

**TIAGO ZAMPIERI D'ANDRÉA**

**Reconciliação de dados de uma malha de gasodutos**

São Paulo  
(2016)

**TIAGO ZAMPIERI D'ANDRÉA**

**Reconciliação de dados de uma malha de gasodutos**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para obtenção do título de Mestre em  
Ciências

São Paulo  
(2016)

**TIAGO ZAMPIERI D'ANDRÉA**

**Reconciliação de dados de uma malha de gasodutos**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para obtenção do título de Mestre em  
Ciências

Área de Concentração:  
Engenharia Química

Orientador: Prof. Dr. Ardson dos Santos  
Vianna Junior

São Paulo  
(2016)

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

Assinatura do autor: \_\_\_\_\_

Assinatura do orientador: \_\_\_\_\_

#### Catálogo-na-publicação

D'Andréa, Tiago Zampieri

Reconciliação de dados de uma malha de gasodutos / T. Z. D'Andréa --  
versão corr. -- São Paulo, 2016.

91 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São  
Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1. Engenharia Química 2. Engenharia de Petróleo I. Universidade de São  
Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

Dedico este trabalho à minha esposa, Renata.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Renata, minha esposa, pelo apoio e suporte ao longo do desenvolvimento deste mestrado.

À minha família, pelas bases formadas e pelo incentivo ao aperfeiçoamento intelectual.

Ao Prof. Dr. Ardson dos Santos Vianna Junior, pela orientação ao longo deste trabalho, e ao Prof. Dr. José Luís de Paiva, pelo incentivo e disponibilidade para receber seus alunos e ex-alunos.

Aos amigos e colegas de trabalho da Petrobras, pela ótima equipe e ambiência, em especial na operação da malha de gás, e àqueles que contribuíram diretamente no desenvolvimento da publicação gerada neste trabalho.

À Petrobras, pela oportunidade e incentivo concedidos para a realização do programa de mestrado.

A todos aqueles que apoiaram direta ou indiretamente a realização deste trabalho.

## RESUMO

O trabalho aborda a aplicação da técnica de reconciliação de dados para o balanço da movimentação de gás natural em uma malha de escoamento de gás não processado, elaborando também um método de cálculo rápido de inventário de um duto. Foram aplicadas, separadamente, a reconciliação volumétrica à condição padrão de medição e a reconciliação mássica, bem como realizadas comparações dos resultados em relação ao balanço original e verificação do balanço resultante de energia em termos de poder calorífico superior. Dois conjuntos de pesos foram aplicados, um arbitrado de acordo com o conhecimento prévio da qualidade do sistema de medição de cada um dos pontos, outro baseado no inverso da variância dos volumes diários apurados no período. Ambos apresentaram bons resultados e o segundo foi considerado o mais apropriado. Por meio de uma abordagem termodinâmica, foi avaliado o potencial impacto, ao balanço, da condensação de parte da fase gás ao longo do escoamento e a injeção de um condensado de gás natural não estabilizado por uma das fontes. Ambos tendem a impactar o balanço, sendo o resultado esperado um menor volume, massa e energia de fase gás na saída. Outros fatores de considerável impacto na qualidade dos dados e no resultado final da reconciliação são a qualidade da medição de saída do sistema e a representatividade da composição do gás neste ponto. O inventário é calculado a partir de uma regressão que se baseia em um regime permanente de escoamento, o que pode apresentar maior desvio quando fortes transientes estão ocorrendo no último dia do mês, porém a variação de inventário ao longo do mês possui baixo impacto no balanço. Concluiu-se que a reconciliação volumétrica é a mais apropriada para este sistema, pois os dados reconciliados levam os balanços mássicos e de energia em termos de poder calorífico, ambos na fase gás, para dentro do perfil esperado de comportamento. Embora um balanço volumétrico nulo apenas da fase gás não seja por si só o comportamento esperado quando se considera os efeitos descritos, para desenvolver um balanço mais robusto é necessário considerar as frações líquidas presentes no sistema, agregando maior dificuldade na aquisição e qualidade dos dados.

Palavras chave: Reconciliação de dados. Gás úmido. Escoamento de gás. Gás natural. Inventário. Malha de gasodutos.

## ABSTRACT

This purpose of this study is the application of data reconciliation to the balancing of a wet natural gas network and to develop a quick approach to calculate the gas linepack. Volumetric reconciliation, measured at standard conditions, and mass reconciliation were applied separately, the results were compared to the original balance and the energy balance in terms of gross calorific value was verified. Two sets of weights have been applied, one arbitrated according to the previous knowledge on the quality of the measurement system of each point, another based on the inverse of the variance of the daily volumes in the period. Both showed good results and the second was considered the most appropriate because of its adherence to the literature. Through a thermodynamic approach, the potential impact on the balance of the condensation of the gas phase along the flow and the injection of a not stabilized gas condensate by one of the sources have been evaluated. Both tend to impact the balance, resulting in smaller volume, mass and energy in the gas phase output. Others factors of significant impact in data quality and in the reconciliation results are the quality of the outlet flow measurement and the representativeness of the gas composition at this point. The linepack is calculated from a regression that relies on a steady flow approach, which can present a higher deviation when strong transients are taking place in that period, but the linepack variation over the month has showed low impact on the balance. The study concludes that the volumetric reconciliation is the most suitable for this system, as reconciled data lead the mass and energy balances, both in the gas phase, into the expected pattern of behavior, according to the thermodynamic evaluation. Although a volume balance reaching zero for the gas phase is not the expected behavior when taking into account the effects described, developing a more robust balance would demand to consider the liquid fractions present in the system, which may add more difficulty in the data acquisition and in guarantying its quality.

Keywords: Data reconciliation. Wet gas. Gas flow. Natural gas. Linepack. Gas network.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Malha integrada de escoamento de gás da Bacia de Santos. ....	12
Figura 2 - GASSLED, malha de escoamento de gás no Mar do Norte, administrado pela GASSCO. ....	13
Figura 3 - Escopo do trabalho, representação simplificada na malha de escoamento de gás natural não processado. ....	39
Figura 4 - Esquema do sistema de dutos utilizado na reconciliação de dados. Representação das variáveis medidas e não medidas. ....	40
Figura 5 - Esquema do sistema de dutos com maior complexidade. ....	44
Figura 6 - Balanço de energia da fase gás, em termos de poder calorífico. Balanço original e comparação dos balanços oriundos da reconciliação volumétrica e mássica da fase gás, com os conjuntos de pesos A e B. ....	60
Figura 7 - Balanço volumétrico da fase gás. Balanço original e comparação dos balanços oriundos da reconciliação volumétrica e mássica da fase gás, com os conjuntos de pesos A e B. ....	61
Figura 8 - Balanço mássico da fase gás. Balanço original e comparação dos balanços oriundos da reconciliação volumétrica e mássica da fase gás, com os conjuntos de pesos A e B. ....	62
Figura 9 - Massa específica da fase gás. Comparação entre a média diária global entrega pelas fontes com os valores diários lidos na saída do sistema. ..	63
Figura 10 - Poder calorífico da fase gás. Comparação entre a média diária global entrega pelas fontes com os valores diários lidos na saída do sistema. ..	63
Figura 11 - Avaliação do efeito da condensação da fase gás ao longo do escoamento e da injeção de fase condensado não estabilizado pela fonte $F_1$ . Balanço volumétrico da fase gás. ....	65
Figura 12 - Avaliação do efeito da condensação da fase gás ao longo do escoamento e da injeção de fase condensado não estabilizado pela fonte $F_1$ . Balanço mássico da fase gás. ....	67
Figura 13 - Avaliação do efeito da condensação da fase gás ao longo do escoamento e da injeção de fase condensado não estabilizado pela fonte $F_1$ . Balanço energético (PCS) da fase gás. ....	68
Figura 14 - Comparação dos resultados da reconciliação volumétrica com o potencial de impacto dos efeitos da condensação da fase gás ao longo	

do escoamento e da injeção de fase condensado não estabilizado pela fonte $F_1$ . Balanço mássico da fase gás. ....	73
Figura 15 - Comparação dos resultados da reconciliação volumétrica com o potencial de impacto dos efeitos da condensação da fase gás ao longo do escoamento e da injeção de fase condensado não estabilizado pela fonte $F_1$ . Balanço energético (PCS) da fase gás. ....	74
Figura 16 - Representação das variáveis utilizadas no estudo de inventário. ....	81
Figura 17 - Inventário do duto $V_1$ (fase gás), resultado de simulação em regime permanente. ....	81
Figura 18 - Inventário do duto $V_1$ (fase gás), dados utilizados no estudo. ....	83
Figura 19 - Inventário do duto $V_2$ (fase gás), resultado de simulação em regime permanente. ....	83
Figura 20 - Inventário do duto $V_2$ (fase gás), dados utilizados no estudo. ....	84
Figura 21 - Inventário do duto $V_3$ (fase gás), resultado de simulação em regime permanente. ....	84
Figura 22 - Inventário do duto $V_3$ (fase gás), dados utilizados no estudo. ....	85
Figura 23 - Inventário do duto $V_4$ (fase gás), resultado de simulação em regime permanente. ....	86
Figura 24 - Inventário do duto $V_5$ (fase gás), resultado de simulação em regime permanente. ....	86
Figura 25 - Duto $V_1$ , comparação entre inventário calculado e simulado. ....	89
Figura 26 - Duto $V_2$ , comparação entre inventário calculado e simulado. ....	89
Figura 27 - Duto $V_3$ , comparação entre inventário calculado e simulado. ....	90
Figura 28 - Duto $V_4$ , comparação entre inventário calculado e simulado. ....	90
Figura 29 - Duto $V_5$ , comparação entre inventário calculado e simulado. ....	91

