



**Copyright 2005, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP**

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação no **Congresso Rio Automação 2005**, realizado nos dias 4 e 5 de maio de 2005, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Organizador do Evento, seguindo as informações contidas na sinopse e no texto final submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho Técnico, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais do **Congresso Rio Automação 2005**.

---

## **Resumo**

A medição de gás úmido é um assunto que vem tomando uma importância maior para a indústria nos últimos anos. Este trabalho apresenta a tecnologia do elemento deprimogênio Vcone para este tipo de aplicação através de testes realizados em laboratórios de renome. Os testes demonstram a performance superior do Vcone quando comparado a outros elementos de mesma tecnologia.

## **Abstract**

Wet gas metering is a topic that has become more important to industry in recent years. The Vcone technology for this application and tests results from recognized laboratories are described herein.

## **1. Introdução**

A medição de gás úmido é um assunto que vem tomando uma importância maior para a indústria nos últimos anos. Como exemplo podemos citar o desenvolvimento de campos marginais de óleo e gás que são economicamente viáveis com a medição direta do gás úmido, no gerenciamento de poços, provendo em tempo real informações sobre vazão de produção ou em testes de poços. Este trabalho apresenta a tecnologia do elemento deprimogênio Vcone para este tipo de aplicação, testes realizados em laboratórios de renome como SWRI, CEESI e NEL e aplicações práticas demonstram a boa performance desta tecnologia.

Desenvolvido no começo dos anos 80 pela McCrometer, empresa com mais de 40 anos no mercado de vazão, o Vcone é resultado de um esforço de pesquisa e desenvolvimento que resultou em um medidor preciso, inovador e confiável, já consolidado com mais de 55000 unidades em operação no Brasil e no mundo, nas mais diversas aplicações.

No caso da medição de gás úmido, os testes demonstram a performance superior do Vcone quando comparado a outros elementos de mesma tecnologia deprimogênia. Da mesma maneira como acontece com os outros medidores com princípio diferencial de pressão em medição de gás úmido, o líquido na corrente gasosa induz um erro positivo geralmente chamado de "over-reading" do medidor, porém no Vcone estes valores possuem alta repetitividade, sendo possível estimar este percentual de erro positivo e corrigi-lo.

## **2. O Vcone**

O Vcone é um medidor de vazão do tipo pressão diferencial. Ele opera com o mesmo princípio físico dos medidores deprimogênicos (ex. placa de orifício, venturi, etc) com vantagens, usando o teorema da conservação de energia de um fluido em movimento através de uma tubulação. Um cone, posicionado no centro do tubo de medição, interage com o fluido em escoamento, modificando o perfil de velocidade e criando uma região de baixa pressão imediatamente à jusante do cone. O diferencial de pressão ( $D_p$ ) entre a pressão estática da linha à montante e a região de baixa pressão criada após o cone, pode ser medido através de um transmissor de pressão diferencial conectado nas tomadas do Vcone. O  $D_p$  pode então ser incorporado na equação de Bernoulli para a determinação da vazão do fluido. Este medidor é um inovador dispositivo de  $D_p$  que mede vazão com precisão, cobrindo um grande range de Número de Reynolds para uma variedade de fluidos líquidos e gasosos sem necessidade de trecho reto à montante ou à jusante. O Vcone pode ser construído dos mais diversos materiais para atender as áreas industrial e de petróleo. Devido à sua

---

<sup>1</sup> Engenheiro Mecânico, Hirsá Sistemas de Automação

geometria (poderíamos chamar de venturi invertido) possui baixa perda de carga permanente se comparado a outros elementos deprimogênicos.

