

## 5 Conclusões e Recomendações

### 5.1. Conclusões

O objetivo geral desta dissertação é avaliar o desempenho e determinar o potencial de aplicação do medidor tipo v-cone para medição de vazão de gás, em escoamento de gás úmido, no segmento de Exploração e Produção (E&P). O desafio principal está relacionado à presença de líquido (água ou condensado) na corrente de gás, já que, em muitos casos, não ocorre a especificação total do gás natural na fase de produção, sendo necessária a medição de sua vazão em condições operacionais adversas. Diante da proposta e dentro do contexto organizacional da Petrobras, foi efetuado um estudo aprofundado da tecnologia de medição de vazão por v-cone, complementado com uma avaliação de laboratório em condições similares às encontradas no campo.

Apesar da disseminação dos medidores do tipo placa de orifício para medição de vazão de gás natural, verifica-se que o medidor v-cone pode ser mais adequado em determinadas aplicações. Os estudos realizados demonstram que o medidor apresenta vantagens evidentes, permitindo redução dos trechos retos de tubulação, maior faixa de medição de vazão, menor queda permanente de pressão, além de se adaptar melhor à presença de líquidos ou mesmo sólidos no escoamento.

Por ser uma tecnologia relativamente recente, normas ainda estão sendo elaboradas de forma a padronizar a construção, operação e a verificação metrológica periódica do medidor. Porém, a tecnologia já vem ganhando aceitação dos órgãos reguladores (ANP e INMETRO), tendo inclusive um modelo já aprovado pelo INMETRO.

O presente trabalho, por meio de uma pesquisa bibliográfica e documental, retrata, portanto, o estágio atual de desenvolvimento da tecnologia de medição de vazão do tipo v-cone e detalha as características dos sistemas de medição de vazão de gás natural, além de abordar os requisitos de normas e regulamentos relacionados ao tema em questão. A fase experimental permite a avaliação do desempenho do medidor por meio de uma investigação empírica

realizada em um circuito de testes, envolvendo ainda a determinação de erros e incertezas de medição.

A metodologia experimental empregada consiste em uma avaliação dos valores de vazão de gás obtidos por meio do medidor v-cone, em condições de gás úmido, comparados aos valores obtidos pelo sistema padrão de referência. As condições operacionais empregadas se aproximam de condições reais de campo. Após essa avaliação, é realizada uma análise de diversos modelos de correlações para correção da medição de vazão fornecida pelo v-cone. Por meio dos testes realizados, comprova-se a tendência do medidor v-cone em sobrestimar a pressão diferencial e, por conseqüência, sobrestimar a vazão de gás quando em escoamento de gás úmido. Os resultados demonstram que esses erros dependem, essencialmente, do parâmetro de Lockhart-Martinelli ou percentual de líquido na corrente de gás, do número de Froude ou da velocidade superficial de gás, e da pressão de operação.

Dentre os modelos avaliados, as correlações desenvolvidas por Steven apresentaram o desempenho mais adequado, nas diversas condições operacionais e padrões de escoamento obtidos. No entanto, dadas as características do v-cone em teste, foi proposta uma nova correlação baseada em ajustes no modelo de Steven. Os resultados obtidos pela aplicação desta correlação foram ainda mais interessantes, permitindo a obtenção de valores de vazão bem próximos aos valores reais de vazão de gás. Portanto, de acordo com as características do medidor a ser utilizado, ajustes nos modelos devem ser realizados para garantir uma maior qualidade de medição. Ressalta-se que, para a aplicação da correlação de correção, a determinação da fração volumétrica ou da vazão volumétrica de líquido deve ser realizada a partir de métodos independentes, que envolvem, por exemplo, a análise do fluido em laboratório, a injeção de traçadores, ou a leitura de histórico em separadores de produção ou de teste.

De acordo com a análise dos resultados encontrados pela aplicação da nova correlação ajustada, nos testes de gás úmido, os erros encontrados das vazões de gás corrigidas, com relação às vazões de referência, foram iguais ou inferiores a 3%. A maior parte dos pontos, ou 90% dos pontos testados, apresentou erros dentro da banda de erro de  $\pm 2\%$ . As incertezas de medição, conforme as duas metodologias propostas, apresentaram resultados satisfatórios, com valores inferiores a 4%, excetuando a incerteza obtida a partir da metodologia 1 para o valor do parâmetro de Lockhart-Martinelli igual a 0,3

(incerteza igual a  $\pm 4,14\%$ ). Além disso, as duas metodologias apresentaram resultados de incerteza próximos.

Vale ressaltar que o modelo de correlação se mostrou aplicável para valores do parâmetro de Lockhart-Martinelli ( $X$ ) iguais ou inferiores a 0,3, já que, incluindo os resultados em teores mais elevados de líquido ( $X$  igual a 0,35 e 0,4), os erros e incertezas de medição encontrados foram bastante elevados. Foi verificado um erro máximo próximo a 10% e incertezas de medição superiores a 11%, no caso do parâmetro de Lockhart-Martinelli igual a 0,4. Logo, 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 fluxo multifásico se afasta da condição de gás úmido. Neste caso, outros meios devem ser utilizados para uma determinação adequada da vazão de gás.