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pesos utilizados em cada cenário de reconciliação de dados. ....	46
Tabela 2 - Cálculo dos pesos através da variância de cada medição. ....	47
Tabela 3 - Limites utilizados para cada variável em reconciliação. ....	47
Tabela 4 - Balanço volumétrico inicial da movimentação de gás. Volumes em m <sup>3</sup> . ...	50
Tabela 5 - Balanço inicial da movimentação de gás, valores em kg. ....	51
Tabela 6 - Resultado da reconciliação de dados do mês de junho. Volumes em m <sup>3</sup> . ...	52
Tabela 7 - Resultado da reconciliação de dados do mês de julho. Volumes em m <sup>3</sup> . ...	53
Tabela 8 - Resultado da reconciliação de dados do mês de agosto. Volumes em m <sup>3</sup> . .....	53
Tabela 9 - Resultado da reconciliação de dados do mês de setembro. Volumes em m <sup>3</sup> . ....	54
Tabela 10 - Resultado da reconciliação de dados do mês de outubro. Volumes em m <sup>3</sup> . ....	54
Tabela 11 - Resultado da reconciliação de dados do mês de novembro. Volumes em m <sup>3</sup> . ....	55
Tabela 12 - Resultado da reconciliação de dados do mês de dezembro. Volumes em m <sup>3</sup> . ....	55
Tabela 13 - Resultado da reconciliação de dados do mês de junho. Valores em kg. ...	56
Tabela 14 - Resultado da reconciliação de dados do mês de julho. Valores em kg. ...	57
Tabela 15 - Resultado da reconciliação de dados do mês de agosto. Valores em kg. .....	57
Tabela 16 - Resultado da reconciliação de dados do mês de setembro. Valores em kg. ....	58
Tabela 17 - Resultado da reconciliação de dados do mês de outubro. Valores em kg. .....	58
Tabela 18 - Resultado da reconciliação de dados do mês de novembro. Valores em kg. ....	59
Tabela 19 - Resultado da reconciliação de dados do mês de dezembro. Valores em kg. ....	59
Tabela 20 - Variáveis utilizadas no estudo de inventário. ....	80
Tabela 21 - Coeficientes para o cálculo de inventário dos dutos V <sub>1</sub> a V <sub>5</sub> . ....	88

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2. OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS</b> .....	<b>14</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
3.1. RECONCILIAÇÃO DE DADOS .....	15
3.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE RECONCILIAÇÃO DE DADOS .....	18
3.3. SISTEMA COM VARIÁVEIS MEDIDAS E NÃO MEDIDAS .....	21
3.4. CASOS DE APLICAÇÃO DA RECONCILIAÇÃO DE DADOS NA INDÚSTRIA 27	
3.5. BALANÇO MATERIAL.....	28
3.6. CÁLCULO DE INVENTÁRIO .....	32
3.7. SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTO .....	36
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>38</b>
4.1. APLICAÇÃO DA RECONCILIAÇÃO DE DADOS .....	45
<b>5. RESULTADOS</b> .....	<b>50</b>
5.1. BALANÇO INICIAL .....	50
5.2. RECONCILIAÇÃO VOLUMÉTRICA .....	52
5.3. RECONCILIAÇÃO MÁSSICA.....	56
5.4. BALANÇO DE ENERGIA EM TERMOS DE PODER CALORÍFICO SUPERIOR E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS .....	60
5.5. IMPACTO DA CONDENSAÇÃO AO LONGO DO ESCOAMENTO.....	64
<b>6. DISCUSSÃO</b> .....	<b>69</b>
<b>7. CONCLUSÃO</b> .....	<b>75</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>77</b>
<b>APÊNDICE A – CÁLCULO DE INVENTÁRIO DE DUTOS</b> .....	<b>79</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A exploração marítima de petróleo tem como característica a utilização de sistemas de dutos de grande extensão para escoamento de gás natural não processado, oriundo das Unidades Estacionárias de Produção (UEP), para processamento em terra, normalmente em uma Unidade de Processamento de Gás Natural e Condensado de Gás natural (UPGN).

Por se tratar do escoamento de gás natural não processado, pode ocorrer condensação de hidrocarbonetos ao longo do escoamento, constituindo um sistema multifásico de escoamento. Alguns sistemas ainda podem receber uma fase líquida de condensado de gás natural oriundo da UEP, utilizando o gasoduto como um meio de transportá-lo até a UPGN.

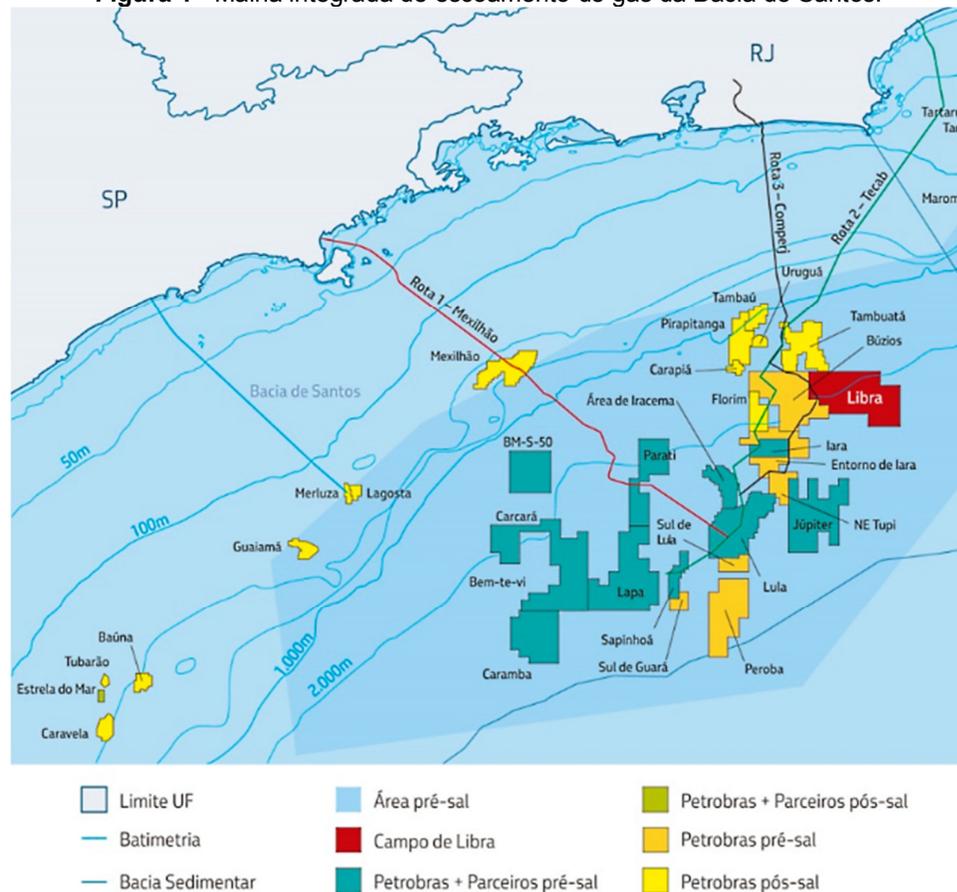
Em termos de unidades interligadas, estas malhas de escoamento normalmente são compostas de múltiplas entradas, podendo conter um único ponto de saída, normalmente representado por uma UPGN, ou múltiplos pontos de saída, compostos por uma ou mais UPGNs e UEPs que importam gás da malha para consumo interno.

Na Bacia de Santos, para desenvolvimento da produção de petróleo nas áreas de pré-sal e pós-sal, está sendo construída uma malha de escoamento integrada, composta de múltiplas entradas e três rotas distintas de saída (UPGNs). Esta infraestrutura é de propriedade da Petrobras e de outras empresas a ela associadas através de Consórcios que constituem Parceria de Produção nas concessões em questão.

A Figura 1 traz um mapa com áreas de produção de petróleo e gás natural da Bacia de Santos, identificando as áreas de pré-sal e pós-sal e destacando a malha de escoamento de gás natural e suas três rotas.

O presente trabalho tem por interesse estudar este sistema de escoamento de gás natural sob o posto de vista de apoio à gestão do negócio, agregando os conhecimentos teóricos necessários para embasar os métodos propostos de aplicação de balanço material na movimentação de gás natural.

**Figura 1** - Malha integrada de escoamento de gás da Bacia de Santos.



Fonte: Petrobras, 2014.

Sistemas com múltiplas entradas e múltiplas saídas são uma realidade comum no seguimento do transporte e distribuição de gás natural. Diferente do sistema alvo deste trabalho, no qual o escoamento multifásico é presente, esses sistemas têm por principal característica, sob o aspecto termo hidráulico, um escoamento monofásico de gás natural processado, cujas características são reguladas pela Resolução ANP nº 16, de 17/06/2008.

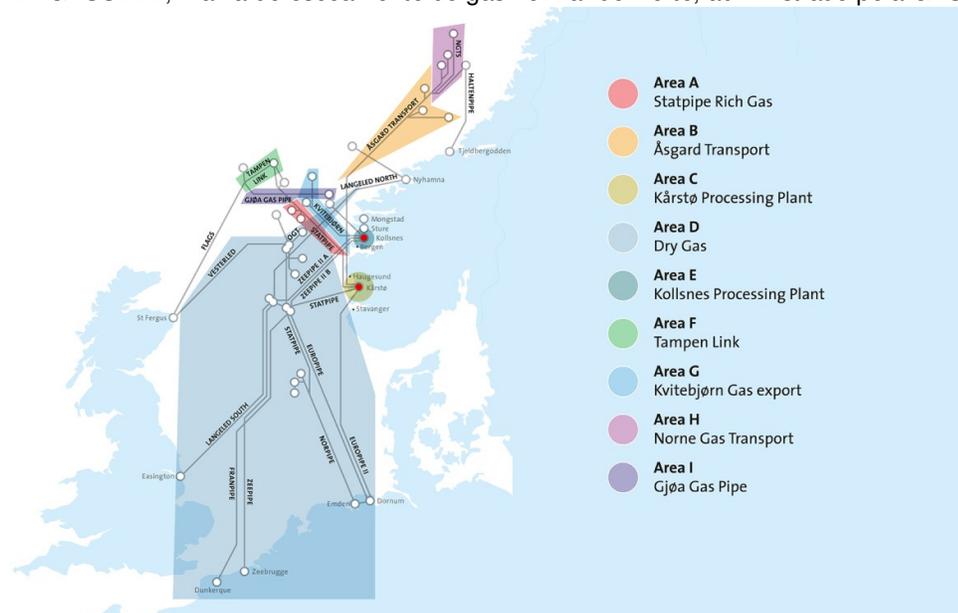
Normalmente os sistemas de transporte e distribuição são compostos por dutos terrestres. No Brasil, a Transpetro, empresa pertencente ao sistema Petrobras, é responsável pela operação de uma malha de transporte de 7107 km de extensão, composta por 28 pontos de recebimento e 133 pontos de entrega. Desta malha, as distribuidoras estaduais recebem o gás natural nos Pontos de Entrega e Transferência do Gás Natural, de onde são responsáveis pela distribuição para os consumidores finais.