## 2.1. Princípio de Operação

O Vcone é um elemento deprimogênio, como tal, sua teoria de medição da vazão se fundamenta em leis físicas conhecidas, ou seja, considera a equação da continuidade e a equação de Bernoulli da conservação de energia em um tubo fechado que demonstra que a uma vazão constante, a pressão é inversamente proporcional ao quadrado da velocidade do fluido dentro do tubo[2]. Em resumo a pressão diminui à medida em que aumenta a velocidade. Observe a figura 1, quando o fluido se aproxima do cone sua pressão é P1, ao passar pela região anular entre o cone e o tubo esta restrição gera um aumento de velocidade e, conseqüentemente, a diminuição da pressão à jusante do cone P2. As pressões P1 e P2 são medidas através de transdutor de pressão diferencial (o centro do cone possui um furo interno ligado a P2). O diferencial de pressão ( $\Delta P$ ) criado pelo Vcone, aumenta e diminui exponencialmente com a velocidade do fluxo, ou seja, com a vazão (equação 1). Quanto maior for o estreitamento da seção transversal, maior será o diferencial de pressão criado para uma mesma vazão, temos aí a razão beta que é um importante conceito que relaciona a área de passagem com a área total do tubo. Veja a figura 2 para a relação beta no Vcone comparado com a relação beta na placa de orifício. Podemos também observar na equação 1, a inclusão de um coeficiente de correção C, que transforma adequadamente a equação teórica para o uso prático, levando em consideração todos os elementos de escoamento real. Este coeficiente é chamado de Coeficiente de descarga  $C_d$  e é definido como:  $C_d = \text{vazão real} / \text{vazão teórica}$ . A McCrometer chama este coeficiente de  $C_f$  – Coeficiente de fluxo, e não usa valores históricos de C ditados por norma como a placa e sim valores levantados em laboratório para cada Vcone fabricado, informado em certificado próprio.

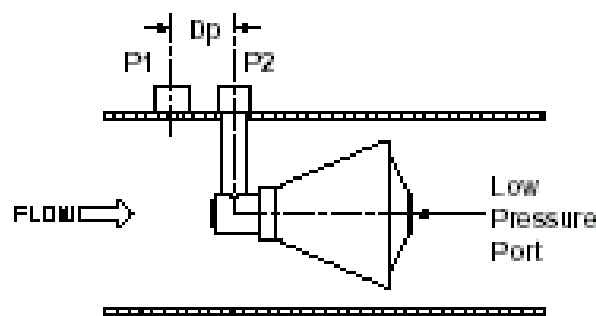


Figura 1. Tomadas de Alta e Baixa.

$$Q = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{2g_c}{\rho}} \frac{D^2 \beta^2}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{\Delta P C_f}$$

where

$D = \text{pipe\_diameter.}$

$\beta = \text{beta\_ratio}$

$g_c = \text{conversion}$

$\Delta P = \text{differential\_pressure}$

$\rho = \text{density}$

$C_f = \text{flow\_coefficient}$

Equação 1. Equação da vazão para fluidos incompressíveis.

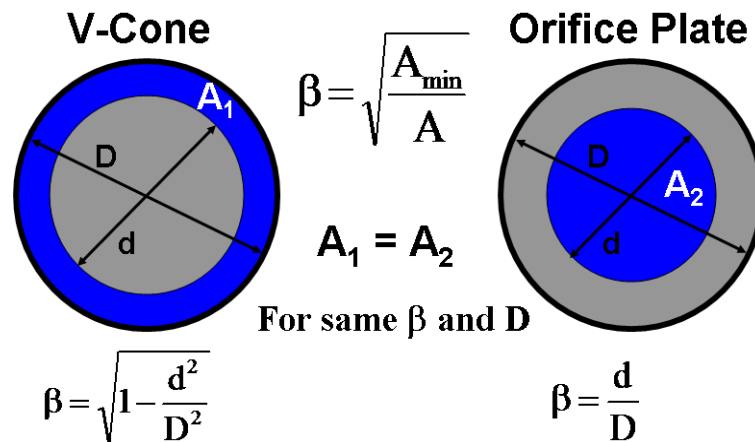


Figura 2. Comparação entre a Relação Beta no Vcone e placa.

