

4 Resultados Experimentais

Este capítulo apresenta os resultados e discussões referentes aos testes realizados no laboratório *National Engineering Laboratory* (NEL) com medidor v-cone, durante o mês de novembro de 2008. O v-cone testado é de 6 polegadas (6”), com valor de beta igual a 0,6 e coeficiente de descarga determinado por calibração no próprio laboratório. O objetivo dos testes é avaliar o desempenho do medidor na obtenção da vazão de gás, em condições de gás úmido, por meio da utilização de correlações desenvolvidas para medidores de pressão diferencial. Além da necessidade de utilização de uma correlação apropriada, é importante que o medidor apresente um comportamento repetitivo, de forma que o erro residual, após a aplicação das equações de correção, seja reduzido. O cálculo da vazão de gás, em escoamento de gás úmido, é feito conforme a equação de medição de vazão de gás natural do medidor v-cone, apresentada no item 2.5.1. A correção dos resultados, de forma a descontar o efeito do líquido presente no escoamento, é realizada a partir das correlações apresentadas na metodologia proposta no capítulo 3.

De forma a verificar os diferentes fatores que influenciam na medição de vazão de gás em escoamento de gás úmido e avaliar a aplicabilidade das correlações, diversas condições operacionais foram geradas durante os ensaios. Os testes foram conduzidos em pressões de 15, 20, 30 e 40 bar, com velocidades superficiais de gás de aproximadamente 3 m/s, 6 m/s, 9 m/s, 12 m/s e 15 m/s. O máximo número de Froude de gás alcançado nos testes foi igual a 3,11. As vazões de líquido foram determinadas a partir dos valores do parâmetro de Lockhart-Martinelli especificados para cada teste. Antes de iniciar o registro de cada ponto de teste, aguardava-se um período para estabilização das variáveis (pressão, vazão, temperatura). Além disso, foi definido um período de 300 segundos para a coleta das variáveis em cada ponto de teste (temperaturas, pressões, pressões diferenciais e vazões), de forma a garantir uma maior confiabilidade dos resultados. Todos os dados, incluindo as propriedades dos fluidos (massa específica, viscosidade, etc), foram registrados para posteriores cálculos e análises.

O parâmetro de Lockhart-Martinelli foi variado de 0 a 0,4, em passos de 0,05. Portanto, extrapola, inclusive, a quantidade de líquido limite definida para a condição de gás úmido, que corresponde a um valor máximo do parâmetro de Lockhart-Martinelli igual a 0,3. Dessa forma, podem-se avaliar também as correlações nessas condições extremas (parâmetro de Lockhart-Martinelli superior a 0,3).

As diversas condições operacionais testadas permitiram avaliar o desempenho do medidor nos padrões de escoamento usualmente encontrados em escoamento de gás úmido, variando entre o fluxo estratificado, de transição e o fluxo anular-névoa.

O Anexo B apresenta as tabelas com as principais variáveis monitoradas nos testes realizados.

A Fig. 13 ilustra o circuito de testes real montado no laboratório NEL.



Figura 13 – Circuito de testes do laboratório NEL

4.1. Resultados da medição de vazão de gás do v-cone

Inicialmente, para cada pressão de teste e cada velocidade superficial de gás, o medidor v-cone foi testado com gás seco, de forma a determinar o

coeficiente de descarga (C_d) em cada condição operacional. O cálculo dos valores de coeficiente de descarga foi realizado a partir da vazão de gás indicada pelo medidor de referência e da vazão fornecida pelo v-cone, conforme a Eq. (49):

$$C_d = \frac{Q_{ref}}{\frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \frac{D^2 \beta^2}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \sqrt{\Delta P} \cdot Y} \quad (49)$$

Da Eq. (49), temos:

Q_{ref} – vazão volumétrica obtida pelo medidor de referência (medidor ultrassônico);

ρ – massa específica do fluido no v-cone, em condições de operação.

D – diâmetro interno da linha onde o v-cone está instalado, nas condições de operação;

β – fator beta do v-cone;

Y – fator de expansão do gás no v-cone;

ΔP – diferencial de pressão no v-cone.

A partir desses testes realizados com gás seco, foram obtidos os valores de coeficiente de descarga do v-cone a serem utilizados nos testes em condições de gás úmido, em várias condições operacionais (pressão de teste, velocidade superficial de gás e número de Reynolds). A Tab. 3 apresenta os resultados encontrados. Verifica-se que o coeficiente de descarga apresentou uma variação bem pequena, com valores em torno de 0,84.

Tabela 3 – Coeficiente de Descarga (C_d) obtido em cada condição operacional nos testes com gás seco

Pressão de Teste (bar)	Velocidade superficial de gás no v-cone (m/s)	Número de Reynolds no v-cone	Coeficiente de Descarga
40	15	6028000	0,84532
40	12	4802000	0,84599
40	12	4792000	0,84494
40	9	3584000	0,84415
40	9	3584000	0,84578
40	6	2382000	0,84486
40	3	1192000	0,84489
30	15	4767000	0,84578
30	12	3799000	0,84467
30	12	3793000	0,84508
30	9	2841000	0,84442
30	6	1885000	0,84368
30	6	1889000	0,84346
30	3	943600	0,84569
20	15	3201000	0,84428
20	12	2547000	0,84317
20	12	2552000	0,84329
20	9	1906000	0,84279
20	6	1266000	0,84395
20	6	1269000	0,84367
20	3	633200	0,84002
20	3	632900	0,83936
15	15	2458000	0,84361
15	12	1956000	0,84203
15	9	1463000	0,84204
15	6	975800	0,84387
15	6	971400	0,84407
15	3	484800	0,83792

Após a obtenção dos dados do laboratório NEL em todas as condições operacionais (dados apresentados no Anexo B) e cálculo das vazões no v-cone conforme equação definida no item 2.5.1 (utilizando os valores de coeficiente de descarga obtidos), foi determinada a sobrestimação na medição de vazão de gás devido à presença de líquido. Além disso, foram gerados os gráficos para apresentar os resultados obtidos. A Fig. 14 apresenta todos os dados encontrados nos testes realizados no laboratório NEL, na forma de erros na medição de vazão de gás do v-cone, ao se comparar com a vazão de gás de referência, em função do parâmetro de Lockhart-Martinelli. Conforme esperado, é possível perceber uma tendência de aumento do erro na medição de vazão de gás com o aumento do parâmetro de Lockhart-Martinelli, já que uma maior presença de líquido tende a gerar uma maior sobrestimação na medição de

vazão de gás. Foram obtidos erros de até 58% na vazão de gás, para o valor do parâmetro de Lockhart-Martinelli igual a 0,4.

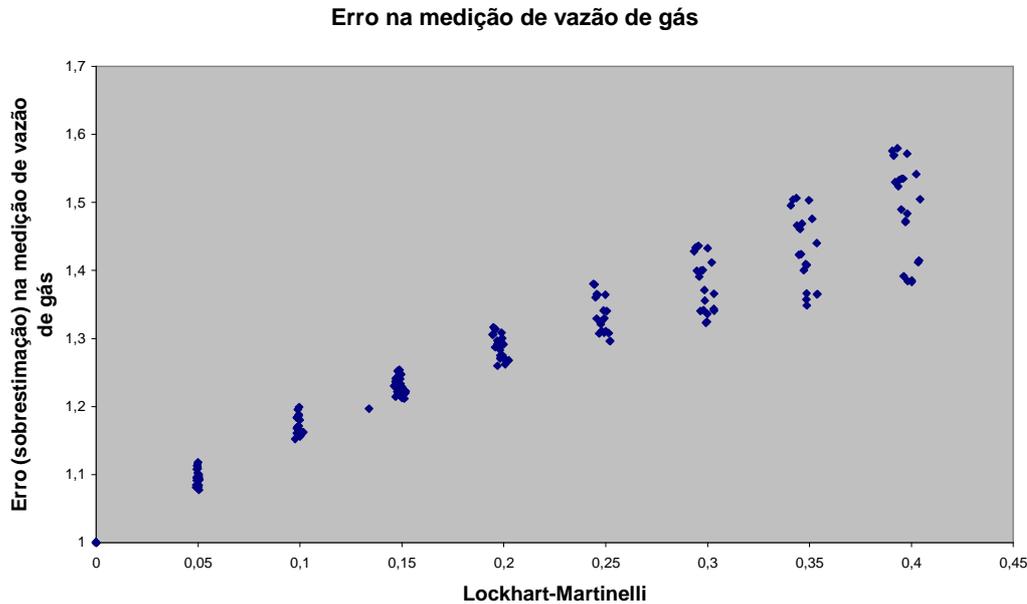


Figura 14 – Dados obtidos de sobrestimação na medição de vazão de gás do v-cone

Observando o gráfico da Fig. 14, há ainda uma dispersão dos dados em cada valor do parâmetro de Lockhart-Martinelli, o que sugere uma influência de outros parâmetros nessa superestimação. Além disso, a dispersão aumenta à medida que o parâmetro de Lockhart-Martinelli aumenta. Dessa forma, é necessário avaliar a razão desse espalhamento dos dados.

A Fig. 15 mostra a distribuição dos dados de acordo com a pressão de operação, enquanto a Fig. 16 mostra a distribuição dos dados de acordo com a velocidade do gás. Neste caso, são apresentados apenas os dados na condição de gás úmido definida, ou seja, com o parâmetro de Lockhart-Martinelli igual ou inferior a 0,3. Pode-se verificar, no gráfico da Fig. 15, que um aumento na pressão de operação, que corresponde a um aumento na massa específica do gás (mantendo a massa específica do líquido aproximadamente constante) e, por conseguinte, na razão entre as massas específicas de gás e líquido, leva a uma pequena redução na sobrestimação da medição de vazão de gás, mantendo constante o parâmetro de Lockhart-Martinelli. Isto pode ser observado nos valores baixos do parâmetro de Lockhart-Martinelli (inferiores a 0,25). Um fator que pode explicar esse efeito é que, em pressões mais altas, o gás tende a carrear o líquido de forma mais efetiva, reduzindo a fração de área da linha ocupada pela fração líquida (*hold-up* de líquido) e levando a uma menor

sobrestimação. Destaca-se que há ainda o efeito da velocidade do gás nos resultados obtidos.

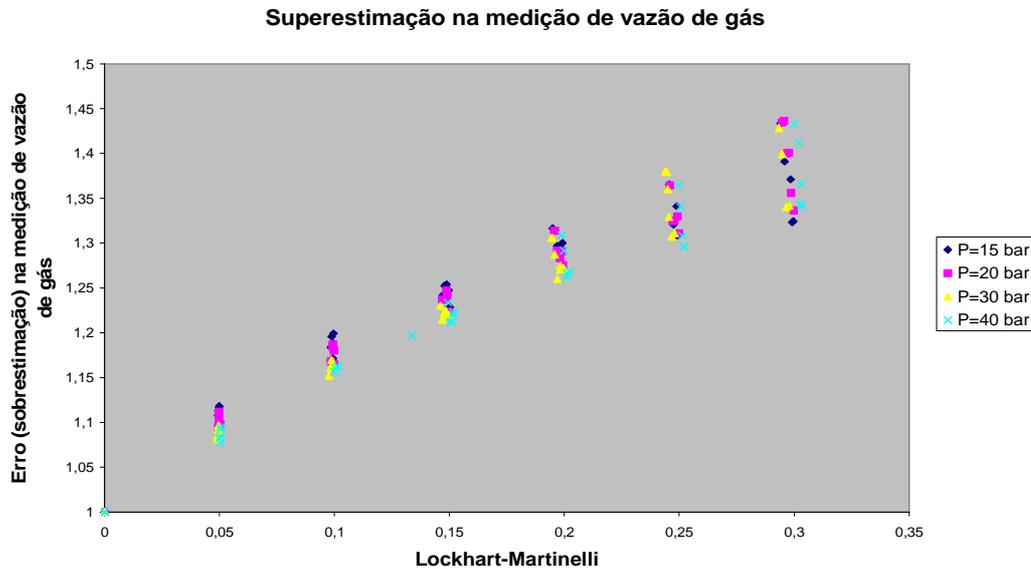


Figura 15 – Influência da pressão de operação na superestimação de vazão de gás

Por meio do gráfico da Fig. 16, pode-se notar que, especialmente nos valores mais altos do parâmetro de Lockhart-Martinelli (acima de 0,15), um aumento na velocidade superficial do gás e, por conseqüência, no número de Froude, leva a um aumento na sobrestimação da medição de vazão de gás. É importante destacar que há ainda o efeito da pressão de operação nos resultados obtidos.

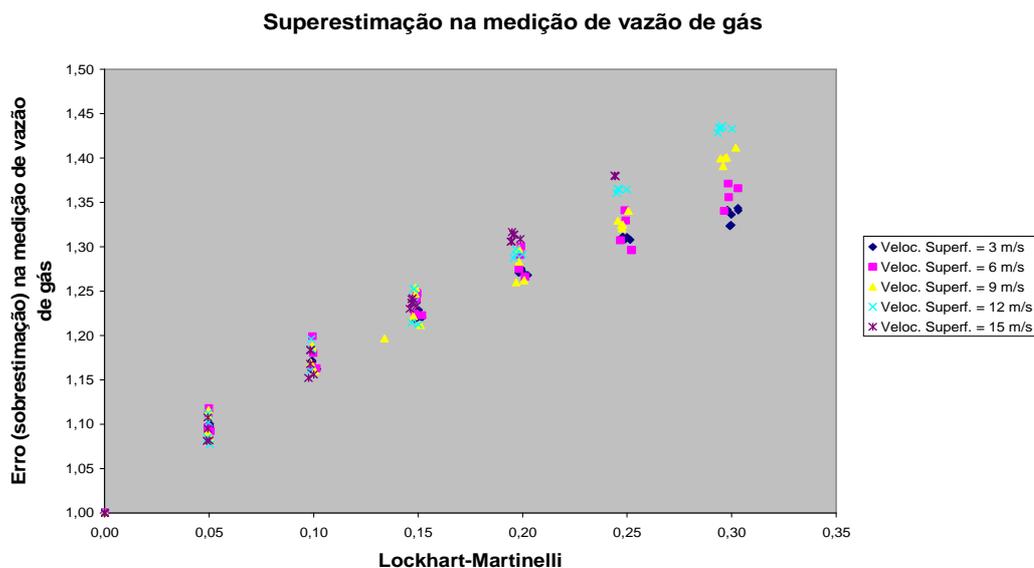


Figura 16 - Influência da velocidade do gás na sobrestimação da vazão obtida pelo v-cone

As Fig. 17 e 18 demonstram, mais claramente, a influência do número de Froude (ou velocidade do gás) no desempenho do medidor v-cone, fixando-se a pressão de operação em 15 bar (Fig. 17) e 40 bar (Fig. 18). Os valores de número de Froude apresentados nos gráficos são aproximados. Conforme observado anteriormente, nota-se a tendência de aumento no erro da medição de vazão com o aumento no número de Froude. Este efeito pode ser explicado a partir da natureza do regime de escoamento. Em velocidades mais baixas, o regime se aproxima de um fluxo estratificado, com boa parte da fase líquida escoando na parte inferior da tubulação. Nestas condições, a interface entre o gás e o líquido é pequena. À medida que a velocidade do gás se eleva, uma maior quantidade de líquido se mistura à corrente gasosa, aumentando a área de interface entre gás e líquido, e, conseqüentemente, aumentando as perdas de energia. Isso resulta, então, em um aumento na superestimação da vazão de gás.

