

## 5 Resultados

Este capítulo apresenta os resultados do estudo realizado acerca da influência da medição de vazão de queima de gás natural, por meio de medição ultrasônica por tempo de trânsito, sobre os volumes produzidos de gás e sua incerteza associada numa plataforma de produção de óleo e gás. A análise envolveu, a partir dos dados de volume horário produzido: estimativas de incerteza para os volumes de produção em base horária, diária e mensal para um período de 16 meses (setembro de 2012 a dezembro de 2013) a partir de estimativas de incerteza para vazão; observações sobre o comportamento da incerteza para a velocidade de escoamento na queima de gás a partir de dados internos de medidor de vazão de outra instalação; aplicação do que foi observado para este medidor de vazão no conjunto de dados de volume de queima originais; comparação entre a influência sobre a incerteza dos volumes produzidos verificada inicialmente contra os resultados da segunda abordagem.

Um balanço de massa também é apresentado, para um período mais curto. Ao final, faz-se uma comparação entre os volumes queimados, consumidos e produzidos ao longo do período de 16 meses. As etapas do estudo estão descritas a seguir.

### 5.1. Cenário

Os projetos de sistemas de medição de plataformas de produção são muito variados. Sua concepção contempla necessidades de atendimento à regulamentação e demandas operacionais, entre outros aspectos. As escolhas que levam à definição das características de um determinado projeto residem principalmente nestes dois elementos. Desde a fase conceitual de um projeto, as normas relativas às características dos pontos de medição e às tecnologias empregadas são observadas.

O cenário deste estudo envolve parte do sistema de medição de gás de uma unidade marítima de produção de configuração típica, conforme apresentado no capítulo 1. Doravante, esta unidade de produção será referenciada como “Plataforma A”. Sua capacidade de compressão é de 6 milhões de m<sup>3</sup>/dia de gás e a capacidade de geração de energia elétrica é de 100 MW, provida por 4 turbo-geradores.

Esta plataforma possui dois trens de produção, contando com seis pontos de medição de entrada de gás: separadores de produção dos trens “A” (*SPA*) e “B” (*SPB*); separador de teste (*SPT*); separadores atmosféricos dos trens “A” (*SAA*) e “B” (*SAB*); e importação de gás (*IMP*). Os pontos de medição de saída do gás são oito: exportação (*EXP*); gás combustível de alta (*GCA*) e baixa pressão (*GCB*); piloto (*PIL*) e assistência de queima(*ASS*); queima de alta (*QA*) e baixa pressão (*QB*); e *gas lift* total (*GLT*). Os pontos de gás combustível geralmente são referidos sem a denominação “pressão”, assim como os pontos de queima. A referência à assistência de queima faz-se como “assistência”.

Os pontos dos separadores atmosféricos, de assistência e de queima de alta e de baixa pressão são dotados de medidores de vazão ultrasônicos, sendo os demais pontos de medição de vazão implementados com placas de orifício. As características declaradas destes medidores são: capacidade de medição de velocidades de escoamento de 0,3 a 100 m/s, com incerteza expandida sobre a vazão volumétrica não-coriçada de 2,5 a 5 % ao longo da faixa de medição. O medidor de queima de alta pressão tem diâmetro de 30” (0,762 m), enquanto o de baixa pressão tem diâmetro de 18” (0,457 m). Estes dois últimos pontos são objeto de atenção neste trabalho.

Todos os equipamentos são projetados e instalados conforme as normas pertinentes, e a operação e a manutenção de todo o sistema, do qual o sistema de medição de gás é apenas uma parte, são conduzidas de modo a garantir seu funcionamento adequado, com rotinas de verificação periódica dos itens relevantes estabelecidas pelo Regulamento Técnico de Medição, baseadas em procedimentos específicos para cada tarefa. Mais do que garantir o funcionamento adequado do sistema, permitem alto grau de confiança nos resultados apresentados pelos diversos dispositivos que o integram.

Todos os pontos de medição considerados estão conectados a computadores de vazão, que efetuam cálculos de volume (para placa de orifício, também de

vazão), armazenam informações de produção e geram relatórios. A base temporal para a geração de relatórios a partir de dados armazenados é horária, embora uma geração mais frequente seja possível. No entanto, uma base de tempo com menor intervalo esgotará mais rapidamente a capacidade de armazenamento do dispositivo, obrigando a equipe que opera o sistema a intervenções mais frequentes para fins de arquivamento. Esta intervenção poderá ser feita de modo automático se o sistema for dotado de uma estação de trabalho que, ligada em rede aos diversos computadores de vazão, solicite tais dados uma taxa que atenda às necessidades de armazenamento do usuário.

Os arranjos físicos típicos de conexão entre dispositivos de medição por placa de orifício e ultrassom e computadores e vazão foram mostrados no capítulo 2 (figuras 4 e 7). Na Plataforma “A”, os arranjos de instalação e conexão são os mesmos lá apresentados.

## 5.2.

### Dados Obtidos da Plataforma “A”

Foram recolhidas informações de volumes horários que cobrem um período de 16 meses consecutivos, relativas aos pontos de medição de gás que contabilizam a produção da unidade, além de outros pontos de interesse para o estudo. As fontes dos dados são relatórios diários de produção de computadores de vazão que listam, a cada uma das 24 horas de um dia de produção, o volume contabilizado (em condições de referência) e uma série de outras informações subsidiárias para o cálculo deste (em termos de médias horárias). Uma amostra dos dados é apresentada na tabela 3, conforme os referidos relatórios.

Tabela 3 - Extrato de dados de produção horária: queima de alta pressão, Plataforma “A”

| Data      | Horário (h) | Tempo de Fluxo (min) | Pressão Média (kPa) | Temperatura (°C) | Multiplicador | Volume Acumulado Horário ( $10^3 \text{ m}^3$ ) |
|-----------|-------------|----------------------|---------------------|------------------|---------------|-------------------------------------------------|
| 7/12/2013 | 07          | 60,0                 | 103,238             | 29,05            | 0,9881        | 0,4009                                          |
| 7/12/2013 | 08          | 60,0                 | 103,289             | 29,27            | 0,9879        | 0,4016                                          |
| 7/12/2013 | 09          | 60,0                 | 103,335             | 29,56            | 0,9874        | 0,4030                                          |
| 7/12/2013 | 10          | 60,0                 | 103,360             | 29,81            | 0,9868        | 0,4048                                          |
| 7/12/2013 | 11          | 60,0                 | 103,377             | 29,96            | 0,9865        | 0,4016                                          |
| 7/12/2013 | 12          | 59,7                 | 103,351             | 30,21            | 0,9854        | 0,3991                                          |
| 7/12/2013 | 13          | 60,0                 | 103,269             | 30,50            | 0,9837        | 0,4005                                          |
| 7/12/2013 | 14          | 60,0                 | 103,215             | 30,68            | 0,9826        | 0,3996                                          |
| 7/12/2013 | 15          | 60,0                 | 103,179             | 30,81            | 0,9818        | 0,4001                                          |
| 7/12/2013 | 16          | 60,0                 | 103,173             | 30,88            | 0,9816        | 0,4522                                          |
| 7/12/2013 | 17          | 60,0                 | 103,152             | 30,96            | 0,9811        | 0,3985                                          |

A produção de gás da Plataforma “A” é apurada diariamente por meio de seus pontos de medição fiscal, e é dada como a soma dos volumes dos pontos de exportação, gás combustível de alta e de baixa pressão, piloto, assistência e queima de alta e de baixa, descontando-se o volume importado, quando houver.

Para cada um dos oito pontos de contabilização da produção foram obtidos 11688 registros horários consecutivos, iniciados às 17 h de 31/Agosto/2012 e encerrados às 17 h de 31/Dezembro/2013, totalizando 487 dias. A preferência pelo início e final às 17 h deveu-se ao fato de ser este o chamado horário contratual, em relação ao qual é fechada a produção do dia. A produção de um dia inicia-se às 17 h do dia anterior.

Para efeito de declaração da produção, os concessionários são obrigados a emitir um boletim denominado *Boletim Mensal de Produção – BMP*, no qual é feita a discriminação diária da produção ao longo do mês em questão. Esta declaração do concessionário é composta pelos dados de medição fiscal, e será utilizada como base para o cálculo da tributação.

De posse destes dados, passou-se à tarefa de estimar a incerteza de medição dos volumes horários corrigidos produzidos. A alternativa vislumbrada baseia-se na abordagem das equações (32), (33) e (34), discutidas no capítulo 4 e válidas para placa de orifício e ultrassom, uma vez que estimativas de incerteza para a vazão estavam disponíveis para cada um dos pontos de medição. A estimativa de incerteza para o volume horário corrigido será, com base de tempo de uma hora, numericamente igual à estimativa de incerteza para a vazão corrigida na mesma base horária.

A geração de estimativas de incerteza é uma imposição regulamentar, e há procedimentos padronizados que norteiam as ações necessárias para a sua realização. O método (embutido em procedimento específico) utilizado para a obtenção das estimativas de incerteza para a vazão para pontos por placa de orifício segue o indicado pelas equações (29) e (30). Já com relação aos pontos dotados de medidores ultrasônicos, a base para o procedimento de cálculo é a equação (37).