Para fluidos compressíveis temos a inclusão do fator de expansão  $Y$  na fórmula da vazão (equação 2) para compensar o fato da mudança na massa específica do gás devido à queda de pressão ao passar pelo cone. Inicialmente era utilizada a fórmula para cálculo de  $Y$  dada pela ISO 5167, contudo a McCrometer solicitou ao National Engineering Laboratory (NEL) da Escócia, um dos mais conceituados laboratórios de vazão no mundo, um rigoroso estudo para a determinação do fator de expansão para o Vcone. A nova equação então foi desenvolvida e apresentada em agosto de 2001 na Conferência Internacional de Medição de Vazão que aconteceu na Escócia (equação 3).

$$Q = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{2g}{\rho}} \frac{D^2 \beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4}} C_f \sqrt{\Delta P} \times Y$$

Equação 2. Equação da vazão para fluido compressível.

$$\text{gas expansion factor} \left. \begin{array}{l} \text{rev. Aug. 2001} \\ Y = 1 - (0.649 + 0.696 \beta^4) \frac{\Delta P}{k \cdot P} \end{array} \right| k \text{ Isentropic Exponent}$$

Equação 3. Equação do Fator de Expansão (NEL).

## 2.2. Modificação do perfil de velocidade.

O cone centrado no tubo obriga que o fluido que se move pelo centro da tubulação flua ao redor do cone. Esta geometria apresenta muitas vantagens comparada aos tradicionais medidores concêntricos de  $D_p$ . A forma do cone foi analisada e testada por mais de dez anos para se obter a melhor performance em diferentes circunstâncias.

É necessário entender o conceito de perfil de fluxo desenvolvido dentro de um tubo para compreender o desempenho do Vcone. Se o fluxo em uma tubulação longa não está sujeito a obstruções ou perturbações, se considera um perfil bem desenvolvido (figura 3). Se traçarmos uma linha perpendicular a este fluxo, a velocidade em cada ponto desta linha será diferente. A velocidade será zero na parede do tubo, máxima no centro e novamente zero na parede oposta. Isto é devido a fricção que se cria com a passagem do fluido. Como o cone está colocado no centro do tubo, este interage diretamente com o “núcleo de alta velocidade” do fluxo. O cone força o núcleo de alta velocidade a misturar-se com fluxo de menor velocidade que passa mais perto da parede. Outros medidores de  $D_p$  possuem aberturas

centrais e não interagem com este núcleo de alta velocidade. Esta é uma importante vantagem do Vcone em baixas vazões, pois continua interagindo com o núcleo de maior velocidade, produzindo  $D_p$  em vazões em que outros medidores já não produzem. Outro ponto importante desta interação é que o perfil de velocidade vai se tornando “flat”, ou seja, as velocidades tendem a se tornarem constantes ao se aproximarem do cone ( figura 4 ), dispensando portanto, trechos retos ou retificadores de fluxo.

Para medição de vazão de gás seco a performance do Vcone é bem documentada, seja por uma variedade de testes realizados, inclusive teste no SWRI de acordo com o API-MPMS 5.7 [5], pela infinidade de aplicações existentes ou pela Aprovação de Modelo para Transferência de Custódia já obtida em vários países.

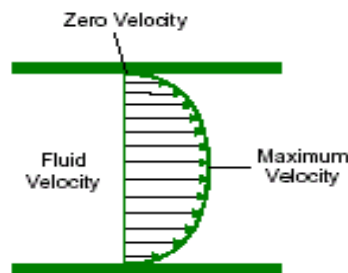


Figura 3. Perfil de velocidade desenvolvido.

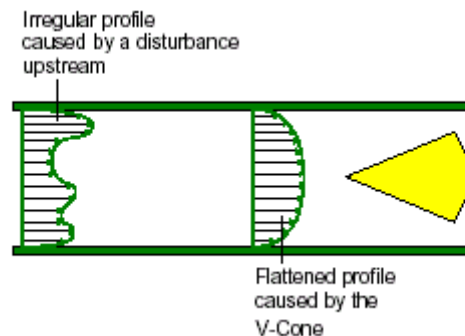


Figura 4. O Vcone dispensa trechos retos ou retificadores de fluxo.

### 3. Escoamento Multifásico/Gás úmido

No escoamento Multifásico os problemas são complexos porque as propriedades de dois ou mais fluidos devem ser consideradas e porque a diferença dos padrões de escoamento dependem das condições de operação e arranjo da tubulação (tubo na horizontal, vertical, etc). Sabemos que o escoamento multifásico não está ligado somente ao estado da matéria (líquido/gasosa), podemos ter um escoamento multifásico líquido-líquido, contudo aqui estamos verificando um escoamento líquido-gás ou seja, com uma interface.

