

5

Resultados e Discussão

5.1.

Resultados Preliminares

O objetivo aqui é apresentar uma primeira análise dos resultados, incluindo uma comparação da resposta de um medidor de um canal com a resposta de medidores de 5 canais paralelos (no mesmo plano e em planos distintos).

5.1.1.

Curva a Montante de Medidor Monocanal

Para avaliar a resposta de um medidor a jusante de uma curva, foram traçadas retas com inclinação de 45° e 201 pontos de amostragem. A primeira reta ficou logo após a curva e, nos 100D seguintes, foi traçada uma reta a cada diâmetro. Foram construídas quatro sequencias de retas, com β igual a 0°, 90°, 180° e 270° (ver item 3.2.5).

Foi utilizada a modelagem de escoamento turbulento ($Re = 150.000$), descrita em 3.3.2, configurada na entrada com lei de potência de 1/7.

As velocidades médias nas linhas foram traçadas de acordo com o método descrito em 3.2.6, incluindo a \bar{w}_T (velocidade média na linha, considerando u , v e w); *swirl* (considerando apenas as componentes transversais) e \bar{w} (velocidade média na linha considerando apenas a componente w). A Figura 5-1, Figura 5-2 e Figura 5-3 apresentam o resultado para β igual a 0° e 90° e 180°.

Nas trajetórias em plano perpendicular ao plano da curva (0° e 180°), as velocidades médias estão praticamente idênticas, devido à simetria no escoamento. Nas trajetórias do plano horizontal, as velocidades médias diferem em função de sua inclinação com relação à curva.

A Figura 5-4 apresenta os erros nas linhas inclinadas em função de β . O cálculo do erro segue a eq. (3-60) tomando como referência a velocidade média na linha a 80D a jusante da curva.

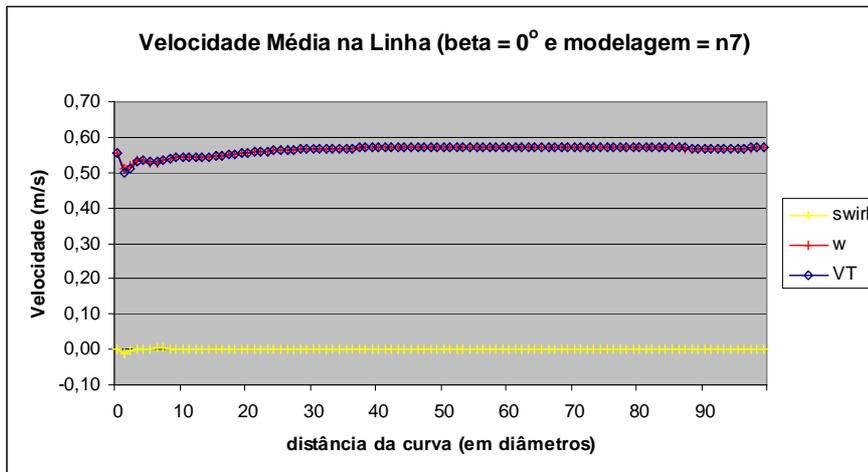


Figura 5-1: \overline{w}_T (no gráfico, VT), \overline{w} (no gráfico, w) e *swirl* para $\beta = 0^\circ$.

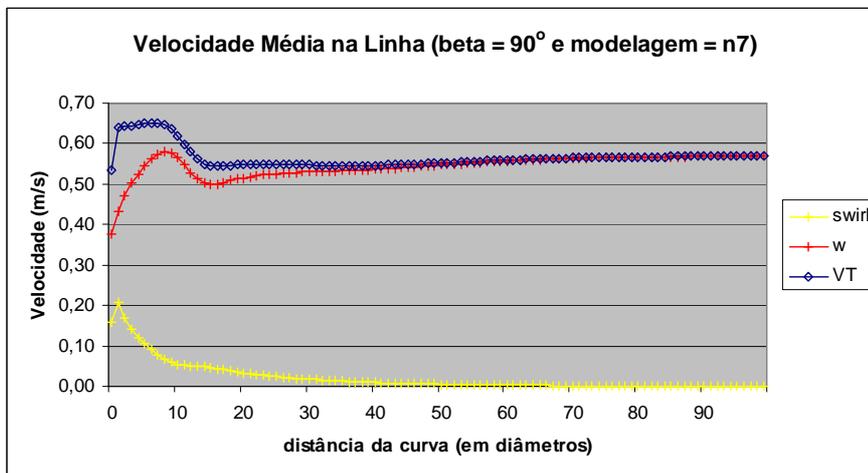


Figura 5-2: \overline{w}_T (no gráfico, VT), \overline{w} (no gráfico, w) e *swirl* para $\beta = 90^\circ$.

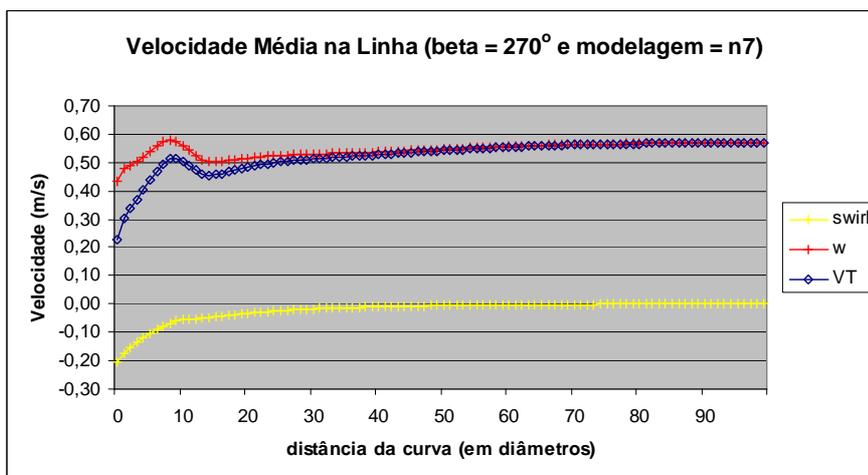


Figura 5-3: \overline{w}_T (no gráfico, VT), \overline{w} (no gráfico, w) e *swirl* para $\beta = 270^\circ$.

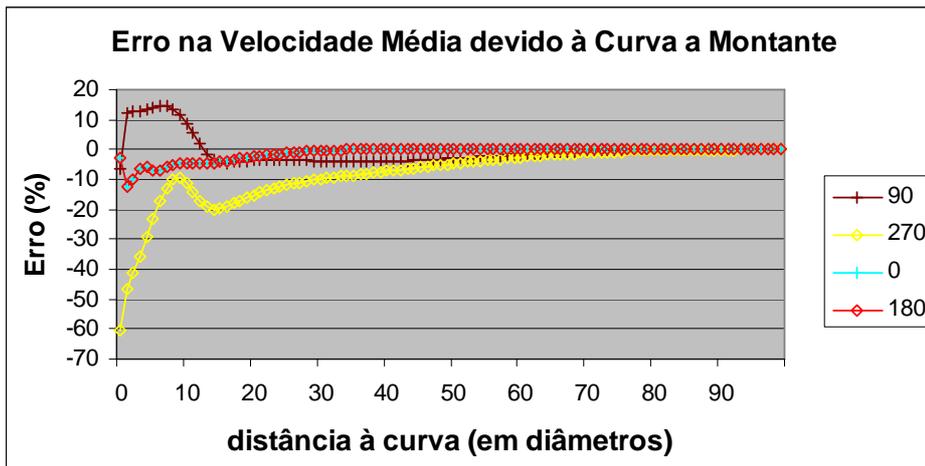


Figura 5-4: Erro na medição de \overline{w}_T para $Re = 150.000$ para β igual a 0° , 90° , 180° e 270° .

Nos primeiros diâmetros os erros são significativos, com erros de 60% com β igual a 270° . Nas linhas com β igual a 0° ou 180° , os erros só chegam a 1% a 26D e, nas linhas com β igual a 90° e 270° , os erros só chegam a menos de 1% em 67D e em 72D, respectivamente.

Para uma análise mais abrangente, a Figura 5-5 apresenta os erros para a modelagem da Figura 5-4 (configurada com lei de potência de $1/7$ na entrada) e, também, para duas outras modelagens configuradas de forma semelhante à primeira, mas com perfis u , v , w , k e ε importados. A modelagem 001 tem como perfil importado, o perfil a 80D de um tubo reto; e a modelagem 004 importou seu perfil de entrada do perfil a 80D após a curva de sua própria malha.

Para a modelagem 001, os erros para β igual a 0° ou 180° só chegam a menos de 1% a 30D da curva; para β igual a 90° , a 61D; e para β igual a 270° , em 66D. Para a modelagem 004, essas distâncias são 27D, 59D e 64D, respectivamente. Estas distâncias estão na mesma faixa das distâncias indicadas para a modelagem configurada com a lei de potência.

Para as três modelagens, para β igual a 270° , os erros logo após a curva ultrapassam, em módulo, 40%. Há um fator aleatório, mas existe uma componente sistemática.

Entretanto, as diferenças nos resultados da Figura 5-5 em função do perfil de entrada foram significativas para $\beta = 270^\circ$ (de 2D a 10D) e para $\beta = 270^\circ$ (de 10D a 20D), chegaram a respectivamente 10% e 8%.

O trecho reto a montante da curva era de apenas 1,67D e com um trecho reto maior na entrada, provavelmente a influência seria menor. De qualquer

forma, é interessante utilizar perfil completamente desenvolvido na entrada a fim de chegar a um resultado influenciado apenas pela presença da curva.

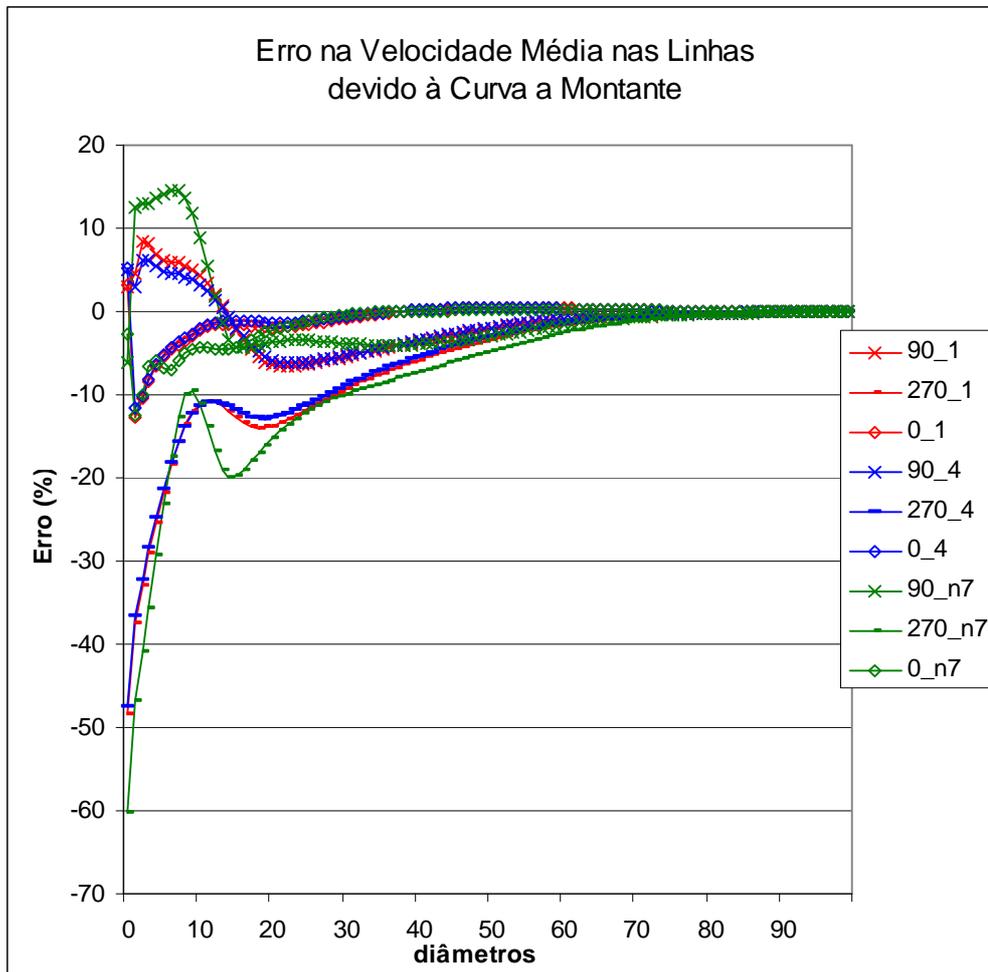


Figura 5-5: Erro em \bar{w}_T com perfil importado (1 e 4) e perfil de 1/7 (n7) na entrada, para β igual a 0°, 90° e 270° (Re = 150.000).

Em escoamento laminar, a mesma análise sobre o erro no cálculo da velocidade média em linha inclinada gerou o gráfico de erro da Figura 5-6.