Para o cálculo das incertezas dos pontos por ultrassom, o procedimento apropriado faz uma assunção conservadora a partir de uma informação do fabricante dos equipamentos (os cinco medidores são do mesmo modelo) relativa à incerteza da vazão volumétrica não-corrigida. Esta informação, que não é

suficientemente clara, sugere que a vazão volumétrica não-corrigida tem variação na incerteza de 2,5 a 5 %, com um grau de confiança de aproximadamente 95 %, sem definir como se dá a transição. Assume-se de forma conservadora que a incerteza é, então, de 5 % em termos expandidos para toda a faixa de operação do medidor, o que significa uma incerteza-padrão de 2,5 % para toda a faixa.

O Apêndice A apresenta as estimativas de incerteza percentuais expandidas utilizadas para os pontos de medição de vazão de interesse, obtidas em doze diferentes intervalos de tempo, cobrindo todo o período analisado neste trabalho, apresentando-se em base horária. No referido anexo, pode-se verificar que as incertezas relativas utilizadas para os pontos de medição de vazão por placa de orifício apresentam percentuais inferiores àqueles referentes aos pontos de medição de vazão por ultrasom por tempo de trânsito.

Os resultados mensais encontram-se no Apêndice B, que contém as incertezas sobre os volumes mensais dos pontos de produção a partir das incertezas das respectivas vazões horárias corrigidas. Devido à grande quantidade de informações geradas, estas foram condensadas em resultados mensais. A tabela 4 traz o resultado obtido para cada mês para a produção e sua incerteza expandida para um grau de confiança de aproximadamente 95 %.

Tabela 4 - Incertezas dos volumes produzidos de set/2012 a dez/2013, Plataforma “A”

| Mês    | Produção de gás<br>(10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> ) | Incerteza-padrão<br>(10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> ) | Incerteza expandida<br>$U_{95\%}$ (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> ) | Incerteza expandida<br>$U_{95\%}$ (%) |
|--------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| set/12 | 108358                                               | 14,74                                                 | 29,49                                                               | 0,027 %                               |
| out/12 | 112787                                               | 19,95                                                 | 39,90                                                               | 0,035 %                               |
| nov/12 | 96471                                                | 15,07                                                 | 30,14                                                               | 0,031 %                               |
| dez/12 | 94363                                                | 13,29                                                 | 26,58                                                               | 0,028 %                               |
| jan/13 | 91241                                                | 13,16                                                 | 26,31                                                               | 0,029 %                               |
| fev/13 | 83935                                                | 10,73                                                 | 21,47                                                               | 0,026 %                               |
| mar/13 | 99001                                                | 13,33                                                 | 26,67                                                               | 0,027 %                               |
| abr/13 | 93699                                                | 11,78                                                 | 23,55                                                               | 0,025 %                               |
| mai/13 | 94671                                                | 11,95                                                 | 23,90                                                               | 0,025 %                               |
| jun/13 | 82536                                                | 12,17                                                 | 24,34                                                               | 0,029 %                               |
| jul/13 | 85758                                                | 10,31                                                 | 20,61                                                               | 0,024 %                               |
| ago/13 | 81809                                                | 14,48                                                 | 28,96                                                               | 0,035 %                               |
| set/13 | 79559                                                | 22,95                                                 | 45,90                                                               | 0,058 %                               |
| out/13 | 75747                                                | 10,82                                                 | 21,64                                                               | 0,029 %                               |
| nov/13 | 73296                                                | 11,51                                                 | 23,01                                                               | 0,031 %                               |
| dez/13 | 88451                                                | 11,43                                                 | 22,85                                                               | 0,026 %                               |

### 5.3. Dados Obtidos de Outras Plataformas

As estimativas de incerteza para a vazão de queima utilizadas na secção 5.2 foram aplicadas aos volumes de queima, porém com um viés que pode ser considerado conservador. Devido à escassez de informações mais detalhadas com relação ao comportamento dos equipamentos da Plataforma “A”, buscou-se subsídio em outras fontes para tentar identificar o comportamento, ainda que em termos médios, dos medidores de queima.

Foram então obtidos registros de operação de dois medidores de queima de outras duas plataformas: de um ponto de queima de alta de 24”, pertencente à denominada a partir daqui Plataforma “B”; e de um ponto de queima de baixa de 12”, pertencente à denominada a partir daqui Plataforma “C”. Os equipamentos são do mesmo fabricante e modelo daqueles em operação na Plataforma “A”. Os registros foram colhidos (e tempos depois cedidos pelo engenheiro Leonardo Bastos ao autor para a realização do presente trabalho) após eventos de *dry calibration*, por meio de *software* proprietário do fabricante, capaz de estabelecer comunicação com o medidor e extrair informações a respeito de seu funcionamento e de características do escoamento. Os registros totalizam oito horas de funcionamento para o medidor de 24” e duas horas para o de 12”.

Estes registros (arquivos de *log*) apresentam detalhes relativos à construção da informação de vazão volumétrica não-corrigida pelo medidor. Uma amostra, de dados disponibilizados pelo *software* é apresentada na tabela 5 conforme extraída.

Tabela 5 - Extrato de arquivo de *log* de equipamento da Plataforma “B”

| Data      | Horário          | Vazão não-corrigida (m <sup>3</sup> /h) | Velocidade do escoamento (m/s) | Velocidade do som (m/s) | Tempo de subida (s) | Percentual Útil dos Tempos de Subida |
|-----------|------------------|-----------------------------------------|--------------------------------|-------------------------|---------------------|--------------------------------------|
| 31/8/2012 | 18 h 00 min 25 s | 167,933                                 | 0,106721                       | 402,072                 | 0,002624            | 100 %                                |
| 31/8/2012 | 18 h 00 min 30 s | 181,782                                 | 0,115522                       | 402,010                 | 0,002625            | 100 %                                |
| 31/8/2012 | 18 h 00 min 35 s | 172,706                                 | 0,109755                       | 401,975                 | 0,002625            | 100 %                                |
| 31/8/2012 | 18 h 00 min 40 s | 172,672                                 | 0,109733                       | 401,948                 | 0,002625            | 100 %                                |
| 31/8/2012 | 18 h 00 min 45 s | 175,684                                 | 0,111647                       | 401,931                 | 0,002625            | 100 %                                |

A obtenção destes dados motivou a seguinte hipótese: se for considerado que o comportamento destes equipamentos específicos, idênticos aos utilizados na medição de queima da Plataforma “A”, é típico, ele poderia permitir uma outra

abordagem para a estimativa de incerteza dos volumes queimados pela Plataforma “A”?

Não há muita informação disponível a respeito do funcionamento específico deste e de outros modelos. Contactados, o fabricante e seus representantes forneceram algumas informações genéricas que ao menos permitiram a admissão de algumas outras hipóteses. Uma das poucas informações obtidas diz respeito à equação que define o fator  $k$  como função de  $Re$ . Essa relação aparece na equação (45).

$$k = 0,889 + 0,0091 \cdot \log_{10}(Re) + 0,0001 \cdot \log_{10}^2(Re) \quad (45)$$

$Re$  pode ser obtido através da relação entre a velocidade do escoamento (fornecida), do diâmetro da secção transversal (conhecido) e da viscosidade cinemática do gás, suposta pelo equipamento como sendo igual a  $0,000015 \text{ m}^2/\text{s}$ , o que é uma aproximação razoável quando as características do gás são desconhecidas. A incerteza de  $k$  é obtida através da derivação da expressão acima e da incerteza da velocidade do caminho acústico. Outra informação obtida é a de que o equipamento gera, a cada 5 segundos, uma informação de vazão em condições de processo, com base numa quantidade de tempos de subida e de descida que varia de 50 a 60 para cada sentido. Para este trabalho, assume-se que sejam no máximo 50 para cada.

Uma assunção necessária diz respeito à distribuição de probabilidades associada aos tempos de subida e de descida, o que levaria à estimativa da incerteza na sua determinação e, por conseguinte, da velocidade do escoamento. Se a distribuição puder ser suposta como normal, isso trará algumas facilidades, como por exemplo assumir que virtualmente todos os tempos estarão contidos num intervalo de três desvios-padrão. Folkestad & Mylvaganam (1993) indicam que esta é uma abordagem que não apresenta bom desempenho em ambientes excessivamente ruidosos, onde a rejeição ao ruído é prejudicada. No entanto, se o ambiente for considerado como sendo de baixo ruído, esta é uma aproximação útil, a despeito de algum erro introduzido na determinação dos tempos de trânsito. De toda sorte, o ruído é um dos componentes determinantes da aceitação ou rejeição de um valor isolado ou de um conjunto de valores de tempo de trânsito

(Marcheti, 2009), e intimamente relacionado à incerteza sobre estes. A incerteza dos tempos de subida e descida será influenciada.