Há também sistemas de transporte de gás natural submarinos na literatura de complexidade semelhante ao sistema objeto deste trabalho.

No Mar do Norte, há um sistema denominado GASSLED, administrado pela empresa GASSCO, cuja extensão é de 7975 km e escoo o gás natural associado à produção de petróleo do Mar do Norte, notadamente Noruega e Reino Unido, fornecendo o gás processado para a Noruega, Reino Unido, Alemanha, Bélgica e França.

A sua porção mais complexa, onde se localizam as múltiplas rotas de saída e diversas interligações na malha (área D descrita na Figura 2), caracteriza-se pelo escoamento monofásico de gás natural processado, oriundo da UPGNs, para os mercados consumidores da Europa e Reino Unido.

**Figura 2 - GASSLED, malha de escoamento de gás no Mar do Norte, administrado pela GASSCO.**



Fonte: GASSCO, 2014.

O cenário de Exploração e Produção que se desdobra na Bacia de Santos demanda aplicação de novas regras de negócio sobre o gás natural não processado escoado, dada a sua complexidade e presença das Parcerias de Produção, nas quais mais de uma empresa é proprietária da infraestrutura ou dos fluidos produzidos e escoados.

## 2. OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

O presente trabalho tem por objetivo geral estudar um sistema complexo de escoamento de gás natural não processado sob o ponto de vista de apoio à gestão do negócio, agregando os conhecimentos teóricos necessários para embasar os métodos propostos de aplicação de balanço material na movimentação de gás natural.

Este balanço tem como aplicação o fechamento do escoamento de períodos fiscais, cuja menor unidade é o dia.

Este trabalho tem como objetivos específicos:

- Propor um método de balanço material para uma malha complexa de gasodutos de escoamento de gás natural não processado, aplicando técnicas de reconciliação de dados e simulação de escoamento e processamento de fluidos;
- Avaliar métodos para cálculo rápido de inventário de gás natural dentro de um duto.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A revisão bibliográfica teve como foco pesquisar referências a respeito de técnicas de reconciliação de dados, a serem aplicadas no balanço material do sistema estudado, além de publicações voltadas a sistemas de escoamento de gás natural, bem como exemplos de aplicações na indústria de óleo e gás.

A principal diferença entre sistemas de transporte de gás natural processado, destinado à distribuição ao mercado ou aos consumidores, e de gás natural não processado, cenário das interligações de UEPs a UPGNs, é o fato que o primeiro lida com escoamento monofásico nos dutos, permitindo algumas simplificações não presentes no segundo caso.

Trabalhos sobre o primeiro cenário predominaram no material pesquisado, embora a simplificação de sistema monofásico seja também aplicada em alguns exemplos do segundo caso.

#### **3.1. RECONCILIAÇÃO DE DADOS**

Para a técnica de reconciliação de dados, foram adotados como referência Narasimhan e Jordache (2000), Romagnoli e Sanchez (1999) e Bagajewicz (2010)

As medições de processo são sujeitas a incidência de erros durante as etapas de medição, processamento e transmissão do sinal. O erro total em uma medição, que é a diferença entre o valor medido e o valor real da variável, pode ser representado como a soma da contribuição de dois tipos de erro, os erros aleatórios e erros sistemáticos.

O erro aleatório não possui característica de poder ser predito com acurácia, seja na magnitude ou ocorrência. Um mesmo experimento, conduzido sob as mesmas condições e utilizando os mesmos instrumentos pode ter sua medição diferindo a depender do comportamento do erro aleatório. Uma melhor caracterização deste tipo de erro é obtida com o uso de distribuição de probabilidade.

Estes erros podem ser causados por diversas fontes, desde as condições ambientes a ruído na conversão do sinal. Embora não possam ser totalmente eliminados em uma medição, usualmente correspondem a um componente de alta frequência e baixa magnitude, exceto pela ocorrência de picos esporádicos.

Já os erros sistemáticos são causados por eventos não aleatórios, tais como o mau funcionamento de instrumentos, falta de calibração, falha de comunicação, sensores danificados por desgaste, corrosão ou depósitos. A não aleatoriedade deste erro implica que, em determinado momento, ele terá certa magnitude e sinal que ainda podem ser desconhecidos, mas, se a medição é repetida com os mesmos instrumentos e sob as mesmas condições, a contribuição sistemática deste erro será a mesma.

Os erros sistemáticos podem ser minimizados ou evitados por meio de uma adequada manutenção e calibração dos instrumentos utilizados. Alguns mecanismos causadores destes erros, tais como o desgaste, corrosão e depósitos, possuem a característica de aumentarem a magnitude do erro lentamente durante um longo período.

Portanto, embora o erro sistemático ocorra em uma frequência menor, tipicamente possui magnitude maior que o erro aleatório.

É possível reduzir o efeito do erro aleatório e também eliminar os erros sistemáticos por meio do uso de relações conhecidas entre as diferentes variáveis de um determinado processo. As técnicas de reconciliação de dados e detecção de erros sistemáticos vêm sendo desenvolvidas nas últimas décadas com esse objetivo.

A reconciliação de dados é uma técnica utilizada para promover o ajuste de medições de processo, sujeitas a erro, de modo a obter um conjunto de dados consistente com o balanço material e de energia a que o sistema de interesse está submetido. O uso explícito destas restrições por modelo de processo a diferencia de outras técnicas de filtragem dos dados.

Esta técnica normalmente se baseia na minimização de uma função de mínimos quadrados, sujeita a um sistema de equações, composto pelos balanços citados, assumindo uma distribuição normal dos erros.

Dos dados reconciliados, espera-se que apresentem maior acurácia do que as medições originais, e, sobretudo, sejam consistentes com as relações conhecidas entre as variáveis de processo conforme definido pelas restrições.

Como os erros podem ter natureza diferente da aleatória, técnicas foram desenvolvidas e são aplicadas para identificação de erro sistemático nas medições. Um exemplo de metodologia para identificação de erros sistemáticos é descrito por Alves e Nascimento (2002), onde se utilizou da análise preliminar da base de dados, a fim de eliminar pontos ou grupo de pontos de maior facilidade de identificação como erro sistemático, seguido da aplicação de uma rede neural sobre o conjunto restante para ajudar a identificar os grupos de pontos que não permitiam bom ajuste de dados de saída durante o treinamento da rede, sendo estes grupos submetidos à uma análise de clusters para auxiliar na decisão de sua exclusão.

Para que a reconciliação de dados seja efetiva, não deve haver presença de erros sistemáticos nos dados ou nas restrições do modelo de processo, e, para tal, a detecção de erros sistemáticos é uma técnica que a acompanha. Portanto, ambas devem ser aplicadas em conjunto para melhorar a acurácia do dado medido.

As técnicas exploram a redundância de medições para obter a redução dos erros citados. Dado um sistema ou modelo que relaciona as variáveis de processo, tipicamente uma restrição física como o balanço de massa ou de conservação de energia, um conjunto mínimo de variáveis sem erros de medição é requerido para calcular todos os demais parâmetros e variáveis do sistema. Se houver mais medições do que o mínimo necessário, há redundância nas medições e esta pode ser utilizada.

Este tipo de redundância é normalmente chamado de redundância espacial, e o sistema de equações é dito ser sobredeterminado. A reconciliação de dados não pode ser executada sem redundância espacial, pois, sem nenhuma medição extra, o sistema está simplesmente determinado e nenhuma correção de erros é possível.

Um segundo tipo de redundância existente nas medições de processo é a redundância temporal, devido ao fato destas variáveis serem medidas continuamente e a uma frequência de amostragem alta, disponibilizando mais dados do que o necessário para caracterizar uma condição de regime permanente. Se o processo é assumido como em regime permanente, a redundância temporal pode ser obtida pelo uso de médias das medições e execução de uma reconciliação de dados em regime permanente sobre as variáveis médias.

Se o processo em questão for dinâmico, a sua evolução será descrita por equações diferenciais referentes aos balanços de massa e energia, o que acaba por capturar tanto a redundância espacial quanto a temporal das variáveis medidas. Para estes casos, técnicas de reconciliação de dados em regime transiente e detecção de erros sistemáticos têm sido desenvolvidas para aplicação com os modelos compostos por equações diferenciais do processo.

Técnicas de processamento de sinais e reconciliação de dados podem ser aplicadas em conjunto em processos industriais como parte de uma estratégia integrada conhecida como condicionamento de dados. O tema é abordado em Romagnoli e Sanchez (1999).

### 3.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE RECONCILIAÇÃO DE DADOS

Os itens 3.2 e 3.3 foram desenvolvidos baseando-se no livro de Narasimhan e Jordache (2000).

A reconciliação de dados normalmente se baseia na minimização de uma função de mínimos quadrados, sujeito a um sistema de equações, composto pelos balanços citados, assumindo uma distribuição normal dos erros. Tem como formato:

$$y = x + \varepsilon \quad (1)$$

$$\underset{x}{Min} (y - x)^T W (y - x) \quad (2)$$

$$\text{Tal que } f(x) = 0$$

Onde,

$y$ , é o vetor de medições;

$x$ , é o vetor do valor real das variáveis

$\varepsilon$ , é o vetor de erros de medição aleatórios, seguindo uma distribuição normal e de média igual a zero;

$W$ , é a matriz de pesos;

$f(x)$ , é o conjunto de restrições a serem atendidas.

O conjunto de restrições pode, de forma geral, ser representado por:

$$Ax = 0 \quad (3)$$

Onde,

$A$ , é uma matriz de dimensão  $m \times n$ ;

$x$ , é o vetor do valor real das variáveis, de dimensão  $n \times 1$ ;

$0$ , é o vetor de dimensão  $m \times 1$  cujos elementos são nulos;

$m$ , é o número de equações;

$n$ , é o número de variáveis.

Como o conjunto de restrições usualmente está relacionado ao balanço mássico do sistema, os elementos da matriz  $A$  tipicamente possuem valor 1, -1 ou 0, a depender se a corrente é uma entrada, uma saída ou se não participa do balanço naquele ponto do sistema.

A matriz de pesos,  $W$ , possui dimensão  $n \times n$  e é normalmente uma matriz diagonal, cujos elementos representam os pesos de cada quadrado da diferença entre a variável medida e a variável reconciliada.