Com as linhas no plano da curva (β igual a 90° ou 270°), os erros chegaram a menos que 1% em 20D, bem menor do que com escoamento turbulento (que chegou a ultrapassar 60D). Entretanto, a velocidade média nas linhas β igual a 0° ou 180° em escoamento laminar convergiu mais lentamente e os erros absolutos foram maiores do que com escoamento turbulento.

A Figura 5-7 apresenta os erros encontrados na simulação de um medidor de 5 canais paralelos para β igual a 0°, 90°, 180° e 270°. Para β igual a 0° e 180°, o erro é o mesmo, pois o escoamento é simétrico em seu plano.

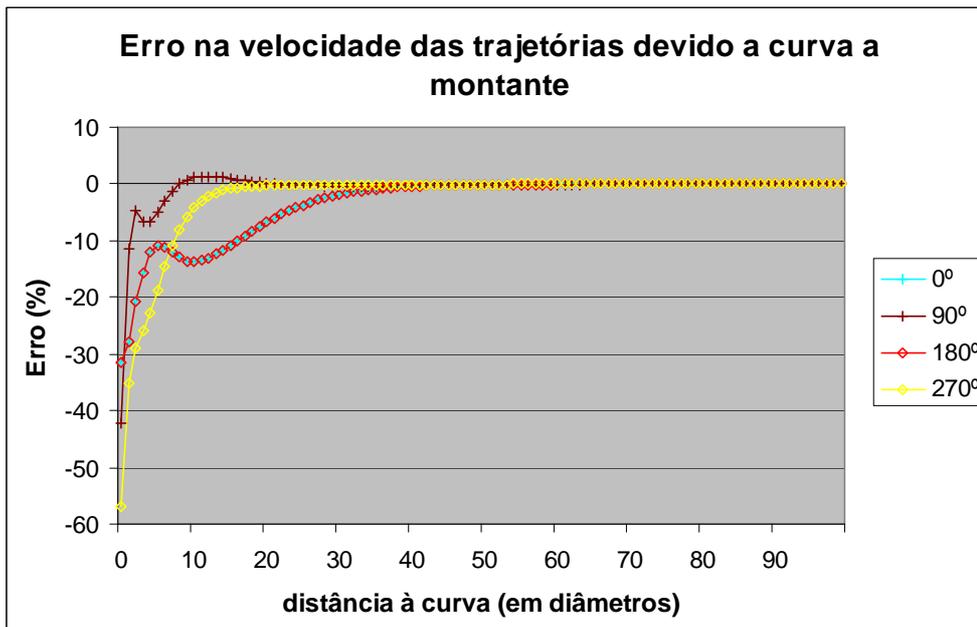


Figura 5-6: Erro \bar{w}_T de velocidade nas linhas: para β igual a 0° , 90° , 180° e 270° ($Re=500$).

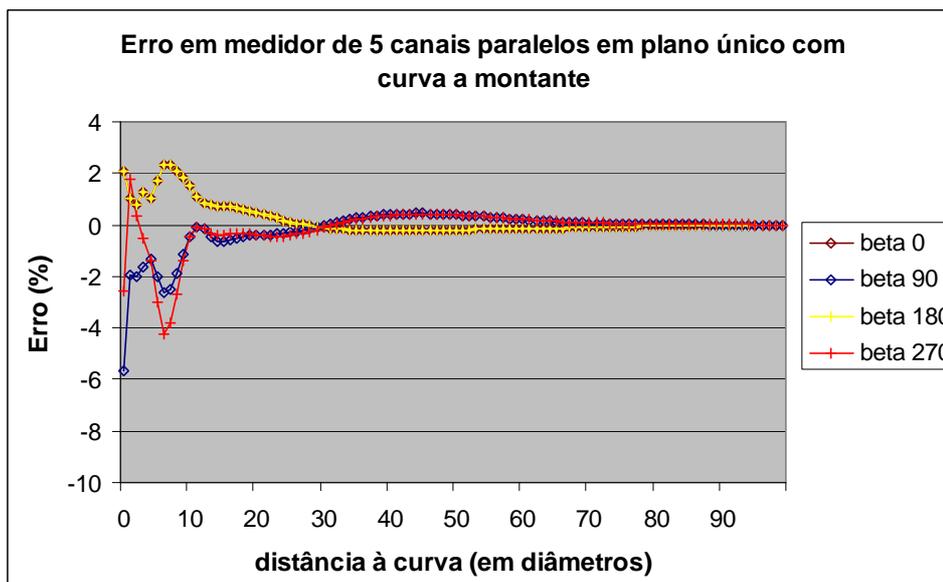


Figura 5-7: Erro para medidor com 5 canais paralelos em plano único para diferentes β igual a 0° , 90° , 180° e 270° ($Re = 150.000$).

Os erros da Figura 5-7 comparados com os erros da Figura 5-4 mostram que com 5 canais, a influência da curva diminuiu de modo significativo: com 1 canal o erro em módulo chegou a 60% (a $0D$, com $\beta = 90^\circ$) e, com 5 canais, esse erro em módulo ficou menor que 6%.

Após 5D, os erros com 1 canal ficam entre +10% e -20%, enquanto que com 5 canais ficam entre +2% e -4%.

As análises com medidor de 5 canais paralelos no mesmo plano foram refeitas para um arranjo com canais paralelos em planos cruzados, mantendo o β dos canais 1,3 e 5 e girando 180° do β dos canais 2 e 4. O gráfico da Figura 5-8 apresenta os erros para os medidores de 5 canais paralelos em planos cruzados.

Os erros da Figura 5-8 comparando com os erros da Figura 5-7, só vão se diferenciar para β igual a 90° e 270° , de 0D a 20D a jusante da curva. A diferença maior fica a 0D, quando a simulação do medidor com canais cruzados o erro, em módulo, chega a 9%.

Com medidores de 5 canais, os valores dos erros para β igual a 90° e 270°

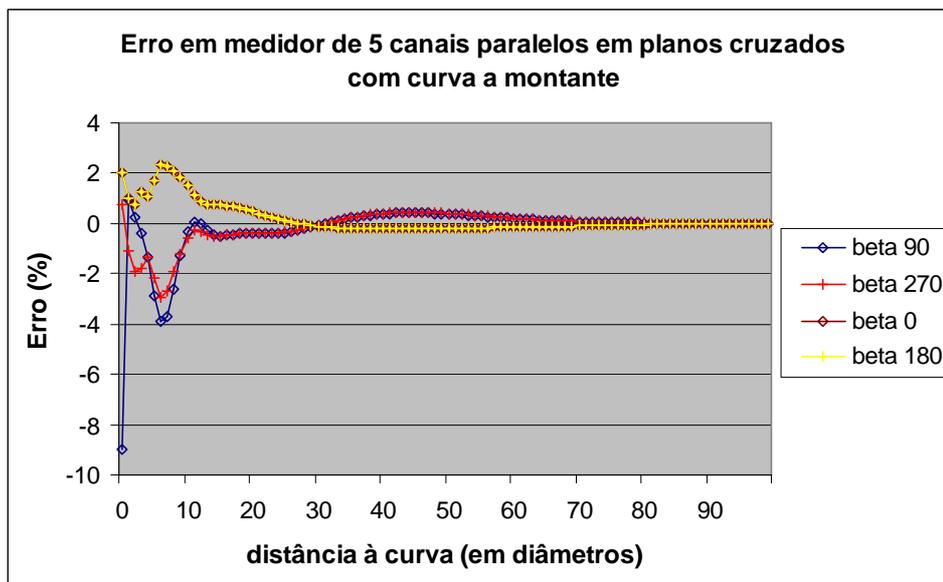


Figura 5-8: Erro para medidor com 5 canais paralelos em planos cruzados para β igual a 0° , 90° , 180° e 270° a jusante da curva.

5.1.2.

Fator de Diagnóstico

Foram utilizados aqui os fatores de diagnóstico apresentados no item 3.3.3, para medidores de 5 canais.

Os gráficos da Figura 5-9, da Figura 5-10 e da Figura 5-11 apresentam o fator de assimetria (F_{Ass5}), fator de escoamento cruzado (F_{EC5}) e fator de regime de escoamento (F_{RE5}) para β igual a 0° , 90° e 270° , respectivamente, para um medidor de 5 canais no mesmo plano.

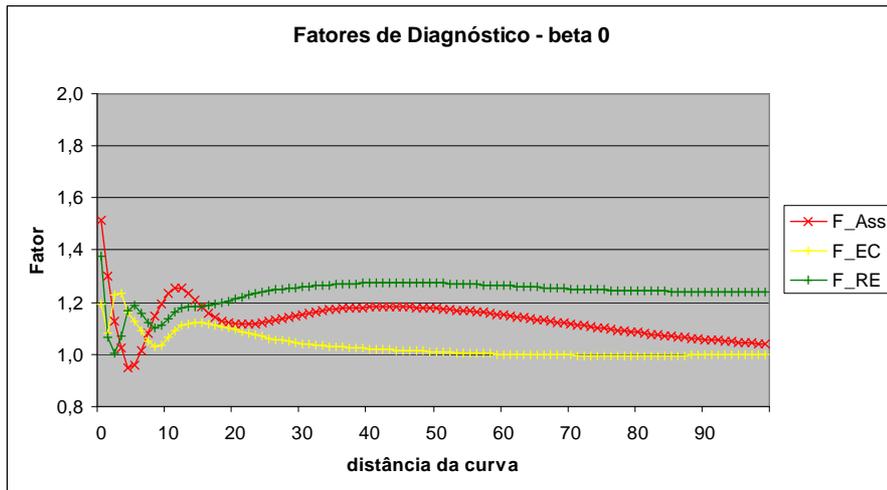


Figura 5-9: F_{Ass5} , F_{EC5} e F_{RE5} para $\beta = 0^\circ$ para medidor de 5 canais, com canais paralelos em plano único.

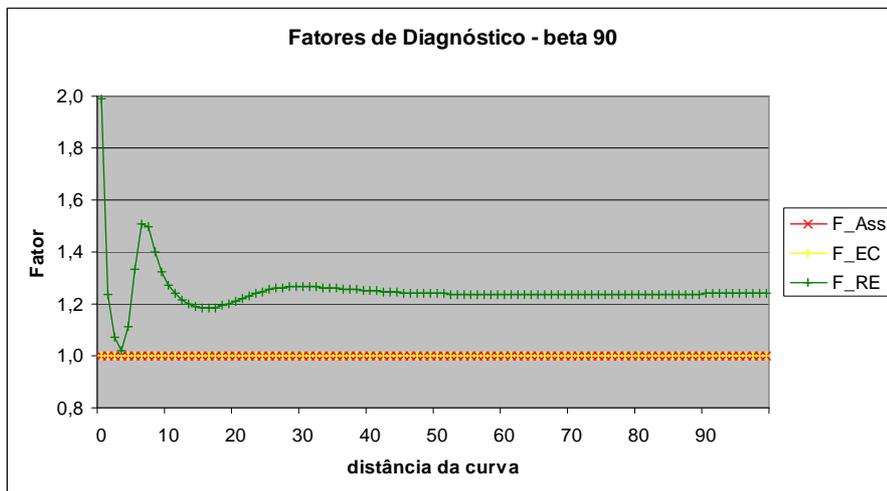


Figura 5-10: F_{Ass5} , F_{EC5} e F_{RE5} para $\beta = 90^\circ$ para medidor de 5 canais, com canais paralelos em plano único.

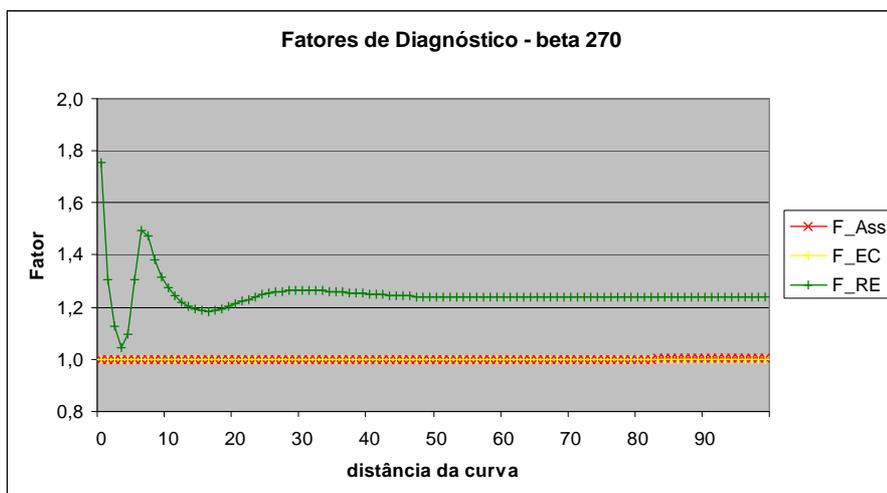


Figura 5-11: F_{Ass5} , F_{EC5} e F_{RE5} para $\beta = 270^\circ$ para medidor de 5 canais, com canais paralelos em plano único.

