV_m^* \quad (4)$$

Como já foi explicado, a incerteza relativa da área pode ser desconsiderada se comparada à incerteza da velocidade, então a incerteza relativa da vazão padrão pode ser escrita como segue na equação abaixo:

$$\frac{u(Q^*)}{Q^*} = \frac{u(V_m^*)}{V_m^*} \quad (5)$$

A equação da incerteza relativa padrão da vazão padrão, quando se utiliza o fator de velocidade pode ser escrita na forma a seguir:

$$\frac{u(Q^*)}{Q^*} = \sqrt{\left(\frac{u(V_m^*)}{V_m^*} + \frac{u(V_c^*)}{V_c^*}\right)^2 + \left(\frac{u(V_c)}{V_c}\right)^2} \quad (6)$$

O termo com velocidade central que aparece à direita dentro do radical, foi escrito sem asterisco, isso porque é diferente da velocidade central utilizada para obter o fator de velocidade que aparece dentro parênteses à esquerda dentro do radical.

A figura 9, mostra um gráfico de superfície com os valores da incerteza relativa do método de Winter Kennedy obtidos com a vazão padrão calculada diretamente com a velocidade média, e resolução dos manômetros igual a  $VD/2$ . nessa pode-se ver que os valores de incerteza relativa

ficam em torno de 2,6% para a maioria das seções de medição, metade dos 5% quando o fator de velocidade é utilizado. Vê-se ainda que os valores de incerteza relativa calculada com o método de Winter Kennedy são menores para a seção de medição localizada a 60° da seção de entrada.

A proximidade da incerteza da vazão padrão pode ser vista numericamente comparando os números de incerteza da vazão padrão com os valores de incerteza expandida.

A tabela 3 traz os valores de incerteza relativa da vazão padrão e da vazão calculada para o método de Winter Kennedy aplicado na seção a 60° da seção de entrada da caixa espiral.

**TABELA 3**

**Incerteza Expandida Relativa da Vazão Padrão e da Vazão Calculada com o Método de Winter Kennedy para a Seção de Medição a 60° da Seção de Entrada**

Velocidade de Rotação (rpm)	Incerteza Relativa Expandida do Padrão	Incerteza Relativa Expandida do W. Kennedy
700	2,26%	2,47%
800	2,29%	2,50%
900	2,21%	2,50%
1000	2,13%	2,53%
1100	2,18%	2,48%
1200	1,96%	2,44%

A discussão sobre o peso da incerteza da vazão padrão nos leva à curva de erro para o tubo de Pitot, figura 10 repetida abaixo.

A correção para pontos que estão entre os pontos da curva de calibração foram obtidos por interpolação, ou seja, há a possibilidade de estar havendo uma correção não apropriada do efeito sistemático na equação do tubo de Pitot.

Com relação ao manômetro, precisam ser levadas em consideração providências que permita diminuir o valor da resolução em função do valor de escala (VD). Assim procura-se diminuir um valor de escala de VD/2 para VD/5, pois isso diminui a incerteza expandida do sistema de medição com tubo de Pitot. Ainda é preciso comentar que a faixa para medição de velocidade em grandes vazões leva a menores valores da constante C do sistema de medição tubo de Pitot, sendo que isso também leva à diminuição da incerteza.

O refinamento da qualidade do resultado da incerteza de medições levantado em calibração estática da vazão esbarra no fato de que, em condições de regime permanente de produção de energia elétrica, são admitidas variações na carga das turbinas, o que se reflete em variações nos valores das vazões aduzidas. No experimento realizado, para que conseguisse repetitividade das medições, as leituras foram realizadas sempre com os mesmos valores de vazão mantendo-se as rotações de, 700 rpm, 800 rpm, 900 rpm, 1000 rpm, 1100 rpm e 1200 rpm. É importante dizer que foram admitidas variações de rotação de até 12 rpm. Sabe-se que é importante manter ao menos um parâmetro fixo quando se realiza uma calibração estática. No caso de leitura a olho nu é igualmente importante se "congelar" as leituras para que se possa fazê-las acertadamente.