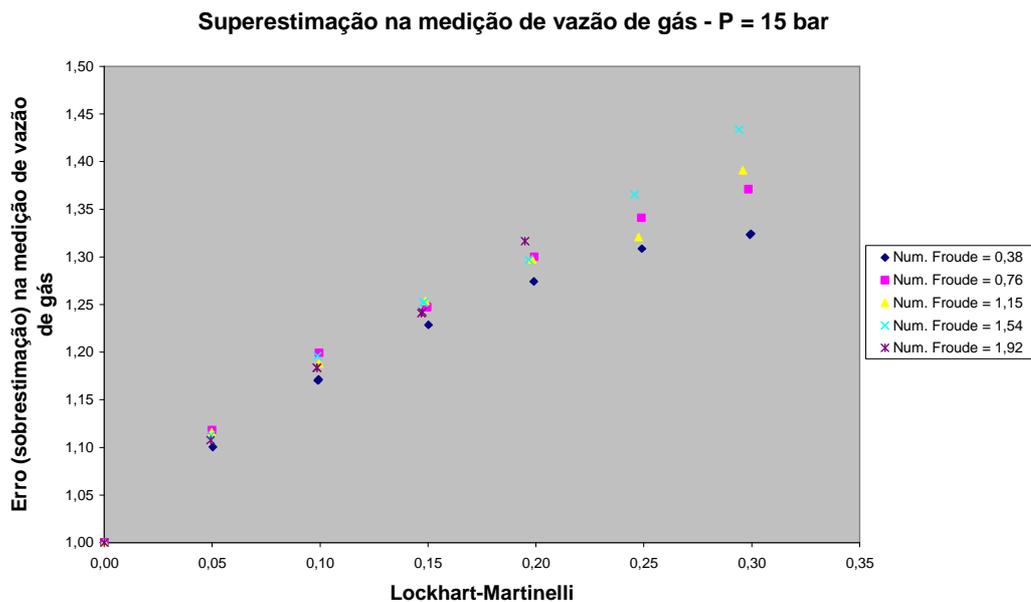


Figura 17 – Influência do número de Froude na medição de vazão de gás (P = 15 bar)

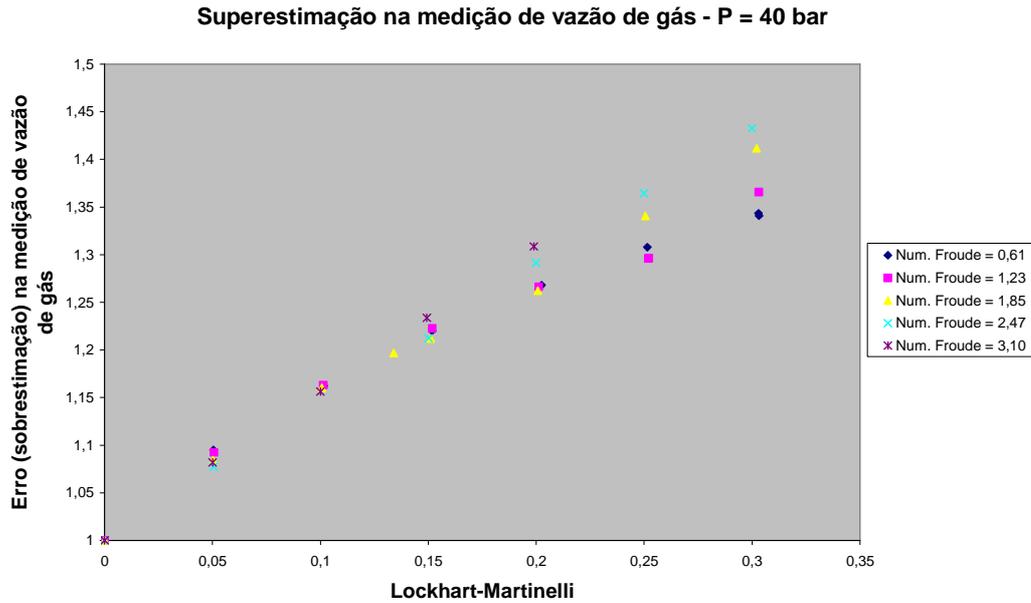


Figura 18 – Influência do número de Froude na medição de vazão de gás (P = 40 bar)

A análise dos dados e gráficos indica que a correlação mais adequada para correção da vazão de gás deverá ser capaz de levar em consideração os parâmetros de influência observados (parâmetro de Lockhart-Martinelli, pressão de operação e velocidade do gás).

4.1.1. Correção da medição de vazão de gás

Após a obtenção dos dados, cálculo das vazões de gás fornecidas pelo v-cone, determinação da sobrestimação na medição dessa vazão devido à presença de líquido e análise dos parâmetros de influência, foi realizada então uma avaliação da eficácia das correlações existentes para correção das vazões de gás no v-cone, em escoamento de gás úmido.

4.1.1.1. Aplicação das correlações de Murdock e Chisholm

Os resultados da aplicação da correlação de Murdock estão apresentados na Fig. 19. O gráfico mostra os dados de erro antes da correção (pontos que formam uma tendência de maior inclinação) e após a aplicação da correlação. Idealmente, os erros dos valores corrigidos de vazão devem estar próximos de 1, o que significa que o valor de vazão corrigido do v-cone corresponde ao valor verdadeiro convencional fornecido pelo medidor de referência. Caso o erro do

valor corrigido esteja acima de 1, indica que a correlação não foi suficiente para corrigir a vazão fornecida pelo v-cone e esta vazão de gás continua sobrestimada. Se o erro do valor corrigido for menor que 1, significa que a correlação levou a um fator de correção superior ao valor devido, e a vazão corrigida do v-cone está subestimada (menor que o valor verdadeiro convencional).

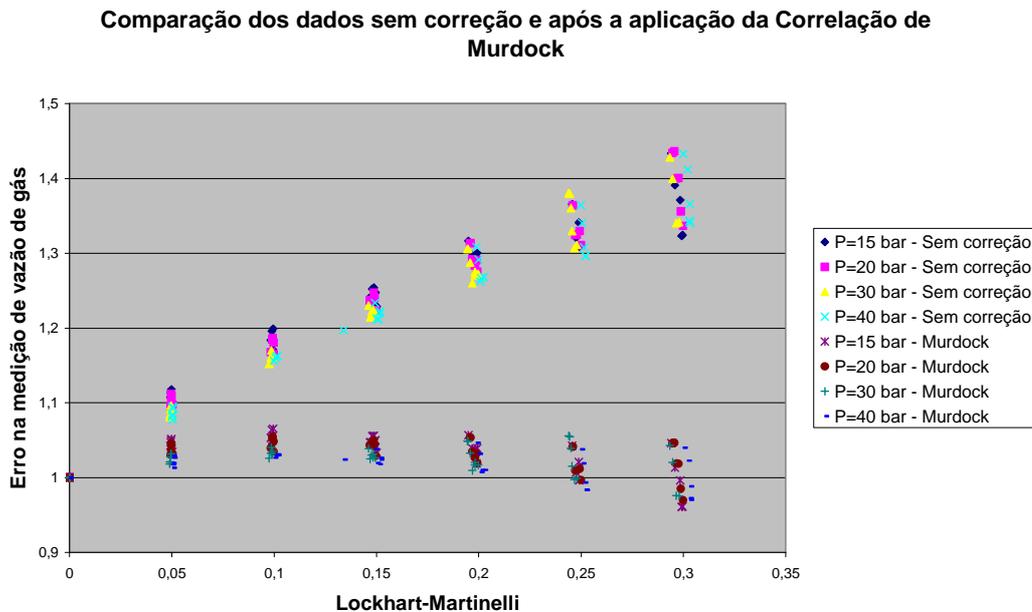


Figura 19 – Sobrestimação da vazão de gás e aplicação da correlação de Murdock

Nota-se que o erro residual após a aplicação da correlação de Murdock ainda é relativamente elevado, variando entre -4% e +6%. A Fig. 20 mostra com maior clareza o erro residual da vazão de gás, em valores percentuais. Os resultados apresentados correspondem aos erros dos valores de vazão corrigidos pela correlação, também apresentados na Fig. 19. No entanto, na Fig. 20, são apresentados em termos percentuais.

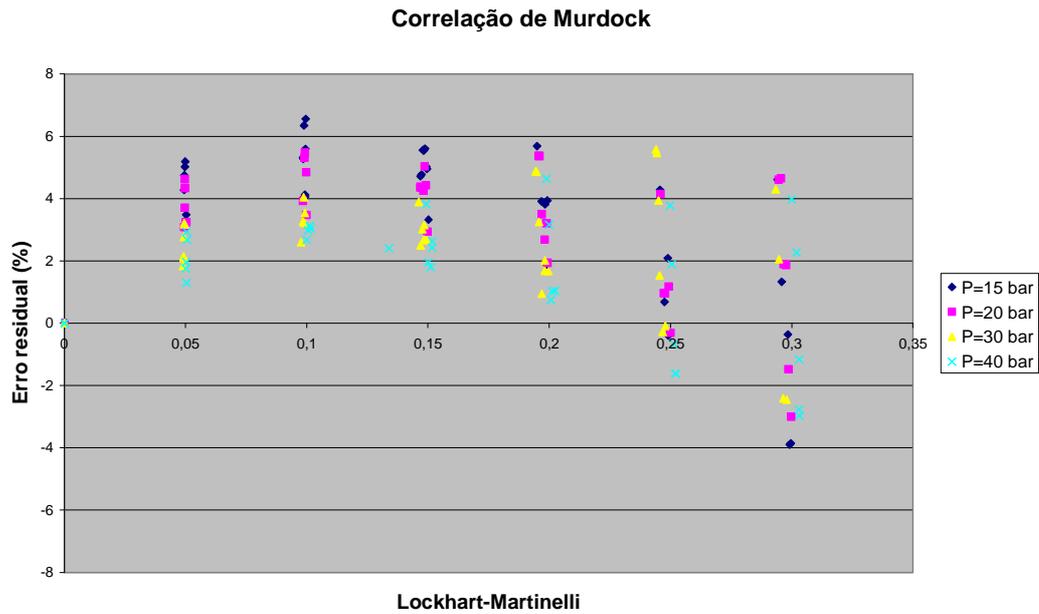


Figura 20 – Erro residual da vazão de gás após a aplicação da correlação de Murdock

Os resultados da aplicação da correlação de Chisholm estão apresentados na Fig. 21. O gráfico mostra os dados antes da correção e após a aplicação da correlação (erros na medição da vazão de gás).

Comparação dos dados sem correção e após a aplicação da Correlação de Chisholm

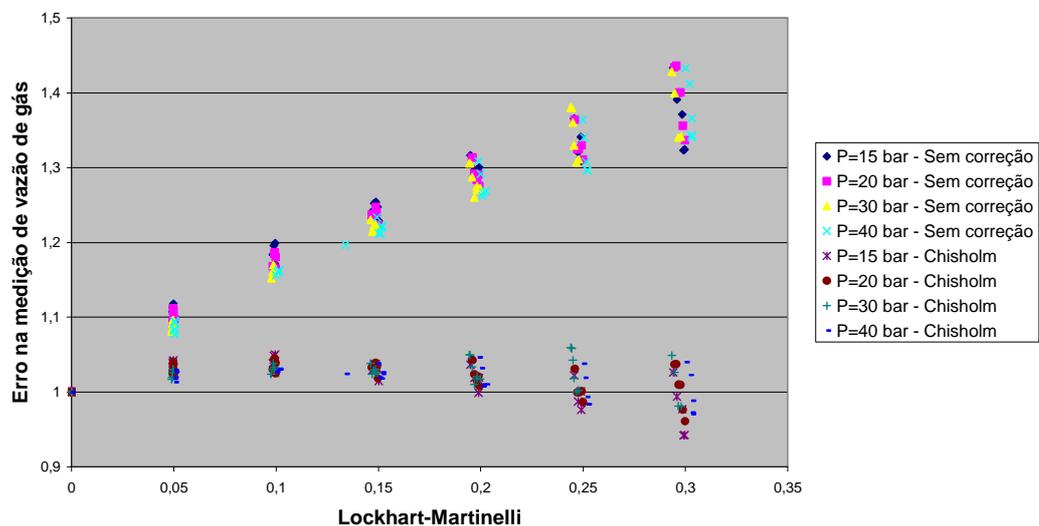


Figura 21 – Sobrestimação da vazão de gás e aplicação da correlação de Chisholm

Neste caso, o erro residual também é relativamente elevado, variando entre -6% e +6%, conforme ilustrado pela Fig. 22.

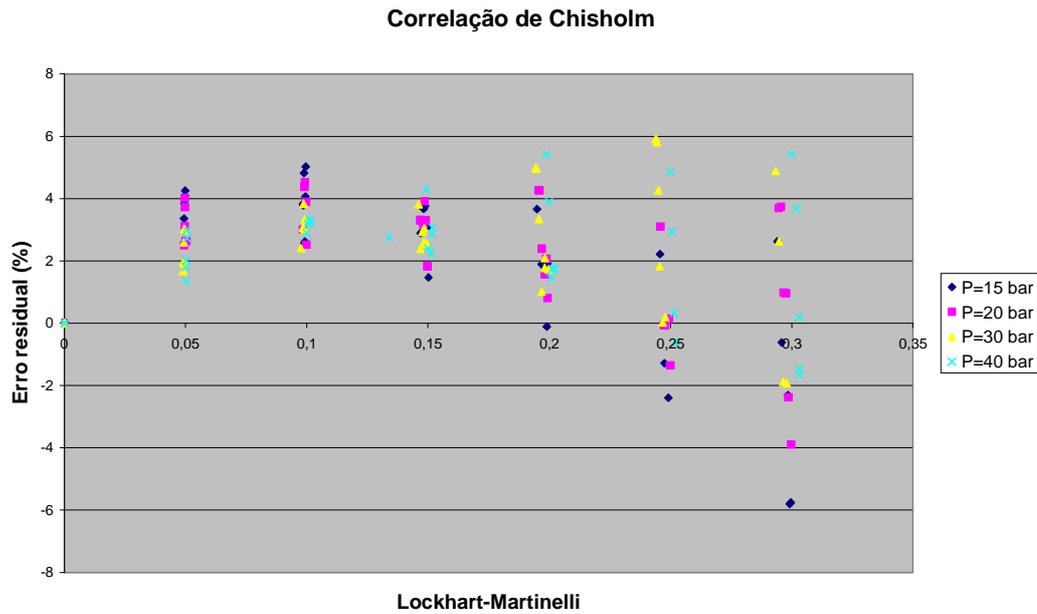


Figura 22 – Erro residual da vazão de gás após a aplicação da correlação de Chisholm

Nota-se que as correlações desenvolvidas para corrigir a vazão de gás medida por uma placa de orifício mostraram uma aplicabilidade apenas razoável para corrigir os erros gerados pela presença de líquido no escoamento de gás, na medição de vazão do gás pelo v-cone. Apesar da redução significativa dos erros após a aplicação da correção, já que antes da correção havia erros de até 44% na vazão de gás, ainda há um erro residual que chega a 6% e uma dispersão que tende a crescer com o aumento da fração de líquido (aumento do parâmetro de Lockhart-Martinelli).