As características acima mencionadas provocam o aparecimento de perfis de escoamento denominado de padrões de escoamento multifásico. As denominações destes padrões variam um pouco dependendo do autor ou organização, porém os perfis indicados na figura 5 são os mais usuais para escoamento em tubulação horizontal, a saber: Padrão tipo Bolha, Estratificado, Ondulado, Tampão, Semi-golfada, Golfada e Anular.

O padrão de escoamento Anular é o que se verifica no escoamento de gás úmido, ou seja, o gás viajando em alta velocidade ao centro e o líquido escoando pela parede interna do tubo. Observando o tubo transversalmente temos um anel de líquido, que devido à gravidade, tem espessura maior na base. Observam-se bolhas dispersas no líquido e líquido atomizado na corrente gasosa. Com o aumento da vazão o filme líquido tende a diminuir de espessura e o gás carrear mais gotículas, estamos entrando em um outro padrão de escoamento chamado Névoa ( Mist ou Spray ). Nesta

condição todo líquido se encontra atomizado viajando à mesma velocidade do gás. Este perfil é também muito encontrado na indústria em escoamento de gás úmido.

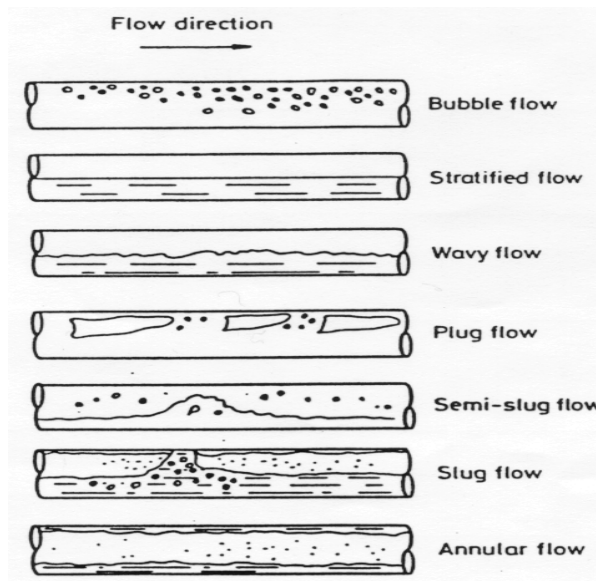


Figura 5. Tipos de perfis de escoamento.

Uma pergunta que se impõe seria em que ponto termina um escoamento multifásico propriamente dito e começa um escoamento de gás úmido. Alguns autores consideram “wet gas” um escoamento multifásico com uma fração de líquido de até 5% em volume, outros chegam até 10% (GVF=90%). Atualmente, uma tendência é usar como referência o chamado “Lockhart-Martinelli parameter” que será discutido mais à frente, estabelecendo-se um limite de 0,35 para este parâmetro o que corresponde a um volume líquido de 7% e 12% para pressões de cerca de 4 Bar e 100 Bar, respectivamente. O API “Multi-phase report no. 2566” já define desta maneira, a ASME conforme o “Wet gas technical report” na última edição, tende a concordar com o API e a ISO tem idéia de adotá-lo.

#### 4. O Vcone no gás úmido.

A McCrometer tem feito substanciais pesquisas do efeito que o gás úmido exerce na medição com o Vcone desde meados da década passada, inicialmente no Southwest Research Institute ( SWRI )-Texas e recentemente com mais profundidade, no dois maiores centros de pesquisa neste assunto que são o Colorado Engineering Experiment Station ( CEESI ) e o National Engineering Laboratory ( NEL ) na Escócia. Todos os resultados obtidos tiveram a mesma orientação no sentido de demonstrar a aplicabilidade do medidor para esta condição.