Do ponto de vista estatístico, a reconciliação de dados adota que as medições a serem reconciliadas possuem uma distribuição normal, no entanto, deve-se atentar que os valores sendo reconciliados podem não ser oriundos de uma medição direta, mas da transformação de um determinado sinal na variável de interesse.

Caso esta transformação seja não linear, o erro associado à variável a ser reconciliada não apresenta uma distribuição normal. Apenas a forma linearizada pode ser aproximada por uma distribuição normal. Portanto, preferencialmente as variáveis a serem reconciliadas devem ser oriundas de medições diretas, e as relações entre estas e as variáveis de interesse devem ser inclusas nas restrições. Para o caso de restrições não lineares, deve-se utilizar uma técnica de reconciliação de dados não linear.

Do ponto de vista estatístico, a reconciliação requer que a matriz de pesos  $W$  seja a inversa da matriz de covariância  $\Sigma$ , cujas diagonais trazem a variância da variável a ser reconciliada, e assumindo que os demais elementos sejam nulos, ou seja, a covariância seja nula (variáveis não correlacionadas). Porém, os elementos não diagonais, que representam a covariância dos erros, podem não ser nulos. Para estes casos, Narasimhan e Jordache (2000) discorrem sobre a abordagem a ser tomada.

A solução analítica do problema pode ser obtida por meio da derivada da função objetivo, expressa na eq.(2), com as restrições incorporadas. Aplicando o método de multiplicadores de Lagrange, é obtido:

$$\hat{x} = y - W^{-1} A^T (A W^{-1} A^T)^{-1} A y \quad (4)$$

Onde,

$\hat{x}$ , é a solução do problema de otimização.

Nesta solução, é assumido que a matriz  $A$  possui apenas linhas linearmente independentes.

Caso a eq.(3) não seja igual a zero, mas a um vetor  $c$ , a solução assume o valor de  $A y - c$  no lugar de  $A y$  na equação eq.(4).

O equacionamento apresentado satisfaz as restrições impostas ao sistema, mas, na prática, as variáveis reconciliadas podem possuir limites. Como estes limites não foram fornecidos no equacionamento das restrições, eles podem não serem satisfeitos, como, por exemplo, a ocorrência de valores negativos inviáveis

fisicamente. A única forma de conter este problema é impor às variáveis os limites adequados como novas restrições, no entanto, a solução analítica não pode ser mais obtida.

### 3.3. SISTEMA COM VARIÁVEIS MEDIDAS E NÃO MEDIDAS

Para sistemas com presença de variáveis não medidas, a abordagem utilizada é a decomposição do problema de reconciliação em dois subproblemas. O primeiro problema é a reconciliação das variáveis medidas e com redundância, seguido do cálculo de estimativas para as variáveis observáveis não medidas.

Sendo  $p$  o número de variáveis não medidas, as variáveis são classificadas em variáveis medidas, representadas pelo vetor  $x$ , e variáveis não medidas, representadas pelo vetor  $u$ . As restrições a que o sistema está submetido são então reescritas:

$$A_x x + A_u u = 0 \quad (5)$$

Onde,

$A_x$ , é uma matriz de dimensão  $m \times n$ , cujas colunas correspondem às variáveis medidas;

$A_u$ , é uma matriz de dimensão  $m \times p$ , cujas colunas correspondem às variáveis não medidas.

As variáveis não medidas, representadas pelo vetor  $u$ , devem ser eliminadas da eq.(5) por meio da combinação linear das restrições. Isto equivale a obter uma matriz de projeção  $P$  que satisfaça a propriedade:

$$P A_u = 0 \quad (6)$$

Ao multiplicar a eq.(5) pela matriz de projeção  $P$ , o resultante é um sistema de equações com apenas as variáveis medidas:

$$PA_x x = 0 \quad (7)$$

A matriz P deve possuir m colunas, ou seja, igual ao número de restrições. O número de linhas linearmente independentes de P é igual a t, que por sua vez está ligado à observabilidade das variáveis não medidas.

Uma variável é dita observável se ela pode ser estimada a partir de outras variáveis medidas e de restrições de processo em regime permanente. Por sua vez, a variável é redundante quando ela é observável mesmo quando sua medição é removida do conjunto.

Se todas as variáveis não medidas forem observáveis, o valor de t será igual a m – p. Esta conclusão pode ser observada pelo fato de t ser igual ao número de restrições no conjunto reduzido de restrições dado pela eq.(7).

Se todas as p variáveis não medidas podem ser unicamente estimadas, então são necessárias p equações de restrição (sistema determinado). Logo m – p restrições estarão disponíveis para a reconciliação das variáveis medidas.

Para que todas as variáveis não medidas sejam observáveis, também pode ser demonstrado que as p colunas de  $A_u$  devem ser linearmente independentes.

Se nem todas as variáveis não medidas forem observáveis, o valor de t será igual a m – s, onde s é o número de colunas linearmente independentes de  $A_u$ .

Como consequência, algumas das variáveis não medidas necessitarão de especificações adicionais para que possam ser estimadas, ou seja, para que se obtenha uma solução única. Seja p – s o número de variáveis não medidas que demandam uma especificação adicional, logo serão necessários s restrições para a resolução das demais variáveis não medidas, resultando em m – s restrições para a reconciliação das variáveis medidas.

O número de restrições que restaram no sistema reduzido, dado pela eq.(7), é chamado de grau de redundância.

A resolução do problema de reconciliação de dados com o sistema reduzido é dado ainda pela eq.(4), porém substituindo a matriz A por  $PA_x$ :

$$\hat{x} = y - W^{-1}(PA_x)^T \left[ (PA_x)W^{-1}(PA_x)^T \right]^{-1} (PA_x)y \quad (8)$$

Obtido o vetor x pela eq.(8), utiliza-se a eq.(5) para a obtenção das variáveis observáveis não medidas, dado que todas são observáveis (colunas de  $A_u$  linearmente independentes):

$$\hat{u} = -(A_u^T A_u)^{-1} (A_u^T \hat{x}) \quad (9)$$

Para a obtenção da matriz de projeção P, Romagnoli e Sanchez (1999) utilizam a fatoração QR da matriz  $A_u$ .

Considerando que todas as colunas da matriz  $A_u$  sejam linearmente independentes, é possível decompor  $A_u$  como:

$$A_u = QR\Pi_u = \begin{bmatrix} Q_1 & Q_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ 0 \end{bmatrix} \Pi_u \quad (10)$$

Onde,

$\Pi_u$ , é a matriz de permutação, dimensão p x p;

$R_1$ , é uma matriz não singular e triangular superior, de dimensão p x p;

$Q$ , é uma matriz ortogonal, de dimensão m x m.

Sendo Q uma matriz ortogonal, tem-se:

$$Q^T Q = I \quad (11)$$

As colunas de  $Q$  formam a base de um espaço de dimensão  $m$ , enquanto  $R_1$  representa as  $p$  colunas de  $A_u$  em termos dos  $p$  primeiros vetores da base, representados por  $Q_1$ . Como a matriz  $Q$  é ortogonal, a matriz  $Q_2$  possui a propriedade:

$$Q_2^T A_u = Q_2^T [Q_1 \quad Q_2] \begin{bmatrix} R_1 \\ 0 \end{bmatrix} \Pi_u = [0 \quad I] \begin{bmatrix} R_1 \\ 0 \end{bmatrix} \Pi_u = 0 \quad (12)$$

Pela eq.(12), observa-se que a matriz de projeção  $P$  desejada será a matriz  $Q_2^T$ .

A fatoração QR pode ainda auxiliar na obtenção do vetor  $u$ , reescrevendo-se a eq.(5):

$$A_x x + QR \Pi_u u = 0 \quad (13)$$

Na eq.(13),  $\Pi_u u$  corresponde ao vetor  $u$  reordenado. Multiplicando-se a mesma equação por  $Q^T$ :

$$Q^T A_x x + R \Pi_u u = 0 \quad (14)$$

Rearranjando:

$$R \Pi_u u = -Q^T A_x x \quad (15)$$

Utilizando a eq.(10) na eq.(15), tem-se:

$$\begin{bmatrix} R_1 \\ 0 \end{bmatrix} \Pi_u u = - \begin{bmatrix} Q_1^T \\ Q_2^T \end{bmatrix} A_x x \quad (16)$$

Ou,

$$R_1 \Pi_u u = -Q_1^T A_x x \quad (17)$$

Sendo  $R_1$  uma matriz triangular superior de dimensão  $p \times p$ , a eq.(17) pode ser resolvida facilmente por uma substituição sucessiva para obtenção do vetor  $u$ :

$$\Pi_u u = -R_1^{-1} Q_1^T A_x x \quad (18)$$

Caso existam variáveis não observáveis, ou seja, com apenas  $s$  colunas independentes de  $A_u$ , a aplicação da fatoração QR tem o seguinte aspecto:

$$A_u = QR\Pi_u = [Q_1 \quad Q_2] \begin{bmatrix} R_1 & R_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \Pi_u \quad (19)$$

Onde,

$R_1$ , é uma matriz não singular e triangular superior, de dimensão  $s \times s$ ;

$R_2$ , é uma matriz de dimensão  $s \times (p - s)$ .

A matriz de projeção  $P$  continua sendo dada pela matriz  $Q_2^T$ . Já o conjunto de variáveis não medidas pode ser dividido em dois subconjuntos, de  $s$  variáveis observáveis e  $p - s$  variáveis não observáveis.

$$\Pi_u u = \begin{bmatrix} u_s \\ u_{p-s} \end{bmatrix} \quad (20)$$

A fim de aplicar a fatoração QR para obter a estimativa das variáveis observáveis não medidas, substitui-se a matriz  $R$  na eq. (15) utilizando a eq.(19) e  $\Pi_u u$  através da eq.(20):

$$\begin{bmatrix} R_1 & R_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_s \\ u_{p-s} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Q_1^T \\ Q_2^T \end{bmatrix} A_x x \quad (21)$$

Rearranjando, tem-se:

$$R_1 u_s + R_2 u_{p-s} = -Q_1^T A_x x \quad (22)$$

Como a matriz  $R_1$  é não singular, ou seja, é invertível, tem-se:

$$u_s = -R_1^{-1} (Q_1^T A_x x + R_2 u_{p-s}) \quad (23)$$

A eq.(23) mostra que a estimativa das  $s$  primeiras variáveis observáveis não medidas podem ser obtidas apenas se forem fornecidas estimativas para as outras  $p - s$  variáveis não observáveis.