Para as duas correlações avaliadas, os erros residuais, em geral, são positivos, indicando que as correlações não foram suficientes para corrigir a vazão de gás, que continua superestimada. A exceção ocorre para o parâmetro de Lockhart-Martinelli igual a 0,3, em que há uma distribuição de erros residuais positivos e negativos.

A razão para o desempenho mediano das correlações pode estar no fato de considerarem um escoamento estratificado, sem levarem em conta a influência da velocidade superficial do gás, ou o número de Froude. A correlação de Chisholm, apesar de considerar a influência da pressão, ou da razão entre as densidades de gás e líquido, mostrou desempenho comparável à correlação de Murdock e, em alguns casos, apresentou erros e dispersões até maiores.

4.1.1.2. Aplicação das correlações de Leeuw e Steven

As correlações de Leeuw e Steven, desenvolvidas para o venturi, também foram avaliadas para correção da medição de vazão de gás no v-cone, considerando o escoamento de gás úmido.

No caso da correlação de Leeuw, os resultados estão apresentados na Fig. 23, com os dados referentes aos erros na medição de vazão obtidos antes da correção (erros da vazão de gás fornecida pela equação do v-cone) e após a aplicação da correlação.

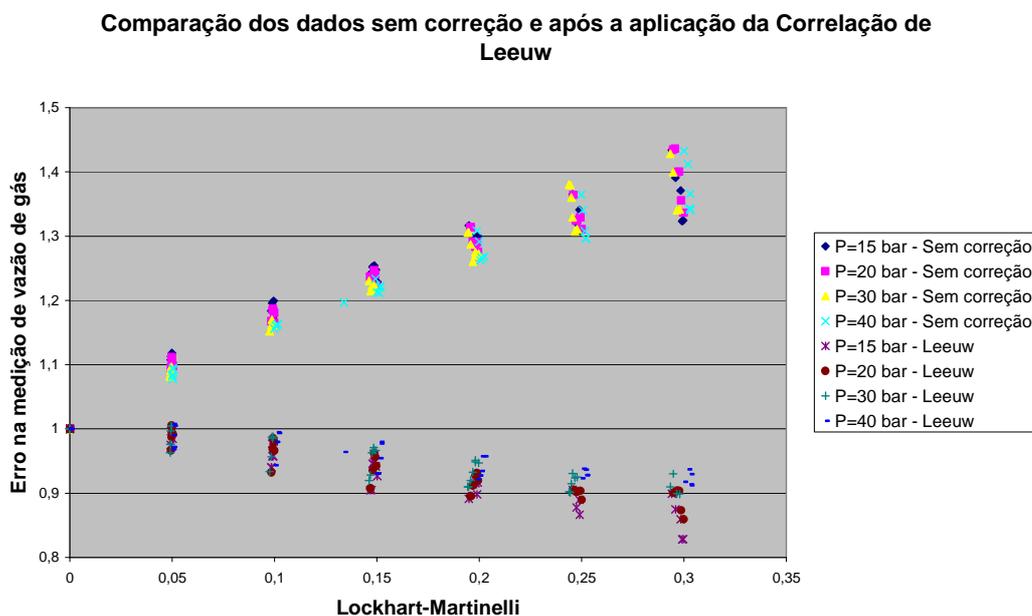


Figura 23 - Sobrestimação da vazão de gás e aplicação da correlação de Leeuw

Pode-se notar um erro residual elevado, especialmente para frações de líquido mais elevadas e para pressões mais baixas. Na Fig. 24, é notável o crescimento do erro residual com o aumento do parâmetro de Lockhart-Martinelli, chegando a erros de -15% ou até maiores, para o caso de parâmetro de Lockhart-Martinelli igual a 0,3. Em geral, observa-se também que os erros são negativos, o que evidencia que a correlação de Leeuw aplica uma correção exagerada na vazão de gás, gerando valores corrigidos menores que os valores de vazão de gás reais.

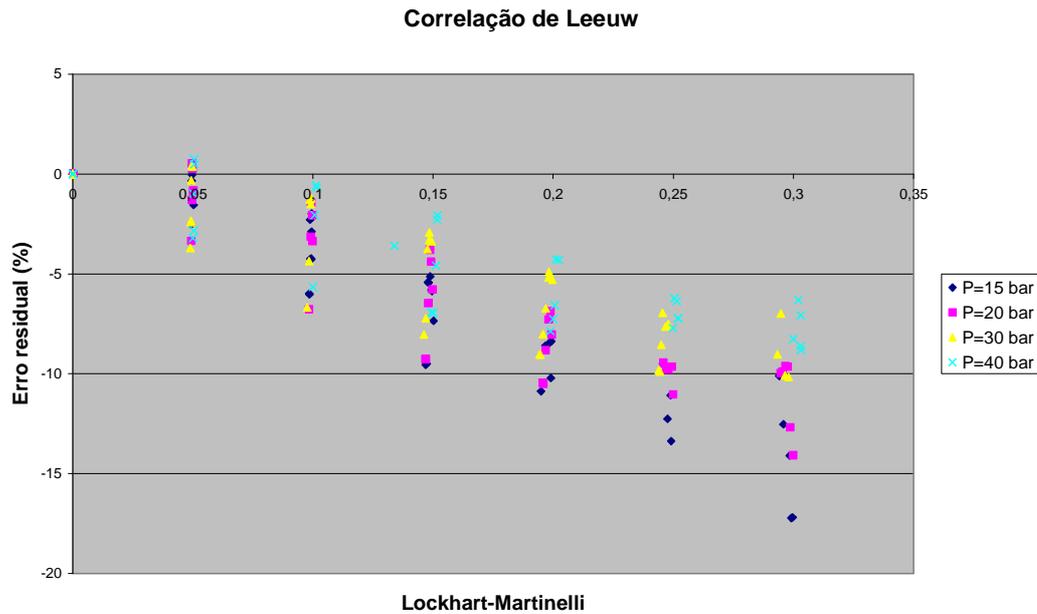


Figura 24 – Erro residual da vazão de gás após a aplicação da correlação de Leeuw

A aplicação da correlação de Steven, também desenvolvida para o venturi, está representada na Fig. 25, onde se podem verificar os erros com os dados brutos de vazão obtidos com o v-cone (sem correção) e com os dados gerados pela utilização da correlação.

Comparação dos dados sem correção e após a aplicação da Correlação de Steven (Venturi)

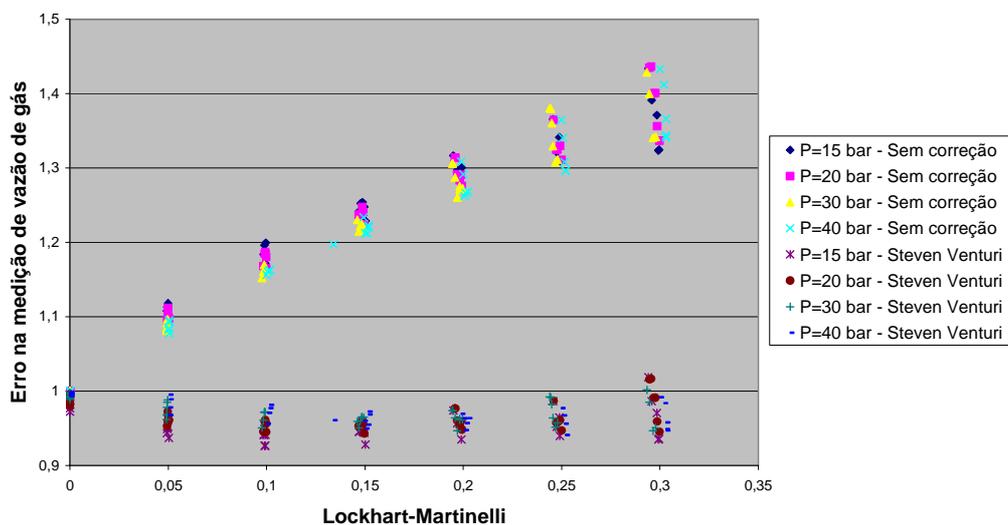


Figura 25 – Sobrestimação da vazão de gás e aplicação da correlação de Steven desenvolvida para o venturi

O erro residual encontrado, após a aplicação da correlação de Steven, variou entre -7% e +2%, conforme ilustrado pela Fig. 26. Em geral, os erros residuais encontrados são negativos e tendem a aumentar com a redução da pressão, especialmente para os valores mais baixos do parâmetro de Lockhart-Martinelli. Isto demonstra que a correlação de Steven também aplica, em geral, uma correção exagerada na vazão de gás. Pode-se verificar também que, devido à equação utilizada e diferentemente das outras correlações avaliadas, o erro na medição de vazão não converge para o valor zero quando a fração de líquido é nula, ou seja, o fator de correção nesta condição é diferente de 1.

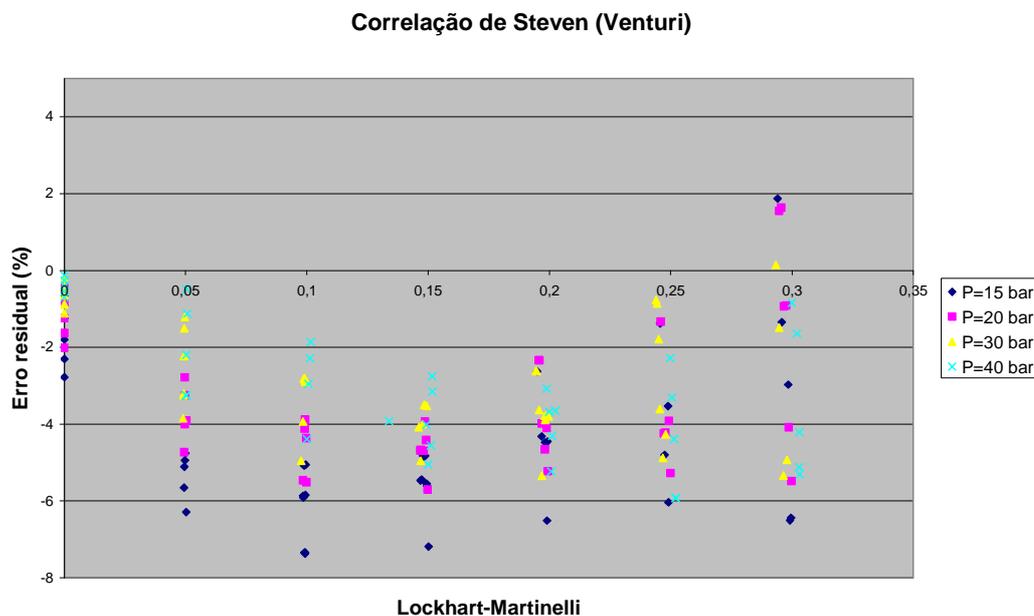


Figura 26 – Erro residual da vazão de gás após a aplicação da correlação de Steven desenvolvida para o venturi

Analisando o desempenho das correlações desenvolvidas para o venturi na correção dos erros da medição de vazão de gás do v-cone gerados pela presença de líquido, percebe-se que a correlação de Leeuw, mesmo levando em consideração os efeitos da concentração de líquido, da pressão de operação e do número de Froude, apresentou resultados incoerentes, com erros residuais elevados e crescentes com o aumento do parâmetro de Lockhart-Martinelli. Como a correlação foi gerada a partir de dados de um tubo venturi cujo valor de beta é igual a 0,4, este pode ser um dos fatores que ocasionaram os erros elevados, visto que o valor do beta do v-cone avaliado é igual a 0,6. No caso da correlação de Steven, os resultados foram melhores, com uma redução significativa dos erros obtidos sem correção, mas ainda aquém do desempenho necessário e desejado para um medidor de vazão de gás natural operando com

presença de líquido em um ambiente de produção. A média dos erros encontrados após a aplicação da correlação de Steven, considerando todos os pontos de teste (com exceção dos dados obtidos sem a presença de líquido), é de -3,8%. Este valor médio de erro é relativamente elevado, considerando que ainda existe uma dispersão significativa dos dados.

As duas correlações mostraram uma “correção excessiva” dos erros das vazões de gás obtidas pelo medidor v-cone, causados pela presença de líquido. Este fato indica que o v-cone gera valores de vazão com menor sobrestimação do que o medidor venturi, quando em condições de gás úmido.

4.1.1.3. Aplicação da nova correlação de Steven

Uma nova correlação foi gerada para corrigir os efeitos da presença de líquido no escoamento de gás, a partir de testes realizados por Steven. No entanto, o seu desempenho foi pouco avaliado e a correlação ainda carece de testes adicionais para validar a sua aplicação em campo. Diante disso, essa correlação foi avaliada com os dados obtidos nos testes realizados no NEL, de forma a validar a sua aplicação caso se reproduzam bons resultados.

Primeiramente, a correlação gerada por Steven com um v-cone de beta igual a 0,55 foi aplicada. Os erros na medição de vazão encontrados antes da correção (erros da vazão obtida pela equação do v-cone) e após a aplicação da correlação estão apresentados na Fig. 27.