Tradicionalmente as placas de orifício têm sido utilizadas para medição de gases úmidos, contudo ultimamente esta aplicação com placas tem sido virtualmente abandonada nos estados Unidos em função do conhecimento adquirido em pesquisas que mostram que o acúmulo de líquido na placa resulta em escoamento não estável. O líquido tende a atravessar o orifício em “ slugs ”.O resultado final destas golfadas é uma leitura instável de delta P. Isto pode ser observado na figura 6, fotografia tirada no SWRI em teste de placa de orifício submetida à vazão de gás úmido realizado em 1997. Em contra ponto, a figura 7 mostra um Vcone submetido às mesmas condições de teste, onde a geometria do mesmo possibilita a passagem do líquido sem acúmulo, não interferindo na leitura do diferencial de pressão. Observe que o padrão de escoamento é Anular.

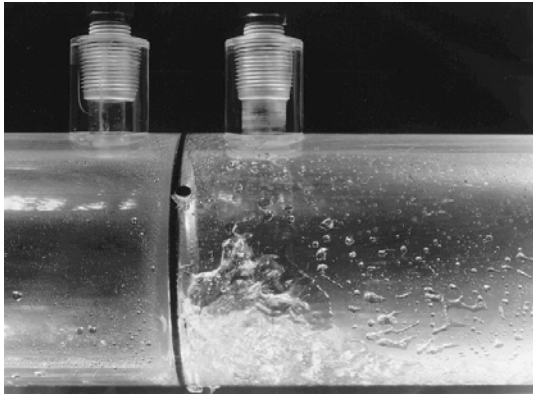


Figura 6. Teste no SWRI com placa de orifício

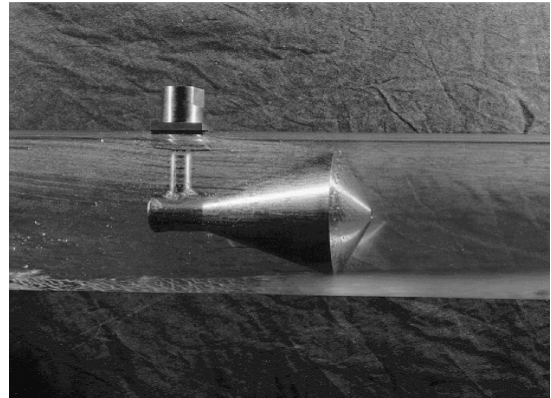


Figura 7. Teste no SWRI com o cone.

Esta mesma geometria inovadora possibilita uma outra característica que vale a pena ser registrada que é a capacidade “auto limpante” do Vcone quando aplicado a gases úmidos e sujos. Observe na figura 8, resultado de teste realizado na Marathon Oil Gas Metering Station, o acúmulo de partículas na placa de orifício após 3 meses de operação com gás natural úmido ( H<sub>2</sub>S + parafina ). Este acúmulo se verificou nas faces a montante e a jusante comprometendo o dimensional da placa além do entupimento das tomadas de pressão. A figura 9 seguinte mostra um Vcone wafer (outra construção do Vcone) que foi montada na mesma linha da placa. Após 9 meses de operação foi observado além da limpeza do mesmo, a estabilidade dimensional da borda do cone, o que em última análise se traduz em exatidão e prolongamento do período entre inspeções. É obvio que nem o cliente nem o BLM, órgão Americano responsável pelo recolhimento de “ Royalty” ficaram satisfeitos com os resultados dos testes das placas e todas foram substituídas por Vcones.[1]

Outros usuários do Vcone na aplicação de gás úmido, por exemplo, na saída de separadores que poderíamos citar são: Halliburton Reservoir Services, Oseberg-A, Brown&Root, ABB/Statoil, Norsk Hydro, Troll, Saga, Chevron, Shell, etc.



Figura 8. Placa após 3 meses de teste



Figura 9. Vcone após 9 meses de teste

Da mesma maneira como acontece com os outros medidores por diferencial de pressão em medição de gás úmido, o líquido na corrente gasosa induz um erro positivo geralmente chamado de “over-reading” do medidor, porém no Vcone estes valores possuem alta repetitividade. Uma vez informada a vazão de líquido, a vazão de gás e suas massas específicas, é possível estimar o percentual deste erro positivo no Vcone.