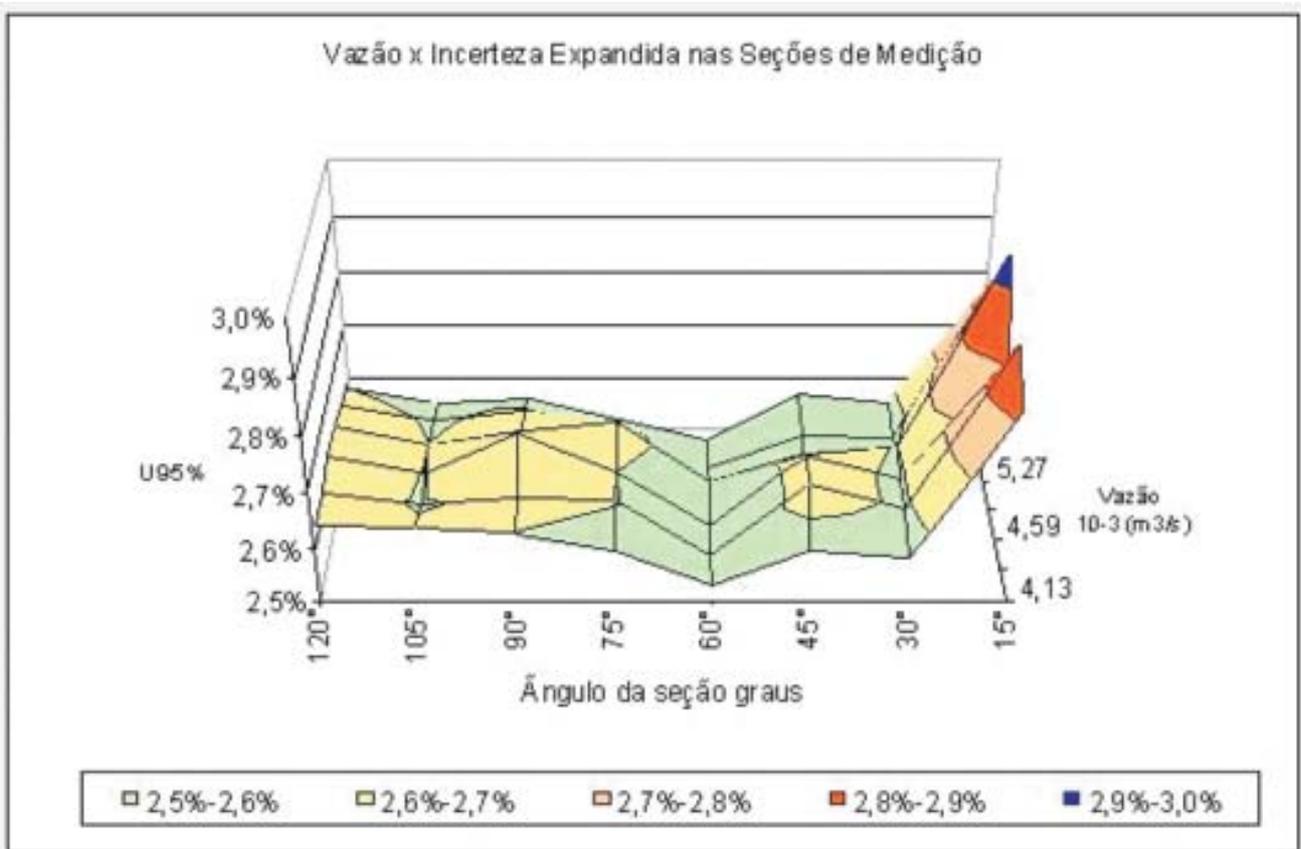


FIGURA 9- Gráfico de superfície com os valores de incerteza relativa para as seções de medição e vazões do experimentadas

## VI. CONCLUSÃO E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para a vazão padrão calculada com a velocidade média, (obtida com o tubo de Pitot) e utilizando manômetros com resolução  $VD/2$ , a incerteza relativa do método de Winter Kennedy ficou em torno de 2,5% para todas as seções de medição a partir de 30° da seção de entrada.