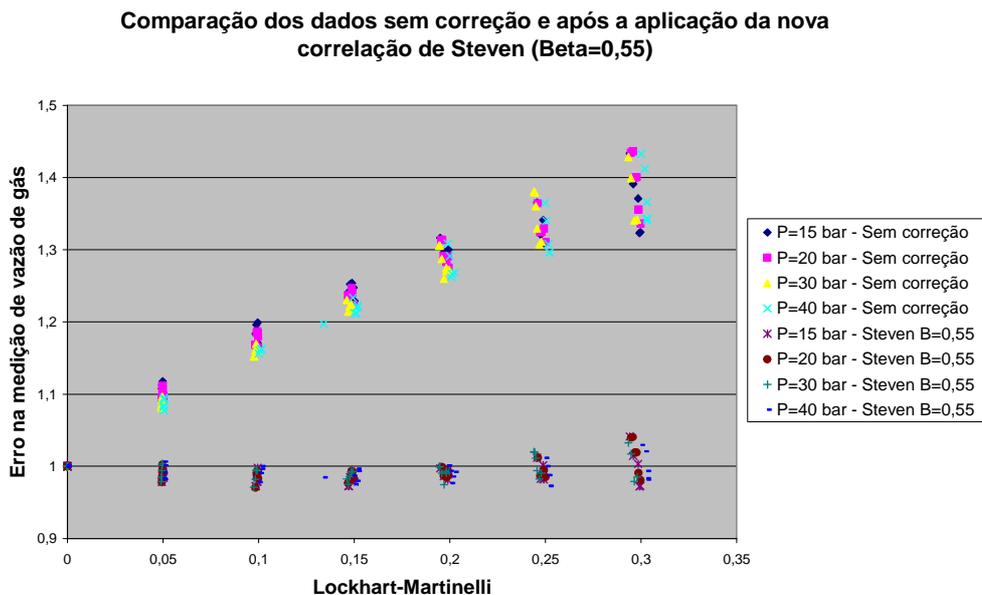


Figura 27 – Sobrestimação da vazão de gás e aplicação da correlação de Steven desenvolvida com v-cone de beta igual a 0,55

Pode-se verificar que o erro residual, após a aplicação da nova correlação, elaborada e avaliada por Steven para um v-cone de beta igual a 0,55, variou entre -4% e +4%, conforme ilustrado pela Fig. 28. Nota-se, também, uma tendência de erros negativos, especialmente para valores mais baixos do parâmetro de Lockhart-Martinelli. Para parâmetro de Lockhart-Martinelli igual a 0,3, percebe-se um aumento na dispersão dos resultados, o que sugere que, para maiores frações de líquido, a correlação não deverá dar bons resultados.

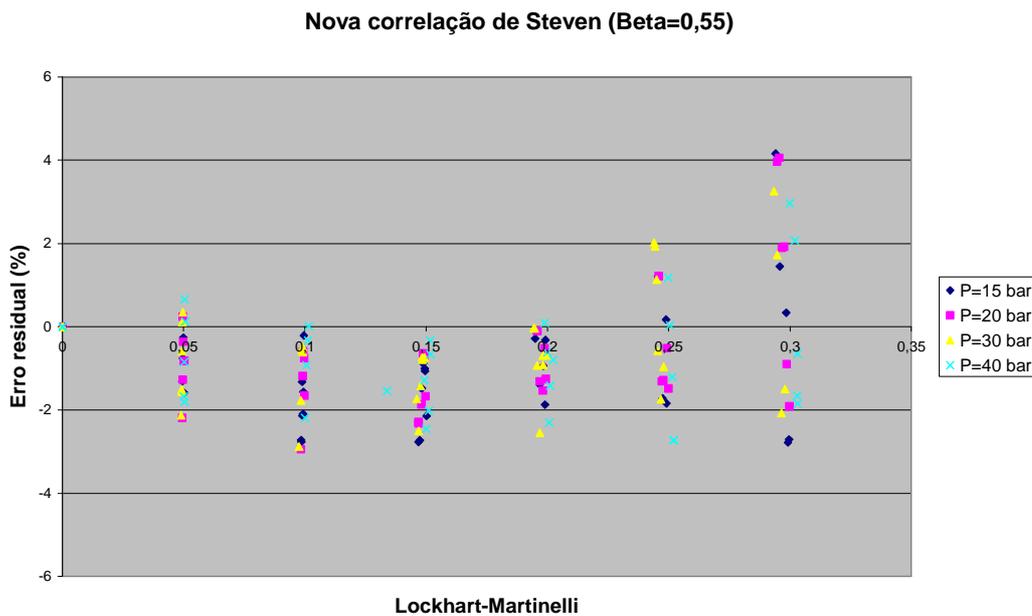


Figura 28 – Erro residual da vazão de gás após a aplicação da correlação de Steven desenvolvida com v-cone de beta igual a 0,55

Steven também desenvolveu uma correlação após testes em um v-cone de beta igual a 0,75. Essa correlação é semelhante à anterior, com variação das constantes utilizadas. Neste trabalho, também foram implementadas as equações para verificação da eficiência dessa correlação no v-cone testado no NEL, cujo beta, conforme informado anteriormente, é igual a 0,6. Os resultados estão apresentados na Fig. 29. O gráfico mostra os dados de erro na medição de vazão de gás antes da correção e após a aplicação da correlação.

Comparação dos dados sem correção e após a aplicação da nova correlação de Steven (Beta=0,75)

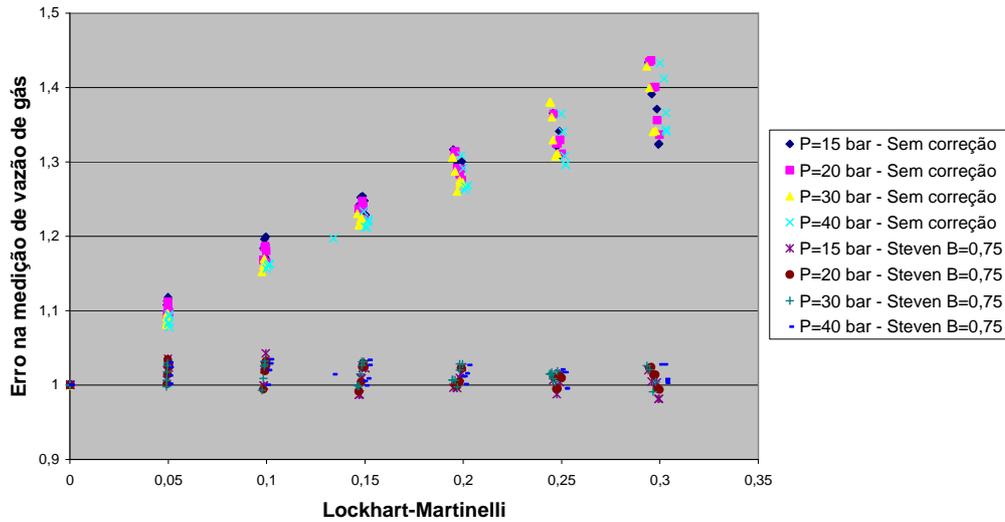


Figura 29 – Sobrestimação da vazão de gás e aplicação da correlação de Steven desenvolvida com v-cone de beta igual a 0,75

O erro residual encontrado foi pequeno, variando entre -2% e +4%, com exceção de um ponto testado, conforme ilustrado pela Fig. 30. Nota-se que a maioria dos valores corrigidos com essa correlação de Steven ficou com erros abaixo de 2%.

Nova correlação de Steven (Beta=0,75)

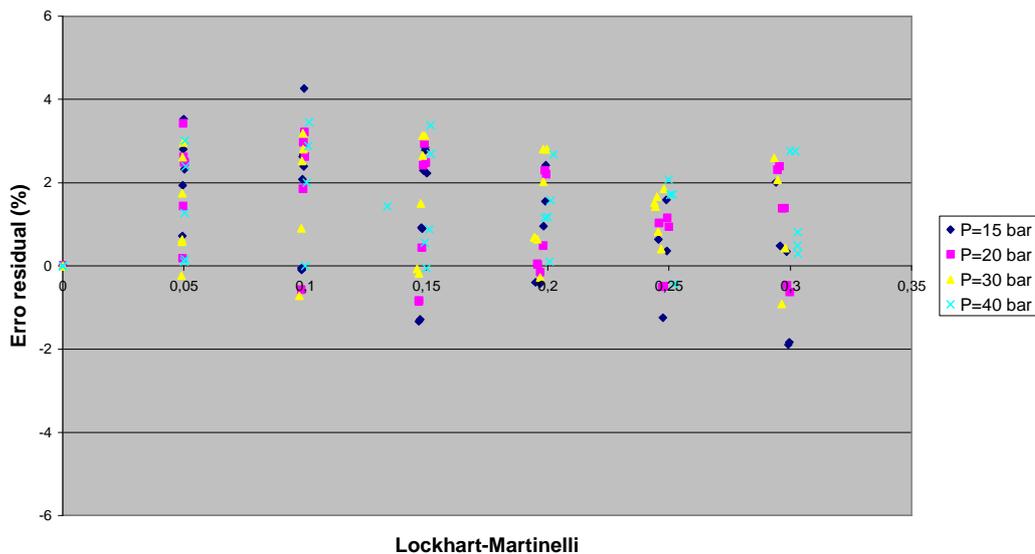


Figura 30 – Erro residual da vazão de gás após a aplicação da correlação de Steven desenvolvida com v-cone de beta igual a 0,75

Pela análise dos resultados obtidos, as correlações desenvolvidas por Steven apresentaram um desempenho satisfatório para corrigir os erros gerados pela presença de líquido na determinação da vazão de gás do v-cone. Os valores corrigidos, com a aplicação das correlações, demonstraram erros inferiores a 4% com relação ao padrão de referência. Além disso, a maioria dos dados ficou dentro da banda de erro de $\pm 2\%$.

Conforme verificado no item 4.1, a sobrestimação da vazão de gás, quando há presença de líquido, é influenciada pelo parâmetro de Lockhart-Martinelli, pela pressão de operação e pelo número de Froude. Portanto, tem-se uma indicação que a aplicação da nova correlação de Steven apresentou resultados mais coerentes que as outras correlações avaliadas por considerar estes fatores nas equações, além de ter sido realizado teste em laboratório com o próprio v-cone.

Vale ressaltar que a correlação de Steven desenvolvida para v-cone de beta igual a 0,55 apresentou uma tendência em corrigir excessivamente a vazão de gás, gerando um fator de correção superior ao valor devido. Portanto, a maior parte dos erros residuais foi negativa. No caso da correlação desenvolvida para v-cone de beta igual a 0,75, esta apresentou uma tendência de correção insuficiente da vazão de gás, especialmente para baixos valores do parâmetro de Lockhart-Martinelli, gerando erros residuais, em sua maioria, positivos. Este fato demonstra que existe uma influência do valor de beta no comportamento do medidor em escoamento de gás úmido. Isso indica que a geração de uma nova correlação, com constantes específicas para o valor de beta igual a 0,6 do v-cone em questão, poderá, então, fornecer resultados ainda melhores que os encontrados.

4.1.1.4. Correlação para v-cone com beta igual a 0,6

Conforme discutido anteriormente, verificou-se que, possivelmente, existe uma pequena influência do valor de beta nos resultados da medição de vazão de gás quando há presença de líquido, apresentados pelo medidor v-cone. Steven já havia observado esse efeito, gerando constantes específicas para o medidor de beta igual a 0,55 e para o medidor de beta igual a 0,75. No entanto, não foi encontrada na literatura nenhuma correlação desenvolvida especificamente para v-cone com valor de beta igual a 0,6. Diante disso, uma nova correlação foi gerada e avaliada neste trabalho, buscando-se a redução dos erros residuais na

medição de vazão de gás. A correlação se baseia na atribuição de pesos às equações de Steven apresentadas no item 3.1.3.1, resultando no seguinte fator de correção:

$$FC = P1 \cdot \left(\frac{1 + A \cdot X + B \cdot Fr}{1 + C \cdot X + B \cdot Fr} \right) + P2 \cdot \left(\frac{1 + A' \cdot X + B' \cdot Fr}{1 + C' \cdot X + B' \cdot Fr} \right) \quad (50)$$

onde $P1$ e $P2$ representam os pesos aplicados às equações. O valor destes pesos é determinado por interpolação, de forma a adaptar as equações ao medidor de beta igual a 0,6, resultando em um valor de $P1$ igual a 0,75 e um valor de $P2$ igual a 0,25. Os coeficientes A , B , C , A' , B' e C' foram definidos no item 3.1.3.1.

Portanto, a vazão volumétrica de gás corrigida resultante é dada por:

$$Q_g = \frac{Q_{gu}}{FC} \quad (51)$$

onde Q_{gu} representa a vazão de gás, em escoamento de gás úmido, obtida pelo v-cone e Q_g representa a vazão de gás natural corrigida pela correlação.

Os resultados da aplicação deste novo fator de correção estão apresentados na Fig. 31. O gráfico mostra os dados de erro na medição de vazão de gás antes da correção e após a aplicação da nova correlação.

Comparação dos dados sem correção e após a aplicação da nova correlação (Beta=0,6)

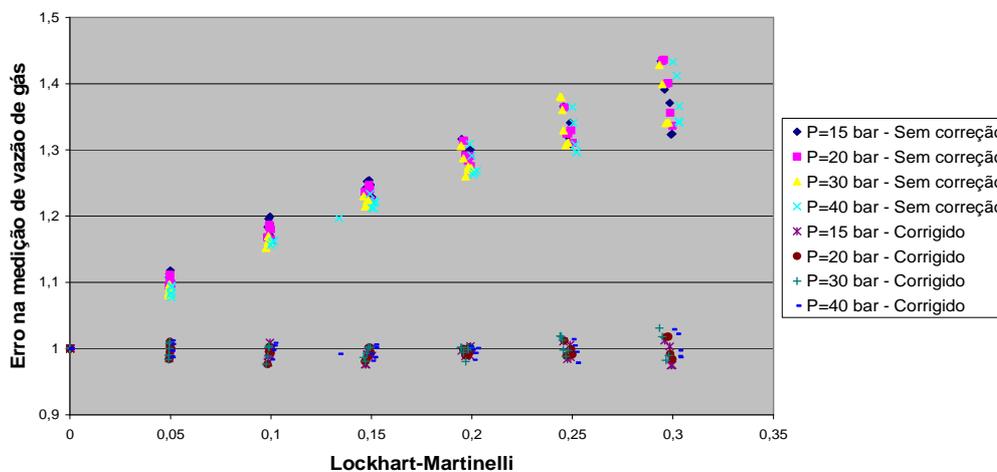


Figura 31 – Sobrestimação da vazão de gás e aplicação do novo fator de correção (Eq. (50)) específico para v-cone de beta igual a 0,6

O erro residual encontrado foi reduzido, variando entre -3% e +3%, conforme ilustrado na Fig. 32. As linhas tracejadas no gráfico indicam exatamente os limites de erro de -3% e +3%. Nota-se que a grande maioria dos valores corrigidos com a nova equação avaliada para o v-cone de beta igual a 0,6 apresentou erros inferiores a 2%.