Os testes demonstraram que o “ over-reading ” é função do chamado Lockhart-Martinelli Parameter, denotado por X, na verdade temos também uma pequena influência da velocidade do gás (Numero de Froud) e da pressão, contudo, X é o fator mandatório. Este número adimensional é na verdade a relação entre a inércia superficial do líquido e a inércia superficial do gás e é calculado pela equação 4 abaixo:

$$X = \frac{m_l}{m_g} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}}$$

Onde : X = Lockhart-Martinelli Parameter

$m_g$  = Vazão mássica do gás ( oper. )

$m_l$  = Vazão mássica do líquido ( oper. )

$\rho_g$  = massa específica do gás

$\rho_l$  = massa específica do líquido

Equação 4 – Lockhart-Martinelli Parameter

O gráfico (figura 10) abaixo mostra claramente a tendência linear desta relação. Todos os testes realizados no NEL e no CEESI demonstram esta tendência, portanto, a McCrometer pode oferecer fatores de correção para o uso industrial na medição da vazão de gases úmidos.

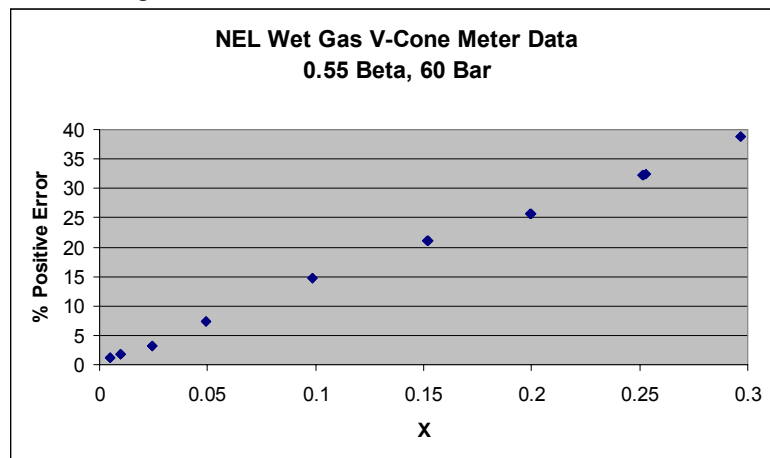


Figura 10. % de erro positivo em função de X.

No caso do Vcone, foi desenvolvido o chamado “Steve correlation”. O Dr. Richard Steven, pesquisador da McCrometer apresentou em 2002 um trabalho [3] de testes realizados no NEL onde foram desenvolvidas correlações, dentre elas a correlação abaixo (equação 5), neste caso para uma relação beta de 0.5 em um Vcone de 6”. Na equação,  $m_g$  é a vazão mássica do gás corrigida,  $m_g(tp)$  é a vazão aparente no medidor e o termo do denominador é o fator de correção. Esta correção traz a medição para uma exatidão de +/- 2%.

Equação 5 – Steven Correlation

$$m_g = \frac{m_{g(tp)}}{\left( \frac{1 + AX + BFr_g}{1 + CX + BFr_g} \right)}$$

$$A = 1.224 + \frac{0.141}{\left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)}$$

$$B = -0.0334 - \frac{0.00139}{\left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)}$$

$$C = \sqrt{0.0805 + \frac{0.0109}{\left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^2}}$$



Devemos observar que os erros são acumulativos. Uma vez que temos uma exatidão de +/- 0.5% em gás seco para o Vcone, e utilizando a regra da raiz quadrada da soma dos quadrados, teremos uma exatidão final de aproximadamente 2,1%, ou seja,  $\{[(0.02)^2]+[(0.005)^2]\}^{0.5}=0.0206$ .

Os gráficos (figuras 11 e 12) dos testes realizados no NEL demonstram claramente isto. No primeiro verificamos a tendência linear de crescimento do over-reading contra X, e os resultados após a correção. ( 6", beta de 0.55 a 3 pressões ), no segundo gráfico temos os resultados corrigidos em escala ampliada onde, fora alguns pontos espúrios, constatamos a exatidão de +/- 2,1%.

No sistema de medição de vazão, o chamado elemento terciário, ou computador de vazão, já possui incorporado o algoritmo de cálculo do Vcone em se tratando de gás seco. Para gás úmido já existe fabricante com algoritmo desenvolvido para esta aplicação, baseado nas correlações acima discutidas.