A partir do artigo supracitado, assumiu-se que a distribuição dos tempos de subida e de descida é normal, com variação de  $\pm 3\sigma$  em torno de uma média. Os valores extremos não ultrapassam  $\pm 5\%$  do valor médio, o que também é suposto por Folkestad & Mylvaganam (1993) na hipótese do uso de média para os tempos de trânsito. Com isto, é possível estimar uma incerteza para estes tempos, conforme a equação (39). O próprio *log* fornece informações que podem ser relacionadas para a obtenção destes valores. Os desvios-padrão para os tempos de trânsito serão:

$$\sigma_s = (0,05/3) \cdot t_s \quad (46)$$

$$\sigma_d = (0,05/3) \cdot t_d \quad (47)$$

De posse das informações fornecidas pelo *log* e as inferidas a partir dele, pode-se então buscar a solução para as equações (37) e (39), que permitirão uma estimativa para a incerteza da velocidade do escoamento.

Os dados apurados permitiram esboçar uma curva para a estimativa de incerteza da velocidade do escoamento, em função desta. Para o medidor da Plataforma “B”, de 24”, a curva ficou limitada a aproximadamente 23 m/s, maior velocidade apresentada pelo respectivo *log*. Para o medidor da Plataforma “C”, a velocidade limitou-se a 10 m/s. Em ambos os casos, as curvas foram extrapoladas até 60 m/s (velocidade próxima à maior velocidade de escoamento média inferida em uma hora apurada para os conjuntos de dados de alta e baixa pressão, conforme secção 5.4.1.1), ajustadas com início em 1 m/s, com o auxílio da ferramenta computacional *MATLAB*.

Assumiu-se que o aproveitamento dos tempos de subida e de descida entre 23 m/s e 60 m/s é de 100%, uma vez que o aproveitamento de ambos os tempos foi igual a este percentual entre 1 m/s e 23 m/s para os dados utilizados. Caso haja uma tendência a perda de aproveitamento dos tempos de subida e de descida dentro desse intervalo, isso significa uma quantidade menor de dados para a geração das médias dos tempos de trânsito, com conseqüente tendência ao aumento da incerteza da velocidade do escoamento e da vazão não-coriigida. Tal

possibilidade, para ser analisada, demandaria a obtenção de *logs* de medição que contemplassem este intervalo de velocidades de escoamento.

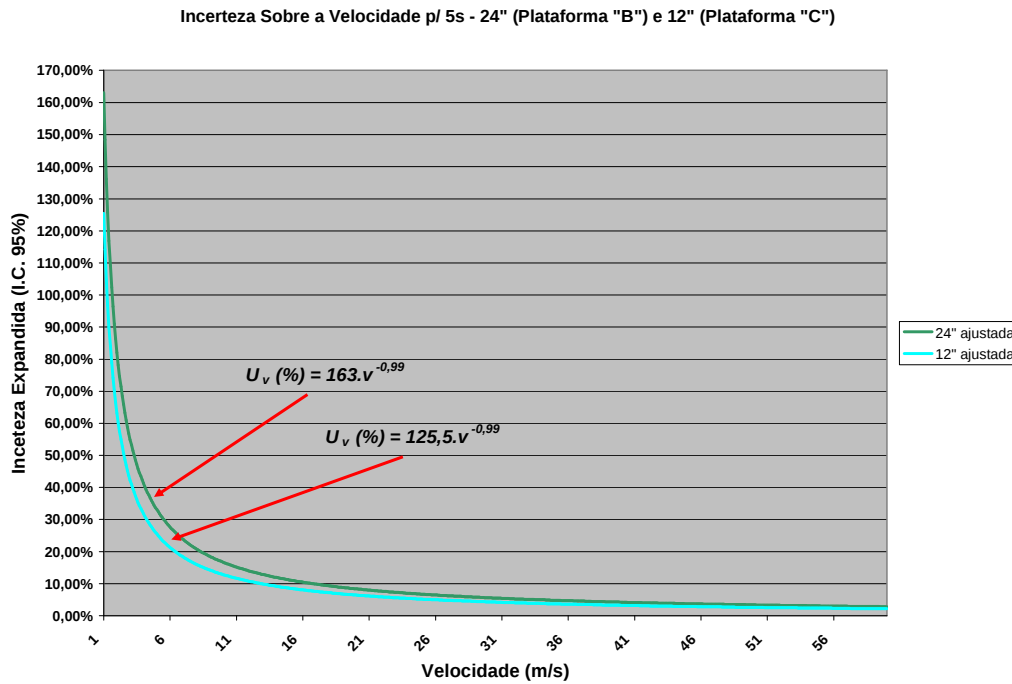


Figura 14 - Incerteza expandida da velocidade do escoamento para 5 s (I.C.  $\approx$  95 %): medidores de 12\" e 24\" (Elaboração Própria)

Supondo as incertezas sobre as áreas das secções transversais dos medidores (725,83 cm<sup>2</sup> para 12\" e 2918,63 cm<sup>2</sup> para 24\") como desprezíveis, chega-se ao seguinte resultado para a incerteza da vazão volumétrica não-corrigida com um grau de confiança de aproximadamente 95 % numa base de 5 segundos, a partir da equação (37):

$$U_{12''}(Q_o) = 33,27 \cdot Q_o^{-0,99} (\%) \quad (48)$$

$$U_{24''}(Q_o) = 171,73 \cdot Q_o^{-0,99} (\%) \quad (49)$$

$Q_o$  é expresso em milhares de m<sup>3</sup>/h. Extratos dos *logs* de 24\" e de 12\" encontram-se nos Apêndices C e D, respectivamente, com indicação de variáveis originárias e inferidas.

## 5.4.

### Comportamento dos Medidores de Queima de Gás da Plataforma “A”

Com base no método aplicado para inferir informações a partir dos dados obtidos das Plataformas “B” e “C”, lastreado pelas relações apresentadas nos capítulos 2 e 4 para medição de vazão ultrasônica e determinação de sua incerteza, buscou-se identificar comportamento semelhante para os medidores de queima da Plataforma “A”, e sua influência sobre a incerteza dos seus respectivos volumes e sobre a incerteza na produção de gás.

#### 5.4.1.

#### Inferência de Propriedades do Gás

O ponto de partida foram os relatórios dos computadores de vazão de queima de alta e de baixa. Embora os relatórios não forneçam uma grande quantidade de informações a respeito da produção horária, se a eles forem agregadas informações referentes às características do gás, uma série informações adicionais poderá ser inferida.

Um exemplo de conjunto de características apuradas para o gás na queima de alta, oriundo de resultados de análises químicas em laboratório encontra-se na tabela 6. Estão presentes, nesta ordem: fator de compressibilidade em condições de referência; razão entre calor específico a pressão constante  $C_p$  e calor específico a volume constante  $C_v$ ; densidade em condições de referência; massa molecular do gás; massa específica nas condições de referência  $\rho_{ref}$ ; viscosidade absoluta nas condições de referência; e viscosidade cinemática nas condições de referência.

Tabela 6 - Propriedades obtidas a partir de análises laboratoriais de amostras de gás

| Análise | Z0       | $C_p / C_v$ | Densidade em condições de referência | Massa molar (g/mol) | $\rho_{ref}$ (kg/m <sup>3</sup> ) | Viscosidade absoluta (cP) | Viscosidade cinemática (m <sup>2</sup> /s) |
|---------|----------|-------------|--------------------------------------|---------------------|-----------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------|
| 1       | 0,997230 | 1,2488      | 0,658273                             | 19,02               | 0,7925                            | 0,010851                  | 1,36917E-05                                |
| 2       | 0,997464 | 1,2608      | 0,635030                             | 18,35               | 0,7645                            | 0,010961                  | 1,43367E-05                                |

O conjunto de propriedades listado na tabela 6 permite a inferência de outras propriedades do gás em termos médios horários relacionadas aos volumes apurados. As características indicadas por “\*” na tabela 7, a seguir, foram inferidas. Aquelas aqui apresentadas como exemplo, para a queima de alta, são: volume não-corrigido da hora; razão entre os fatores de compressibilidade em

condições de referência e em condições de operação ( $Z_0/Z$ ); fator de compressibilidade em condições de operação segundo a *AGA Report n°8* (“Z”); área da secção transversal do medidor em função da temperatura; velocidade média do escoamento na hora; e número de Reynolds médio da hora.

Tabela 7 - Variáveis inferidas a partir de dados de relatórios e de propriedades do gás

| Data       | Hora (h) | Volume ( $10^3 \text{ m}^3$ ) | $Z_0 / Z$ | Z pela AGA8 | Área da secção transversal ( $\text{m}^2$ ) | Velocidade média do escoamento (m/s) | Re    |
|------------|----------|-------------------------------|-----------|-------------|---------------------------------------------|--------------------------------------|-------|
| 02/09/2012 | 20       | 0,78343                       | 0,999595  | 0,997681    | 0,4372                                      | 0,4977                               | 26914 |
| 02/09/2012 | 21       | 0,98975                       | 1,000489  | 0,996789    | 0,4372                                      | 0,6288                               | 34002 |
| 02/09/2012 | 22       | 1,44681                       | 1,003638  | 0,993662    | 0,4372                                      | 0,9192                               | 49704 |

#### 5.4.1.1.

##### Efeitos do Número de Reynolds

Cabe aqui um parêntese com relação à adoção de critério para estabelecer o regime de escoamento como função de  $Re$ , em termos médios para cada hora. Considera-se, para efeitos do presente trabalho, que a garantia de escoamento turbulento plenamente desenvolvido, livre de efeitos de *swirl* (vórtices) e de deformação do perfil, ocorre a  $Re$  igual ou superior a 10000. Considera-se um escoamento em regime de transição aquele em que  $Re$  situa-se entre 4000 e 10000.  $Re$  abaixo de 4000 indica um escoamento laminar.