Esses fatores, F_{Ass5} , F_{EC5} , F_{RE5} , estão descritos no item 3.3.3, pela eq. (3-64), eq. (3-66) e eq. (3-68), respectivamente.

O gráfico para β igual a 180° não foi incluído, devido a sua semelhança com o gráfico para β igual a 0° . A igualdade dos fatores para β igual a 0° e 180° é devido à simetria do escoamento.

Há também semelhança entre os fatores para β igual a 90° e 270° , apesar da assimetria do perfil, a comparação entre os canais, seguindo as equações dos fatores geram resultados próximos.

Pelos gráficos da Figura 5-9, Figura 5-10 e Figura 5-11, verifica-se primeiramente que a avaliação de assimetria e escoamento cruzado depende da posição relativa do medidor ultrassônico com relação à assimetria ou, no caso, à curva. Um medidor ultrassônico posicionado com β igual a 90° ou 270° em qualquer ponto a jusante de uma curva, mesmo que esteja a 0D da curva, não consegue identificar a curva pelos parâmetros de assimetria.

O fator de regime de escoamento (F_{RE}) compara a velocidade no centro do duto com a velocidade próximo à parede. Assim, seu valor não seria necessariamente o mesmo para β igual a 90° ou 270° . Não são iguais, mas estão bastante próximos.

Oliveira et al. (2007) indicam, para medidor ultrassônico de 5 canais, um valor de 1,17 para o F_{RE} . No caso de o medidor ter sido instalado com retificador, uma variação de até 2% é esperada. Esta indicação não está compatível com os valores aqui encontrados, pois para todos β aqui analisados, o F_{RE} a 80D é igual a 1,24, que está fora da faixa indicada.

Outro problema com o F_{RE} é sua sensibilidade à existência de acidentes a montante, o que vai dificultar sua utilização e mostra que ele só identifica o Re em escoamento completamente desenvolvido.

Foram elaborados também os gráficos para os fatores de diagnóstico para o medidor de 5 canais paralelos em planos cruzados, que o β dos canais 1, 3 e 5 e gira 180° do β dos canais 2 e 4.

A Figura 5-12 mostra os gráficos para os fatores F_{Ass5} , F_{EC5} e F_{RE5} para β igual a 90° . O traçado desse gráfico está muito próximo do traçado do gráfico da

Figura 5-10. O F_{Ass5} e o F_{EC5} são iguais a 1,0 e o F_{RE5} com o mesmo padrão e valores próximos.

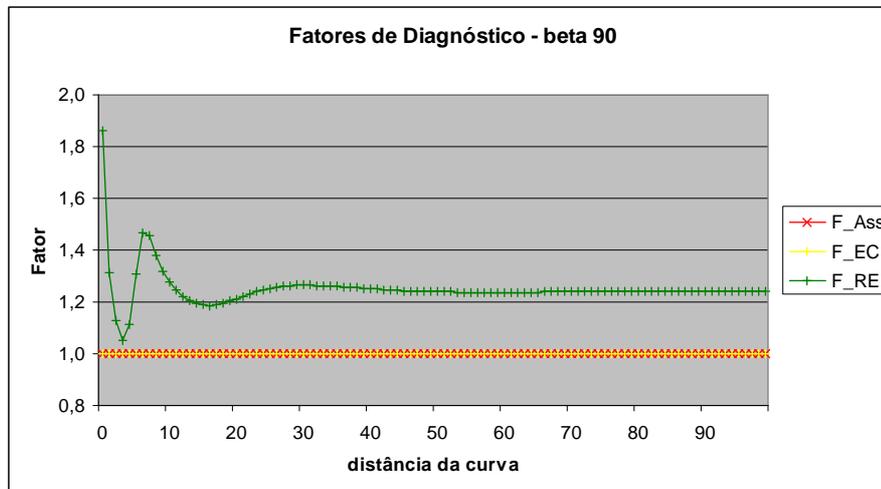


Figura 5-12: F_{Ass5} , F_{EC5} e F_{RE5} para $\beta = 90^\circ$ para medidor de 5 canais, com canais paralelos em planos cruzados.

Os gráficos para β igual a 0° e 180° para medidores com canais paralelos em planos cruzados não foram aqui incluídos, pois são exatamente iguais aos gráficos da Figura 5-9. O gráfico para β igual a 270° também não foi incluído, pois é muito próximo do gráfico da Figura 5-12.

Os resultados dos fatores de diagnóstico de um medidor com 5 canais paralelos em um único plano, ou em planos cruzados são idênticos.

Nas simulações realizadas, os fatores de diagnóstico F_{Ass5} , F_{EC5} e F_{RE5} não conseguiriam com segurança identificar uma curva de 90° a montante. O fator de diagnóstico F_{RE5} não consegue avaliar o Re do escoamento devido a suas variações devido à curva.

5.2.

Resultados com Curva

5.2.1.

Modelagens e Simulações

Para determinar a sensibilidade do medidor a curvas a montante de forma sistemática, foram configuradas as modelagens: uma curva (1C), duas curvas no

mesmo plano (2C1P) e duas curvas em planos perpendiculares (2C2P). Para cada uma das modelagens foram incluídas as simulações:

- linhas inclinadas de 0D a 99D para β igual a 0° , 90° , 180° e 270° ;
- linhas inclinadas com β variando de 0° a 360° , em 0D, 5D, 20D e 80D.

Foram incluídos nessas simulações medidores de 1 canal (1canal); 2 canais (2canais); 3 canais no mesmo plano (3canais); 3 canais em planos cruzados (K3); 4 canais no mesmo plano (4canais); 5 canais no mesmo plano (5canais); 5 canais em planos cruzados (K5); 8 canais em planos cruzados e casados (C8). Em algumas simulações foram incluídos também: 1 canal com reflexão (V), 2 canais cruzados (X), 2 canais com reflexão e cruzados (XX) e 4 canais defasados 90° (#).

O medidor com 3 canais em planos cruzados (K3) tem sua posição determinada pelos canais 1 e 3, e utiliza o canal 2 de um medidor defasado 180° . Da mesma forma, o medidor K5 tem sua posição determinada pelos canais 1, 3 e 5, e utiliza os canais 2 e 4 de um medidor defasado 180° . O medidor C8 é formado por dois medidores de 4 canais paralelos defasados 180° .

O medidor de 2 canais cruzados (X) é formado por dois medidores de 1 canal defasados 180° . O medidor de 1 canal com reflexão (V) é formado por medidores de um canal defasados 180° e posicionados de forma que o final da primeira linha coincida com o início da segunda. O medidor com 2 canais com reflexão e cruzados (XX) é constituído por dois medidores de 1 canal com reflexão defasados 180° .

Para os medidores de um canal constituído de apenas uma linha, o valor tido como velocidade média no medidor é a velocidade média na linha. No caso de medidores de 2 ou mais canais em um mesmo plano ou em planos cruzados a velocidade média é calculada pela integração de Gauss-Legendre. Para os medidores com mais de um canal que cruzam o eixo do medidor, a velocidade média é calculada pela média aritmética das velocidades médias das linhas.

Nas três modelagens foi utilizado um trecho reto de 100D a montante das curvas para garantir perfil completamente desenvolvido. A configuração dessas modelagens segue o padrão utilizado no presente trabalho com água com propriedades constantes, modelo RNG k-epsilon, sem transferência de calor, parede lisa sem deslizamentos, diâmetro do duto de 0,5m e Re igual a 150.000.

A modelagem 1C utilizou uma malha com um trecho reto de 100D, uma curva de 90° e mais outro trecho reto de 100D, e totalizou 453.964 elementos.

O contorno do *Velocity* no plano da curva da modelagem 1C aparece na Figura 5-13 (escala: 0 a 0,85 m/s). A Figura 5-14 apresenta as linhas de corrente e o contorno do *Velocity* na seção transversal a 0D (escala: 0 a 0,68 m/s).

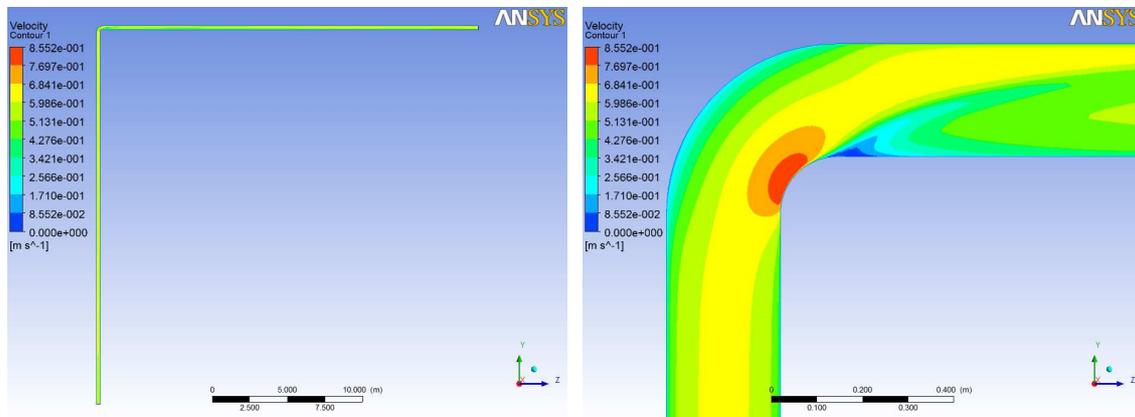


Figura 5-13: Contorno no plano yz da modelagem 1C.

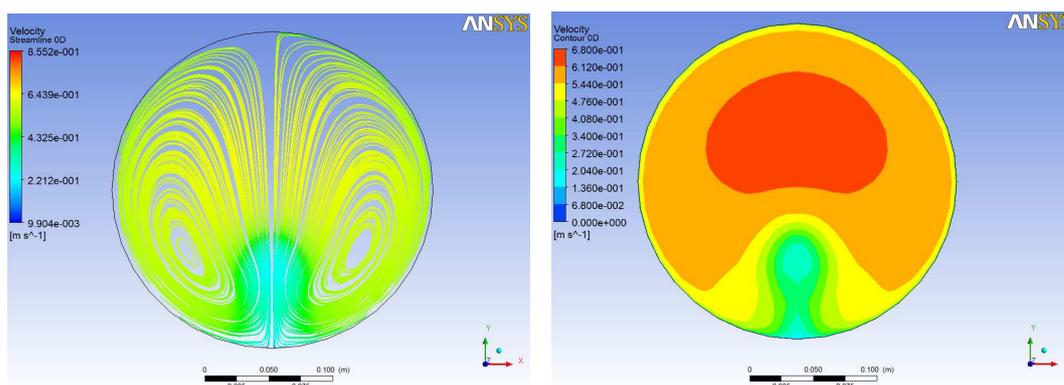


Figura 5-14: Linhas de corrente e contorno do *Velocity* a 0D da curva (1C).

Na modelagem 1C, a velocidade mais elevada fica próximo da parede interna da curva, ultrapassando os 0,77 m/s.

As malhas das modelagens 2C1P e 2C2P foram construídas a partir da malha D5 já utilizada nas modelagens descritas no item 3.3.1. A malha primitiva (D5) possui no total 263.160 elementos e é formada por um trecho reto de 1,67D, uma curva de 90° e outro trecho reto de 100D.

Na configuração da malha da modelagem 2C1P, a malha D5 foi refletida. Para gerar a malha da modelagem 2C2P, a malha D5 foi refletida e rotacionada. Assim, as malhas de 2C1P e de 2C2P incluem: trecho reto de 100D, curva de 90°, trecho reto de 3,33D, outra curva de 90°, e outro trecho reto de 100D; e totalizam 526.320 elementos.

A Figura 5-15 apresenta para a modelagem 2C1P o contorno do *Velocity* no plano das curvas (escala: 0 a 0,94 m/s). A Figura 5-16 mostra a linha de corrente e o contorno do *Velocity* para a modelagem 2C1P na seção transversal a 0D a jusante da segunda curva (escala: 0 a 0,68 m/s). Na Figura 5-15 aparece a fronteira entre as duas malhas primitivas.