Dadas as dificuldades discutidas de medição de vazão de gás em escoamento de gás úmido, os resultados obtidos do modelo proposto foram bastante satisfatórios, credenciando o medidor para a obtenção de vazão de gás com presença de líquido associado, desde que as condições operacionais encontradas em campo se aproximem das condições avaliadas nos testes realizados. Ressalta-se que a extrapolação do modelo para outras circunstâncias (pressões mais elevadas, por exemplo) pode não ser aplicável; portanto, essa extrapolação não é recomendada.

Em aplicações que envolvam medição fiscal ou de apropriação, a utilização da metodologia de correção deve ser precedida de aprovação da ANP. Apesar de não serem alcançados níveis de incerteza exigidos pelo Regulamento Técnico de Medição para a medição fiscal e de apropriação, é importante levar em consideração as condições críticas às quais o equipamento está submetido, dificultando a obtenção de valores de incerteza inferiores.

Portanto, pode-se concluir que, considerando a complexidade envolvida na medição de vazão de gás com contaminação de líquido, a solução avaliada na pesquisa realizada e nos testes de laboratório demonstrou confiabilidade, garantindo resultados repetitivos e com boa exatidão. Além disso, o custo relativamente baixo dos sistemas de medição de vazão com medidor primário do tipo v-cone tende a facilitar a disseminação da tecnologia no segmento de Exploração e Produção.

Finalmente, recomenda-se a aplicação do medidor no segmento de Exploração e Produção, especialmente nas situações em que há dificuldade ou mesmo inviabilidade de especificar o gás natural com relação ao líquido presente

no escoamento. Isso se justifica pelos estudos efetuados e pelo bom desempenho apresentado pelo medidor nos testes realizados. A obtenção de resultados adequados em campo, com níveis de incerteza reduzidos, pode ser garantida caso alguns cuidados sejam tomados, 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 ou vazões 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.

## **5.2. Recomendações**

A correlação proposta de correção da vazão de gás pelo v-cone, baseada em ajustes nos modelos de Steven, se mostrou adequada para o medidor com valor de beta igual a 0,6. Sugere-se que novos testes sejam realizados, com medidores de variados diâmetros e valores de beta, de forma a validar a aplicabilidade do ajuste da correlação para todos os tipos de medidores.

Apesar de os fluidos utilizados nos testes apresentarem características semelhantes aos fluidos encontrados em campo, recomenda-se realizar testes com gás natural, água e condensado. Diferentes viscosidades e tensões superficiais do líquido podem, por exemplo, levar a pequenas variações na distribuição dos fluidos e nos padrões de escoamento formados pela combinação entre o gás e o líquido, causando comportamentos distintos a depender do líquido utilizado. Portanto, pode haver uma leve variação no comportamento do medidor e no desempenho da correlação quando forem utilizados fluidos reais de campo. Há uma grande carência de laboratórios no

mundo para testes de medidores de vazão em escoamento de gás úmido com gás natural, condensado e água, em condições operacionais próximas às encontradas em campo; no entanto, o Núcleo de Testes Experimental Engenheiro Baruzzi (NUEX), localizado em Aracaju e pertencente à Petrobras, está sendo adaptado para realização de testes nessas condições.

Considerando a inexistência de normas que definam o coeficiente de descarga ( $C_d$ ) dos medidores v-cone, é importante que estes coeficientes sejam determinados por meio de calibração com vazão, na faixa de número de Reynolds em que os medidores irão efetivamente operar em campo. É importante, ainda, definir um procedimento de verificação dimensional periódica ou realizar calibrações periódicas (em base anual, por exemplo), de forma a promover o adequado desempenho metrológico do medidor durante toda a vida útil em campo.

Recomenda-se, também, estudar novos métodos para estimativa das vazões de líquido e gás em um escoamento de gás úmido, sem a necessidade de uma fonte independente para a determinação da vazão de líquido. Neste trabalho, foi proposto o estudo de um método que utiliza, além do transmissor de pressão diferencial convencional, outro transmissor de  $\Delta p$  com uma das tomadas de pressão localizada a jusante do medidor v-cone, após a recuperação de pressão. Dessa forma, obtém-se uma segunda leitura de pressão diferencial, podendo, a partir de duas correlações de vazão, obter a vazão de gás, a vazão de líquido e o parâmetro de Lockhart-Martinelli. Estudos e avaliações em campo são necessários para desenvolver melhor o método e comprovar a sua eficácia. Outra forma de determinação das vazões de gás e líquido seria a partir da utilização de dois medidores monofásicos de vazão em série, com respostas distintas ao escoamento de gás úmido, gerando duas equações que possam permitir a obtenção das duas incógnitas (vazão de gás e vazão de líquido). Há ainda a possibilidade de utilização de um mecanismo de medição das frações das fases (sistemas baseados em microondas, sistemas óticos, gama-densitômetros, etc). No entanto, é importante aprofundar as pesquisas para obtenção de soluções que apresentem baixo custo e permitam uma redução das incertezas de medição.