Um quadro-resumo (tabela 8) apresenta o comportamento dos medidores de queima de alta e de baixa da Plataforma “A” ao longo dos 16 meses no que diz respeito a: total de tempo acumulado sob diferentes regimes de escoamento; percentual, sob cada um dos diferentes regimes, do tempo total; volumes totais corrigidos apurados sob cada regime de escoamento; e percentual do volume global apurado associado às ocorrências dos diferentes regimes de escoamento.

Tabela 8 - Regimes de escoamento e volumes apurados

|                                                                | Queima de alta pressão | Queima de baixa pressão |
|----------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------|
| Total de Horas com N° Reynolds Turbulento                      | 4853                   | 11627                   |
| Total de Horas com N° Reynolds de Transição                    | 6828                   | 4                       |
| Total de Horas com N° Reynolds Laminar                         | 7                      | 57                      |
| % Horas com N° Reynolds Turbulento                             | 41,5 %                 | 99,5 %                  |
| % Horas com N° Reynolds de Transição                           | 58,4 %                 | 0,0%                    |
| % Horas com N° Reynolds Laminar                                | 0,1 %                  | 0,5 %                   |
| Volume Apurado $10^3 \text{ m}^3$ com N° Reynolds Turbulento   | 41570                  | 12399                   |
| Volume Apurado $10^3 \text{ m}^3$ com N° Reynolds de Transição | 1297                   | 0                       |
| Volume Apurado $10^3 \text{ m}^3$ com N° Reynolds Laminar      | 1                      | 1                       |
| % Volume Apurado com N° Reynolds Turbulento                    | 97 %                   | 100 %                   |
| % Volume Apurado com N° Reynolds de Transição                  | 3 %                    | 0 %                     |
| % Volume Apurado com N° Reynolds Laminar                       | 0 %                    | 0 %                     |

A análise das inferências para *Re* médio horário a partir dos relatórios de produção indica que, embora a queima de alta pressão tenha permanecido por tempo próximo a 60 % do total das 11688 horas apuradas, neste mesmo tempo apenas 3 % do volume total de queima de alta foi computado. Baixos *Re*, associados a baixas velocidades de escoamento, contribuem para a degradação da determinação dos tempos de trânsito, bem como para a determinação de sua incerteza, fatalmente aumentando-a. No entanto, quando se considera o baixo percentual de volume apurado nestas condições, este efeito dilui-se.

No outro extremo, números elevados de *Re* indicam velocidade de escoamento igualmente elevadas. No capítulo 2, foi indicado que à medida que a velocidade do escoamento aumenta, a simplificação que considera uma mera soma ou subtração algébrica da velocidade do som e do incremento na velocidade de propagação devido ao efeito do deslocamento do fluido necessita ser abandonada. Quando a velocidade do escoamento atinge valores significativos, (superiores a 10% da velocidade do som nas mesmas condições, por exemplo) a velocidade de propagação do pulso ultrasônico deve ser encarada como o resultado de uma soma vetorial.

A velocidade do som em um fluido depende de sua composição e de suas características intrínsecas, além das condições às quais esteja submetido. Nas condições de pressão e temperatura observadas para os dados de queima de alta e de baixa nos relatórios de computadores de vazão analisados, o gás natural terá associado a si uma velocidade do som que variará em torno de 420 m/s (10 % deste valor equivale a 42 m/s). Ao longo de todas as 11688 horas analisadas para as queima de alta e de baixa, em apenas um evento a velocidade média horária apurada foi superior a 42 m/s (61,7 m/s, queima de alta pressão, 10/Nov/2012 entre as 7 h e as 8 h). Para o *log* analisado do ponto de queima de alta da Plataforma “B”, a máxima velocidade observada foi 23,2 m/s, também inferior a um décimo do entorno esperado para a velocidade do som no gás natural. Assim sendo, esse efeito de alta velocidade não foi considerado neste estudo.

#### 5.4.1.2.

#### Inferência da Velocidade do Som

Com as propriedades do gás à disposição, uma importante inferência a partir da qual outros parâmetros relacionados aos volumes de queima obtidos através da medição ultrasônica podem também ser inferidos é velocidade do som. A velocidade do som num gás pode ser expressa, de forma aproximada, pela equação (16), cujos fatores são conhecidos, resultados de análises para o gás. Com a velocidade do som estimada, a velocidade do escoamento média inferida para cada hora e o fator  $k$  calculado a partir da sua expressão em função do  $Re$  inferido, pode-se estimar a média em cada hora da velocidade do caminho acústico e dos tempos de subida e de descida. Um exemplo é apresentado na tabela 9.

Tabela 9 - Velocidade do som e outras variáveis inferidas

| Data      | Horário (h) | $\bar{R}$ / Massa Molar | Vel. Som (m/s) | Fator $k$ | Velocidade $v$ (m/s) | $t_s$ (s) | $t_d$ (s) |
|-----------|-------------|-------------------------|----------------|-----------|----------------------|-----------|-----------|
| 31/8/2012 | 18          | 439,69                  | 402,07         | 0,924642  | 0,115419             | 0,002624  | 0,002623  |
| 31/8/2012 | 19          | 439,69                  | 402,01         | 0,924981  | 0,124891             | 0,002625  | 0,002624  |
| 31/8/2012 | 20          | 439,69                  | 401,98         | 0,924762  | 0,118684             | 0,002625  | 0,002624  |
| 31/8/2012 | 21          | 439,69                  | 401,95         | 0,924761  | 0,118661             | 0,002625  | 0,002624  |

Os valores apresentados na tabela 9 são valores médios estimados para uma hora. Em princípio, por serem médios, são encarados como constantes ao longo daquela hora, sem dispersão, qualquer que seja o intervalo de observação dentro dela. Porém, se a hipótese suposta para o medidor da plataforma “B” (média com dispersão máxima de  $\pm 5\%$ , mais que 99,9 % dos tempos de trânsito dentro de  $\pm 3\sigma$ ) for aplicada a estes resultados, uma segunda estimativa para os volumes de queima pode ser realizada, e comparada com a visão conservadora de 5 % de incerteza expandida para toda a faixa.

#### 5.5.

#### Incertezas dos Volumes de Queima de Gás a Partir das Inferências

O cálculo do volume a partir da medição ultrasônica foi apresentado no capítulo 3. As equações (21) e (22) indicam o método de cálculo utilizado pelos computadores de vazão. Para o caso específico da Plataforma “A”, o computador de vazão solicita ao medidor, a intervalos de tempo  $\Delta t$ , uma informação de vazão não-coriçada, uma informação de pressão e uma informação de temperatura. Este

tempo  $\Delta t$ , ou tempo de aquisição, é igual a 1 segundo. Assim, o computador de vazão gera e armazena um pequeno volume não-corrigido por segundo, acumulando volumes ao longo do intervalo de integração.

No caso da Plataforma “A”, o intervalo de integração é de 5 minutos. Ao final deste intervalo, as médias de pressão e temperatura adquiridas serão utilizadas, inicialmente, para o cálculo do fator de compressibilidade médio do intervalo segundo a *AGA Report n°8*, (o fator em condições de referência é calculado apenas uma vez, excepto se houver mudança na composição do gás inserida no computador de vazão). Em seguida, são utilizadas para a correção do volume acumulado para as condições de referência. O intervalo de integração poderá ser reduzido caso haja oscilações identificadas no comportamento das variáveis de pressão ou de temperatura que ultrapassem 34,5 kPa ou 1,1 °C, respectivamente. O objetivo é garantir uma melhor representatividade dos volumes corrigidos.

A incerteza sobre o volume pode ser calculada a partir da equação (42). Dos componentes a determinar, as derivadas parciais (coeficientes de sensibilidade) são obtidas a partir da equação (24), derivando o volume em condições de referência em relação às variáveis  $P_{op}$ ,  $T_{op}$ ,  $Z_{op}$  e  $V_{op}$ .  $T_{ref}$  e  $P_{ref}$  são constantes (293,15 K e 101,325 kPa, respectivamente);  $Z_{ref}$  é constante, e não se considera sua incerteza. As incertezas de  $P_{op}$  e  $T_{op}$  são aquelas apontadas nas secções 4.5.3 e 4.5.4 (0,375 kPa para a faixa de 0 a 500 kPa; e 0,2°C para a faixa de 0°C a 100°C). A incerteza de  $Z_{op}$  é aquela apontada na secção 4.5.2 como resultado da AGA 8, 0,1 %.