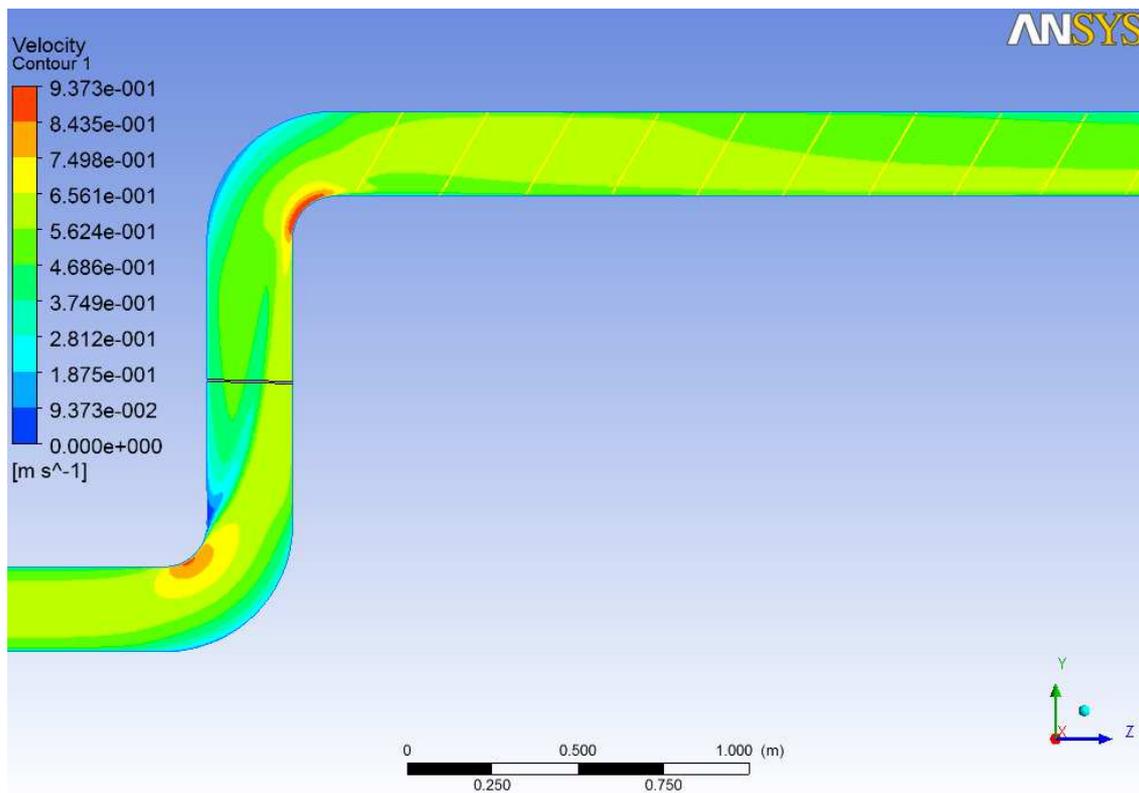


Figura 5-15: Contorno do *Velocity* no plano *xy* no 2C1P.

O contorno da primeira curva do *Velocity* para a modelagem 2C2P é semelhante ao contorno da curva de 1C e da primeira curva de 2C1P.

A Figura 5-17 mostra a linha de corrente e o contorno do *Velocity* para 2C2P na seção transversal a 0D após a segunda curva (escala de 0 a 0,68 m/s).

Os contornos de *Velocity* nas seções transversais para as modelagens 1C e 2C1P mostram claramente a simetria com relação ao eixo *y*, o que não ocorre na modelagem 2C2P. As linhas de corrente das modelagens 1C e 2C1P são similares e sua semelhança aumenta a partir de 5D.

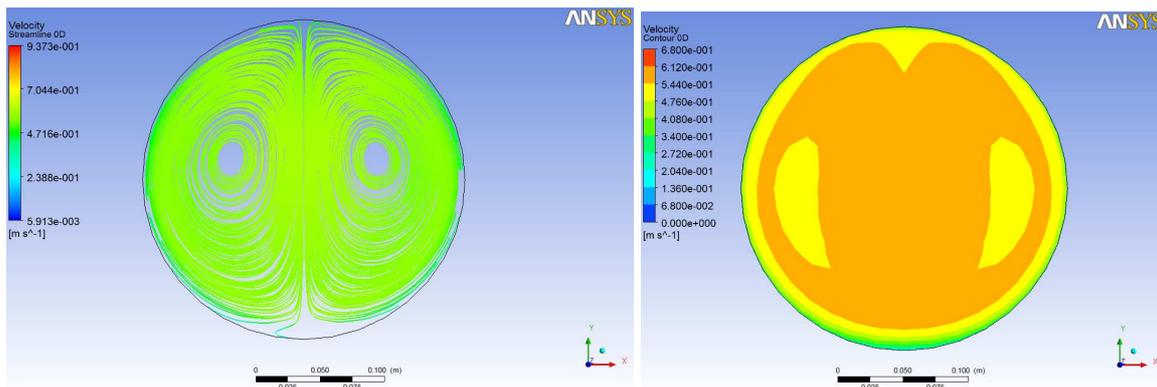


Figura 5-16: Linhas de corrente e contorno do *Velocity* a 0D (2C1P).

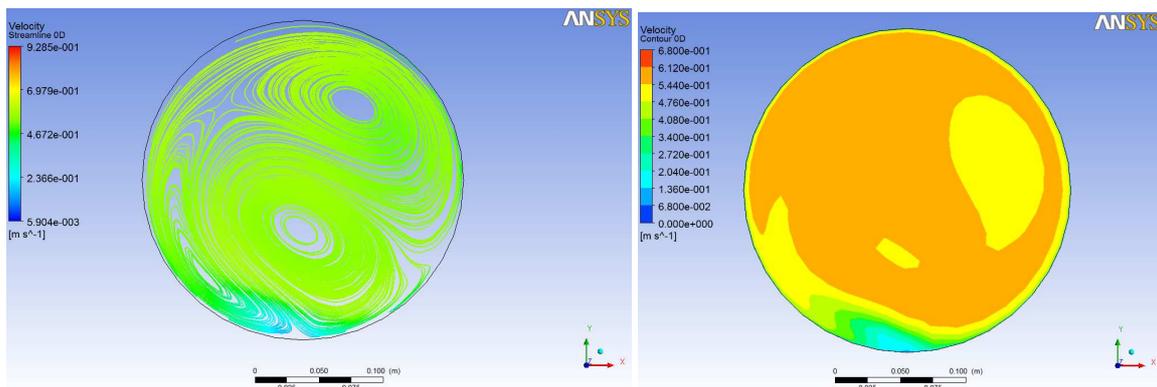


Figura 5-17: Linhas de corrente e contorno do *Velocity* a 0D (2C2P).

Nas três modelagens o perfil de escoamento a 80D ainda mostra alguma assimetria. Como analisado no item 3.3.1, as linhas de corrente se mantêm a 80D mas o valor do *swirl* não é significativo.

As simulações foram feitas para as três modelagens. Foram traçadas linhas retas inclinadas simulando as trajetórias dos medidores. Para que a análise dos resultados possa ser feita de forma sistemática, foram montadas sequências de conjuntos de linhas inclinadas, para simular medidores de 1, 2, 3, 4 e 5 canais:

- 100 conjuntos de linhas inclinadas posicionadas de 0D a 99D
 - para β igual a 0°; 90°; 180°; e 270°.
- 36 conjuntos de linhas inclinadas com β de 0° a 360°
 - posicionadas a 0D, 5D, 20D e 80D.

Na Figura 5-15, as linhas inclinadas amarelas a jusante da segunda curva, indicam a posição de nove linhas inclinadas da sequência de medidores de 1 canal, na modelagem 2C1P

A Figura 5-18 mostra os 36 conjuntos de linhas inclinadas para medidor de 3 canais.

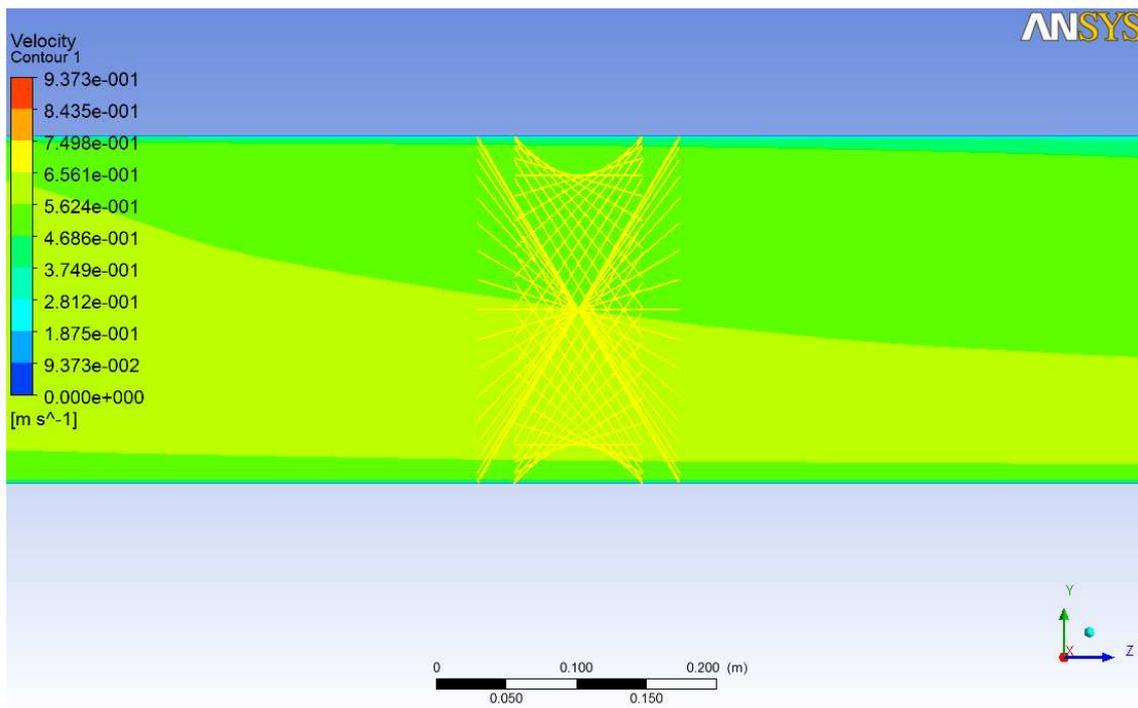


Figura 5-18: Indicação das linhas de medidores de 3 canais, na posição 5D, para diferentes β , na modelagem 2C1P.

5.2.2.

Velocidade a Jusante da Curva de 0D a 100D

O Anexo A apresenta os gráficos com as velocidades indicadas por medidores ultrassônicos posicionados de 0D a 100D a jusante das curvas. Foram incluídos os medidores 1canal, 2canais, 3canais, 4canais, 5canais, K3, K5, C8 e X. As séries incluíram β igual a 0° , 180° , 90° e 270° .

As figuras do anexo estão organizadas da seguinte forma:

- Modelagem 1C: Figura A-1 até Figura A-4;
- Modelagem 2C1P: Figura A-5 até Figura A-8;
- Modelagem 2C2P: Figura A-9 até Figura A-12.

As velocidades estão normalizadas pela velocidade média do escoamento, que é constante em todo o domínio, e é dado de entrada. Neste item e nos demais itens deste capítulo, será utilizada a velocidade adimensional, visando facilitar as comparações dos resultados.

As escalas dos gráficos são diferentes, pois as variações nos resultados para β igual a 90° e 270° de 0D a 100D são significativamente maiores do que a variação para β igual a 0° e 180° .

Para os quatro gráficos a velocidade média a 80D são praticamente iguais entre si, com os valores em torno de 1,06 para 1 canal; 0,99 para 2 canais; 0,98 para 3 canais; e 0,97 para 4 e 5 canais. Esse resultado é similar ao resultado encontrado na simulação usando planilhas Excel para as equações de Bogue-Metzner para perfil completamente desenvolvido, com a única diferença que para 2 canais Bogue-Metzner indica 0,98. As modelagens aqui analisadas utilizaram modelo de turbulência RNG k-epsilon.

Para as modelagens 1C e 2C1P, os gráficos para β igual a 0° e 180° são idênticos devido à simetria do escoamento no plano perpendicular ao plano da curva. Essa simetria não ocorre com a modelagem 2C2P.

As maiores variações na velocidade ocorreram para as modelagens 1C e 2C1P, com β igual a 90° e 270° . Os medidores que apresentaram maiores variações foram o medidor 1canal e o medidor K3. Com a 1C, o medidor 1canal chegou a variar de 0,4 a 1,3 e o medidor K3 chegou a variar de 0,5 a 1,37. Com a 2C2P, a variação do medidor 1canal foi de 0,75 a 1,35 e a variação do medidor K3 foi de 0,65 a 1,32. As variações da 1C são maiores do que as variações da 2C2P.

As variações do medidor X foram bem menores do que as variações com o modelo 1canal; e as variações do modelo 3canais foram bem menores do que as variações com o K3.

Após 60D o escoamento, para todas as modelagens pode ser considerado completamente desenvolvido (variações menores que 1%).

Para analisar a resposta do medidor ao longo do trecho reto a jusante de um acidente, além das amplitudes das variações é interessante a taxa dessa variação, o que indica a sensibilidade do medidor em função de sua posição ao longo do trecho reto.