A aplicação da fatoração QR, além de facilitar a resolução, auxilia na identificação de variáveis não observáveis dentro do conjunto de variáveis não medidas.

Ainda sobre classificação de variáveis não medidas, a eq.(23) pode ser rearranjada como:

$$u_s = -R_1^{-1} Q_1^T A_x x - R_u u_{p-s} \quad (24)$$

Seja:

$$R_u = R_1^{-1} R_2 \quad (25)$$

Se uma linha de  $R_u$  possui apenas elementos nulos, a variável não medida correspondente do vetor  $u_s$  pode ser obtida com apenas as estimativas de  $x$ , e é, portanto, observável. Já se uma linha de  $R_u$  possui algum elemento não nulo, a variável não medida correspondente do vetor  $u_s$  é não observável e depende das estimativas das  $p - s$  variáveis não medidas (vetor  $u_{p-s}$ ). Todas as variáveis do vetor  $u_{p-s}$  são não observáveis, uma vez que dependem de uma especificação extra para serem obtidas.

Já a respeito da redundância de uma variável, pode-se analisar a matriz reduzida de restrições, dada por  $Q_2^T A_x$ . Uma variável medida redundante será reconciliada no problema, mas uma variável medida não redundante não terá seu valor alterado na

reconciliação, já que não pode ser estimada a partir das demais variáveis medidas, e a coluna a que ela corresponde na matriz reduzida terá todos os elementos iguais a zero.

### **3.4. CASOS DE APLICAÇÃO DA RECONCILIAÇÃO DE DADOS NA INDÚSTRIA**

Weiss, Romagnoli e Islam (1996) aplicaram a reconciliação de dados em um reator industrial de pirólise, por meio também de balanços simplificados de massa e quantidade de movimento, resolvidos por meio de linearizações sucessivas. O trabalho utilizou dados da unidade industrial coletados em intervalos regulares de tempo. Foi aplicado um teste global para identificação de erros sistemáticos, de forma a eliminá-los da base de dados.

Como resultados obtidos, o coeficiente global de transferência de calor calculado por meio da reconciliação de dados apresentou uma tendência consistente com a experiência de operação da unidade e pode ser utilizado para otimização dos ciclos de regeneração do reator.

Bagajewicz e Cabrera (2003) aplicam a reconciliação de dados em um sistema de escoamento de gás natural, utilizando balanços mássicos e de quantidade de movimento. O equacionamento do escoamento foi simplificado no modelo proposto, por meio da adoção de escoamento incompressível e descarte dos termos de aceleração.

Também foi analisado o impacto do erro da medição da temperatura, utilizado para correção da medição de volume de gás escoado em cada ponto de medição e conclui que apenas grandes erros nesta leitura trarão algum impacto significativo sobre o algoritmo proposto de reconciliação de dados.

Outra aplicação em escoamento de gás natural para a reconciliação de dados com informações coletadas em tempo real é a detecção de vazamentos.

Geiger (2006) faz um levantamento do estado da arte em detecção de vazamento e sua localização, apresentando-os em duas categorias, os sistemas baseados em dados internos e os em dados externos.

Fukushima et al (2000) descrevem a aplicação do sistema no gasoduto Niigata - Sendai, no Japão. O sistema se baseia nas leituras de pressão e temperatura em cada estação de válvulas ao longo do duto, aplicando uma abordagem de escoamento transiente. Embora não tenha sido validado contra um vazamento real, acredita-se que tenha contribuído para sua operação segura.

### 3.5. BALANÇO MATERIAL

O balanço material do sistema de escoamento de gás deve seguir a conservação de massa, portanto, para um determinado período “j” e considerando-se o regime permanente, pode ser escrito como:

$$\text{Período "j": } \sum_{i=1}^a me_{i,j} - \sum_{i=1}^b ms_{i,j} + \sum_{i=1}^c (D_{i,j-1} - D_{i,j}) = 0 \quad (26)$$

Onde,

$me$ , é a quantidade de massa entregue pelos pontos de entrada do sistema;

$ms$ , é a quantidade de massa retirada pelos pontos de saída do sistema;

$D$ , é o inventário de cada duto do sistema, em massa;

$a$ , é a quantidade de pontos de entrada;

$b$ , é a quantidade de pontos de saída;

$c$ , é a quantidade de dutos do sistema.

Porém, os dados disponíveis para a realização deste balanço estão em base volumétrica.

As medições de vazão deste sistema normalmente correspondem a pontos de medição fiscal ou de transferência de custódia, sendo de competência da Agência

Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) a regulação e normatização destas estações de medição. Estas medições são regidas pelo Regulamento Técnico de Medição de Petróleo e Gás Natural (RTM), cuja versão em vigor se refere à resolução conjunta ANP/INMETRO N<sup>o</sup> 1, de 10 de junho de 2013.

De acordo com o RTM, uma medição fiscal é toda medição utilizada no cômputo da totalização das Participações Governamentais, inclusive as medições utilizadas no cálculo das Participações Especiais. Uma medição de transferência de custódia é a medição do volume de petróleo ou gás natural, movimentado com transferência de custódia, nos pontos de entrega e recebimento. Por sua vez, a transferência de custódia é a transferência legal e/ou comercial de fluidos hidrocarbonetos.

O RTM define os tipos de instrumentos aplicáveis para a medição de vazão, bem como a classe de exatidão e incerteza da medição para cada tipo de aplicação e a Gestão Metrológica para que estes requisitos sejam atendidos e auditáveis. Nele também é definida a condição padrão de medição, condição em que a pressão absoluta é de 0,101325 MPa e a temperatura de 20 °C, para a qual o volume mensurado do líquido ou do gás é convertido. Para a medição de gás, a incerteza máxima permitida para as medições do tipo fiscal e do tipo transferência de custódia é de 1,5%.

De acordo com INMETRO (2012), a incerteza da medição é um parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser atribuídos ao mensurando. Dado que a medição não provê o valor real do mensurando mas a melhor estimativa deste, a incerteza de medição caracteriza uma faixa de dispersão ou intervalo no entorno do valor real do mensurando em que se espera que esteja localizado o resultado da medição. Este conceito não deve ser confundido com o erro, pois este trata de um valor pontual, algo que pode usualmente ser corrigido por meio da aplicação de fator de correção adequado.

Ainda segundo INMETRO (2012), a incerteza de medição geralmente compreende muitos componentes. Alguns podem ser estimados com base na distribuição estatística dos resultados de séries de medições, podendo ser caracterizados por desvios-padrão experimentais. Outros, que também podem ser caracterizados por

desvios-padrão, são avaliados por meio de distribuições de probabilidade, estas elencadas com base na experiência ou em outras informações disponíveis.

A medição de vazão da fase gás utiliza basicamente dois tipos de instrumentos, a medição por placas de orifícios e a medição do tipo ultrassônica. Ambas têm como saída o volume de gás à condição padrão de medição, e utilizam para tal um computador de vazão que atualiza em tempo real as condições locais de temperatura e pressão, a fim de corrigi-las para as condições padrões de medição.

A depender das características do ponto de medição, este pode também dispor de correção por cromatografia em linha da fase gás, porém são utilizados normalmente em instalações terrestres, sendo que, nas plataformas de produção de petróleo, a composição que é alimentada no computador de vazão possui rotina de atualização mensal, seguindo os requisitos mínimos do RTM.

Estes computadores de vazão normalmente possuem configuração para que seja fornecida a medição em base mássica, mas tipicamente os valores são reportados e registrados na base volumétrica, visto que essa é a base descrita pelo RTM.

Para medições de correntes líquidas, os pontos de medição fiscal ou de transferência de custódia também possuem como requisitos a correção por pressão e temperatura, a fim de reportar os volumes à condição padrão de medição. São utilizados com maior frequência os medidores de vazão do tipo placas de orifício, medidores ultrassônicos e os de deslocamento positivo, como as turbinas.

A fim de converter os dados disponíveis, o balanço em base mássica irá demandar uma massa molar média do gás para o período em questão, uma estimativa de massa molar média para cada duto, bem como uma massa específica média para as fases líquidas eventualmente medidas. Nos pontos em que não houver uma composição média diária, serão aplicadas as disponíveis.

Admitindo-se que não ocorre reação química no escoamento, pode-se utilizar o balanço molar macroscópico estacionário. Para um período “j”, pode ser escrito como:

$$\text{Período "j": } \sum_{i=1}^a ne_{i,j} - \sum_{i=1}^b ns_{i,j} + \sum_{i=1}^c (N_{i,j-1} - N_{i,j}) = 0 \quad (27)$$

Onde,

$ne$ , é a quantidade de mols entregue pelos pontos de entrada do sistema;

$ns$ , é a quantidade de mols retirada pelos pontos de saída do sistema;

$N$ , é o inventário de cada duto do sistema, em mols;

$a$ , é a quantidade de pontos de entrada;

$b$ , é a quantidade de pontos de saída;

$c$ , é a quantidade de dutos do sistema.

O volume molar da fase gás pode ser calculado através da lei dos gases ideais:

$$\rho_n = \frac{n}{V} = \frac{P}{zRT} \quad (28)$$

Da eq.(28) e com a aplicação da massa molar ( $M$ ), a massa específica da fase gás em qualquer condição pode ser calculado através da equação:

$$\rho_m = \frac{m}{V} = \frac{PM}{zRT} \quad (29)$$

A abordagem de balanço molar é bastante vantajosa para a fase gás, pois, nas condições padrões de medição (0,101325 MPa e 20 °C), o fator de compressibilidade, única variável que depende da composição na eq.(28), é igual a 1, ou seja, pode ser considerado gás ideal.

Dividindo-se a eq.(27) pelo volume molar do gás à condição padrão de medição, chega-se ao balanço volumétrico da fase gás, dado por:

$$\text{Período "j": } \sum_{i=1}^a F_{i,j} - \sum_{i=1}^b S_{i,j} + \sum_{i=1}^c (V_{i,j-1} - V_{i,j}) = 0 \quad (30)$$

Onde,

$F$ , é o volume entregue pelos pontos de entrada;

- S, é o volume retirado pelos pontos de saída;
- V, é o inventário de cada duto do sistema, em volume;
- a, é a quantidade de pontos de entrada do sistema;
- b, é a quantidade de pontos de saída do sistema;
- c, é a quantidade de dutos do sistema.