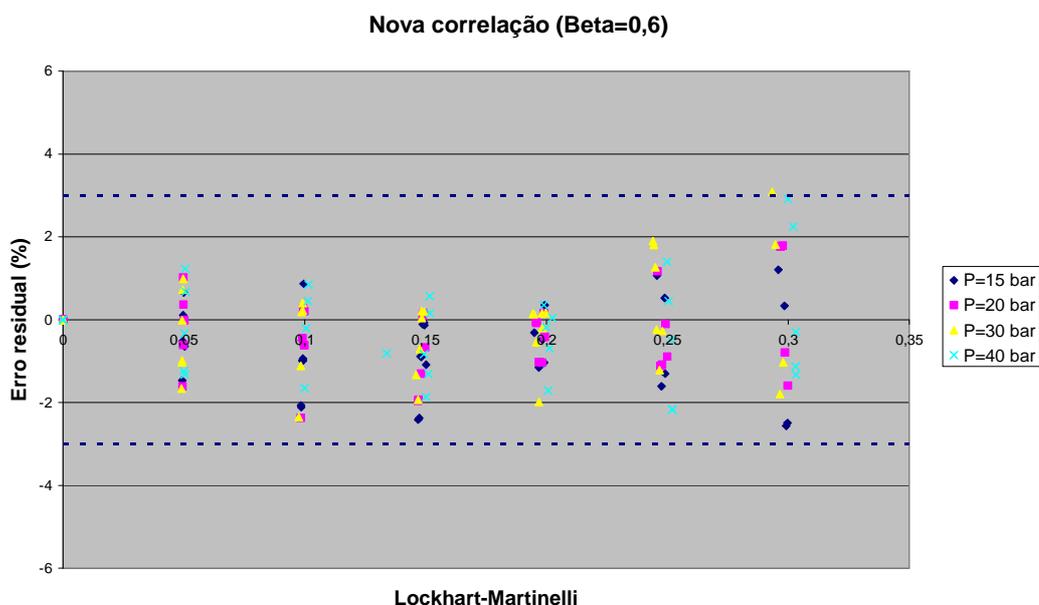


Figura 32 - Erro residual da vazão de gás após a aplicação do novo fator de correção (Eq. (50)) específico para v-cone de beta igual a 0,6

A avaliação dos resultados obtidos demonstra que essa correlação desenvolvida apresentou o desempenho mais satisfatório dentre as correlações avaliadas, com erros na vazão inferiores a 3% com relação ao padrão de referência. Nota-se, ainda, uma pequena tendência de erros negativos, especialmente para valores do parâmetro de Lockhart-Martinelli inferiores a 0,25. Para parâmetro de Lockhart-Martinelli igual a 0,25 e 0,3, percebe-se um aumento na dispersão dos resultados, o que sugere que, para maiores frações de líquido, a correlação não deverá dar bons resultados. Vale ressaltar que a maior parte dos pontos apresentou erros dentro da banda de erro de $\pm 2\%$ (90% dos pontos testados com erros inferiores a 2%).

4.2. Avaliação do desempenho do medidor v-cone

A Eq. (50) desenvolvida para corrigir o valor da vazão de gás obtida pelo v-cone apresentou o desempenho mais adequado, já que os erros e incertezas encontrados foram baixos, conforme demonstrado na avaliação a seguir. Nesta avaliação, foram consideradas duas metodologias para determinação das incertezas de medição. Os procedimentos utilizados nas estimativas estão baseados nos documentos de referência relacionados à avaliação de incertezas [43], [44], [45].

Após a aplicação da correlação, o erro máximo encontrado da vazão corrigida com relação à vazão de referência é de +3,0%, considerando todas as condições de teste, que resultaram em cerca de 130 pontos testados com o parâmetro de Lockhart-Martinelli igual ou inferior a 0,3. Os erros residuais máximos encontrados em cada pressão, referentes à vazão corrigida com relação à vazão de referência, estão apresentados na Tab. 4.

Tabela 4 – Erro máximo encontrado na vazão de gás natural

Erro Máximo na Vazão de Gás (%)	
15 bar	-2,6
20 bar	-2,4
30 bar	3,0
40 bar	2,9

4.2.1. Avaliação das incertezas de medição (metodologia 1)

Conforme esta metodologia proposta, as incertezas de medição podem ser obtidas a partir de uma análise da dispersão dos dados encontrados (dispersão dos erros) e do erro sistemático residual médio, considerando o erro residual em função da vazão de gás de referência (avaliação **(a)**) e em função do parâmetro de Lockhart-Martinelli (avaliação **(b)**).

a) Erro residual x Vazão de gás de referência

A Fig. 33 apresenta os erros residuais, após a aplicação da nova correlação representada pela Eq. (50), em função da vazão de gás de referência.

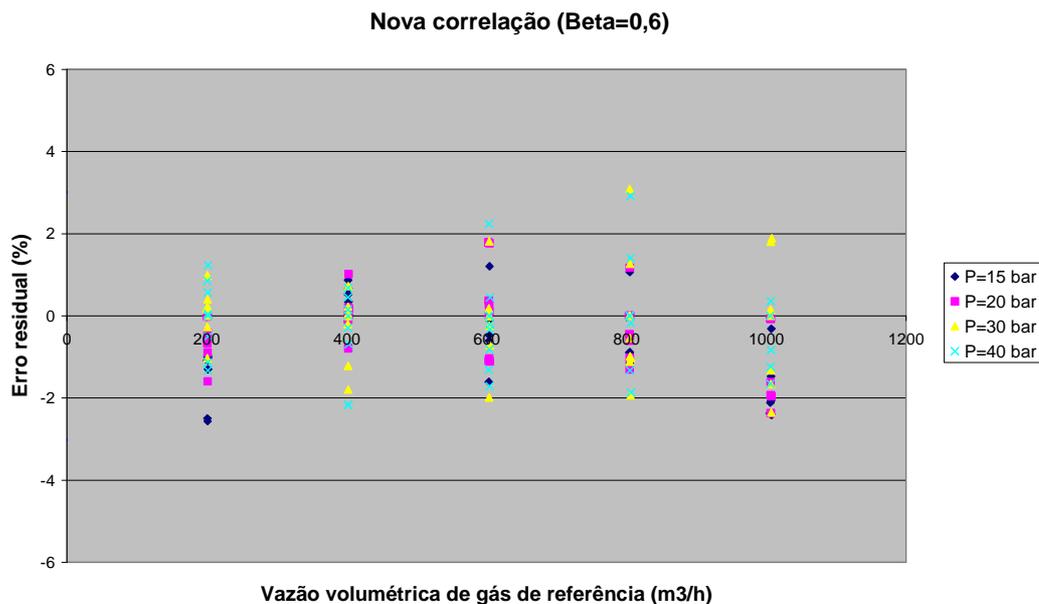


Figura 33 - Erro residual da vazão de gás após a aplicação da nova correlação x Vazão de gás de referência

A partir desses resultados, pode-se determinar o erro residual médio da vazão (E_{med}) para cada vazão de gás de referência e a incerteza expandida (U) associada ao valor de cada erro, supondo uma distribuição normal, para um nível de confiança de 95,45%. A Tab. 5 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 5 – Erros médios e incertezas associadas a cada valor de erro

Vazão volumétrica de gás (m ³ /h)	Erro residual médio (E_{med}) (%)	Incerteza do erro = Desvio padrão (s) (%)	Graus de liberdade ($n-1$)	Fator de abrangência = t de <i>student</i>	Incerteza expandida ($U=t.s$) (%)
200	-0,51	0,91	30	2,09	± 1,89
400	-0,12	0,87	25	2,11	± 1,84
600	-0,11	1,12	26	2,10	± 2,36
800	-0,24	1,38	22	2,12	± 2,94
1000	-1,02	1,28	22	2,12	± 2,72

Os valores de incerteza expandida (U) são obtidos por meio do desvio padrão (s) dos erros em cada valor de vazão, multiplicado pelo fator de abrangência (t de *student*) correspondente, de acordo com o número de graus de liberdade. O número de graus de liberdade é determinado a partir do número de medições menos 1 ($n-1$). Deve-se ressaltar que, na Tab. 5, os valores de incerteza estão apresentados em valores percentuais absolutos.

Como exemplo, pode-se concluir que, para uma vazão de cerca de 200 m³/h, o erro residual estará situado na seguinte faixa, considerando um nível de confiança de 95,45%:

$$(-0,51 - 1,89\%) < \text{Erro}(\%) < (-0,51 + 1,89\%) \quad (52)$$

Portanto, o erro residual percentual estará na seguinte faixa:

$$- 2,40\% < \text{Erro}(\%) < 1,39\% \quad (53)$$

De forma a expressar a incerteza em termos da vazão corrigida do v-cone, temos que:

$$\text{Erro}(\%) = \left(\frac{Q_{cor}}{Q_{real}} - 1 \right) * 100 \quad (54)$$

Onde Q_{cor} representa a vazão de gás obtida com o v-cone e corrigida pela correlação, e Q_{real} representa a vazão de gás real (valor verdadeiro convencional).

Considerando o exemplo anterior, para a variação do erro entre -2,40% e 1,39%, e utilizando o limite inferior do erro, temos:

$$- 2,40 = \left(\frac{Q_{cor}}{Q_{real}} - 1 \right) * 100 \quad (55)$$

Portanto:

$$Q_{real} = 1,0246 * Q_{cor} \quad (56)$$

Para o limite superior do erro, temos:

$$1,39 = \left(\frac{Q_{cor}}{Q_{real}} - 1 \right) * 100 \quad (57)$$

Portanto:

$$Q_{real} = 0,9863 * Q_{cor} \quad (58)$$

Interpretando os resultados, observa-se que, para uma vazão de gás medida e corrigida no v-cone (Q_{cor}) com um valor de aproximadamente 200 m³/h,

a vazão verdadeira deve situar-se na faixa entre $0,9863 \times Q_{cor}$ e $1,0246 \times Q_{cor}$, para um nível de confiança de 95,45%, ou seja:

$$Q_{real} = Q_{cor} (+2,46\%; -1,37\%) \quad (59)$$

Verifica-se um valor de incerteza assimétrico, devido à existência de um erro sistemático que não é corrigido. Adotando uma avaliação conservadora, pode-se considerar a incerteza como $\pm 2,46\%$, para um nível de confiança de 95,45%.

Expandindo a mesma metodologia para as outras vazões, podem-se obter as incertezas de medição da vazão de gás conforme a Tab. 6, para um nível de confiança de 95,45%:

Tabela 6 – Incerteza associada a cada valor de vazão de gás

Vazão volumétrica de gás corrigida (Q_{cor}) (m^3/h)	Limite superior Vazão de gás real (Q_{real})	Limite inferior Vazão de gás real (Q_{real})	Incerteza (%)	Incerteza (conservadora) (%)
200	$1,0246 \times Q_{cor}$	$0,9863 \times Q_{cor}$	+ 2,46% - 1,37%	$\pm 2,46$
400	$1,0200 \times Q_{cor}$	$0,9830 \times Q_{cor}$	+ 2,00% - 1,70%	$\pm 2,00$
600	$1,0254 \times Q_{cor}$	$0,9780 \times Q_{cor}$	+ 2,54% - 2,20%	$\pm 2,54$
800	$1,0327 \times Q_{cor}$	$0,9737 \times Q_{cor}$	+ 3,27% - 2,63%	$\pm 3,27$
1000	$1,0389 \times Q_{cor}$	$0,9833 \times Q_{cor}$	+ 3,89% - 1,67%	$\pm 3,89$

Verifica-se que os valores de incerteza se mantiveram aproximadamente estáveis em vazões de gás baixas e médias (até $600 m^3/h$). No entanto, para vazões de gás mais elevadas, as incertezas de medição da vazão aumentaram, atingindo um valor de $\pm 3,89\%$ para as vazões de $1\ 000 m^3/h$.

b) Erro residual x Parâmetro de Lockhart-Martinelli

A Fig. 34 apresenta novamente os erros residuais, após a aplicação da correlação representada pela Eq. (50), em função do parâmetro de Lockhart-Martinelli.

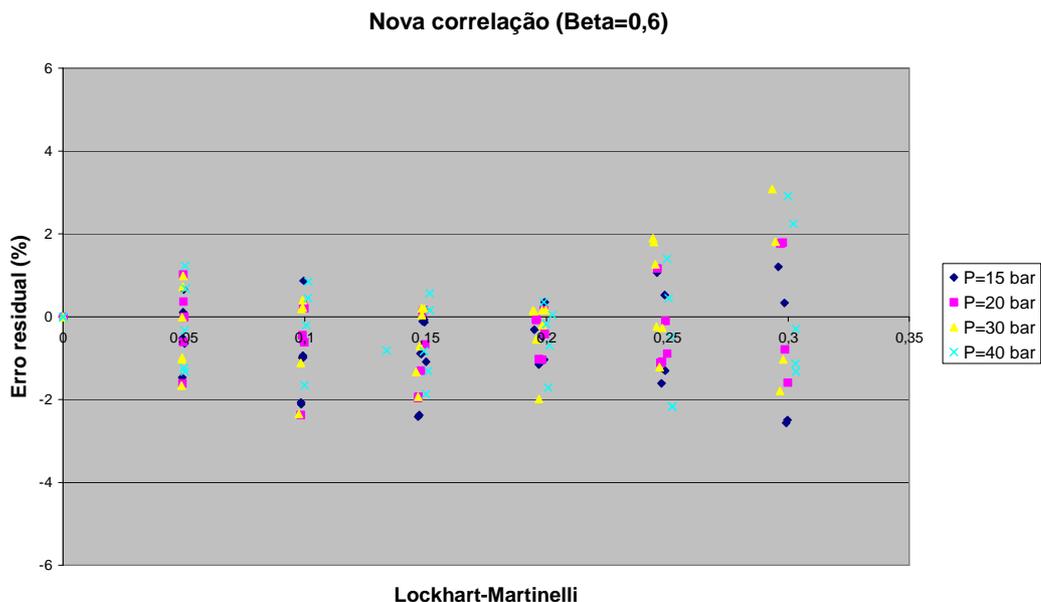


Figura 34 - Erro residual da vazão de gás após a aplicação da nova correlação x Parâmetro de Lockhart-Martinelli

Pode-se realizar uma avaliação semelhante à realizada anteriormente, considerando os erros e incertezas para cada valor do parâmetro de Lockhart-Martinelli, ao invés de cada valor da vazão de gás de referência. A partir dos resultados apresentados na Fig. 34, determina-se o erro residual médio da vazão (*Emed*) para cada valor do parâmetro de Lockhart-Martinelli e a incerteza expandida (*U*) associada ao valor de cada erro, supondo uma distribuição normal, para um nível de confiança de 95,45%. A Tab. 7 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 7 – Erros médios e incertezas associadas a cada valor de erro

Parâmetro de Lockhart-Martinelli (<i>X</i>)	Erro residual médio (<i>Emed</i>) (%)	Incerteza do erro = Desvio padrão (<i>s</i>) (%)	Graus de liberdade (<i>n-1</i>)	Fator de abrangência = <i>t</i> de <i>student</i>	Incerteza expandida (<i>U=t.s</i>) (%)
0,05	-0,26	0,92	21	2,13	± 1,95
0,10	-0,61	1,02	21	2,13	± 2,16
0,15	-0,81	0,89	25	2,11	± 1,88
0,20	-0,41	0,65	22	2,12	± 1,38
0,25	-0,15	1,29	19	2,14	± 2,76
0,30	0,13	1,89	16	2,17	± 4,11

Os valores de incerteza expandida (*U*) são obtidos por meio do desvio padrão (*s*) dos erros em cada valor do parâmetro de Lockhart-Martinelli, multiplicado pelo fator de abrangência (*t* de *student*) correspondente, de acordo

com o número de graus de liberdade. O número de graus de liberdade é determinado a partir do número de medições menos 1 ($n-1$). Deve-se ressaltar que, na Tab. 7, os valores de incerteza estão apresentados em valores percentuais absolutos.