Para β igual a 0° e 180° , as variações nos gráficos da 2C1P estão são de modo geral menores do que as variações da 1C. Além da amplitude, o gráfico da 2C1P apresenta uma variação mais suave e contínua, enquanto que com apenas 1 curva, há variações bruscas na velocidade ao longo dos primeiros diâmetros a jusante da curva.

Quando a variação é suave, um fator calculado com base nos gráficos para corrigir o erro identificado terá uma probabilidade muito maior de estar correto.

As variações nas velocidades adimensionais nos gráficos de 2C2P são também significativas, mas são menores do que as variações com β igual a 90° ou 270° nas outras modelagens.

O medidor X pode ser, por exemplo, um *clamp-on* com dois canais cruzados, que é um medidor simples com relação a outros com 4, 5 ou 8 canais. E o X obteve resultados mais próximos dos medidores melhores. Assim, foram montados os gráficos especificamente para os medidores 1canal, X, V, XX e #.

Assim, no Anexo A, foram incluídas as Figuras A-10 até A-13, que apresentam os gráficos com velocidade adimensional para os medidores 1canal, X, V, XX, #, para 1C e 2C1P. Foram incluídos apenas os gráficos com β igual a 0° e 90° , pois foram os ângulos com as menores e maiores variações, respectivamente.

O medidor 1canal e V são formados por apenas 1 canal, direto e com reflexão; os medidores X e XX, por 2 canais, direto e com reflexão; e o medidor # por 4 canais diretos.

Os resultados com X, V e XX são similares. Se for utilizar um *clamp-on* com um canal, é recomendável procurar utilizá-lo com reflexão.

Nas posições com $\beta = 90^\circ$, a melhora dos resultados com # é significativa, entretanto, com $\beta = 0^\circ$, os resultados pioram com #.

5.2.3.

Fator a Jusante da Curva de 0D a 100D

O Anexo B apresenta os gráficos com os fatores de medidores ultrassônicos posicionados de 0D a 100D a jusante das curvas. Foram incluídos os medidores 1canal, 2canais, 3canais, 4canais, 5canais, K3, K5, C8 e X. As séries incluíram β igual a 0° , 180° , 90° e 270° .

As figuras do anexo estão organizadas da seguinte forma:

- Modelagem 1C: Figura B-1 até Figura B-3;
- Modelagem 2C1P: Figura B-4 até Figura B-6;
- Modelagem 2C2P: Figura B-7 até Figura B-10.

Para quantificar as variações, foram montados os gráficos com os fatores. Está sendo denominado fator do medidor a relação entre a velocidade indicada

pelo medidor em uma dada posição dividida pela velocidade indicada pelo medidor a 80D.

Os gráficos com os fatores para β igual a 180° para as modelagens 1C e 2C1P não foram incluídos, pois são idênticos aos gráficos para β igual a 0° .

Os fatores mais próximos de 1,00 foram obtidos com os medidores posicionados com β igual a 0° e a 180° nas modelagens 1C (de 0,87 a 1,07) e 2C1P (0,95 a 1,03).

Entretanto, essas modelagens apresentam variações significativas ao longo dos 100D para outras inclinações β . O fator em 1C foram 0,45 a 1,25 com β igual a 90° , e 0,35 e 1,40 para β igual a 270° . O fator de 2C1P variaram de 0,7 a 1,35 para β igual a 270° , e 0,65 e 1,25 para β igual a 270° .

Quando β é igual a 0° , significa a reta que corta o centro das trajetórias está no plano da curva, ou seja, se o plano da curva estiver na vertical, os transdutores devem estar na lateral do duto. Entretanto, se o plano da curva estiver na horizontal, a recomendação seria estar com os transdutores na geratriz inferior e superior do duto.

De modo geral, a modelagem 2C1P apresentou resultado melhor do que a modelagem 1C.

Com duas curvas em planos perpendiculares, o fator variou de 0,85 a 1,15; de 0,75 a 1,20; de 0,90 a 1,5; e de 0,90 a 1,10 para β igual a 0° , 180° , 90° e 270° , respectivamente. Assim, os resultados são mais uniformes e não há uma posição recomendada.

As três modelagens, com quatro inclinações de β , 100 posições ao longo dos 100D, medidores de 1 a 5 canais com diferentes arranjos resultaram em grande quantidade de informações. A análise dos medidores, então, é feita por comparações específicas:

a) Monocanal ou Multicanal:

Os medidores monocanais mostram as maiores variações no fator para praticamente todas as modelagens em todas as posições. O pior fator foi 0,35 para 1C, $\beta = 270^\circ$.

Dentre os multicanais, os medidores que apresentaram os maiores fatores foram K3 (em 1C a 90° e 270° ; 2C1P a 90° e 270° ; e 2C2P a 0° e 180°) e X (em 1C e 2C1P a 0° ; e 2C2P a 90° e 270°).

b) Medidores com Canais no Mesmo Plano ou em Planos Cruzados:

Os medidores 1canal, 2canais, 3canais, 4canais e 5canais foram os medidores primeiramente construídos. O medidor X são dois medidores 1canal, o K3 é um medidor 3canais em planos cruzados, o K5 é um medidor 5canais em planos cruzados e o medidor C8 são dois medidores 4canais em planos cruzados.

Os medidores 1canal e X; 3canais e K3; 5canais e K5; e 4canais e C8 mostram os mesmos resultados em 1C e 2C1P a 0° e 180° . Nas outras posições β e para 2C2P, as respostas são distintas.

c) 3canais ou K3:

Com exceção dos arranjos em que os medidores 3canais e K3 apresentam os mesmos resultados, em todos os outros arranjos o K3 mostrou variações significativamente maiores do que o 3canais.

d) 4canais, 5canais, K5 e C8:

Medidores com quatro ou mais canais são utilizados em medição de transferência de custódia ou medição fiscal e, a expectativa é obter os melhores resultados. Realmente, de modo geral, os menores fatores foram obtidos com os arranjos 4canais, 5canais, 5K e C8.

Entretanto, considerando uma faixa de 0,95 a 1,05 para o fator, esses medidores saíram da faixa: C8 em duas posições (1C a 90° e 270°); 4canais e 5canais em cinco posições (1C a 90° e 270° ; 2C1P a 90° e 270° ; e 2C2P a 90°); e K5 em seis posições (1C a 90° e 270° ; 2C1P a 270° ; e 2C2P a 0° , 180° e 270°)

e) 2canais ou X:

Os medidores 2canais e X são medidores de 2 canais, mas assim como seus arranjos, suas respostas são distintas. Em 1C e 2C1P, a 0° , o fator foi maior para X. Em outras posições, de modo geral, o fator apresentou uma variação brusca em 2canais nos primeiros 5D enquanto que X se manteve mais estável.

Pelos fatores aqui considerados é imediato chegara aos erros. Está sendo considerado o valor a 80D como referência ou valor verdadeiro.

Para $\beta = 0^\circ$, 90° e 270° os erros que em módulo são máximos em 1C são: 1canal (-13%; 24%; -64%), 2canais (7,0%; -15%; 26%), 3canais (3,9%; -12%; 5,4%), 4canais (3,5%; -13%; 19%), 5canais (2,8%; -6,1%; 9,4%); C8 (3,5%;

5,8%; 5,8%), K5 (2,8%; 14%; -7,5%), X (-13%; -25%; -25%) e K3 (3,9%; -49%; 40%).

Para $\beta = 0^\circ, 90^\circ$ e 270° os erros que em módulo são máximos em 2C1P são: 1canal (-5,0%; -29%; 25%), 2canais (1,7%; 18%; -19%), 3canais (2,6%; 10%; -7,7%), 4canais (1,9%; 15%; -9,7%), 5canais (1,7%; 10%; -8,0%); C8 (1,9%; 2,7%; 2,7%), K5 (1,7%; -3,6%; 6,0%), X (-5,0%; -9,6%; -9,6%) e K3 (2,6%; 35%; -32%).

O escoamento da modelagem 2C2P não tem simetria em y . Para $\beta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ e 270° os erros que em módulo são máximos em 2C2P são: 1canal (14%; -9,2%; -23%; -11%), 2canais (-8,0%; 13%; 15%; -8,7%), 3canais (1,3%; 5,0%; 1,9%; 3,8%), 4canais (-3,5%; 7,4%; 3,8%; 4,0%), 5canais (-2,2%; 7,8%; 2,9%; 3,2%); C8 (1,4%; 3,6%; 1,4%; 3,6%), K5 (7,3%; 3,1%; -7,1%; 9,1%), X (-4,5%; -6,6%; -4,5%; 6,6%) e K3 (-16%; 4,7%; 19%; 6,6%).

5.2.4.

Velocidade na Seção Transversal (360°)

O Anexo C apresenta os gráficos com a velocidade dos medidores ultrassônicos nas seções transversais a 0D, 5D, 20D e 100D. As velocidades foram calculadas a cada 10° . Foram incluídos os medidores 1canal, 2canais, 3canais, 4canais, 5canais, K3, K5, C8 e X.

As figuras do anexo estão organizadas da seguinte forma:

- Modelagem 1C: Figura C-1 até Figura C-4;
- Modelagem 2C1P: Figura C-5 até Figura C-8;
- Modelagem 2C2P: Figura C-9 até Figura C-12.

As velocidades dos gráficos do Anexo C para β igual a $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ e 270° coincidem com seus correspondentes do Anexo A, a 0D, 5D, 20D e 80D.

A igualdade dos gráficos de velocidade ao longo dos 100D a 0° e 180° para 1C, e para 2C1P é vista também nos gráficos de velocidade nos 360° .

As escalas dos gráficos de velocidade variam em função da amplitude das variações impostas pelo degrau, que são maiores a 0D e menores a 80D.

Os valores de variação máxima e mínima nem sempre ocorrem para β igual a $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ ou 270° . Pelos gráficos do Anexo A, para modelagem 1C, a velocidade máxima do medidor 1canal é 1,21, e ocorre a 0D. Entretanto, o Anexo

A só indica as velocidades a 0° , 90° , 180° e 270° . Analisando pelo Anexo C, a velocidade máxima na modelagem 1C, para medidor 1canal, é 1,35 e ocorre para β entre 110° e 120° .

Os medidores C8 e X têm todas as suas trajetórias em par cruzado e casado. Por isso, nos gráficos de velocidade de 1C e 2C1P sua resposta ao longo da faixa de 0° a 180° é idêntica a sua resposta de 180° a 360° .

A 80D a influência das curvas não é significativa. As velocidades, para as três modelagens, apresentam velocidade praticamente constante nos 360° com valor típico de escoamento completamente desenvolvido.

Nas três modelagens, o aumento do número de canais, de modo geral, melhora o resultado dos medidores. Os medidores com 4 ou mais canais obtiveram em geral respostas melhores do que os medidores com 1, 2 ou 3 canais.

A variável *swirl* foi definida na eq. (3-54) e representa, na velocidade média da trajetória (\bar{w}_T), o peso das componentes u e v (considerando que o eixo da tubulação coincide com o eixo z). O parâmetro \bar{w}_T varia quando há curvas a montante, devido à deformação no perfil de velocidades w e, também, devido ao *swirl*.

Foi incluído no Anexo C os gráficos do *swirl* normalizado pela velocidade média do escoamento na seção transversal a 0D para as modelagens 1C e 2C2P, na Figura C-13 e na Figura C-14, respectivamente. O *swirl* só consegue ser eliminado de forma significativa nos medidores que apresentam par cruzado e casado, ou seja, quando as trajetórias realmente se cruzam. Os medidores que sofreram menor influência do *swirl* foram o X e o C8.

Os medidores 1canal e K3 mostraram as maiores sensibilidades ao *swirl* nas duas modelagens. Na modelagem 2C2P, a sensibilidade ao *swirl* é vista também no medidor 2canais e, em seguida, o K5.

O medidor X mostra, em alguns gráficos, variações consideráveis na velocidade média, mas comparando sua resposta como o 1canal, as variações do X são significativamente menores.

A velocidade w na seção transversal a 0D para as modelagens 1C e 2C2P aparecem na Figura C-15 e C-16. A soma de w (Figura C-15) com o *swirl* (Figura C-13) resulta na velocidade média indicada pelo medidor (\bar{w}_T) indicada na Figura C-1 (nos gráficos os valores estão normalizados). Da mesma forma, os valores do

gráfico da Figura C-16 mais os valores da Figura C-14, resultam nas velocidades da Figura C-9.

Para as três modelagens, a resposta dos medidores 1canal e X; 3canais e K3; 4canais e C8; 5canais e K5 se aproximam sem o *swirl*, ou seja, suas respostas em W normalizado ficam bastante semelhantes ao longo dos 360° se comparadas com a velocidade média normalizada. Esta semelhança pode ser verificada comparando-se os gráficos da Figura C-1 com o gráfico da Figura C-15, e o gráfico da Figura C-9 com o gráfico da Figura C-14.

5.2.5.