A confiabilidade dos resultados de incerteza padrão são estribados na confiabilidade dos padrões de medição, se apoia no conceito de rastreabilidade, e na propagação da incerteza para pequenos erros alatórios, pois a lei de propagação de incerteza é um truncamento da série de Taylor, BIPM et alii 1998. Então com relação ao sistema de medição tomado como padrão deve-se tomara melhor resolução possível, diminuir a variabilidade da velocidade do escoamento em que se calibra o tubo de Pitot e identificar a faixa em que os valores na calibração em campo serão lidos.

Com o objetivo de obter resultados de melhor qualidade com o método de Winter Kennedy, corrigir efeitos sistemáticos no cálculo da velocidade com o tubo de Pitot é recomendável fazer uma pesquisa prévia dos perfis de pressão dinâmica que são encontrados na adutora em que se deseja fazer a medição da vazão. A informação dos valores dos perfis de pressão dinâmica vistos em campo deve ser utilizada para voltar ao laboratório, e fazer uma calibração mais fina do tubo de Pitot em intervalos em torno dos valores encontrados em campo. O objetivo é obter correções mais confiáveis que as obtidas por interpolação linear utilizadas no corpo deste trabalho.

As análises da qualidade do resultado das medições utilizando o método de Winter Kennedy trazem as mesmas conclusões que a medição de velocidade com o tubo de Pitot, porque seus modelos matemáticos são os mesmos. Ou seja, deve-se procurar minimizar a incerteza do padrão diminuir a resolução e dispersão das leituras.

Uma questão levantada durante o trabalho é que a literatura consultada, Delmé, 1983, informa que o tubo de

Pitot padrão não precisa ser calibrado, o manômetro de coluna líquida também não, isso seria interessante porque teríamos um sistema de medição de velocidade de escoamento que não depende de calibrações periódicas em laboratórios credenciados e mesmo assim seus resultados teriam que ser aceitos em qualquer forum de discussão. A sugestão é um trabalho em que tubos de Pitot padrão sejam construídos e que sejam verificadas as suas equações. Outra sugestão é que sejam desenvolvidos sistema geradores do mensurando velocidade que possam fazê-lo com menor variabilidade. A última sugestão é um sistema de controle eletrônico para registrar instantaneamente em campo a pressão diferencial e a velocidade da turbina para que se possa confiar na implementação do método de Winter Kennedy.

## VII. BIBLIOGRAFIA

- [1] BIPM, IEC, ISO, IUPAC e OML, Guia para a expressão da incerteza de medição, 2a edição, Rio de Janeiro, ABNT, INMETRO, SBM, 1998.
- [2] DELMEÉ G. J.; Manual de medição de vazão. Editora Edgard Blücher LTDA. 2ª Edição, São Paulo, 1983.
- [3] GERHARD ,P. Schreiber, Usinas hidrelétricas, 1977.
- [4] PFLEIDERER, C.; Bombas centrífugas e turbocompressores, Editorial Labor S\A, Barcelona, 1960.
- [5] READER-HARRIS, MJ, Brunton, W.C., Gibson,J.J. Hodges, Discharge coefficients of venturi tubes with non-standart convergent angles. The 10th International conference on flow measurement. Fiesta Convention Center. June 4-8. Salvador, Bahia, 2000
- [6] SPANGLER, D.; Pumps prove versatile as hydraulic turbines. Power engineering, p. 52-54, July 1984.
- [7] STEPANOFF,A .T.; Centrifugal and Axial flow pumps. John Wiley & Sons, Inc., N.Y.,1962.
- [8] TROSKOLANSKI, A.T. Théorie et pratique des mesures hydrauliques, Éditeur Dunot, Paris - 1970.
- [9] VAN WEERS, T., VAN DER BEEK, M.P., and LANDHEER, I.J.C d - Factor of classical Venturi's: Gaming technology. In Proc. 9th Int. conf. On flow measurement, Flomeko, Lund, Sweden, p. 203-207, june,1998
- [10]VENNARD, J.K. - Elementary fluid mechanics 4th ediction. New York , John Wiley & Sons. Inc. 1963