Como exemplo, pode-se concluir que, para um valor de parâmetro de Lockhart-Martinelli igual a 0,05, o erro residual estará situado na seguinte faixa, considerando um nível de confiança de 95,45%:

$$(-0,26 - 1,95\%) < \text{Erro}(\%) < (-0,26 + 1,95\%) \quad (60)$$

Portanto, o erro residual percentual estará na seguinte faixa:

$$- 2,21\% < \text{Erro}(\%) < 1,69\% \quad (61)$$

De forma a expressar a incerteza em termos da vazão corrigida do v-cone, temos que:

$$\text{Erro}(\%) = \left(\frac{Q_{cor}}{Q_{real}} - 1 \right) * 100 \quad (62)$$

Onde Q_{cor} representa a vazão de gás obtida com o v-cone e corrigida pela correlação, e Q_{real} representa a vazão de gás real (valor verdadeiro convencional).

Considerando o exemplo anterior, para a variação do erro entre -2,21% e 1,69%, e utilizando o limite inferior do erro, temos:

$$-2,21 = \left(\frac{Q_{cor}}{Q_{real}} - 1 \right) * 100 \quad (63)$$

Portanto:

$$Q_{real} = 1,0226 * Q_{cor} \quad (64)$$

Para o limite superior do erro, temos:

$$1,69 = \left(\frac{Q_{cor}}{Q_{real}} - 1 \right) * 100 \quad (65)$$

Portanto:

$$Q_{real} = 0,9833 * Q_{cor} \quad (66)$$

Interpretando os resultados, observa-se que, para o parâmetro de Lockhart-Martinelli com um valor de aproximadamente 0,05, a vazão verdadeira deve situar-se na faixa entre $0,9833xQ_{cor}$ e $1,0226xQ_{cor}$, para um nível de confiança de 95,45%, ou seja:

$$Q_{real} = Q_{cor} (+2,26%; -1,67%) \quad (67)$$

Verifica-se um valor de incerteza assimétrico, devido à existência de um erro sistemático que não é corrigido. Adotando uma avaliação conservadora, pode-se considerar a incerteza como $\pm 2,26\%$, para um nível de confiança de 95,45%.

Expandindo a mesma metodologia para os outros valores do parâmetro de Lockhart-Martinelli, podem-se obter as incertezas de medição da vazão de gás conforme a Tab. 8, para um nível de confiança de 95,45%:

Tabela 8 – Incerteza associada a cada valor de parâmetro de Lockhart-Martinelli

Parâmetro de Lockhart-Martinelli (X)	Limite superior Vazão de gás real (Q_{real})	Limite inferior Vazão de gás real (Q_{real})	Incerteza (%)	Incerteza (conservadora) (%)
0,05	$1,0226xQ_{cor}$	$0,9833xQ_{cor}$	+ 2,26% - 1,67%	$\pm 2,26$
0,10	$1,0286xQ_{cor}$	$0,9847xQ_{cor}$	+ 2,86% - 1,53%	$\pm 2,86$
0,15	$1,0276xQ_{cor}$	$0,9895xQ_{cor}$	+ 2,76% - 1,05%	$\pm 2,76$
0,20	$1,0182xQ_{cor}$	$0,9904xQ_{cor}$	+ 1,82% - 0,96%	$\pm 1,82$
0,25	$1,0300xQ_{cor}$	$0,9746xQ_{cor}$	+ 3,00% - 2,54%	$\pm 3,00$
0,30	$1,0414xQ_{cor}$	$0,9594xQ_{cor}$	+ 4,14% - 4,06%	$\pm 4,14$

Verifica-se que os valores de incerteza se mantiveram iguais ou inferiores a 3% para valores do parâmetro de Lockhart-Martinelli até 0,25. No entanto, para o parâmetro de Lockhart-Martinelli igual a 0,3, a incerteza de medição da vazão foi igual a $\pm 4,14\%$.

Conforme esperado, não foram alcançados níveis de incerteza de acordo com os requisitos exigidos pelo Regulamento Técnico de Medição para a medição fiscal (1,5%) ou mesmo para medição de apropriação da produção de

gás (2%). No entanto, devido à complexidade envolvida na medição de vazão de gás com contaminação de líquido, os valores encontrados de erro e incerteza são considerados bastante satisfatórios, tanto na avaliação dos erros realizada em função da vazão de gás como na avaliação dos erros realizada em função do parâmetro de Lockhart-Martinelli. Dessa forma, pode-se alcançar uma boa confiabilidade na medição para esses casos em que há contaminação de líquido na corrente de gás. Nos casos de vazões mais elevadas ou frações maiores de líquido (maiores valores do parâmetro de Lockhart-Martinelli), a incerteza de medição da vazão ficou mais elevada, mas ainda dentro de patamares aceitáveis (em torno de 4%).

Portanto, nas situações em que é complicado ou mesmo inviável técnica ou economicamente especificar o gás com relação aos níveis de água e condensado, a utilização da metodologia de medição proposta, utilizando v-cone e corrigindo a vazão pela correlação adequada, pode ser utilizada mesmo em condições fiscais ou de apropriação, caso haja a aprovação prévia da ANP. Ressalta-se que as condições operacionais devem se aproximar das condições avaliadas nos testes realizados, já que a extrapolação dos resultados para outras circunstâncias (pressões mais elevadas, por exemplo) pode não ser aplicável.

É importante que sejam tomados alguns cuidados para garantir que esses níveis de incerteza sejam atingidos também durante a operação do medidor em campo, tais como:

- Operação dentro da faixa de medição de vazão para a qual o medidor v-cone foi projetado e calibrado;
- Calibração periódica dos instrumentos do sistema de medição (transmissores de pressão, temperatura, pressão diferencial, etc) e do próprio medidor v-cone (calibração convencional com vazão ou verificação dimensional);
- Programação adequada das equações associadas ao v-cone no computador de vazão ou outro sistema responsável pela aquisição dos dados e cálculo das vazões;
- Determinação adequada das frações de líquido presentes no escoamento;
- Amostragem representativa do fluido, de forma a permitir análises adequadas de laboratório para determinação das propriedades do gás, e realização de análises químicas periódicas ou quando houver mudanças nas propriedades do fluido.

Os itens acima devem ser levados em consideração para evitar erros que comprometam a medição de vazão e que levem à perda da confiabilidade nos resultados alcançados.

4.2.2. Avaliação das incertezas de medição (metodologia 2)

Conforme esta metodologia alternativa, as incertezas de medição podem ser obtidas a partir da comparação direta (gráfico) entre a vazão de gás de referência (eixo das ordenadas), e a vazão de gás medida pelo v-cone e corrigida por meio da correlação (eixo das abscissas). Dessa forma, pode-se ajustar um polinômio pelo método dos mínimos quadrados e obter o desvio médio quadrático para cada valor de vazão. Combinando-se o desvio médio quadrático com a incerteza do sistema de medição de vazão de referência, pode-se obter a incerteza de medição da vazão de gás corrigida do v-cone.

A Fig. 35 apresenta a vazão volumétrica de gás de referência (Q_{ref}) em função da vazão volumétrica obtida pela equação do v-cone e corrigida pela nova correlação apresentada na Eq. (50) (Q_{cor}).

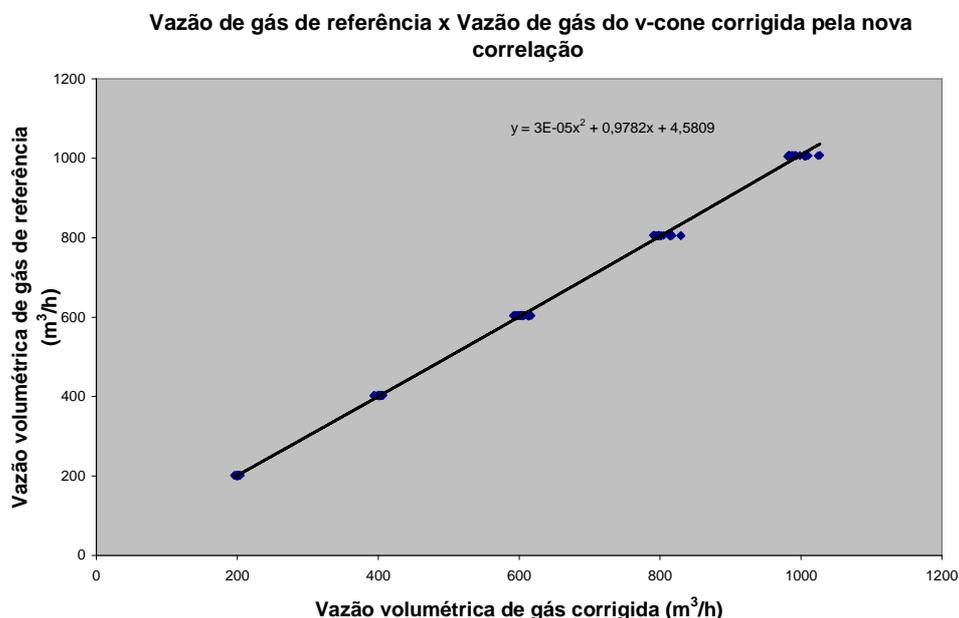


Figura 35 - Vazão volumétrica de gás de referência x Vazão volumétrica de gás corrigida

A partir dos dados obtidos, foi gerado um polinômio de ajuste pelo método dos mínimos quadrados (polinômio de 2º grau). O polinômio de correção dos dados gerado, apresentado na Fig. 35, foi o seguinte:

$$y = 2,58 * 10^{-5} \cdot x^2 + 0,9782 \cdot x + 4,5809 \quad (68)$$

A incerteza do ajuste (u_{ajuste}) pode ser obtida a partir do desvio médio quadrático dos dados em cada valor de vazão, conforme a Eq. (69):

$$u_{ajuste}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - y(x_i))^2 \quad (69)$$

Onde n representa o número de medições em cada valor de vazão, y_i representa cada valor da vazão de referência, e $y(x_i)$ representa a vazão obtida a partir do polinômio de ajuste da vazão medida pelo v-cone e corrigida pela correlação.

A incerteza expandida da vazão volumétrica de gás de referência (U_{ref}) é igual a $\pm 0,5\%$ (informações obtidas com o laboratório NEL), para um nível de confiança de 95,45%. Portanto, supondo uma distribuição normal, a incerteza padrão será calculada por:

$$u_{ref} = \frac{U_{ref}}{2} \quad (70)$$

Neste caso, a incerteza padrão do sistema de medição de vazão de referência (u_{ref}) será igual a:

$$u_{ref} = \frac{0,5}{2} = 0,25\% = \frac{0,25 \cdot Q_{ref}}{100} \quad (71)$$

Portanto, considerando a incerteza do ajuste e a incerteza do sistema de medição de vazão de gás de referência, e supondo que a incerteza da indicação da vazão corrigida pela correlação está contemplada na incerteza do ajuste (dispersão dos dados), pode-se obter a incerteza padrão de medição de vazão de gás corrigida (u):

$$u = \sqrt{u_{ref}^2 + u_{ajuste}^2} \quad (72)$$

A incerteza padrão obtida em unidades de engenharia (m^3/h) pode ser convertida então para valores percentuais. Os valores de incerteza expandida (U) são obtidos por meio da incerteza percentual padrão (u) em cada valor de vazão, multiplicada pelo fator de abrangência (t de *student*) correspondente, de acordo com o número de graus de liberdade. O número de graus de liberdade é

determinado a partir do número de medições menos 1 ($n-1$). A Tab. 9 apresenta os resultados encontrados. Para os valores de vazão existentes nas faixas entre cada valor apresentado na tabela, pode-se considerar que a incerteza é igual ao maior valor entre os valores de incerteza da vazão imediatamente superior e inferior existentes na tabela. Para uma vazão de 300 m³/h, por exemplo, pode-se considerar uma incerteza de medição de vazão de gás igual a $\pm 1,97\%$.

Tabela 9 – Incerteza associada a cada valor de vazão de gás obtida pela metodologia 2

Vazão de gás (Q) (m ³ /h)	U_p (m ³ /h)	U_{ajuste}^2 (m ³ /h) ²	U_{ajuste} (m ³ /h)	u (m ³ /h)	u (%)	Graus de liberdade ($n-1$)	Fator de abrangência = t de student	U (%)
200	0,50	3,31	1,82	1,89	0,94	30	2,09	$\pm 1,97$
400	1,00	12,58	3,55	3,68	0,92	25	2,11	$\pm 1,94$
600	1,50	46,95	6,85	7,01	1,17	26	2,10	$\pm 2,45$
800	2,00	132,85	11,53	11,70	1,46	22	2,12	$\pm 3,10$
1000	2,50	180,54	13,44	13,67	1,37	22	2,12	$\pm 2,90$

A Tab. 10 apresenta a comparação entre os valores de incerteza de medição da vazão encontrados para cada valor de vazão de gás, conforme as metodologias 1 e 2.

Tabela 10 – Comparação das incertezas de medição obtidas pelas metodologias 1 e 2

Vazão de gás (Q) (m ³ /h)	Incerteza (%) Metodologia 1	Incerteza (%) Metodologia 2
200	$\pm 2,46$	$\pm 1,97$
400	$\pm 2,00$	$\pm 1,94$
600	$\pm 2,54$	$\pm 2,45$
800	$\pm 3,27$	$\pm 3,10$
1000	$\pm 3,89$	$\pm 2,90$

Observa-se que os valores de incerteza encontrados de acordo com a metodologia 2 foram próximos, mas ainda menores do que os valores encontrados pela metodologia 1. No caso da vazão de 1 000 m³/h, a incerteza conforme a metodologia 2 foi cerca de 1% inferior.

4.3.

Avaliação do desempenho do medidor v-cone considerando altas frações de líquido

Além dos resultados apresentados e discutidos anteriormente, também foram obtidos dados para altas frações de líquido na corrente de gás. Estas frações de líquido levam à extrapolação da condição de gás úmido,

correspondendo a valores do parâmetro de Lockhart-Martinelli superiores a 0,3. Foram alcançados, nos testes realizados, valores de até 0,4 para o parâmetro. Neste caso, consideramos a existência de um escoamento multifásico, mas não mais de gás úmido. Além disso, pode haver variações na distribuição dos fluidos e nos padrões de escoamento formados pela combinação entre o gás e o líquido, causando comportamentos distintos dos apresentados anteriormente e afetando o desempenho das correlações utilizadas para correção das vazões de gás. É importante ressaltar que a maioria das correlações foi gerada empiricamente a partir de testes com escoamento de gás úmido apenas (parâmetro de Lockhart-Martinelli igual e inferior a 0,3).