O volume não-corrigido no intervalo de integração (5 minutos), segundo a equação (21), pode ser representado como sendo a soma a cada segundo de uma parcela de volume:

$$AVQ_t = q_1 \cdot \Delta t_1 + q_2 \cdot \Delta t_2 + \dots + q_{300} \cdot \Delta t_{300} \quad (50)$$

A incerteza do volume não-corrigido poderá ser expressa por:

$$u(AVQ_t) = \sqrt{u^2(q_1) \cdot \Delta t_1^2 + \dots + u^2(q_{300}) \cdot \Delta t_{300}^2} \quad (51)$$

O intervalo de aquisição não varia. Os cinco primeiros valores de  $q$  são iguais, pois a taxa de aquisição do computador de vazão é cinco vezes maior que a taxa de geração de um novo valor de vazão pelo medidor, e assim segue para os próximos cinco valores de  $q$ . Assim, a incerteza pode ser reescrita como:

$$u(AVQ_t) = \sqrt{5 \cdot u^2(Q_1) \cdot \Delta t^2 + \dots + 5 \cdot u^2(Q_{60}) \cdot \Delta t^2} \quad (52)$$

Onde  $Q_n$  é uma vazão determinada a cada 5 segundos pelo medidor. Como ao longo do intervalo de integração os 60 valores de  $Q_n$  são iguais, pelo fato da vazão média ser constante ao longo da hora considerada, tem-se finalmente como expressão desta incerteza:

$$u(AVQ_t) = \Delta t \cdot \sqrt{60} \cdot u(\overline{Q_t}) \quad (53)$$

Onde:

$u(\overline{Q_t})$  = incerteza sobre a vazão volumétrica não-corrigida em 5 segundos.

Seja  $BMV_t$  o multiplicador que engloba  $P_{op}$ ,  $T_{op}$ ,  $Z_{op}$ ,  $Z_{ref}$ ,  $T_{ref}$ , e  $P_{ref}$  na equação do volume corrigido, obtido dos dados de relatório dos computadores de vazão em termos médios para a hora considerada. O intervalo de aquisição, igual a 1 segundo, desaparece. A expressão da incerteza do volume corrigido em 5 minutos será, portanto, conforme a equação (54):

$$u(V_{ref(5min)}) = \sqrt{\left( BMV_t \cdot \sqrt{60} \cdot u(\overline{Q_t}) \right)^2 + \left( -AVQ_t \cdot \frac{BMV_t}{Z_{op}} \cdot u(Z_{op}) \right)^2 + \dots} \quad (54)$$

$$\sqrt{\dots + \left( AVQ_t \cdot \frac{BMV_t}{P_{op}} \cdot u(P_{op}) \right)^2 + \left( -AVQ_t \cdot \frac{BMV_t}{T_{op}} \cdot u(T_{op}) \right)^2}$$

O volume em condições de referência para o período equivale a 1/12 do volume horário nas mesmas condições (o mesmo ocorre para o volume não-corrigido,  $AVQ_t$ ). Como não há variação dos blocos de volumes apurados em 5

minutos, todos os 12 são iguais. Então, a incerteza do volume horário ( $V_h$ ) será equivalente a:

$$u(V_h) = \sqrt{12} \cdot u(V_{ref(5min)}) \quad (55)$$

A incerteza expandida, com um grau de confiança de aproximadamente 95 %, será o dobro do valor de  $u(V_h)$ . Este raciocínio foi aplicado a todo o conjunto de dados horários de queima de alta e de baixa pressão, determinando-se novos valores para as incertezas dos respectivos volumes.

Os novos resultados mensais encontram-se no Apêndice E, onde são apresentadas as incertezas sobre os volumes mensais dos pontos de medição que compõem a produção a partir de inferência do comportamento dos medidores de queima. Devido à grande quantidade de informações geradas, estas foram condensadas em resultados mensais. A tabela 10 traz o resultado obtido para cada mês para a produção de gás e sua incerteza expandida para um grau de confiança de aproximadamente 95 %.

Tabela 10 - Incertezas para a produção mensal de set/2012 a dez/2013, Plataforma "A"

| Mês    | Produção de gás<br>( $10^3 \text{ m}^3$ ) | $u$ ( $10^3 \text{ m}^3$ ) | $U_{95\%}$ ( $10^3 \text{ m}^3$ ) | $U_{95\%}$ (%) |
|--------|-------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|----------------|
| set/12 | 108358                                    | 12,59                      | 25,18                             | 0,023%         |
| out/12 | 112787                                    | 13,10                      | 26,19                             | 0,023%         |
| nov/12 | 96471                                     | 12,02                      | 24,04                             | 0,025%         |
| dez/12 | 94363                                     | 11,77                      | 23,54                             | 0,025%         |
| jan/13 | 91241                                     | 10,70                      | 21,41                             | 0,023%         |
| fev/13 | 83935                                     | 10,08                      | 20,15                             | 0,024%         |
| mar/13 | 99001                                     | 11,21                      | 22,41                             | 0,023%         |
| abr/13 | 93699                                     | 10,79                      | 21,59                             | 0,023%         |
| mai/13 | 94671                                     | 10,90                      | 21,80                             | 0,023%         |
| jun/13 | 82536                                     | 9,48                       | 18,97                             | 0,023%         |
| jul/13 | 85758                                     | 9,71                       | 19,42                             | 0,023%         |
| ago/13 | 81809                                     | 8,86                       | 17,72                             | 0,022%         |
| set/13 | 79559                                     | 8,44                       | 16,87                             | 0,021%         |
| out/13 | 75747                                     | 8,36                       | 16,71                             | 0,022%         |
| nov/13 | 73296                                     | 8,13                       | 16,26                             | 0,022%         |
| dez/13 | 88451                                     | 9,42                       | 18,84                             | 0,021%         |

## 5.6. Comparação de Resultados

O comportamento da incerteza da vazão não-corrigida para os pontos de queima de alta e de baixa pressão da Plataforma “A” pode ser verificado na figura 15, assim como o comportamento dos medidores de 12” e de 24”.

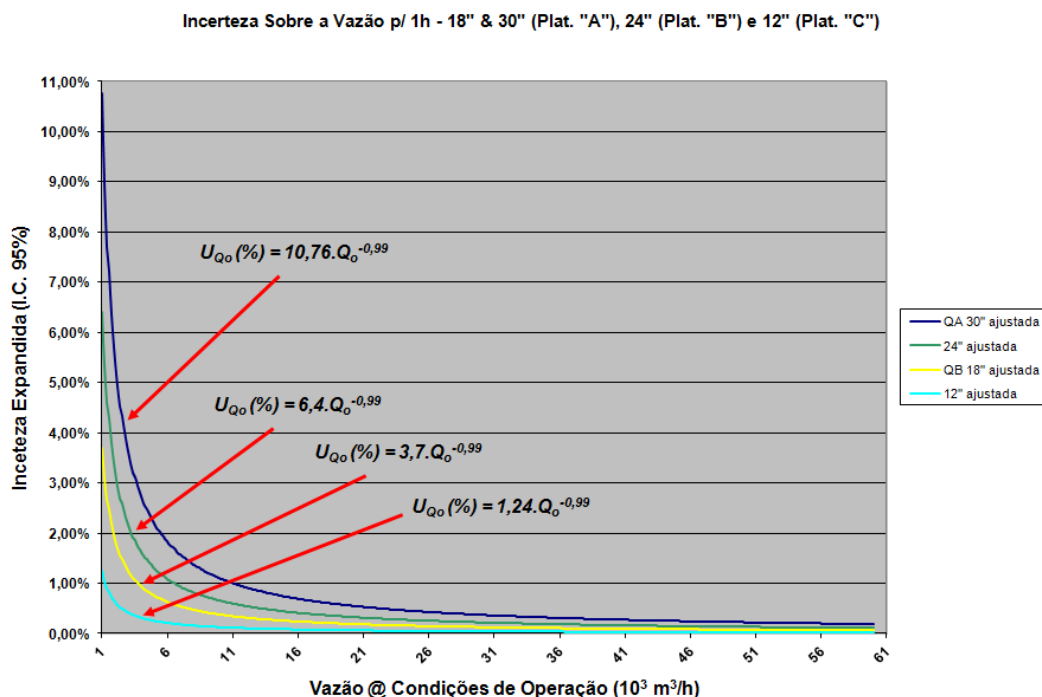


Figura 15 - Incerteza da vazão volumétrica não-corrigida para 1 h – medidores de 12”, 18”, 24” e 30” (Elaboração Própria)

A figura 16 apresenta as curvas de incerteza expandida percentual para a velocidade do escoamento para os quatro medidores. As curvas dos medidores de queima de alta e de baixa encontram-se bastante próximas. As relações entre os coeficientes das curvas aproximam-se das relações entre as velocidades do som médias apuradas para cada medidor, independentemente do intervalo de tempo de coleta de dados. As médias das velocidades do som apuradas foram: 283,8 m/s (12”); 423,2 m/s (18”, queima de baixa); 367,7 m/s (24”); e 413,5 m/s (30”, queima de alta). O baixo valor da velocidade do som associado ao medidor de 12” possivelmente é devido ao fato de a massa molar do gás para este medidor ser bastante pesada. A indicação é de aproximadamente 35 g/mol, contra 18 a 19 g/mol para os medidores da Plataforma “A”, e 22,2 g/mol para a massa molar obtida para o medidor de 24”.