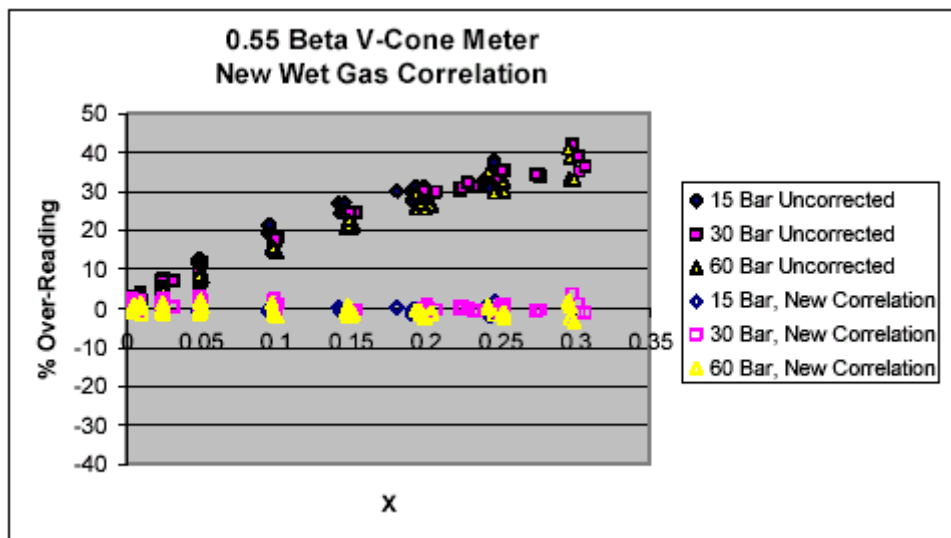


Figura 11. Resultados antes e após o uso do fator de correção.

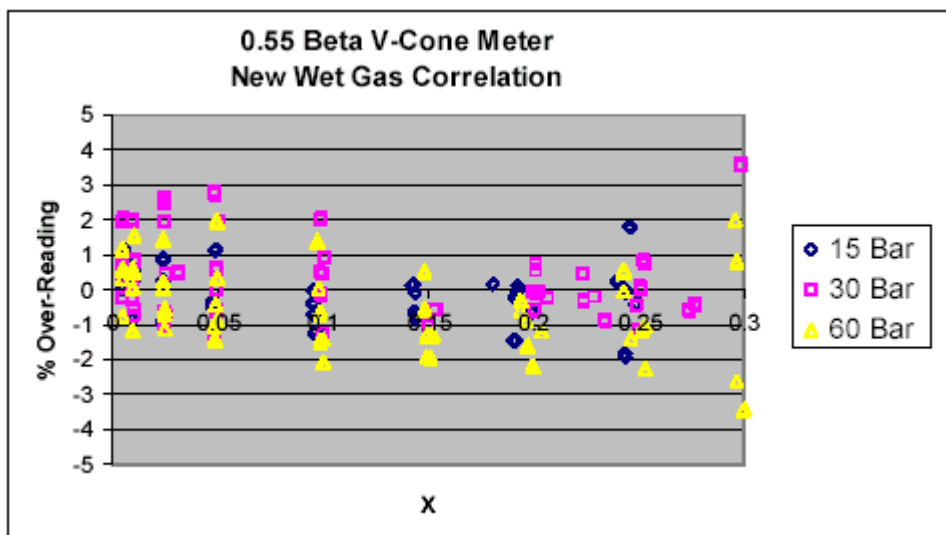


Figura 12. Percentual de erro após correção.