### 3.6. CÁLCULO DE INVENTÁRIO

O inventário de um gasoduto se refere ao volume de gás ali presente, nas condições padrão de medição. Diferente dos pontos de medição de vazão, o termo de inventário não é regido por legislação específica e sua determinação advém da aplicação dos conceitos de escoamento de gases compressíveis.

Schroeder (2001) apresenta um tutorial das principais equações utilizadas para escoamento dentro de um tubo. Coelho e Pinho (2007) trazem uma discussão sobre as particularidades das equações de perda de carga em uso para o projeto de gasodutos, bem como Mcallister (2013) e Menon (2005) reúnem as principais informações do tema sob o ponto de vista de aplicação prática em problemas de engenharia.

O presente trabalho tem por objetivo comparar alguns meios de cálculo deste inventário presente na literatura. Uma comparação entre três métodos de cálculo rápido de inventário foi realizada pelo autor (D'ANDREA et al., 2015) e o método escolhido é apresentado no Apêndice A.

O inventário pode ser obtido de forma simplificada pelo desdobramento da Lei dos Gases Ideais modificada para gases reais, isto é, aplicando-se o fator de compressibilidade:

$$PV = znRT \quad (31)$$

$$\begin{aligned}
P_{REF} V_{REF} &= z_{REF} n R T_{REF} \\
P_M V_H &= z_M n R T_M \\
V_{REF} &= \frac{z_{REF} T_{REF} P_M V_H}{z_M T_M P_{REF}}
\end{aligned} \tag{32}$$

Onde,

$P_{REF}$  e  $T_{REF}$ , são a pressão e temperatura na condição padrão de medição;

$z_{REF}$ , é o fator de compressibilidade à condição padrão de medição;

$V_{REF}$ , é o inventário calculado à condição padrão de medição;

$P_M$  e  $T_M$ , são a pressão e temperatura médias do duto;

$z_M$ , é o fator de compressibilidade médio do duto;

$V_H$ , é o volume hidráulico do sistema do duto.

Rearranjando os termos da eq.(32), pode-se destacar aqueles que trazem a informação média do duto.

$$V_{REF} = V_H \left( \frac{z_{REF} T_{REF}}{P_{REF}} \right) \left( \frac{P_M}{z_M T_M} \right) \tag{33}$$

Para os termos médios do duto, algumas simplificações são tipicamente adotadas, tais como:

- Média de cada parâmetro individualmente, por meio dos valores lidos na entrada (índice 1) e na saída (índice 2):

$$\frac{P_M}{z_M T_M} = 2 \frac{(P_1 + P_2)}{(z_1 + z_2)(T_1 + T_2)} \tag{34}$$

- Média do termo calculado na entrada e na saída:

$$\frac{P_M}{z_M T_M} = 0.5 \left( \frac{P_1}{z_1 T_1} + \frac{P_2}{z_2 T_2} \right) \tag{35}$$

No entanto, como verificado em Macallister (2013) e Menon (2005), na literatura é comum utilizar-se a simplificação de escoamento em duto horizontal e escoamento incompressível. Para tal cenário, é comum o uso da eq.(36) para a pressão média do duto:

$$P_M = \frac{2}{3} \left( P_1 + P_2 - \frac{P_1 \cdot P_2}{P_1 + P_2} \right) = \frac{2}{3} \left( \frac{P_1^3 - P_2^3}{P_1^2 - P_2^2} \right) \quad (36)$$

Como exemplo de aplicação, esta pressão média foi usada ao longo do estudo de Keyaerts et al (2001).

Em seguida, para o cálculo do inventário, adota-se uma simplificação para a temperatura média, tais como:

- Média aritmética entre temperatura na entrada e saída;
- Evolução politrópica, conforme a eq.(37):

$$P \cdot v^n = C \quad (37)$$

Onde,

$P$  , é a pressão;

$v$  , é o volume específico do gás;

$n$  , é o coeficiente politrópico, que pode variar de 1 (escoamento isotérmico) a

$\gamma = C_p / C_v$  (escoamento isoentrópico);

$C$  , é uma constante;

Ettouney e El-Rifai (2009) propõem um equacionamento baseado na abordagem de evolução politrópica, porém com o coeficiente sendo calculado através dos demais termos conhecidos na entrada e saída do duto, pela equação:

$$T_2 = T_1 \left( \frac{Z_1}{Z_2} \right) \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1-n}{n}} \quad (38)$$

Em seguida, propõe uma integração do termo  $\frac{PT}{z}$ , porém o fator de compressibilidade como constante e igual a seu valor médio entre entrada e saída, chegando a:

$$\lambda_{approx} = \frac{1}{L} \int \frac{PT}{z} dl = \frac{\frac{n}{n+2} a \left( \frac{P_1^3}{T_1^2} - \frac{P_2^3}{T_2^2} \right) - \left( -\frac{P_1}{T_1} - \frac{P_2}{T_2} \right)}{\frac{n}{n+1} a \left( \frac{P_1^2}{T_1} - \frac{P_2^2}{T_2} \right) - \frac{1}{n} \ln \frac{P_1}{P_2}} \cdot \frac{2}{Z_1 + Z_2} \quad (39)$$

$$\text{Com } a = \frac{M}{Z \cdot R} \left( \frac{A}{G} \right)^2$$

Katz (1959) calcula a capacidade de armazenamento de gás em um duto a partir da equação de Clinedinst, adotando uma equação que leva em consideração a variação da compressibilidade do gás com a pressão. Este volume, em condições de escoamento isotérmico, é dado pela eq.(40).

$$V_0 = \frac{ALz_0 T_0 P_c}{P_0 T} \frac{\int_0^{P_{r,1}} \left( \frac{P_r}{z} \right)^2 dP_r - \int_0^{P_{r,2}} \left( \frac{P_r}{z} \right)^2 dP_r}{\int_0^{P_{r,1}} \left( \frac{P_r}{z} \right) dP_r - \int_0^{P_{r,2}} \left( \frac{P_r}{z} \right) dP_r} \quad (40)$$

Onde,

$V_0$ , é o volume de gás no duto, medido à  $T_0$  e  $P_0$ , em m<sup>3</sup>;

$A$ , é a área da seção do duto, em m<sup>2</sup>;

$L$ , é o comprimento do duto, em m;

$T$ , é a temperatura média do escoamento, em K;

$P_c$ , é a pressão pseudocrítica do gás, em Pa;

$P_0$ , é a pressão de referência, em Pa;

$T_0$ , é a temperatura de referência, em K.

Os valores das integrais de  $\int_0^{P_r} \left(\frac{P_r}{z}\right)^2 dP_r$  e  $\int_0^{P_r} \left(\frac{P_r}{z}\right) dP_r$  podem ser obtidos de tabelas presentes em Katz (1959).

Já Nørstebø (2008) adota, em sua tese, o conceito de envelope de operação. Por meio de uma série de simulações rigorosas de escoamento em regime permanente, o autor reúne os resultados obtidos para dois cenários, um de máximo e outro de mínimo inventário e os compila dentro de um envelope em função da vazão em regime permanente.

### 3.7. SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTO

O trabalho de Bagajewicz e Cabreara (2003) aplica as equações de conservação de quantidade de movimento na reconciliação de dados de um sistema de escoamento de gás natural.

Woldeyohannes e Majid (2011) desenvolvem um trabalho voltado a simular uma malha de escoamento de gás natural, com presença de loops e compressores para a movimentação do gás. O objetivo do trabalho foi prover uma ferramenta para comparar o consumo energético de diferentes configurações de operação do sistema.

O aumento do poder computacional disponível a um custo relativamente baixo e a maior disponibilidade de dados de processo e sua aquisição e visualização em tempo real permitiram o desenvolvimento de várias aplicações de simulação rigorosa e em tempo real, tanto para apoio à operação, quanto para suporte a gestão do negócio. Diversos são os exemplos na literatura de tais aplicações e ganhos.

Al-Rasheed et al (2011) relatam os requisitos e características da implantação de um sistema de simulação para a malha de escoamento de gás operada pela Saudi Aramco na Arábia Saudita, sistema chamado Master Gas System (MGS).

Reed et al (2006) apresentam um estudo de caso da implantação de sistema de simulação de escoamento para a malha de transporte de gás natural operada pela Transpetro, no Brasil. No trabalho, destaca-se a existência de dois modelos, um

trabalhando em tempo real e com simulação rigorosa do escoamento, para atendimento à esfera operacional; e outro para estudo de caso, também chamado de what-if, para uso na validação da programação do escoamento de gás.

Velde et al (2013) apresentam as características do novo sistema de simulação de escoamento para atendimento à malha operada pela GASSCO no Mar do Norte, sistema denominado GASLED. Trata-se de uma atualização em relação ao sistema anterior, que por sua vez acumulou mais de uma década de experiência entre desenvolvimento e utilização.

D'Andrea et al (2015) descrevem a implementação de um sistema de simulação de escoamento transiente, multifásico e em tempo real, tendo como cenário de aplicação a malha de escoamento de gás não processado da Bacia de Santos.

Rotava et al (2015) apresentam a aplicação de simulação de escoamento transiente e em tempo real para melhoria do rastreamento de volumes de gás de diferente composição e acompanhamento de um determinado componente ao longo do escoamento – o gás carbônico, no exemplo citado pelo trabalho. Tal sistema, que possui como cenário a mesma malha citada da Bacia de Santos, também é aplicado para melhorias no cálculo do inventário de gás.

De modo geral, os ganhos relatados pelo uso destes sistemas denominados Pipeline Management System (PMS) são melhoria na eficiência e segurança operacional, redução do gasto de energia na movimentação do gás natural, melhor previsão do inventário de gás do sistema, estimação de parâmetros como tempo de sobrevida mediante diversos cenários de contingência, melhoria dos processos referentes ao planejamento do escoamento ao prover uma maior ligação entre a realidade operacional e as regras de negócio, rastreamento de variações na composição do gás, como picos de contaminantes e estimativa de chegada de volume de gás não especificado a um determinado ponto.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de realizar a reconciliação do balanço de movimentação de gás natural em uma malha de gasodutos, neste capítulo são apresentados o sistema de interesse e o algoritmo proposto.