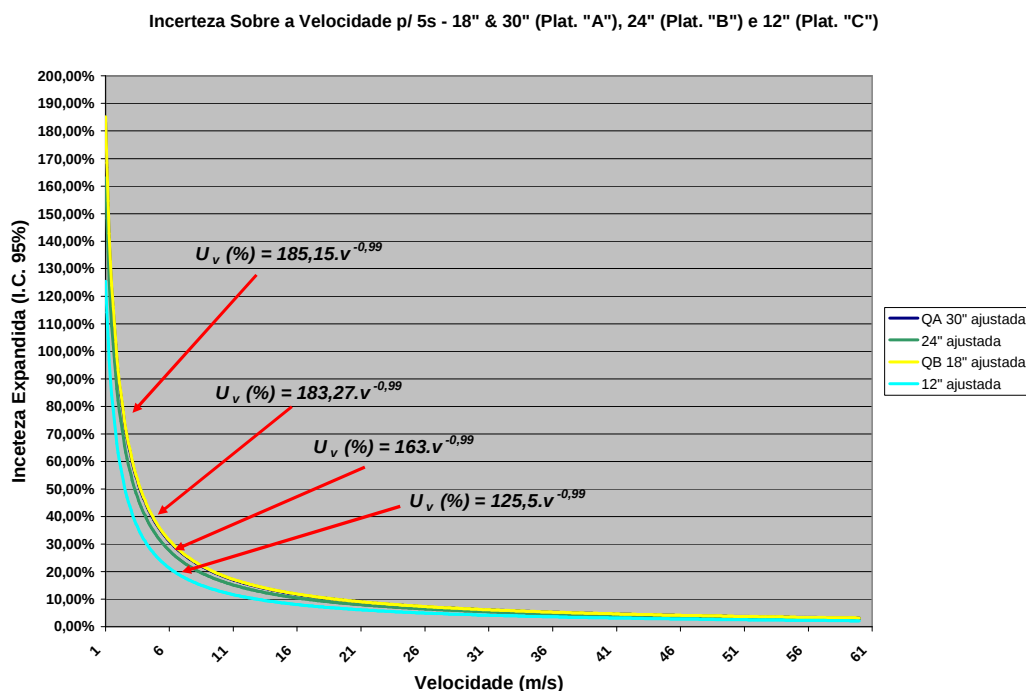


Figura 16 - Incerteza da velocidade do escoamento para 5 s, medidores de 12", 18", 24" e 30" (Elaboração Própria)

Um quadro comparativo mostrando os resultados obtidos para os efeitos sobre as incertezas dos volumes de produção de gás da Plataforma "A" com a abordagem tradicional para a vazão de queima (supondo 5 % de incerteza para toda a faixa de vazão) e com a abordagem da inferência do comportamento dos medidores de queima encontra-se na tabela 11.

Tabela 11 - Incertezas sobre volumes produzidos: diferentes tratamentos para a queima

| Mês    | Produção de gás<br>(10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> ) | 5 % para $U(Q_o)_{95\%}$ em<br>toda a faixa de medição | % $U(Q_o)_{95\%}$ considerando o<br>comportamento dos<br>medidores |
|--------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| set/12 | 108358                                               | 0,027 %                                                | 0,023 %                                                            |
| out/12 | 112787                                               | 0,035 %                                                | 0,023 %                                                            |
| nov/12 | 96471                                                | 0,031 %                                                | 0,025 %                                                            |
| dez/12 | 94363                                                | 0,028 %                                                | 0,025 %                                                            |
| jan/13 | 91241                                                | 0,029 %                                                | 0,023 %                                                            |
| fev/13 | 83935                                                | 0,026 %                                                | 0,024 %                                                            |
| mar/13 | 99001                                                | 0,027 %                                                | 0,023 %                                                            |
| abr/13 | 93699                                                | 0,025 %                                                | 0,023 %                                                            |
| mai/13 | 94671                                                | 0,025 %                                                | 0,023 %                                                            |
| jun/13 | 82536                                                | 0,030 %                                                | 0,023 %                                                            |
| jul/13 | 85758                                                | 0,024 %                                                | 0,023 %                                                            |
| ago/13 | 81809                                                | 0,035 %                                                | 0,022 %                                                            |
| set/13 | 79559                                                | 0,058 %                                                | 0,021 %                                                            |
| out/13 | 75747                                                | 0,029 %                                                | 0,022 %                                                            |
| nov/13 | 73296                                                | 0,031 %                                                | 0,022 %                                                            |
| dez/13 | 88451                                                | 0,026 %                                                | 0,021 %                                                            |

A comparação indica menores percentuais para a incerteza do volume quando se considera o comportamento dos medidores ao longo da faixa de operação, contra a abordagem que considera um percentual de 5 % para a vazão volumétrica não-corrigida para uma única vazão, extensível a toda a faixa. A tabela 12 apresenta os efeitos sobre a incerteza dos volumes queimados de alta pressão.

Tabela 12 - Diferentes tratamentos para a incerteza: volumes queimados, alta pressão

| Mês    | Volumes Queimados em Alta Pressão ( $10^3 \text{ m}^3$ ) | 5 % para $U(Q_0)$ em toda a faixa de medição | % $U(Q_0)$ Considerando o comportamento dos medidores |
|--------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| set/12 | 4017                                                     | 0,76 %                                       | 0,02 %                                                |
| out/12 | 3213                                                     | 1,87 %                                       | 0,03 %                                                |
| nov/12 | 1875                                                     | 1,94 %                                       | 0,04 %                                                |
| dez/12 | 1574                                                     | 1,55 %                                       | 0,04 %                                                |
| jan/13 | 2891                                                     | 1,05 %                                       | 0,03 %                                                |
| fev/13 | 1022                                                     | 1,35 %                                       | 0,06 %                                                |
| mar/13 | 2412                                                     | 1,19 %                                       | 0,03 %                                                |
| abr/13 | 2184                                                     | 0,86 %                                       | 0,03 %                                                |
| mai/13 | 1151                                                     | 1,69 %                                       | 0,06 %                                                |
| jun/13 | 1900                                                     | 1,60 %                                       | 0,04 %                                                |
| jul/13 | 999                                                      | 1,34 %                                       | 0,06 %                                                |
| ago/13 | 4444                                                     | 1,03 %                                       | 0,02 %                                                |
| set/13 | 8043                                                     | 1,06 %                                       | 0,01 %                                                |
| out/13 | 1230                                                     | 2,22 %                                       | 0,05 %                                                |
| nov/13 | 1778                                                     | 1,83 %                                       | 0,04 %                                                |
| dez/13 | 4132                                                     | 0,62 %                                       | 0,02 %                                                |

Assim como o verificado para os dados apresentados na tabela 11, a comparação indica menores percentuais para a incerteza do volume quando se considera o comportamento dos medidores ao longo da faixa de operação. A figura 17 mostra a comparação por dia no período estudado.  $UV_d 5 \% Q_0$  refere-se à curva obtida a partir da consideração de incerteza da vazão não-corrigida como sendo igual a 5 % ao longo de toda a faixa de vazão, enquanto  $UV_d Comport$  refere-se à curva obtida a partir da consideração do comportamento dos medidores para a determinação da incerteza da vazão não-corrigida.

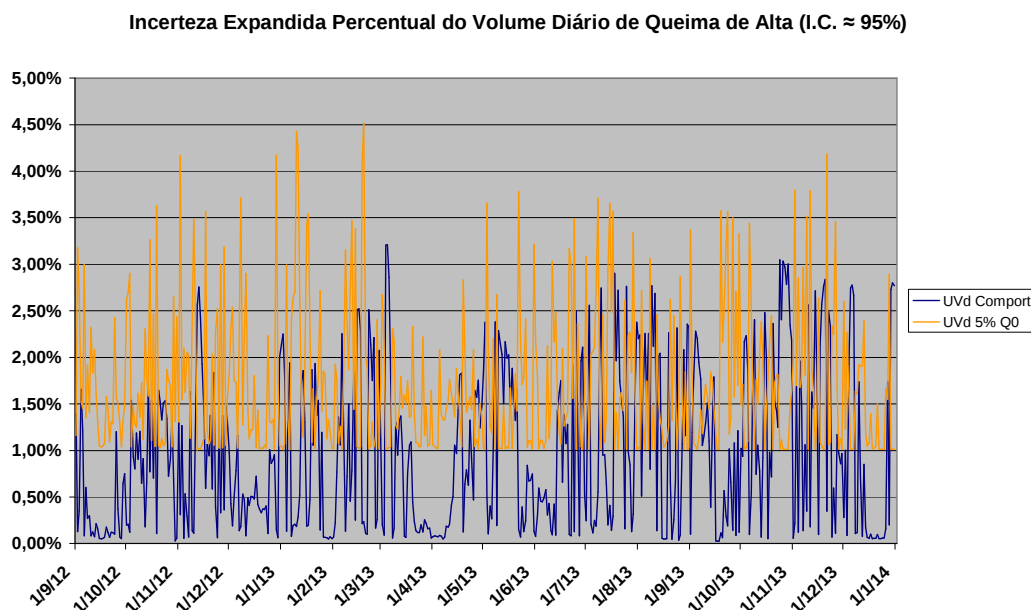


Figura 17 - Comparação entre as incertezas dos volumes queimados de alta pressão  
(Elaboração Própria)

A tabela 13 apresenta os efeitos da incerteza da vazão considerando o comportamento dos medidores sobre a incerteza dos volumes queimados de baixa pressão.