A Fig. 36 apresenta os resultados da aplicação do novo fator de correção gerado e apresentado no item 4.1.1.4 (Eq. (50)). O gráfico mostra os dados de erro na medição de vazão de gás pelo v-cone antes da correção e após a aplicação da nova correlação (vazão corrigida), considerando todos os dados obtidos nos testes realizados, ou seja, variando-se o parâmetro de Lockhart-Martinelli entre 0 e 0,4. Neste caso, foram gerados 171 pontos de teste com contaminação de líquido na corrente de gás, ou seja, 41 pontos além dos 130 avaliados anteriormente.

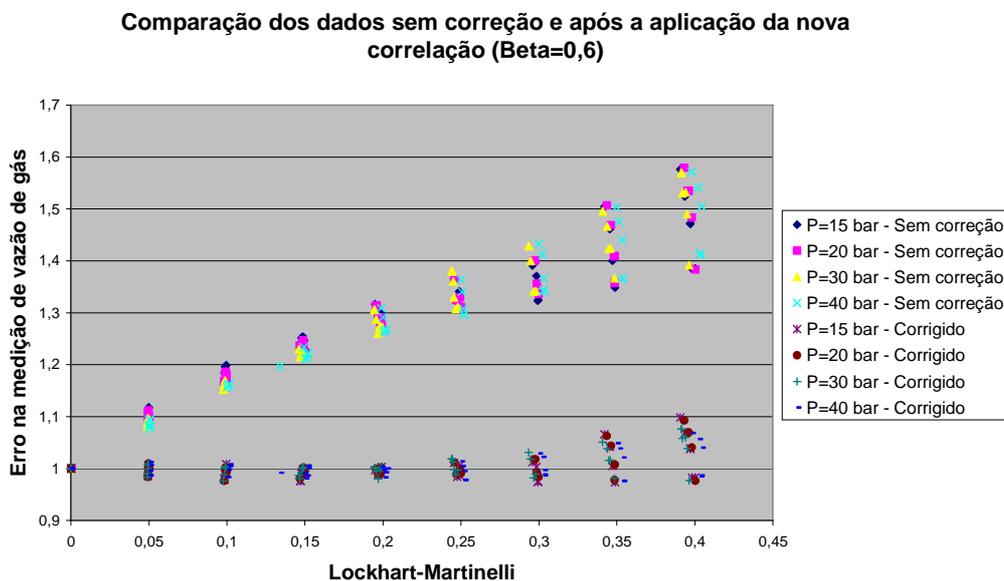


Figura 36 - Sobrestimação da vazão de gás e aplicação da nova correlação específica para v-cone de beta igual a 0,6, com X variando entre 0 e 0,4

Antes da aplicação da correção da medição de vazão de gás, nota-se uma dispersão dos dados mais elevada nos testes realizados com valores do parâmetro de Lockhart-Martinelli iguais a 0,35 e 0,40, em comparação com os

dados referentes aos valores inferiores do parâmetro (0 a 0,3). Após a aplicação da correlação, notam-se uma maior dispersão dos resultados e erros residuais elevados nos testes realizados com valores do parâmetro de Lockhart-Martinelli iguais a 0,35 e 0,40, bem superiores aos encontrados nos testes realizados com baixas frações de líquido.

Na Fig. 37, pode-se observar com clareza o aumento do erro residual, com valores próximos a 7% no caso do parâmetro de Lockhart-Martinelli igual a 0,35, e valores próximos a 10% no caso do parâmetro de Lockhart-Martinelli igual a 0,4.

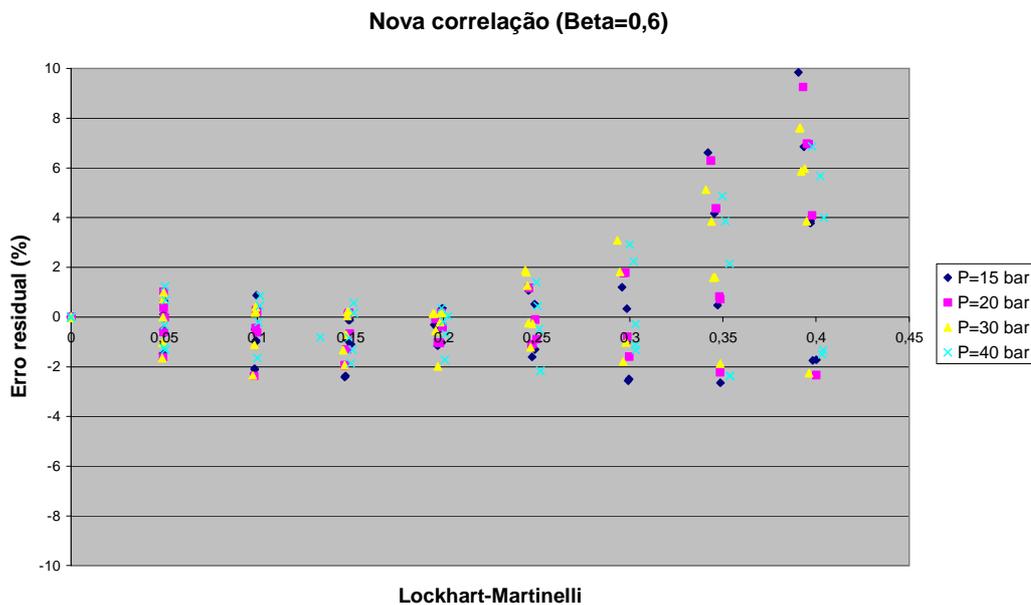


Figura 37 - Erro residual da vazão de gás após a aplicação da nova correlação específica para v-cone de beta igual a 0,6, com X variando entre 0 e 0,4

Verifica-se que o erro máximo encontrado da vazão de gás corrigida com relação à vazão de referência é de 9,8%, após a aplicação da nova correlação. Este valor é bem superior ao valor máximo encontrado para valores do parâmetro de Lockhart-Martinelli iguais e inferiores a 0,3. Nestes casos, o erro máximo, conforme apresentado no item 4.2, foi de 3,0%.

Para cada pressão de teste, os erros máximos encontrados, referentes à vazão de gás corrigida com relação à vazão de referência, estão apresentados na Tab. 11. Em todos os casos, o erro máximo foi obtido em testes com o valor do parâmetro de Lockhart-Martinelli igual a 0,4.

Tabela 11 – Erro máximo encontrado na vazão de gás natural, com X variando entre 0 e 0,4

Erro Máximo na Vazão de Gás (%)	
15 bar	9,8
20 bar	9,3
30 bar	7,6
40 bar	6,9

Para os valores mais elevados do parâmetro de Lockhart-Martinelli, nota-se uma tendência de redução dos erros com o aumento da pressão de operação. No entanto, mesmo na pressão mais elevada de teste, os erros encontrados ainda estão bastante elevados.

4.3.1.

Avaliação das incertezas de medição considerando altas frações de líquido

A estimativa de incertezas, considerando todos os pontos testados (incluindo os pontos com altas frações de líquido), foi realizada conforme a metodologia 1 proposta, que se mostrou um pouco mais conservadora. Portanto, as incertezas de medição, para valores do parâmetro de Lockhart-Martinelli até 0,4, podem ser obtidas a partir de uma análise da dispersão dos dados encontrados (dispersão dos erros) e do erro sistemático residual médio, considerando o erro residual em função da vazão de gás de referência (avaliação **(a)**) e em função do parâmetro de Lockhart-Martinelli (avaliação **(b)**).

a) Erro residual x Vazão de gás de referência

A Fig. 38 apresenta o erro residual, após a aplicação da correlação representada pela Eq. (50), em função da vazão de gás de referência.

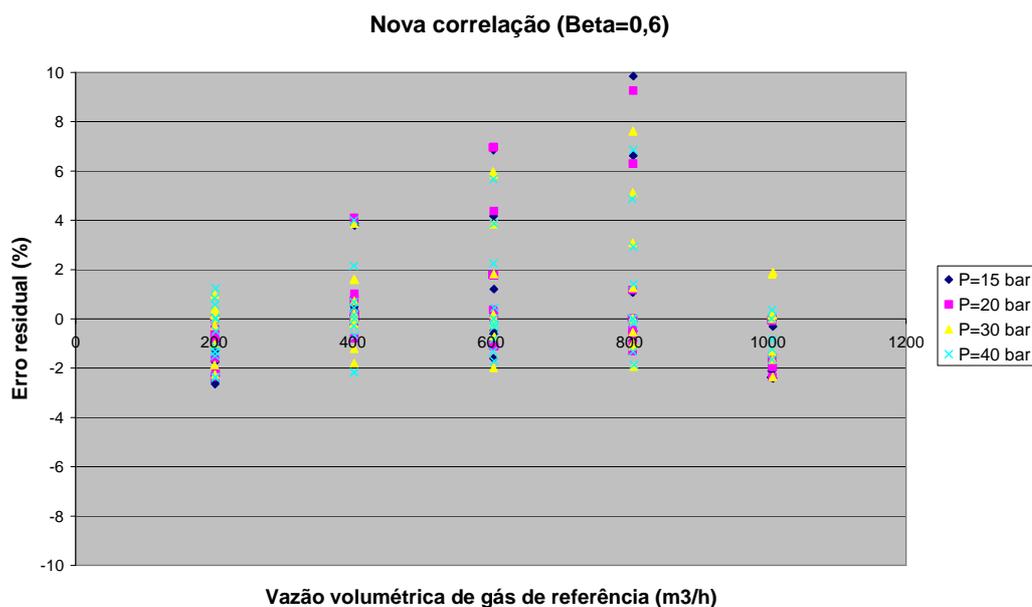


Figura 38 - Erro residual da vazão de gás após a aplicação da nova correlação x Vazão de gás de referência, considerando X até 0,4

A partir desses resultados, pode-se determinar o erro residual médio da vazão (E_{med}) para cada vazão de gás de referência e a incerteza expandida (U) associada ao valor de cada erro, para um nível de confiança de 95,45%. A Tab. 12 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 12 – Erros médios e incertezas associadas a cada valor de erro

Vazão volumétrica de gás (m ³ /h)	Erro residual médio (E_{med}) (%)	Incerteza do erro = Desvio padrão (s) (%)	Graus de liberdade ($n-1$)	Fator de abrangência = t de <i>student</i>	Incerteza expandida ($U=t.s$) (%)
200	-0,91	1,05	41	2,06	± 2,17
400	0,65	1,60	36	2,07	± 3,31
600	1,39	2,76	36	2,07	± 5,71
800	1,83	3,66	31	2,08	± 7,61
1000	-1,02	1,28	22	2,12	± 2,72

Os valores de incerteza expandida (U) são obtidos por meio do desvio padrão (s) dos erros em cada valor de vazão, multiplicado pelo fator de abrangência (t de *student*) correspondente, de acordo com o número de graus de liberdade. O número de graus de liberdade é determinado a partir do número de medições menos 1 ($n-1$). Deve-se ressaltar que, na Tab. 12, os valores de incerteza estão apresentados em valores percentuais absolutos.

Como exemplo, pode-se concluir que, para uma vazão de cerca de 800 m³/h, o erro residual estará situado na seguinte faixa, considerando um nível de confiança de 95,45%:

$$(1,83 - 7,61\%) < \text{Erro}(\%) < (1,83 + 7,61\%) \quad (73)$$

Portanto, o erro residual percentual estará na seguinte faixa:

$$- 5,77\% < \text{Erro}(\%) < 9,44\% \quad (74)$$

De forma a expressar a incerteza em termos da vazão corrigida do v-cone, temos que:

$$\text{Erro}(\%) = \left(\frac{Q_{cor}}{Q_{real}} - 1 \right) * 100 \quad (75)$$

onde Q_{cor} representa a vazão de gás obtida com o v-cone e corrigida pela correlação, e Q_{real} representa a vazão de gás real (valor verdadeiro convencional).

Considerando o exemplo anterior, para a variação do erro entre -5,77% e 9,44%, e utilizando o limite inferior do erro, temos:

$$- 5,77 = \left(\frac{Q_{cor}}{Q_{real}} - 1 \right) * 100 \quad (76)$$

Portanto:

$$Q_{real} = 1,0613 * Q_{cor} \quad (77)$$

Para o limite superior do erro, temos:

$$9,44 = \left(\frac{Q_{cor}}{Q_{real}} - 1 \right) * 100 \quad (78)$$

Portanto:

$$Q_{real} = 0,9137 * Q_{cor} \quad (79)$$

Interpretando os resultados, observa-se que, para uma vazão de gás medida e corrigida no v-cone com um valor de aproximadamente 800 m³/h, a

vazão verdadeira deve situar-se na faixa entre $0,9137 \times Q_{cor}$ e $1,0613 \times Q_{cor}$, para um nível de confiança de 95,45%, ou seja:

$$Q_{real} = Q_{cor} (+6,13\%; -8,63\%) \quad (80)$$

Verifica-se um valor de incerteza assimétrico, devido à existência de um erro sistemático que não é corrigido. Adotando uma avaliação conservadora, pode-se considerar a incerteza como $\pm 8,63\%$, para um nível de confiança de 95,45%.

Expandindo a mesma metodologia para as outras vazões, podem-se obter as incertezas de medição da vazão de gás conforme a Tab. 13, para um nível de confiança de 95,45%:

Tabela 13 – Incerteza associada a cada valor de vazão de gás

Vazão volumétrica de gás corrigida (Q_{cor}) (m^3/h)	Limite superior Vazão de gás real (Q_{real})	Limite inferior Vazão de gás real (Q_{real})	Incerteza (%)	Incerteza (conservadora) (%)
200	$1,0317 \times Q_{cor}$	$0,9875 \times Q_{cor}$	+ 3,17% - 1,25%	$\pm 3,17$
400	$1,0274 \times Q_{cor}$	$0,9619 \times Q_{cor}$	+ 2,74% - 3,81%	$\pm 3,81$
600	$1,0451 \times Q_{cor}$	$0,9337 \times Q_{cor}$	+ 4,51% - 6,63%	$\pm 6,63$
800	$1,0613 \times Q_{cor}$	$0,9137 \times Q_{cor}$	+ 6,13% - 8,63%	$\pm 8,63$
1000	$1,0389 \times Q_{cor}$	$0,9833 \times Q_{cor}$	+ 3,89% - 1,67%	$\pm 3,89$

Verifica-se que houve um significativo aumento da incerteza neste caso em que o parâmetro de Lockhart-Martinelli (X) extrapola a condição definida de gás úmido em comparação à análise realizada anteriormente (item 4.2) em que o valor máximo de X era igual a 0,3. Os resultados apresentados na Tab. 13 mostram que a incerteza, em qualquer valor de vazão, está superior a 3%, atingindo valores próximos a 9% para a vazão de 800 m^3/h . Devido às limitações do circuito do laboratório, não foi possível testar o escoamento com valores do parâmetro de Lockhart-Martinelli superiores a 0,3, para a vazão de gás de 1 000 m^3/h . Portanto, para esta vazão, o valor de incerteza permaneceu inalterado com relação à análise anterior.

b) Erro residual x Parâmetro de Lockhart-Martinelli

A Fig. 39 apresenta, novamente, o erro residual em função do parâmetro de Lockhart-Martinelli, após a aplicação da correlação representada pela Eq. (50).