As Unidades Estacionárias de Produção (UEP), também conhecidas como plataformas de produção de petróleo e gás natural, estão interligadas ao sistema de escoamento de gás. Estas unidades realizam o processamento primário do petróleo produzido, estabilizando-o dentro dos parâmetros requeridos para envio para processamento posterior em terra.

O gás natural produzido passa também por um tratamento, a fim de especificá-lo dentro do teor de umidade admissível para o escoamento e também para remoção de contaminantes, conforme o arranjo de projeto de unidade, que pode contemplar remoção de gás carbônico e de sulfeto de hidrogênio, por exemplo. Após o tratamento, esta corrente de gás passa por estágios de compressão, de onde é exportada para o gasoduto. Parte deste gás pode ser utilizado para consumo interno, como gás combustível, para uso na elevação artificial de petróleo (gas lift) ou para reinjeção na rocha reservatório visando reposição da pressão, uma técnica de recuperação secundária de petróleo.

Uma malha de escoamento possui tipicamente múltiplas entradas e pelo menos uma saída, sendo esta normalmente uma unidade de processamento de gás natural (UPGN) em terra.

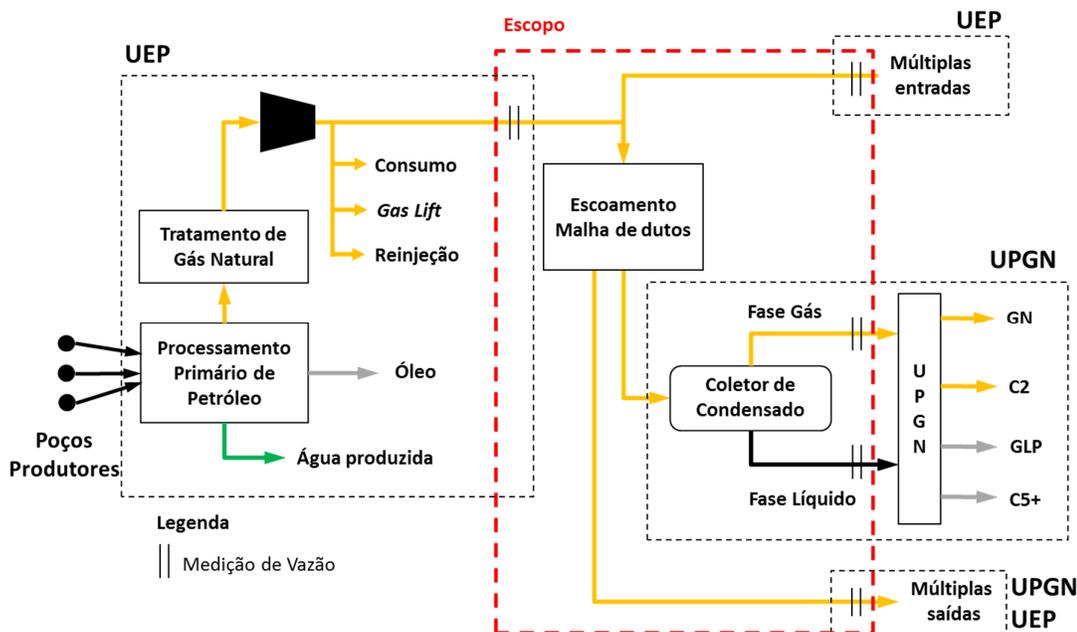
Em uma UPGN, tipicamente a primeira facilidade a montante do processamento será um coletor de condensado, composto por tubos horizontais de grande diâmetro e extensão, compondo um grande vaso separador horizontal.

O processamento tem por finalidade especificar o gás natural conforme a Resolução ANP nº 16, de 17/06/2008. Os líquidos de gás natural recuperados são fracionados em GLP e gasolina natural (C5+). A depender das facilidades da unidade, pode haver

ainda separação de uma corrente de etano de alta pureza, que pode ser utilizada para fins petroquímicos.

O presente trabalho tem como escopo o sistema de escoamento, delimitado pela linha vermelha tracejada na Figura 3. A interface com os pontos de entrada consiste nas informações referentes à medição de gás exportado, a interface com os pontos de saída, na medição de gás importado quando se tratar de UEP importadora de gás - ou seja, unidade consome gás oriundo da malha de gasodutos, ou nas medições de gás e líquidos contidas nas saídas do coletor de condensado quanto se tratar de uma UPGN.

**Figura 3** - Escopo do trabalho, representação simplificada na malha de escoamento de gás natural não processado.



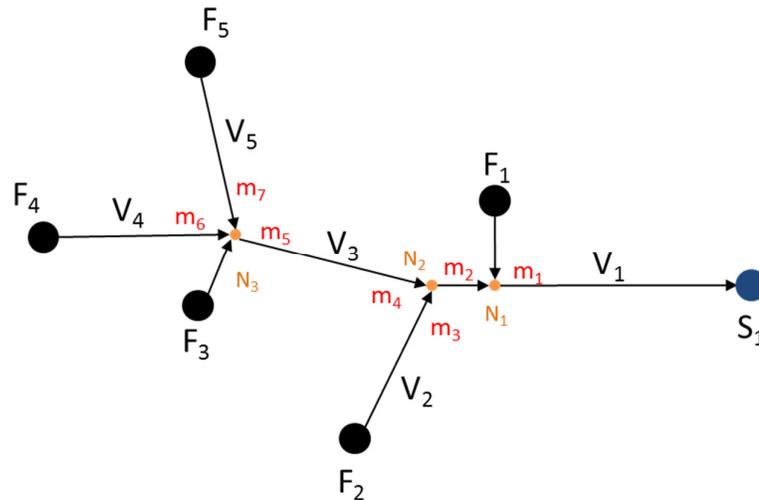
Fonte: O autor.

O algoritmo para a reconciliação de dados foi desenvolvido através do software Matlab.

A Figura 4 traz o esquema da malha de escoamento. Os itens de  $F_1$  a  $F_5$  representam os pontos de entrada do sistema,  $S_1$  é o ponto de saída,  $V_1$  a  $V_5$  são o inventário de cada um dos dutos. Os nós  $N_1$  a  $N_3$  são pontos utilizados no balanço, através dos quais se escreve o relacionamento com as variáveis não medidas do modelo. Há algumas fontes, como  $F_1$  e  $F_3$ , que estão interligadas diretamente ao nó por

simplificação, uma vez que o volume do duto que a interliga é desprezível perante o inventário dos demais dutos do sistema.

**Figura 4** - Esquema do sistema de dutos utilizado na reconciliação de dados. Representação das variáveis medidas (em preto) e não medidas (em vermelho).



Fonte: O autor.

Para um determinado período "j", o equacionamento do balanço material macroscópico estacionário que rege o sistema acima é dado por:

$$\begin{aligned}
 \text{Duto 1:} \quad & m_{1,j} - S_{1,j} + V_{1,j-1} - V_{1,j} = 0 \\
 \text{Nó 1:} \quad & -m_{1,j} + F_{1,j} + m_{2,j} = 0 \\
 \text{Nó 2:} \quad & -m_{2,j} + m_{3,j} + m_{4,j} = 0 \\
 \text{Duto 2:} \quad & F_{2,j} - m_{3,j} + V_{2,j-1} - V_{2,j} = 0 \\
 \text{Duto 3:} \quad & -m_{4,j} + m_{5,j} + V_{3,j-1} - V_{3,j} = 0 \\
 \text{Nó 3:} \quad & F_{3,j} - m_{5,j} + m_{6,j} + m_{7,j} = 0 \\
 \text{Duto 4:} \quad & F_{4,j} - m_{6,j} + V_{4,j-1} - V_{4,j} = 0 \\
 \text{Duto 5:} \quad & F_{5,j} - m_{7,j} + V_{5,j-1} - V_{5,j} = 0
 \end{aligned} \tag{41}$$

O balanço global macroscópico estacionário naturalmente é dado por:

$$\sum_{i=1}^a F_{i,j} - \sum_{i=1}^b S_{i,j} + \sum_{i=1}^c (V_{i,j-1} - V_{i,j}) = 0 \tag{42}$$

Com o objetivo de analisar as variáveis medidas e não medidas e o grau de redundância do sistema, o equacionamento das restrições será desenvolvido sem o uso do balanço global, que é linearmente dependente em relação aos demais.

O sistema apresentado para um período “j” pode ser escrito matricialmente por:

$$A_x x + A_u u = 0 \quad (43)$$

Ou,

$$\begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 F_{1,j} \\
 F_{2,j} \\
 F_{3,j} \\
 F_{4,j} \\
 F_{5,j} \\
 S_{1,j} \\
 V_{1,j-1} \\
 V_{2,j-1} \\
 V_{3,j-1} \\
 V_{4,j-1} \\
 V_{5,j-1} \\
 V_{1,j} \\
 V_{2,j} \\
 V_{3,j} \\
 V_{4,j} \\
 V_{5,j}
 \end{bmatrix}
 +
 \begin{bmatrix}
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 m_{1,j} \\
 m_{2,j} \\
 m_{3,j} \\
 m_{5,j} \\
 m_{5,j} \\
 m_{6,j} \\
 m_{7,j}
 \end{bmatrix}
 = 0 \quad (44)$$

São oito equações presentes no sistema (linhas das matrizes  $A_x$  e  $A_u$ ) e sete colunas linearmente independentes da matriz  $A_u$ , portanto, espera-se obter uma equação apenas das variáveis medidas para a reconciliação de dados.

Dado que todas as colunas da matriz  $A_u$  são linearmente independentes, todas as variáveis não medidas são observáveis e podem ser estimadas unicamente, sem necessidade de fornecer especificações adicionais.