Tabela 13 - Diferentes tratamentos para a incerteza: volumes queimados, baixa pressão

| Mês    | Volumes Queimados em Baixa Pressão ( $10^3 \text{ m}^3$ ) | 5 % para $U(Q_0)$ em toda a faixa de medição | % $U(Q_0)$ Considerando o comportamento dos medidores |
|--------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| set/12 | 374                                                       | 0,23 %                                       | 0,05 %                                                |
| out/12 | 406                                                       | 0,21 %                                       | 0,05 %                                                |
| nov/12 | 542                                                       | 0,20%                                        | 0,04 %                                                |
| dez/12 | 1096                                                      | 0,19 %                                       | 0,02 %                                                |
| jan/13 | 1138                                                      | 0,19 %                                       | 0,02 %                                                |
| fev/13 | 836                                                       | 0,48 %                                       | 0,02 %                                                |
| mar/13 | 836                                                       | 0,19 %                                       | 0,03 %                                                |
| abr/13 | 529                                                       | 0,20%                                        | 0,04 %                                                |
| mai/13 | 521                                                       | 0,21 %                                       | 0,04 %                                                |
| jun/13 | 439                                                       | 0,23 %                                       | 0,05 %                                                |
| jul/13 | 912                                                       | 0,22 %                                       | 0,03 %                                                |
| ago/13 | 777                                                       | 0,23 %                                       | 0,03 %                                                |
| set/13 | 634                                                       | 0,20%                                        | 0,03 %                                                |
| out/13 | 648                                                       | 0,21 %                                       | 0,03 %                                                |
| nov/13 | 479                                                       | 0,22 %                                       | 0,04 %                                                |
| dez/13 | 651                                                       | 0,21 %                                       | 0,03 %                                                |

Como observado anteriormente, a comparação indica menores percentuais de incerteza do volume quando se considera o comportamento dos medidores ao

longo da faixa de operação. Como ilustração, a figura 18 mostra a comparação dos comportamentos diários da incerteza dos volumes queimados de baixa.

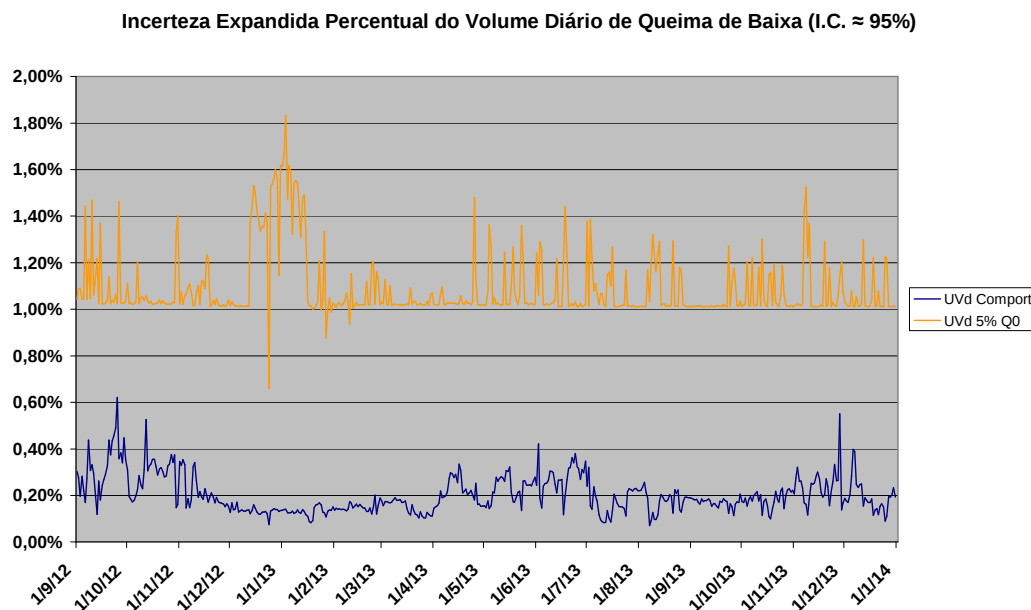


Figura 18 - Comparação entre as incertezas dos volumes queimados de baixa pressão (Elaboração Própria)

Nas figuras 17 e 18 observa-se que as curvas de cor laranja, que representam as incertezas dos volumes calculadas com base em incerteza expandida de 5 % em base horária para toda a faixa de vazão não-corrigida, apresentam uma tendência de limite inferior próximas a 1 %. Este fato deve-se justamente à fixação de um percentual para a incerteza da vazão não-corrigida. Dobrando este percentual para 10% e recalculando as incertezas sobre os volumes, as curvas de cor laranja deslocam-se, “apoiando-se” em patamar pouco superior a 2 %.

## 5.7. Balanço de Massa

A fim de verificar a consistência do sistema de medição, um balanço de massa foi realizado considerando os volumes produzidos durante um período determinado. O balanço não cobre todo o período de 16 meses de dados coletados em função da ausência de informações disponíveis, para grande parte do período, de quatro dos pontos de medição da entrada da Plataforma “A”: os dois separadores de produção e os dois separadores atmosféricos. Ressalte-se que estas informações não estavam totalmente disponíveis no formato em que foram obtidas

as demais informações. As informações de vazão, pressão, temperatura, e outras variáveis pertinentes para o controle e a manutenção da segurança do processo estão continuamente disponíveis para os operadores, por meio de indicação local e apresentada no sistema supervisório, que permite a supervisão e a operação remotas dos sistemas de produção. O modo e o formato como estas informações de processo são armazenadas não permitiria a extração de dados relevantes para o balanço. A rotina de extração de relatórios de dados de produção dos computadores de vazão de pontos de medição desta natureza não obedece à mesma rigidez observada para os pontos de medição fiscal, uma vez que não participam da computação da produção de gás. O balanço, portanto, resumiu-se ao mês de dezembro de 2013.

A produção de gás é computada em bases volumétricas, conforme a regulamentação vigente. Para realizar o balanço de massa, são necessários os resultados de análise de massa específica para cada um dos pontos envolvidos. Esta mostrou-se como outra razão para a redução do período de análise. Os pontos dos separadores anteriormente mencionados possuem intervalos para a coleta de amostras de gás bastante elásticos. Para os separadores atmosféricos, isso não representa um problema, pelo fato da influência da composição (leia-se fator de compressibilidade) poder ser desconsiderada tanto para a determinação da vazão por ultrassom, como para a correção dos volumes para condições de referência (API, 2007).

No caso dos separadores de produção, os pontos de medição utilizam placas de orifício, e necessitam da adequada composição inserida no computador de vazão para a correta computação dos volumes. No entanto, a dinâmica da produção não garante que os mesmos poços produtores estejam ligados aos mesmos trens de produção continuamente. A necessidade de desviar os poços com frequência determinada para o separador de testes, a fim de atender à regulamentação, que obriga a realização de testes periódicos para apuração de características das frações de óleo e gás, bem como de potencial produtivo dos poços, e as decisões de carácter operacional que determinam o direcionamento dos poços de um trem para outro em função de seu comportamento e das condições dos sistemas de processamento de óleo e gás, fazem com que a amostra de gás recolhida num determinado momento seja como uma fotografia da composição naquele instante, uma combinação das composições dos gases dos

poços então presentes. À medida que as alterações ocorrem, este instantâneo não representa mais a combinação de composições presentes. Dada a quantidade possível de combinações, não é tarefa trivial avaliar o erro na determinação da vazão e no cálculo do volume.

A tabela 14 apresenta as composições do gás, em percentuais de frações molares, de três dos poços produtores da Plataforma “A” num dado momento ao longo do intervalo analisado de 16 meses.