Fator na Seção Transversal (360°)

O Anexo D apresenta os gráficos com os fatores dos medidores ultrassônicos nas seções transversais a 0D, 5D, 20D e 100D, que foram calculados a cada 10° . Foram incluídos os medidores 1canal, 2canais, 3canais, 4canais, 5canais, K3, K5, C8 e X.

As figuras do anexo estão organizadas da seguinte forma:

- Modelagem 1C: Figura D-1 até Figura D-4;
- Modelagem 2C1P: Figura D-5 até Figura D-8;
- Modelagem 2C2P: Figura D-9 até Figura D-12.

Os gráficos com o fator do medidor é mais imediato para avaliar o erro do medidor devido às curvas a montante. Os fatores dos gráficos do Anexo D para β igual a 0° , 90° , 180° e 270° coincidem com seus correspondentes do Anexo A, a 0D, 5D, 20D e 80D.

Os fatores representam a relação entre a velocidade média no medidor simulado em uma dada posição (distância e ângulo) com relação a curvas a montante e a velocidade média que seria indicada pelo mesmo medidor simulado em escoamento completamente desenvolvido.

A uma distância 20D a jusante da curva, medidores de 2 e 3 canais chegam a fatores de 0,9 a 1,08 para a 1C; de 0,93 a 1,07 para a 2C1P; e de 0,96 a 1,04 para a 2C2P. Medidores de 4 e 5 canais chegaram a fatores de 0,99 a 1,04 para a 1C; 0,99 a 1,03 para a 2C1P; e de 0,99 a 1,03 para a 2C2P.

Quando o objetivo é avaliar o erro, é mais interessante utilizar o fator do que a velocidade, pois a velocidade a 80D não tende a 1,0, mas às constantes que podem ser vistas, por exemplo, na Figura C-12. O gráfico dos fatores é

interessante em especial na avaliação de erros menores que 5%. O gráfico da velocidade pode confundir o leitor devido às constantes para escoamento completamente desenvolvido.

5.2.6.

Parâmetros de Diagnóstico

O Anexo E apresenta os gráficos com resultados de parâmetros de diagnóstico que medidores ultrassônicos posicionados de 0D a 100D a jusante das curvas indicariam. Foram incluídos os medidores 4canais, 5canais e K5. As séries incluíram β igual a 0° , 90° , 180° e 270° .

As figuras do anexo estão organizadas da seguinte forma:

- Modelagem 1C: Figura E-1 até Figura E-4;
- Modelagem 2C1P: Figura E-5 até Figura E-8;
- Modelagem 2C2P: Figura E-9 até Figura E-12.

Os parâmetros de diagnóstico aqui apresentados foram descritos no item 3.3.3. Foram incluídos o fator de assimetria (F_{Ass}), fator de escoamento cruzado (F_{EC}) e fator de regime de escoamento (F_{RE}), conforme definido pela eq. (3-63), eq. (3-65) e eq. (3-67) para o medidor de 4 canais e pela eq. (3-64), eq. (3-66) e eq. (3-68) para os medidores de 5 canais.

O F_{Ass} é a razão entre as velocidades médias dos canais do segmento negativo do eixo x pelas velocidades médias dos canais do segmento positivo. O F_{EC} usa em seus pares um canal interno e outro externo de cada lado. F_{Ass} e F_{EC} avaliam a assimetria.

Os parâmetros para avaliação da assimetria falham totalmente com β igual a 90° ou 270° , nas modelagens 1C e 2C1P. Foram as posições nas quais os medidores mostraram suas maiores variações e o *swirl* é elevado. No entanto, nenhuma assimetria é indicada e F_{Ass} e F_{EC} se mantêm iguais à unidade. Só com isso, já fica inviável o uso desses fatores para avaliação de assimetrias no escoamento.

Com β igual a 0° e a 180° , os parâmetros F_{Ass} e F_{EC} mostram variações, mas não são coerentes com as assimetrias.

O F_{RE} é também denominado de fator de turbulência. É calculado pela razão da velocidade média nos canais mais internos pela velocidade média nos

canais mais externos e, assim, avalia o perfil. A proposta deste fator é definir de forma comparativa o número de Reynolds do escoamento.

Para as modelagens 1C e 2C2P, o F_{RE} apresenta os mesmos valores de 0D a 100D para os medidores 5canais e K5 para β igual a 0° e 180° . Para β igual 90° e 270° , apresentam diferenças nos primeiros diâmetros.

Em 1C, 2C1P e 2C2P, o número de Reynolds é igual a 150.000, para escoamento completamente desenvolvido, o valor de F_{RE} é o mesmo para as mesmas modelagens. Entretanto, pela variação dos perfis teóricos, para Re igual a 50 até Re igual a 150.000, ou seja, incluindo escoamento laminar, de transição e turbulento, a variação esperada em F_{RE} ficaria entre 1,05 e 1,25. Mas as variações devido à presença de curvas são significativas. Por exemplo, a 20D após a curva, para a modelagem 1C, o valor indicado seria 1,1 e, a 10D após a curva, esse valor seria de 0,9.

Assim, para utilizar um fator como o F_{RE} sem que o medidor tenha sido calibrado no local de operação e sem que a correlação entre Re e F_{RE} seja definida no local de operação.

5.3.

Resultados com Degrau

5.3.1.

Um Degrau a Montante

Foram encontradas na indústria instalações com degrau a montante do medidor. Para verificar a influência do degrau, três medidores ultrassônicos de três canais foram calibrados em laboratório em arranjos com e sem degrau. Na indústria, o primeiro degrau verificado foi de $-3,6\%$, mas degraus de outros tamanhos foram encontrados posteriormente. Na calibração, foi utilizado apenas degrau de $-3,6\%$.

A proposta, então, foi elaborar uma simulação numérica com um degrau de $-3,6\%$ que pode ser validada se a malha e a configuração da modelagem estiverem semelhantes às condições do laboratório de calibração.

Para avaliar o efeito do degrau, foram utilizadas duas malhas, ambas incluindo trecho reto (80D), degrau e trecho reto (100D):

- A) Trecho reto a montante com 0,3174 m de diâmetro e comprimento de 25,392 m (80D); degrau de $-3,6\%$; trecho reto a jusante com 0,3060 m de diâmetro e comprimento de 30,60 m (100D); comprimento total: 55,992 m.
- B) Trecho reto a montante com 0,3174 m de diâmetro e comprimento de 25,392 m (80D); degrau de $-8,6\%$ a montante; trecho reto a jusante com 0,2900 m de diâmetro e comprimento de 29,00 m (100D); comprimento total: 54,392 m.

Foram feitas modelagens com as malhas A e B. As modelagens foram configuradas com fluido água, entrada com u , v , w , κ e ε importados, Re igual a 200.000, sem transferência de calor, pressão estática média na saída 0 Pa, pressão de referência 1 atm, modelo de turbulência RNG-k-epsilon, parede lisa sem deslizamento, *auto-timescale* e precisão simples.

As modelagens foram configuradas com critério de convergência r.m.s. de 10^{-6} , entretanto, a convergência r.m.s. para as malhas com degrau ficou em torno de 3×10^{-5} (para u e v). Algumas alterações na configuração foram feitas, inclusive no *timescale*, e foram testadas outras malhas com degrau, mas não houve melhora na convergência. Como essa piora na convergência ocorreu apenas com as malhas com um degrau, ficou entendido que, independentemente de haver outras contribuições, a própria geometria com um degrau, que é pequeno com relação ao comprimento do duto, é o fator que dificultou a convergência. Para uma convergência r.m.s. de 3×10^{-5} , é indicado pelo CFX que a convergência não atingiu o nível de boa convergência, e é suficiente para muitas aplicações em engenharia.

A Figura 5-19 apresenta o contorno do parâmetro *Velocity* para a modelagem realizada com a malha de $-3,6\%$.

Nas modelagens, a viscosidade dinâmica (μ), a massa específica (ρ) e o número de Reynolds da entrada do domínio (Re_{duto}) foram dados de entrada. A partir da velocidade média na entrada (\bar{w}_{duto}) foram calculados a velocidade média na saída (\bar{w}_{med}) e o Re da saída (Re_{med}):

$$\bar{w}_{med} = \bar{w}_{duto} \frac{D_{duto}^2}{D_{med}^2} \quad (5-1)$$

$$Re_{med} = Re_{duto} \frac{D_{duto}}{D_{med}} \quad (5-2)$$

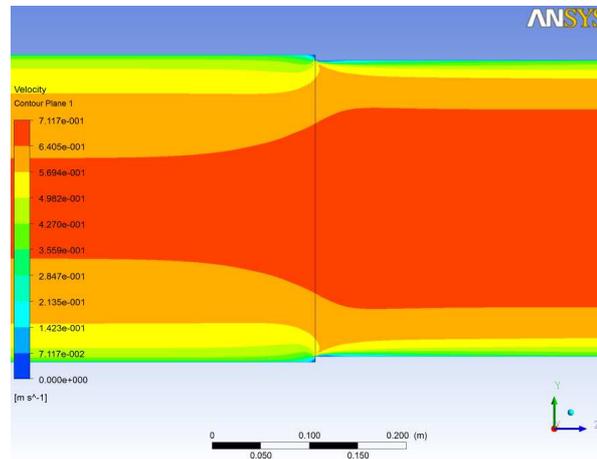


Figura 5-19: Contorno da *Velocity* em *yz* para malha com degrau de $-3,6\%$.

Assim, no domínio com degrau de $-3,6\%$, no Re da saída será $3,6\%$ maior que o Re na entrada.

Para facilitar comparações, a velocidade em um ponto ou uma linha é normalizada pela velocidade média em sua seção transversal. Assim, as velocidades no trecho reto após o acidente, onde é instalado o medidor, são normalizadas por \bar{w}_A .

Utilizando as modelagens com degrau, foram realizadas simulações de:

- Medidor de 1 canal: com uma linha inclinada ($\theta = 45^\circ$) passando pelo centro do duto a partir do degrau (Figura 5-20);
- Medidor de 2 canais: com duas linhas inclinadas ($\theta \approx 60^\circ$), posicionadas em $\pm R/2$ do eixo do duto na direção x ;
- Medidor de 3 canais: com três linhas inclinadas ($\theta \approx 60^\circ$) seguindo as posições e pesos indicados pela integração de Gauss-Legendre (Figura 5-22 e Figura 5-21).

As linhas dos medidores de um canal foram traçadas a partir do degrau, com o começo da primeira linha exatamente em cima do degrau e, com $\theta = 45^\circ$, terminam a $1D$, onde inicia o próximo medidor. O objetivo foi avaliar o desenvolvimento do escoamento como um todo, e não houve a proposta de seguir

o arranjo de um medidor comercial. Entretanto, as linhas dos medidores de 2 e 3 canais foram traçadas deixando uma distância ao degrau semelhante à distância que existe nos medidores ultrassônicos de carretel. Também, as trajetórias passaram a ser simuladas com diferentes θ e, para os multicanais, em especial para os medidores de 2 e 4 canais, a marcação do início do medidor deixou de ser uma informação imediata.

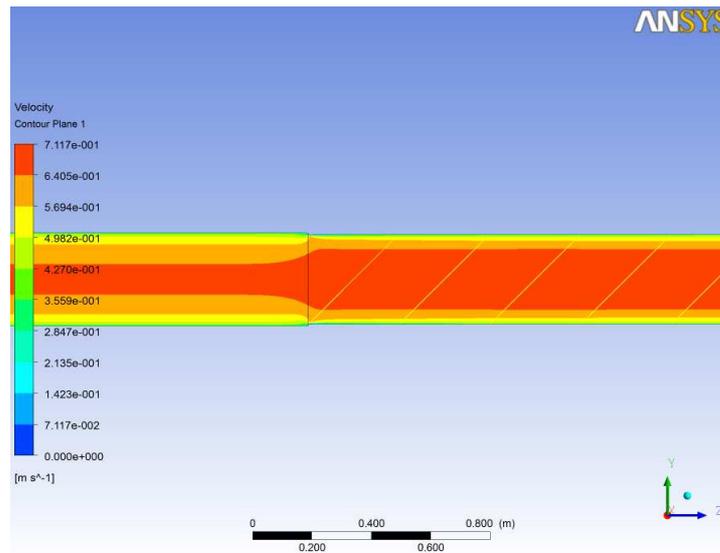


Figura 5-20: Contorno da *Velocity* e as linhas para os medidores de 1 canal no plano yz.