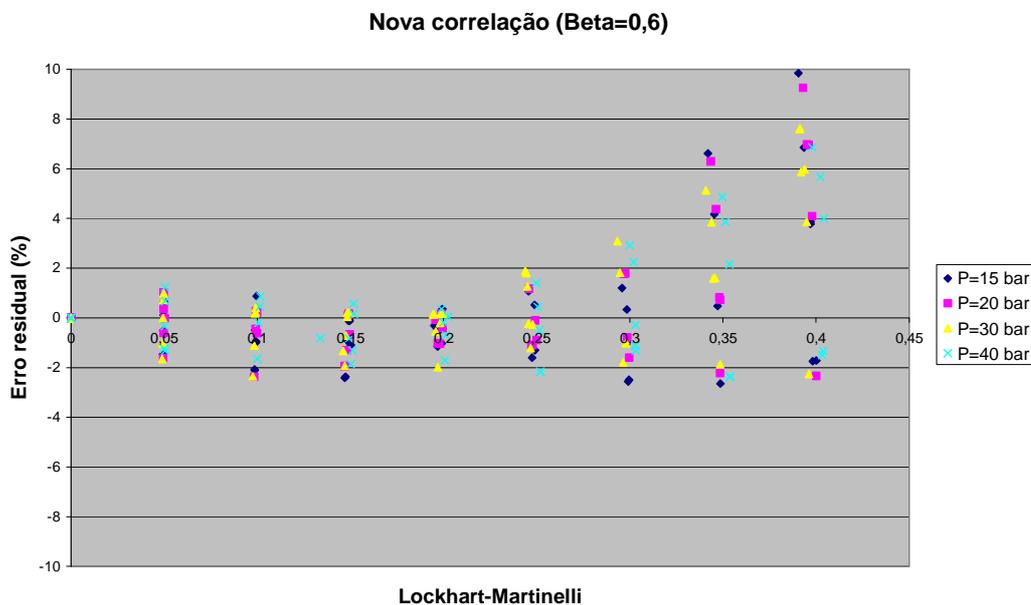


Figura 39 - Erro residual da vazão de gás após a aplicação da nova correlação x Parâmetro de Lockhart-Martinelli (X), com X variando entre 0 e 0,4

Neste caso, será realizada a avaliação considerando os erros e incertezas para cada valor do parâmetro de Lockhart-Martinelli (X), ao invés de cada valor da vazão de gás de referência. Para valores de X até 0,3, já foi realizada a análise no item 4.2. Portanto, serão acrescentados os dados referentes a X igual a 0,35 e X igual a 0,4. A partir dos resultados apresentados na Fig. 39, determina-se o erro residual médio da vazão (E_{med}) para cada valor do parâmetro de Lockhart-Martinelli e a incerteza expandida (U) associada ao valor de cada erro, para um nível de confiança de 95,45%. A Tab. 14 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 14 – Erros médios e incertezas associadas a cada valor de erro

Parâmetro de Lockhart-Martinelli (X)	Erro residual médio (E _{med}) (%)	Incerteza do erro = Desvio padrão (s) (%)	Graus de liberdade (n-1)	Fator de abrangência = t de student	Incerteza expandida (U=t.s) (%)
0,05	-0,26	0,92	21	2,13	± 1,95
0,10	-0,61	1,02	21	2,13	± 2,16
0,15	-0,81	0,89	25	2,11	± 1,88
0,20	-0,41	0,65	22	2,12	± 1,38
0,25	-0,15	1,29	19	2,14	± 2,76
0,30	0,13	1,89	16	2,17	± 4,11
0,35	1,84	3,10	18	2,15	± 6,66
0,40	4,01	4,00	21	2,13	± 8,52

Os valores de incerteza expandida são obtidos por meio do desvio padrão (s) dos erros em cada valor do parâmetro de Lockhart-Martinelli, multiplicado pelo fator de abrangência (t de student) correspondente, de acordo com o número de graus de liberdade. O número de graus de liberdade é determinado a partir do número de medições menos 1 (n-1). Deve-se ressaltar que, na Tab. 14, os valores de incerteza estão apresentados em valores percentuais absolutos.

Como exemplo, pode-se concluir que, para um valor de parâmetro de Lockhart-Martinelli igual a 0,40, o erro residual estará situado na seguinte faixa, considerando um nível de confiança de 95,45%:

$$(4,01 - 8,52\%) < \text{Erro}(\%) < (4,01 + 8,52\%) \quad (81)$$

Portanto, o erro residual percentual estará na seguinte faixa:

$$-4,51\% < \text{Erro}(\%) < 12,52\% \quad (82)$$

De forma a expressar a incerteza em termos da vazão corrigida do v-cone, temos que:

$$\text{Erro}(\%) = \left(\frac{Q_{cor}}{Q_{real}} - 1 \right) * 100 \quad (83)$$

Onde Q_{cor} representa a vazão de gás obtida com o v-cone e corrigida pela correlação, e Q_{real} representa a vazão de gás real (valor verdadeiro convencional).

Considerando o exemplo anterior, para a variação do erro entre -4,51% e 12,52%, e utilizando o limite inferior do erro, temos:

$$-4,51 = \left(\frac{Q_{cor}}{Q_{real}} - 1 \right) * 100 \quad (84)$$

Portanto:

$$Q_{real} = 1,0472 * Q_{cor} \quad (85)$$

Para o limite superior do erro, temos:

$$12,52 = \left(\frac{Q_{cor}}{Q_{real}} - 1 \right) * 100 \quad (86)$$

Portanto:

$$Q_{real} = 0,8887 * Q_{cor} \quad (87)$$

Interpretando os resultados, observa-se que, para o parâmetro de Lockhart-Martinelli com um valor de aproximadamente 0,40, a vazão verdadeira deve situar-se na faixa entre $0,8887 \times Q_{cor}$ e $1,0472 \times Q_{cor}$, para um nível de confiança de 95,45%, ou seja:

$$Q_{real} = Q_{cor} (+4,72\%; -11,13\%) \quad (88)$$

Verifica-se um valor de incerteza assimétrico, devido à existência de um erro sistemático que não é corrigido. Adotando uma avaliação conservadora, pode-se considerar a incerteza como $\pm 11,13\%$, para um nível de confiança de 95,45%.

Expandindo a mesma metodologia para os outros valores do parâmetro de Lockhart-Martinelli, podem-se obter as incertezas de medição da vazão de gás conforme a Tab. 15, para um nível de confiança de 95,45%:

Tabela 15 – Incerteza associada a cada valor do parâmetro de Lockhart-Martinelli

Parâmetro de Lockhart-Martinelli (X)	Limite superior Vazão de gás real (Q_{real})	Limite inferior Vazão de gás real (Q_{real})	Incerteza (%)	Incerteza (conservadora) (%)
0,05	$1,0226xQ_{cor}$	$0,9833xQ_{cor}$	+ 2,26% - 1,67%	$\pm 2,26$
0,10	$1,0286xQ_{cor}$	$0,9847xQ_{cor}$	+ 2,86% - 1,53%	$\pm 2,86$
0,15	$1,0276xQ_{cor}$	$0,9895xQ_{cor}$	+ 2,76% - 1,05%	$\pm 2,76$
0,20	$1,0182xQ_{cor}$	$0,9904xQ_{cor}$	+ 1,82% - 0,96%	$\pm 1,82$
0,25	$1,0300xQ_{cor}$	$0,9746xQ_{cor}$	+ 3,00% - 2,54%	$\pm 3,00$
0,30	$1,0414xQ_{cor}$	$0,9594xQ_{cor}$	+ 4,14% - 4,06%	$\pm 4,14$
0,35	$1,0506xQ_{cor}$	$0,9216xQ_{cor}$	+ 5,06% - 7,84%	$\pm 7,84$
0,40	$1,0472xQ_{cor}$	$0,8887xQ_{cor}$	+ 4,72% - 11,13%	$\pm 11,13$

Observa-se que os valores de incerteza de medição da vazão de gás aumentaram bastante para valores do parâmetro de Lockhart-Martinelli (X) superiores a 0,3, alcançando um valor maior que 11% para X igual a 0,4.

Verifica-se, portanto, que os valores encontrados de incerteza de medição de vazão, tanto na avaliação dos erros realizada em função da vazão de gás como na avaliação dos erros realizada em função do parâmetro de Lockhart-Martinelli (para X igual a 0,35 e 0,4), foram bastante elevados, bem superiores aos obtidos apenas para as condições de gás úmido. Portanto, no caso de escoamentos em que o parâmetro de Lockhart-Martinelli seja superior a 0,3, não é recomendável a utilização da correlação apresentada, pois os erros e incertezas associados tendem a aumentar à medida que o escoamento multifásico se afasta da condição de gás úmido. Neste caso, outros meios devem ser utilizados para uma determinação adequada da vazão de gás.

4.4.

Determinação da vazão de líquido em um escoamento de gás úmido

Conforme discutido no capítulo 3, a determinação da vazão volumétrica de gás em um escoamento de gás úmido, a partir de correlações aplicadas a medidores de pressão diferencial, exige o conhecimento prévio da fração ou da vazão volumétrica de líquido. Essa informação geralmente pode ser obtida em

campo a partir de métodos que utilizam análise do fluido em laboratório, leitura de histórico em separadores ou injeção de traçadores (químicos ou radioativos). A exatidão do cálculo das vazões de gás dependerá das incertezas envolvidas nos dados de entrada referentes às frações ou vazões de líquido.

De forma a minimizar as incertezas de medição, é importante avaliar novas metodologias que possam ser utilizadas na determinação das vazões de gás e líquido em um escoamento de gás úmido, sem a necessidade de uma fonte independente para a determinação das frações ou vazões de líquido. Uma proposta de estudo resumida será feita a seguir.

4.4.1.

Vazões de gás e líquido em um medidor v-cone

É conhecido que a seção de expansão a jusante de um medidor de princípio de pressão diferencial também pode fornecer uma medição de vazão, bastando estar disponível uma tomada de pressão a jusante do medidor para obtenção da perda de pressão permanente. Em outras palavras, uma estimativa da vazão no v-cone pode ser obtida pelo diferencial de pressão clássico entre a seção a montante do medidor e o ponto imediatamente a jusante (ΔP_o), ou pelo diferencial de pressão entre o ponto imediatamente a jusante do medidor e uma seção após a recuperação de pressão (ΔP_j). Há ainda a possibilidade de medição de vazão utilizando a perda de pressão permanente entre as seções de montante e de jusante do medidor (ΔP_p). Portanto, em um único medidor v-cone, pode haver até três oportunidades de medição de vazão a partir de três diferenciais de pressão gerados. Observa-se que:

$$\Delta P_C = \Delta P_J + \Delta P_P \quad (89)$$

Portanto, um medidor v-cone pode ser utilizado para efetuar ao menos duas estimativas da vazão, desde que haja disponível dois medidores de pressão diferencial. A Fig. 40 ilustra a flutuação de pressão típica em medidores de pressão diferencial, como o v-cone.

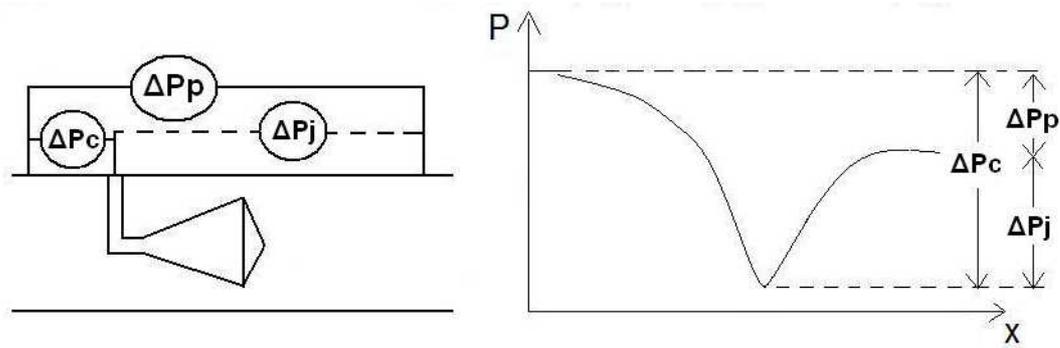


Figura 40 – Flutuação de pressão no v-cone

Para os medidores de pressão diferencial, também há uma sobrestimação do diferencial de pressão na seção de expansão, ou seja, entre o ponto imediatamente a jusante do medidor e o ponto após a recuperação de pressão (ΔP_j), quando ocorre escoamento de gás úmido. No entanto, foi observado, em medidores do tipo venturi, que o comportamento dessa sobrestimação é diferente se comparada ao erro gerado no diferencial de pressão clássico do medidor (ΔP_c) [46]. Para os medidores do tipo v-cone, o comportamento esperado é o mesmo. Dessa forma, pode-se deduzir o parâmetro de Lockhart-Martinelli, a vazão de gás e a vazão de líquido a partir, por exemplo, da relação entre as duas sobrestimações ou a partir de duas correlações de correção de vazão, uma para o medidor tradicional (que utiliza ΔP_c) e outra para o medidor que considera a seção de expansão (que utiliza ΔP_j). Neste caso, existem, então, duas equações envolvendo as duas vazões de gás úmido ou vazões de gás “aparentes”, que são obtidas a partir de ΔP_c e ΔP_j , e duas incógnitas (vazão de líquido e vazão de gás):

$$Q_g = \frac{Q_{gu1}}{FC1}, Q_g = \frac{Q_{gu2}}{FC2} \quad (90)$$

Onde Q_{gu} representa a vazão de gás em escoamento de gás úmido obtida pelo medidor de pressão diferencial, Q_g representa a vazão real de gás corrigida e FC representa o fator de correção, que é função da vazão real de gás (Q_g) e da vazão de líquido (Q_l). Os índices 1 e 2 representam os métodos de determinação das vazões utilizando ΔP_c e ΔP_j , respectivamente.

Portanto, como a resposta ao escoamento de gás úmido é diferente para os dois métodos de medição, uma técnica baseada na diferença dessas respostas pode ser utilizada para estimar as vazões de líquido e gás, ou ao

menos para indicar uma variação na fração de líquido existente no escoamento. É importante observar que a incerteza do método de medição de vazão não convencional, ou seja, a incerteza do método que utiliza ΔP_j , necessita ser avaliada para uso prático em aplicações reais. Essa alternativa para obtenção das vazões de gás e líquido, sem a necessidade de uma fonte independente para a determinação da vazão de líquido, deve ser mais bem estudada e avaliada em campo, não sendo objeto deste estudo.