Tabela 14 - Diferentes composições dos gases de alguns poços (% de fração em mol)

| Componente                                   | Poço 1 (% de fração molar) | Poço 2 (% de fração molar) | Poço 3 (% de fração molar) |
|----------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Nitrogênio (N <sub>2</sub> )                 | 0,47                       | 0,18                       | 0,31                       |
| Etano (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )       | 5,98                       | 3,76                       | 1,75                       |
| N-Butano (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )   | 2,68                       | 1,44                       | 0,45                       |
| N-Pentano (C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> )  | 1,37                       | 0,63                       | 0,23                       |
| Hexanos (C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> )    | 1,45                       | 0,66                       | 0,34                       |
| Octanos (C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> )    | 0,86                       | 0,53                       | 0,73                       |
| Decanos (C <sub>10</sub> H <sub>22</sub> )   | 0,08                       | 0,09                       | 0,08                       |
| Dióx.Carbono (CO <sub>2</sub> )              | 0,15                       | 1,25                       | 1,12                       |
| Metano (CH <sub>4</sub> )                    | 77,52                      | 86,17                      | 92,46                      |
| Propano (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )     | 5,44                       | 3,12                       | 0,92                       |
| Isobutano (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )  | 1,16                       | 0,64                       | 0,20                       |
| Isopentano (C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> ) | 0,91                       | 0,41                       | 0,12                       |
| Heptanos (C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> )   | 1,58                       | 0,86                       | 0,87                       |
| Nonanos (C <sub>9</sub> H <sub>20</sub> )    | 0,35                       | 0,26                       | 0,42                       |
| Oxigênio (O <sub>2</sub> )                   | 0,00                       | 0,00                       | 0,00                       |
| Hidrogênio (H <sub>2</sub> )                 | 0,00                       | 0,00                       | 0,00                       |

Observando a tabela, pode-se verificar a amplitude de variação das composições em termos de frações em mol. O balanço é dado pela diferença entre as somas das massas de entrada de gás e a soma das massas de saída, conforme a relação expressa na equação (56). Os pontos de entrada e saída estão discriminados na secção 5.1.

$$SPA + SPB + SPT + SAA + SAB + IMP \equiv EXP + GCA + GCB + GLT + PIL + ASS + QA + QB \quad (56)$$

A incerteza da operação é a raiz da soma dos quadrados das incertezas individuais. A tabela 15 traz o resultado obtido para o balanço de massa, encontrando-se os dados completos no Apêndice F. O balanço foi realizado utilizando-se as incertezas para os volumes de queima determinadas pelo comportamento observado para os respectivos medidores. As diferenças relativas nas incertezas para a soma das massas de saída, caso fossem utilizadas as

incertezas de volume de queima com 5 % de incerteza sobre as faixas de vazão de queima de alta e baixa, apresentariam um incremento de 0,04 % nas incertezas das massas de saída e um incremento de 0,02 % na incerteza do balanço de massa.

Tabela 15 - Resultado do balanço de massa para a Plataforma “A” (dez/2013)

|                                                       |        |
|-------------------------------------------------------|--------|
| Soma das Massas de Entrada ( $10^3$ kg)               | 109356 |
| Soma das Massas de Saída ( $10^3$ kg)                 | 100915 |
| Balanço (Entrada – Saída) ( $10^3$ kg)                | 8440   |
| Excedente na Entrada em Relação à Saída (%)           | 7,72 % |
| Incerteza da Soma das Massas de Entradas ( $10^3$ kg) | 217,79 |
| Incerteza da Soma das Massas de Saída ( $10^3$ kg)    | 195,77 |
| Incerteza do Balanço ( $10^3$ kg)                     | 292,85 |

Há uma diferença de 8440 toneladas de gás em favor das entradas. Uma hipótese para justificar parte da diferença pode ser a discordância, já mencionada, entre as composições do gás inseridas nos computadores de vazão que totalizam os pontos dos separadores de produção e a composição real, com suas variações, presente ao longo do período. Conforme a equação (2), se um resultado de análise de composição for inserido no computador de vazão e a massa específica resultante for maior que a massa específica do gás que efetivamente passa pelo ponto de medição com placa de orifício, a vazão mássica será superestimada. O efeito sobre a vazão volumétrica será inverso.

Outra hipótese que pode justificar parte da diferença é a presença de vapor d’água no gás que passa pelos pontos de medição dos separadores de produção e também do separador de teste. As condições de separação da mistura óleo-gás-água da Plataforma “A” oscilaram em torno de pressões de 963 kPa e temperaturas 102 °C para o separador de produção “A”, 976 kPa e temperaturas 94 °C para o separador de produção “B” e 1012 kPa e temperaturas 88 °C para o separador de teste (pressões em termos relativos). Nestas condições de temperatura e pressão, a mistura dá origem a gás saturado ao ser separada, com teor de vapor d’água dependerá das condições de separação. Com isso, parte da massa que atravessa as placas de orifício nestes pontos é constituída de água, e não de gás natural. Esta água presente no gás será quase que totalmente removida através do processo de compressão do gás e, em seguida no processo de secagem da água residual, antes que o gás seja medido nos pontos de saída. Para a obtenção de uma estimativa de do percentual de vapor d’água presente nos três separadores, seria necessária uma simulação (através de *softwares* como o *Aspen Hysys*), ainda

que em termos estáticos, do processo de separação considerando combinações de poços por separador, o que não foi possível realizar para este estudo.

## 5.8.

### Volumes Produzidos, Consumidos e Queimados

Por fim, fez-se uma comparação ilustrativa entre os volumes queimados e consumidos a título de combustível. A figura 19 traz a comparação, que abrange todo o período de 16 meses.

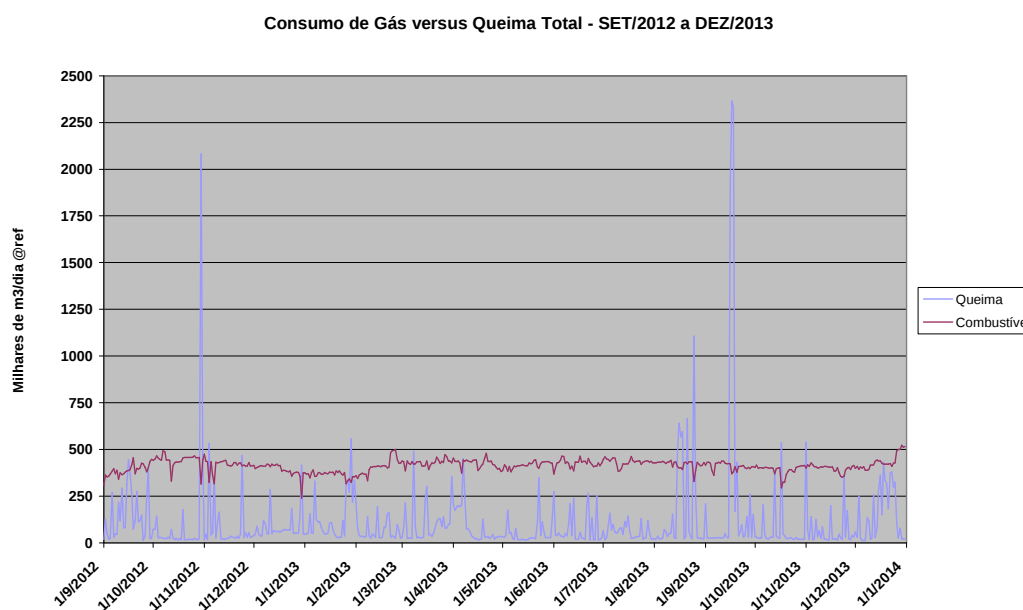


Figura 19 - Comparação entre volumes queimados e consumidos em 16 meses – Plataforma “A”

A figura 19 revela que no acumulado dos 16 meses, o volume queimado equivale a 26,7 % do total consumido no mesmo período, predominantemente para a geração de energia para funcionamento dos processos de produção. A figura 20 apresenta a contribuição das diferentes correntes para a produção: importação, exportação, consumo e queima.

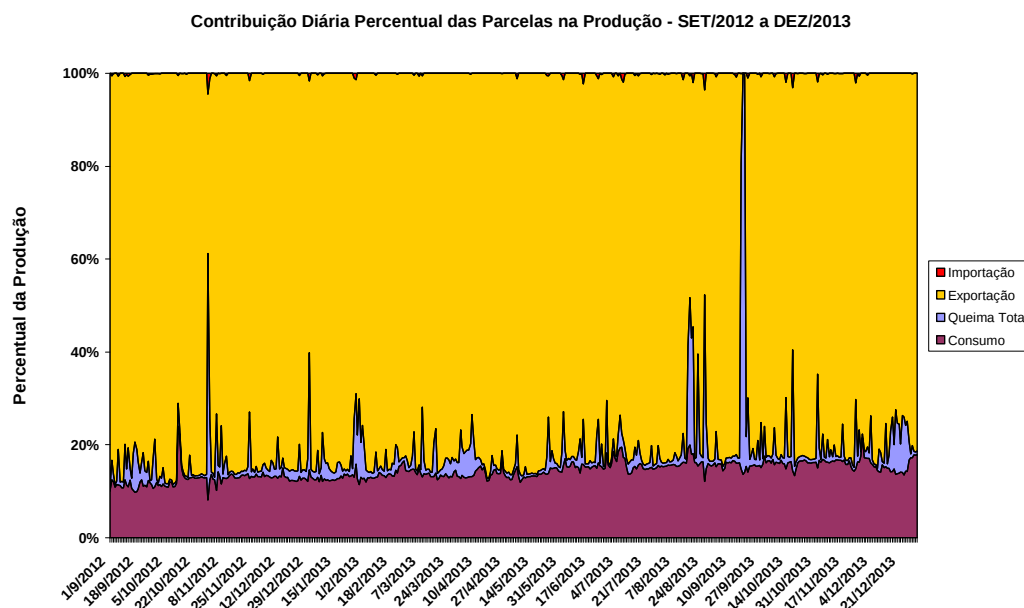


Figura 20 - Contribuição diária das correntes de produção em 16 meses – Plataforma “A”

Uma análise das contribuições diárias indica que o percentual queimado foi equivalente a 3,7 % de toda a produção do período. O consumo equivaleu a 13,9 %, enquanto o desconto de produção promovido pela importação encontrou-se em 0,1 % da produção. Disto resulta um aproveitamento de 82,5 % da produção a título de exportação, ou seja, disponibilidade do gás do ponto de vista comercial.