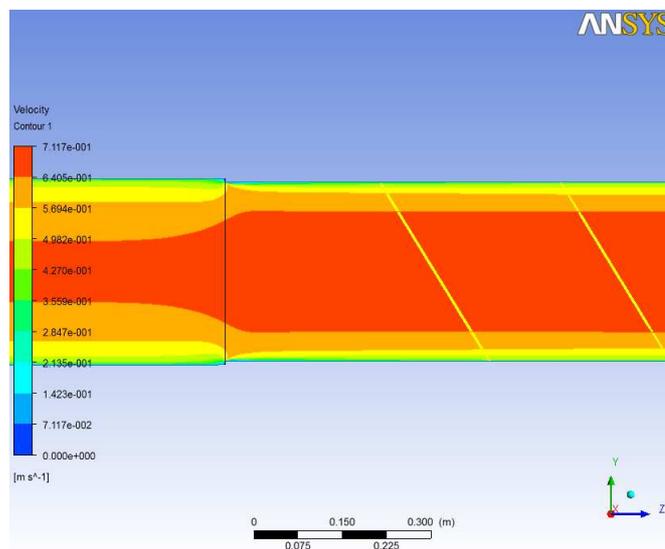


Figura 5-21: Contorno da *Velocity* com as linhas para os medidores de 3 canais no plano yz.

Assim, a posição dos medidores passou a ser determinada pela distância média do degrau às trajetórias. No caso específico dessa simulação de medidores de 2 e 3 canais, após um degrau o início do primeiro medidor ficou próximo a 1D.

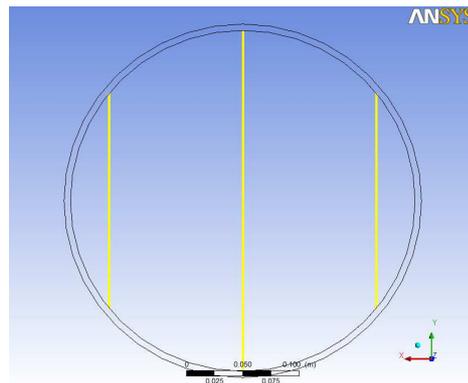


Figura 5-22: Estrutura da geometria e as linhas para medidor de 3 canais no plano xy.

Foram utilizados 201 pontos de amostragem em cada linha.

O cálculo da velocidade média na linha inclinada (\bar{w}_T) segue a eq. 3-53, ou seja, é função da componente \bar{w} e, devido ao acidente, é função também de \bar{u} e \bar{v} . Nessas simulações, as linhas inclinadas ficaram na direção do eixo y, e o perfil é axialmente simétrico, portanto, a velocidade média \bar{w}_T é calculada pela eq. (3-57). Para os multicanais, então, é calculada a velocidade média pela integração de Gauss-Legendre (\bar{w}_{GL}) pela eq. (2-40).

Foram traçadas as sequencias de medidores (de 1, 2 ou 3 canais) ao longo do eixo z, para as modelagens com degrau de $-3,6\%$ e $-8,6\%$. A velocidade média do medidor a 80D foi a referência e, dessa forma, o erro percentual ($E\%$) é calculado pela eq. (3-60) para medidores de 1 canal e eq. (3-61) para medidores de 2 e 3 canais.

A Figura 5-23 apresenta o gráfico com o erro percentual na medição de velocidade ao longo de z, obtido com a simulação de um medidor de 2 canais devido à existência de um degrau (de $-3,6\%$ ou $-8,6\%$). Os erros foram significativos para as posições logo a jusante do degrau. Com o degrau de $-3,6\%$, o erro foi maior que $0,6\%$ e com o degrau de $-8,6\%$, o erro ultrapassou os $2,0\%$.

A Figura 5-24 mostra, para degrau de $-3,6\%$, os erros para as simulações com 1, 2 e 3 linhas, a Tabela 5-1 apresenta os valores desses erros e a Tabela 5-2, as distâncias necessárias para os desvios ficam abaixo de $0,2\%$ e $0,1\%$.

Para medidores de 3 canais o erro do medidor mais próximo ao degrau ficou em $0,36\%$, o que é significativamente menor do que os $0,6\%$ para o medidor de 2 canais.

Os medidores de 3 canais, entretanto, só chegaram a desvios menores que 0,1% em módulo, em uma distância de 20D ou mais.

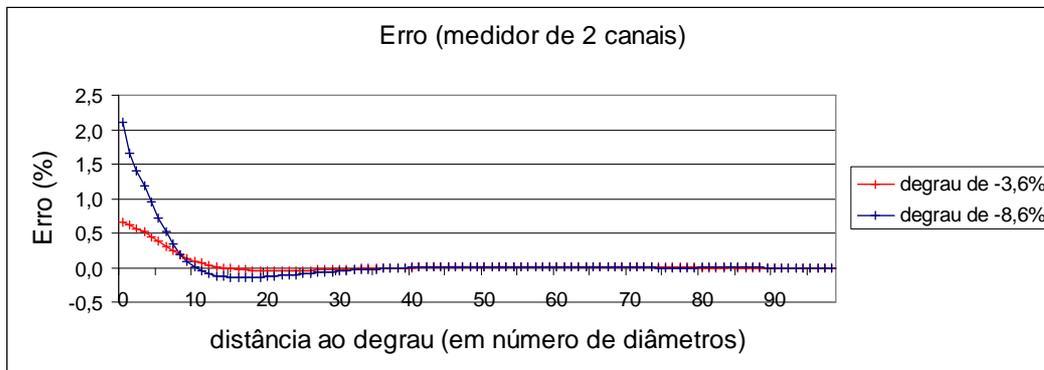


Figura 5-23: Erro na velocidade média devido a degrau a montante, para degrau de $-3,6\%$ e $-8,6\%$, e medidores de 2 canais.

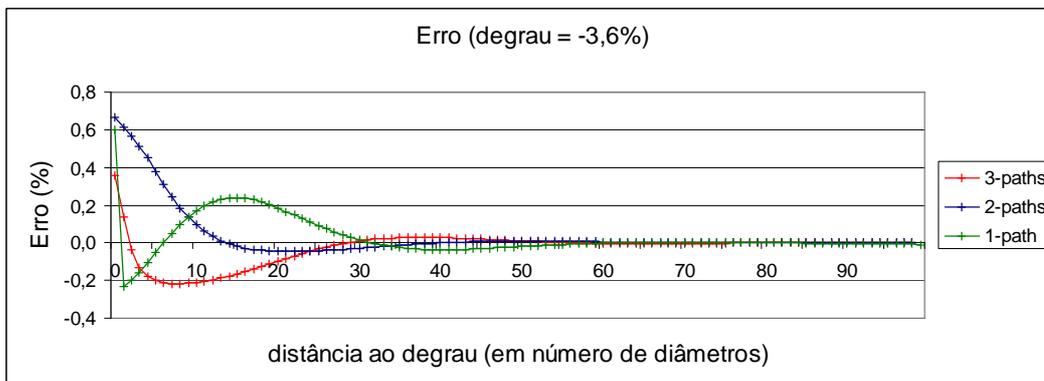


Figura 5-24: Erro na velocidade média devido a degrau a montante, para degrau de $-3,6\%$ e medidores de 1, 2 e 3 canais.

Tabela 5-1: Desvio nos 10 primeiros diâmetros para simulação de medidores de 1, 2 e 3 canais.

posição	desvio (%)		
	1 canal	2 canais	3 canais
0D	0,600	0,663	0,360
1D	-0,235	0,609	0,138
2D	-0,202	0,564	-0,037
3D	-0,156	0,513	-0,132
4D	-0,104	0,450	-0,179
5D	-0,052	0,379	-0,202
6D	0,000	0,308	-0,212
7D	0,050	0,242	-0,217
9D	0,095	0,184	-0,217
10D	0,136	0,134	-0,214

Tabela 5-2: Distância do degrau para obter desvios menores que 0,2% e 0,1%.

posição	desvio (%)		
	1 canal	2 canais	3 canais
0,2%	20	8	12
0,1%	25	10	20

A curva de erro do medidor de 1 canal apresenta uma mudança significativa no erro de 0D a 1D (de 0,6% para -0,24%). Essas variações abruptas não são desejáveis, pois dificultam a identificação e correção de erros sistemáticos.

Essa descontinuidade que aparece nos medidores de 1 canal não aparece nos medidores de 2 e 3 canais. Entretanto, o traçado da primeira linha a jusante do medidor começa logo no degrau, o que não ocorre com os medidores de 2 e 3 canais.

5.3.2.

Degrau Duplo

A partir do que foi levantado até aqui quanto às simulações de medidores ultrassônicos, em especial no caso das malhas com um degrau, foram preparadas modelagens e simulações para análise de forma sistemática do caso de existência de desnível entre o diâmetro interno do medidor e do diâmetro interno do trecho reto. Foi incluída a simulação de medidores de 1, 2, 3, 4 e 5 canais para o caso específico de um degrau a montante e outro a jusante do medidor de mesmo tamanho. Nessa simulação de degrau-duplo tem como aplicação prática a avaliação de um medidor ultrassônico em uma instalação, onde diâmetro interno do trecho reto não é igual ao diâmetro interno do medidor.

A geometria seguiu o esquema apresentado na Fig. 3-55 e na Fig. 3-56, com o comprimento do trecho a montante do medidor igual a 80D e o comprimento do trecho a jusante do medidor igual a 100D. Os 80D a montante buscou garantir o desenvolvimento do perfil na entrada do medidor. Poderia ser utilizada a importação de perfis completamente desenvolvidos, mas isso não foi feito, pois pelo método utilizado houve a necessidade de variar o diâmetro da entrada do domínio, e o desenvolvimento de perfis em trechos retos específicos geraria mais trabalho e acabaria consumindo mais tempo do que criar uma malha direta com 80D a montante. O trecho de 100D a jusante não precisaria ser tão longo, pois só está sendo analisada a vazão no medidor e o comprimento a jusante tem apenas o objetivo garantir que o ruído gerado pela saída do domínio não seja significativo. Entretanto, o trecho de 100D foi mantido, para utilização futura das modelagens.

O diâmetro do medidor (D_{med}) ficou fixo em 0,5 m em todas as simulações de degrau-duplo. O diâmetro dos trechos a montante e a jusante (D_{duto}) foi alterado em: $\pm 7\%$; $\pm 4\%$; $\pm 1\%$. Com D_{med} fixo, o Re ficou definido em função dos valores de velocidade média na seção transversal (\bar{w}_A) e de viscosidade cinemática (ν): $Re = 50.000$ ($\nu = 0,7$ m/s; $\nu = 7$ cSt); $Re = 150.000$ ($\nu = 1,5$ m/s; $\nu = 5$ cSt); e $Re = 400.000$ ($\nu = 0,8$ m/s; $\nu = 5$ cSt).

A geometria utilizada permitiu variar o diâmetro do medidor (D_{med}), mas o diâmetro da entrada (D_{duto}), como referência, é usado o f_{deg} (eq. (3-49)).

O comprimento do medidor também teve que fazer referência ao diâmetro da entrada e foi definido um fator de comprimento (f_{Ldeg}):

$$f_{Ldeg} = 1,5 \frac{D_{med}}{D_{duto}} = 1,5 f_{deg} \quad (5-3)$$

A velocidade na entrada a partir do diâmetro e da velocidade no medidor foi também calculada. Para densidade constante, é calculado:

$$\bar{w}_{duto} = \bar{w}_{med} \frac{D_{med}^2}{D_{duto}^2} \quad (5-4)$$

$$\bar{w}_{duto} = \bar{w}_{med} f_{deg}^2 \quad (5-5)$$

A Figura 5-25 apresenta o contorno do *Velocity* para a modelagem com degrau duplo convergente de -7% e a Figura 5-26, para a modelagem com degrau duplo divergente. Ambas as modelagens são para $Re = 150.000$.

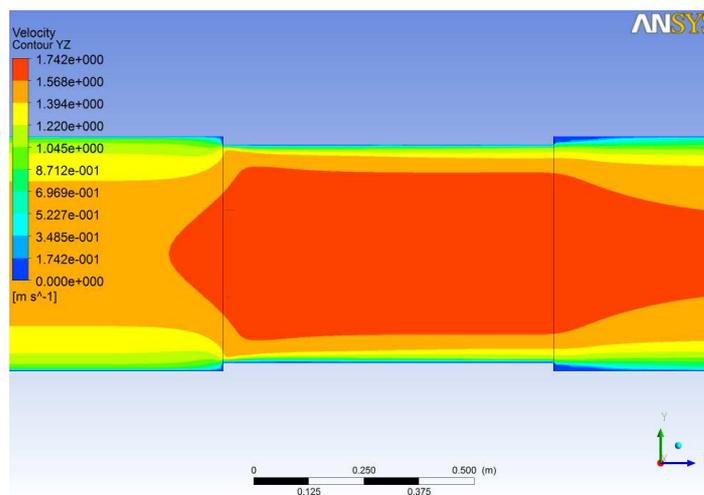


Figura 5-25: Contorno do *Velocity* para a modelagem com degrau duplo de -7% .