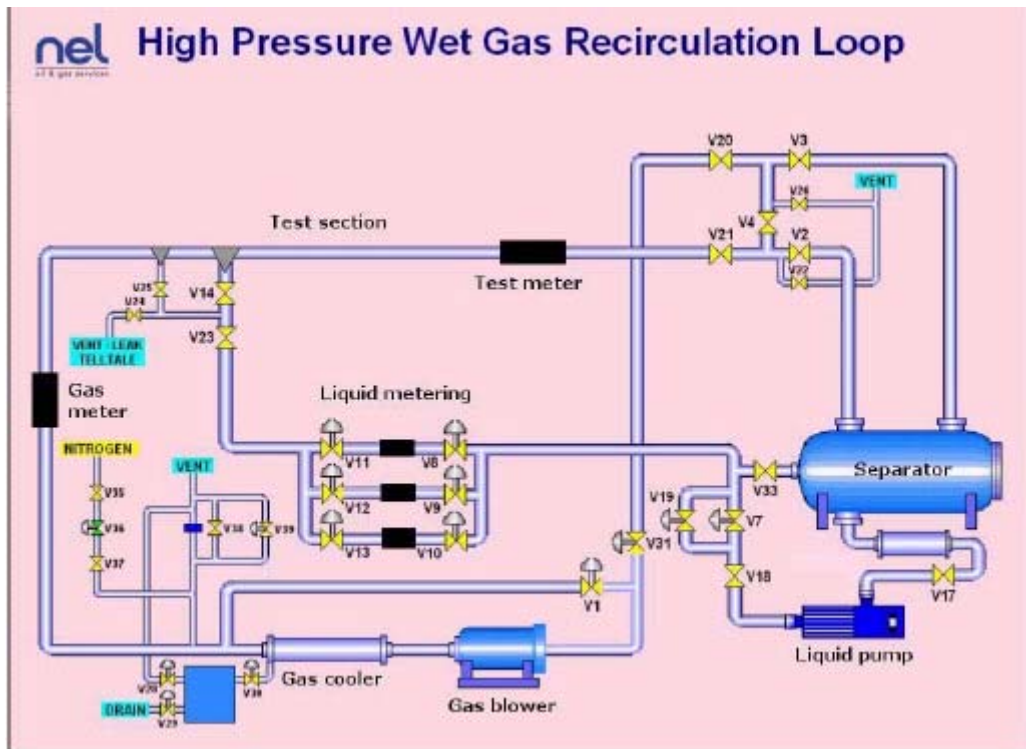


Figura 13. Loop de teste do NEL.

## 5. Conclusão

Embora os “loops” de teste do NEL e do CEESI utilizados nos testes do Vcone tenham significativas diferenças, os resultados encontrados no CEESI foram bem similares aos mostrados aqui do NEL. Os testes foram realizados para diâmetros e betas específicos.

Tradicionais recomendações para medidores deprimogênicos como ISO 5167, AGA3, etc, oferecem detalhada especificação, requisitos de instalação e cálculo, contudo, se aplicam a escoamentos estáveis, homogêneos e monofásicos.[6] Continuadas pesquisas são necessárias para o completo entendimento do efeito do gás úmido em medidores deprimogênicos, porém já temos condição de avaliar muitas instalações com o intuito de minimizar erros onde medições de gás úmido são consideradas como de gás seco. Não precisamos ressaltar a importância deste assunto, pois todos sabemos dos valores monetários envolvidos nas transferências de grandes volumes de gás que acontecem todos os dias.

## 6. Agradecimento

Agradeço ao Dr. Richard Steven e ao Dr. Robert Peters, ambos da McCrometer–EUA e ao Mr Roy Williams da Nufflo-Barton do Canadá pelo envio de notas técnicas.

## 7. Referências

- [1] LAWRENCE P.A., “ Wellhead Metering Using Vcone Technology ” p. 8-10, McCrometer 2000
- [2] MCCROMETER, “Vcone technical brief” p. 1-2, 2M/3-00/k24517-16 rev. 2.6, 2002
- [3] STEWART. D and STEVEN. R at al., “Wet Gas Metering with V-Cone Meters”, North Sea Flow Measurement Workshop 2002, Paper No. 4.2.
- [4] SHEN, J.S, et al., “A Performance Study of a V-Cone Meter in Swirling Flow”, North Sea Flow Measurement Workshop 1995, Paper No. 20.
- [5] SWRI Testing of V-Cone Meters in Accordance with API-MPMS chapter 5.7 Report. 2004.
- [6] TING, V.C.,”Effect of Orifice Meters Orientation on Wet Gas Flow Measurement Accuracy”, presented at the SPE Gas Technology Symposium, Calgary, Canada, June 28-30, 1993.