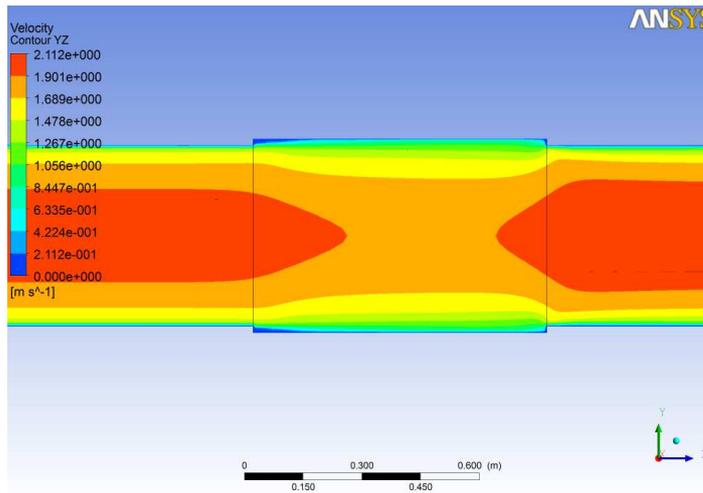


Figura 5-26: Contorno do *Velocity* para a modelagem com degrau duplo de 7%.

O Anexo F apresenta os gráficos com as velocidades médias adimensionais indicadas por medidores ultrassônicos de 1 a 5 canais em função do número de Reynolds. Apresenta, também, os fatores, que são calculados dividindo a velocidade média no medidor instalado no trecho do medidor pela velocidade média que seria indicada se esse mesmo medidor estivesse em escoamento completamente desenvolvido.

Essa velocidade média adimensional no medidor de 1 canal poderia ser escrita como:

$$V_{adm} = \frac{\overline{w}_T}{\overline{w}_A} \quad (3-6)$$

Para o medidor multicanal, é:

$$V_{adm} = \frac{\overline{w}_{GL}}{\overline{w}_A} \quad (3-7)$$

O fator para um medidor de um canal, é escrita como:

$$fator = \frac{\overline{w}_T}{\overline{w}_{T80}} \quad (3-8)$$

Para o medidor multicanal, é:

$$fator = \frac{\overline{w}_{GL}}{\overline{w}_{GL80}} \quad (3-9)$$

A avaliação do erro pode ser feita com base no fator.

As figuras do Anexo F estão organizadas da seguinte forma:

- Degrau-duplo convergente (de -7%, -4% e -1%): Figura F-1 até Figura F-6;
- Degrau-duplo divergente (de 7%, 4% e 1%): Figura F-7 até Figura F-12.

As velocidades para ambas as modelagens seguem o padrão verificado em escoamento completamente desenvolvido, com a velocidade normalizada para medidores de 1 canal maior que zero e menor que 1,0 para os medidores que utilizam Gauss-Legendre.

Tanto para degraus convergentes como para degraus divergentes, os erros de modo geral aumentam com o tamanho do degrau. Os erros, em módulo, para degrau divergente são em geral maiores do que os erros para degrau convergente.

Os gráficos de velocidade e fator mostram que há uma variação com Re . O valor de velocidade normalizada diminui com o aumento de Re , o que já foi indicada para escoamento completamente desenvolvido na Fig. 3-21. Não foi identificada correlação significativa para as variações no fator devido ao degrau e as variações no fator devido a Re , o que indica que o degrau e Re influenciam a resposta do medidor de forma independente.

O Anexo F inclui também os gráficos dos fatores em função do degrau para:

- $Re = 50.000$: Figura F-13 e Figura F-14;
- $Re = 150.000$: Figura F-15 e Figura F-16;
- $Re = 400.000$: Figura F-18 e Figura F-18;

Esses gráficos mostram que o fator tende a 1,0 para degrau igual a 0%. Entretanto, as modelagens para degraus de -1% convergentes mostram maior dispersão. Essa dispersão deve ser averiguada. Essas modelagens foram as que tiveram maior dificuldade de convergência e, portanto, pode ter prejudicado os resultados.

Com o degrau convergente de -7% , o erro nos medidores de 5 canais foi de mais de -1% e em torno de $-0,5\%$ para medidores de 4 canais. Com degrau -4% , esses erros ficaram em torno de $-0,4\%$ e $-0,1\%$. Os medidores de 3 canais tiveram erros em torno de $0,35\%$ para degrau de -7% e $0,3\%$ para -4% . Para os medidores de 2 canais, esses erros ficam em torno de $0,8$ e $0,5\%$. Com degrau de -1% , os erros caíram significativamente e o padrão de erro não se manteve.

Com degraus divergentes, os erros foram maiores. Com degrau de 7% , os erros para medidores de 3 canais ficaram próximo de $-1,5\%$ e com medidores de 4 e 5 canais, em torno de $-2,3\%$. Com degrau de 4% , medidores de 3 canais

mostram erros em torno de $-0,7\%$ e medidores de 4 e 5 canais, em torno de $-1,1\%$.

Com degrau de 1% , medidores de 4 canais tiveram erro em torno de $0,3\%$ e medidores de 5 canais, entre $0,3$ e $0,4\%$. Esse valor é elevado, principalmente no caso de líquidos, pois o seu erro máximo admissível fica em $\pm 0,2\%$ no caso de medição de transferência de custódia ou fiscal.

5.3.3.

Um Degrau, Degrau-Duplo e Experimento

Os valores próximos ao degrau no gráfico da Figura 5-24 podem ser comparados com os valores do gráfico com degrau de -4% (Figura F-3 e Figura F-4). O medidor de 3 canais apresentou erro de $0,35\%$ com a modelagem de um degrau convergente e erro de $0,3\%$ com a modelagem de degrau duplo convergente.

O medidor de 2 canais teve erro de $0,65\%$ para a modelagem com um degrau e $0,4\%$ para a modelagem com degrau-duplo.

De modo geral, os erros foram menores com modelagem de degrau-duplo do que com modelagem de um degrau, quando comparados degraus de mesma altura.

O medidor de 1 canal da Figura 5-24 mostrou, próximo ao degrau, uma variação abrupta, o que não ocorre com o medidor de 1 canal da Figura F-3. Entretanto, além das modelagens serem diferentes, estas simulações apresentam diferenças: o medidor de 1 canal da Figura 5-24 tem θ igual a 45° e começa exatamente no degrau, enquanto que o medidor de 1 canal simulado na modelagem de degrau-duplo tem θ igual a 60° e começa a uma distância de $D/4$ a jusante do degrau.

A modelagem de um degrau (da Figura 5-24) foi configurada com Re igual a 200.000 e a modelagem de degrau-duplo (da Figura F-3 e Figura F-4) foi configurada com Re igual a 150.000 . A comparação dos resultados dessas modelagens foi considerada viável, uma vez que no item 5.3.2, foi verificado que uma variação de Re entre 50.000 e 400.000 não influencia de forma significativa a análise do efeito do degrau na medição de velocidade.

A diferença entre as calibrações com e sem degrau indicou um erro sistemático entre 0,18% e 0,3%. As simulações indicaram para um medidor de 3 canais, um desvio entre 0,3% e 0,35%.

5.4.

Resultados, Normas e Recomendações

5.4.1.

Situação Atual

A API 5.8 se aplica a medição de vazão com medidores ultrassônicos de hidrocarbonetos líquidos de 2 ou mais canais. Foi escrita inicialmente para medição de transferência de custódia, mas se estende também a medições de alocação, verificação de medidores e detecção de vazamento. Esta norma indica que o trecho reto a montante, sem utilização de retificador de escoamento, deva ter comprimento de trecho reto a montante do medidor a partir de 20 diâmetros nominais.

Entretanto, pelas simulações aqui realizadas, comprimento de 20D a montante do medidor não é suficiente. O gráfico da Figura D-3 apresenta os fatores para medidores instalados a 20D a jusante de uma curva. Medidores de 2 e 3 canais sem correção chegariam a erros de 9% e 7%, respectivamente. Medidores de 4 e 5 canais chegariam a erros de 4% e 3%.

O erro de uma medição a 20D para duas curvas no mesmo plano (Figura D-7) chega a 7% para medidores de 2 e 3 canais, a 3,5% para medidores de 4 canais e 2,5% para medidores de 5 canais. Para duas curvas em planos perpendiculares (Figura D-11), esse erro é de 4% para medidores de 2 canais, 3,5% para medidores de 3 canais, e 1% para medidores de 4 e 5 canais.

Estes valores são significativos, pois na medição de transferência de custódia de líquido, o erro máximo admissível para o sistema de medição é de 0,3% (RTM-64) e, em transferência de custódia de gás natural, 0,5% (OIML R-137-1).

A AGA M-96-2-3 (1996) indicava a utilização de trecho reto a montante de 5D a 10D, mas alertava que estava se baseando em uma quantidade limitada de dados. Em sua versão de 1998, a AGA 9 aceitava que fossem seguidas recomendações do fabricante, com maior flexibilização nos trechos retos a

montante e aceitava instalações sem condicionador ou retificador de escoamento. Entretanto, alerta que assimetrias nos perfis de velocidades podem persistir por 50D e *swirl* no perfil de velocidades podem ainda estar presentes em 200D ou mais.

A Norma AGA 9, na revisão de 2007, estendeu o comprimento de trecho reto a montante para 20D com condicionador de escoamento e é mais rigorosa nos testes de aceitação trechos retos menores a montante.

As normas para medidores ultrassônicos não distingue o comprimento do trecho reto em função do tipo de acidente a montante do medidor. Entretanto, a AGA 3.2 (2000), para medidores tipo placa de orifício para gás natural, indica os comprimentos de trecho reto a montante do medidor em função do acidente. Em instalações sem retificador de escoamento, para a razão beta (diâmetro do orifício pelo diâmetro interno do duto) igual a 0,5, as recomendações de trecho reto são: para uma curva de 90° a montante ou 2 curvas de 90° no mesmo plano com distância entre elas menor que 10D, o comprimento mínimo é 30D; para 2 curvas de 90° em planos perpendiculares, com distância entre elas menor que 5D, o comprimento mínimo é de 95D. Para acidentes a montante sem distinção, o comprimento mínimo a montante (para beta igual a 0,5) é de 147D.

Essas recomendações não seguem a mesma tendência do que foi verificado no presente trabalho quanto à existência de curvas a montante do medidor. Pelos gráficos dos fatores ao longo dos 100D do trecho reto a jusante do medidor ou nos gráficos dos fatores nas seções transversais, os erros foram maiores com uma curva e menores com duas curvas em planos perpendiculares. A 30D a jusante da curva, ainda são encontradas distorções significativas com as modelagens com uma curva a montante e com duas curvas no mesmo plano a montante.

Pelas simulações aqui realizadas, o medidor ultrassônico para líquido ou gás instalado a jusante de uma curva ou duas curvas, deve incluir uma correção devido à curva. Para desconsiderar o acidente, o trecho reto a montante deve ter comprimento de pelo menos 50D.

As normas API 5.8 e AGA 9 para medidores ultrassônicos indicam que o diâmetro interno do duto deve ser igual ao medidor, mas não apresenta limites. Os limites para a existência de degraus devem ser incluídos para minimizar a existência de desconhecidos.

5.4.2.

Utilização de Fatores e Cálculo da Incerteza de Medição

O presente trabalho teve como objetivo apresentar uma proposta para a utilização de fatores para correção do resultado da medição em função da presença de curvas a montante do medidor ou em função de diferenças nos diâmetros internos do trecho reto e do medidor.

Primeiramente, quanto à utilização de fator:

- a) Os fatores para correção de curvas variam significativamente em função do número de canais e do arranjo utilizado.
- b) Os fatores variam significativamente devido à distância ao acidente e devido à inclinação do medidor com relação ao acidente.
- c) No caso das curvas, a existência de uma segunda curva a montante da primeira, muda totalmente os resultados.

Quanto aos valores dos fatores:

- a) Os medidores de 4, 5 e 8 canais apresentaram, de modo geral, apresentaram os melhores resultados.
- b) De modo geral: medidores de 4 e 5 canais, no primeiro diâmetro após a última curva, os erros sistemáticos até ultrapassam 10% mesmo para medidores de 4 e 5 canais; em 5D ficam dentro da faixa de 10%; e em 20D, na faixa de 5%.
- c) De modo geral, os medidores que indicaram maiores fatores são o medidor de 1 canal e o medidor de 3 canais cruzados, chegando a erros maiores que 30% a 0D e maiores que 20% a 5D.
- d) O medidor de 2 canais em algumas situações mostra resultado na faixa do medidor de 2 canais cruzados, mas em outras fica com resultados próximos dos medidores de 4 e 5 canais.

Assim, recomenda-se o uso de fatores, mas recomenda-se que seja feita uma simulação para cada instalação específica, pois a diversidade de padrões de resposta e módulo do erro são significativas de caso para caso.

Quanto à incerteza de medição, como visto no Capítulo 4, os erros sistemáticos não corrigidos precisam ser considerados. Para esse caso, os cálculos realizados podem ser utilizados. Deve ser considerada a intensidade do erro sistemático indicado na simulação e a variação em função da distância, ângulo e instalações semelhantes.