Ao aplicar a fatoração QR para decompor  $A_u$  conforme descrito na eq.(43), obtém-se as matrizes:

$$Q = \begin{bmatrix} -0,7071 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & -0,3536 & 0,3536 \\ 0,7071 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & -0,3536 & 0,3536 \\ 0 & -0,7071 & 0 & 0 & 0 & -0,5 & -0,3536 & 0,3536 \\ 0 & 0,7071 & 0 & 0 & 0 & -0,5 & -0,3536 & 0,3536 \\ 0 & 0 & -0,7071 & -0,4082 & -0,2887 & 0 & 0,3536 & 0,3536 \\ 0 & 0 & 0,7071 & -0,4082 & -0,2887 & 0 & 0,3536 & 0,3536 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,2887 & 0 & 0,3536 & 0,3536 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,8660 & 0 & 0,3536 & 0,3536 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} -1,4142 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,7071 & 0 \\ 0 & -1,4142 & 0 & 0 & 0 & 0,7071 & -0,7071 \\ 0 & 0 & -1,4142 & 0,7071 & 0,7071 & 0 & 0,7071 \\ 0 & 0 & 0 & -1,2247 & -0,4082 & 0 & 0,4082 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1,1547 & 0 & 0,2887 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -0,5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,7071 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Pi_u = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$Q_1 = \begin{bmatrix} -0,7071 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & -0,3536 \\ 0,7071 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & -0,3536 \\ 0 & -0,7071 & 0 & 0 & 0 & -0,5 & -0,3536 \\ 0 & 0,7071 & 0 & 0 & 0 & -0,5 & -0,3536 \\ 0 & 0 & -0,7071 & -0,4082 & -0,2887 & 0 & 0,3536 \\ 0 & 0 & 0,7071 & -0,4082 & -0,2887 & 0 & 0,3536 \\ 0 & 0 & 0 & 0,8165 & -0,2887 & 0 & 0,3536 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,8660 & 0 & 0,3536 \end{bmatrix}$$

$$Q_2 = \begin{bmatrix} 0,3536 \\ 0,3536 \\ 0,3536 \\ 0,3536 \\ 0,3536 \\ 0,3536 \\ 0,3536 \\ 0,3536 \end{bmatrix}$$

$$R_1 = \begin{bmatrix} -1,4142 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,7071 & 0 \\ 0 & -1,4142 & 0 & 0 & 0 & 0,7071 & -0,7071 \\ 0 & 0 & -1,4142 & 0,7071 & 0,7071 & 0 & 0,7071 \\ 0 & 0 & 0 & -1,2247 & -0,4082 & 0 & 0,4082 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1,1547 & 0 & 0,2887 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -0,5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,7071 \end{bmatrix}$$

A matriz de projeção P da eq.(7) é dada por  $Q_2^T$ . Assim, tem-se:

$$PA_x x = 0$$

$$0,3536 \cdot [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1]x = 0$$

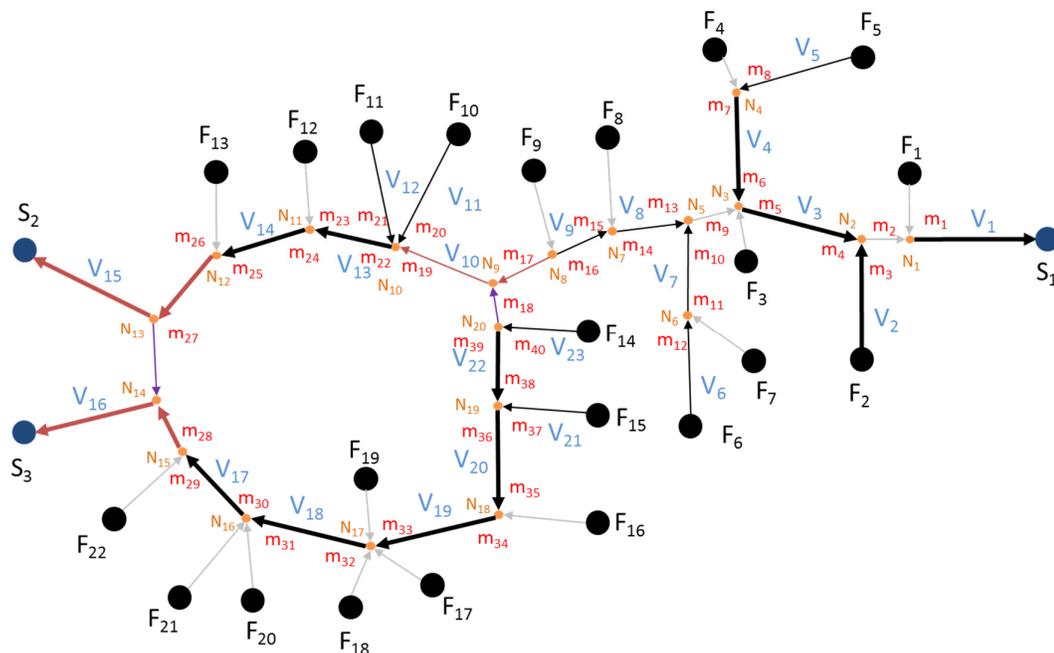
Ao dividir a matriz  $PA_x$  obtida pelo módulo do valor de seu primeiro elemento, obtém-se:

$$[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1]x = 0 \quad (45)$$

O resultado foi a obtenção do balanço global dado pela eq.(45), mostrando que este é suficiente para a realização da reconciliação de dados, conforme esperado para este sistema. Como restou apenas uma equação no sistema reduzido, há apenas um grau de redundância neste caso.

A Figura 5 ilustra a visão de malha complexa alvo neste trabalho. Embora não tenha ainda dados de operação deste sistema completo, o objetivo é que o algoritmo de reconciliação venha a atender também a este cenário.

**Figura 5** - Esquema do sistema de dutos com maior complexidade.



Fonte: O autor.

#### 4.1. APLICAÇÃO DA RECONCILIAÇÃO DE DADOS

A reconciliação de dados utilizou dados reais da malha de escoamento citada para os meses de junho a dezembro de 2014. Os valores de volume exportado pelas fontes ou volume retirados pelas saídas são oriundos do apontamento obtido do computador de vazão destas unidades. Os inventários de cada duto foram obtidos a partir de cálculo por regressão de equação em função de resultados de simulação de escoamento em regime permanente de cenários operacionais.

Os dados utilizados de composição das correntes de entrada e saída foram aqueles disponíveis para cada um dos pontos segundo as rotinas existentes:

- Dado de atualização com frequência mensal para os pontos de entrada, sendo esta a composição que é utilizada como referência no computador de vazão para computar o volume à condição padrão de medição;
- Dado de frequência diária para os pontos de saída, oriunda de uma rotina de uma amostragem por dia – embora não seja a mesma frequência de atualização do computador de vazão (frequência irregular por se tratar de ponto de medição operacional, onde este requisito não é requerido para fins fiscais);

Quando requerida a composição do gás dentro de cada gasoduto, uma composição média foi calculada para o primeiro e último dia do mês. Ela foi obtida por meio da média da composição de cada fonte ponderada pelo volume entregue em cada uma nos últimos sete dias. Como não há divergência de fluxo na malha analisada, o sentido de escoamento do gás é de fácil determinação, possibilitando apontar quais fontes escoaram por quais dutos.

Para os demais dias do mês, optou-se por uma simplificação com a adoção da média de composição entre o primeiro e último dias. Como no balanço global representado pela eq.(42) os inventários intermediários de anulam, restando apenas o inicial e final do mês, os inventários intermediários continuam cumprindo sua função de prover limites para a atuação da reconciliação de dados, com um percentual permissivo, mas não livre.

Nos capítulos 5 e 6 são analisados e discutidos os potenciais impactos sobre o balanço da movimentação de gás da condensação da corrente gasosa ao longo do escoamento, gerando uma fase líquida recebida no coletor de condensado presente na saída do sistema, e da injeção, pela fonte  $F_1$ , de um condensado de gás natural no duto  $V_1$ , que, por ser um líquido não estabilizado, ou seja, de elevada pressão de vapor, pode, ao longo do escoamento, perder parte de sua massa para a fase gasosa.

No entanto, os volumes de líquidos não foram considerados ao longo das reconciliações volumétrica e mássica, baseando-se apenas nos volumes movimentados de gás natural – tendo como fundamento um balanço molar sem reação química. Os motivos pelos quais as medições de volume da fase líquida na saída do coletor de condensado da UPGN não foram consideradas são:

- Trata-se de ser uma medição operacional de controle interno apenas, cujo rigor lhe provê menor qualidade (a medição de finalidade fiscal se localiza a jusante da UPGN);
- Esta fase líquida não está estabilizada, de modo que a presença de gás no medidor de vazão atua no sentido do aumento do erro de medição;
- Sua caracterização em campo não é realizada devido à dificuldade de coleta da amostra, havendo apenas referências de simulação para a composição deste fluido.

Para a reconciliação de dados, foram avaliados dois conjuntos de peso para cada cenário, descritos na Tabela 1.

**Tabela 1** - Pesos utilizados em cada cenário de reconciliação de dados.

<b>PESOS</b>	<b>S<sub>1</sub></b>	<b>F<sub>1</sub></b>	<b>F<sub>2</sub></b>	<b>F<sub>3</sub></b>	<b>F<sub>4</sub></b>	<b>F<sub>5</sub></b>	<b>V<sub>INI</sub></b>	<b>V</b>
<b>A</b>	1	5	5	5	5	5	100	1
<b>B</b>	1	3	20	32	7	6	10.000	1

O conjunto A foi arbitrado, levando em consideração que a medição de saída possui qualidade inferior que as medições de entrada e foi adotado mesmo peso da saída para os valores calculados de inventário.

O conjunto B teve como base o inverso da variância dos volumes diários apurados para cada unidade no período avaliado, mantendo um baixo peso para os valores calculados de inventário. Os pesos resultantes são o valor relativo em relação ao dado da saída  $S_1$ , que foi a que apresentou maior variância. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Na Tabela 1, a variável  $V_{INI}$  se refere ao inventário inicial do período, e a variável  $V$  ao inventário dos demais períodos. Como  $V_{INI}$  representa o inventário do final do mês anterior, que por premissa passou por uma reconciliação de dados, não deve sofrer alterações na reconciliação do mês corrente, motivo pelo qual o seu peso é muito maior que o dos demais.

**Tabela 2 - Cálculo dos pesos através da variância de cada medição.**

<b>DADO</b>	<b>S<sub>1</sub></b>	<b>F<sub>1</sub></b>	<b>F<sub>2</sub></b>	<b>F<sub>3</sub></b>	<b>F<sub>4</sub></b>	<b>F<sub>5</sub></b>
<b>Média (m<sup>3</sup>)</b>	13.008.643	6.841.492	1.944.672	989.140	1.605.240	1.371.079
<b>Desvio Padrão (m<sup>3</sup>)</b>	2.224.039	1.198.511	489.111	392.440	823.663	896.299
<b>Variância (m<sup>3</sup>)<sup>2</sup></b>	4,95E+12	1,44E+12	2,39E+11	1,54E+11	6,78E+11	8,03E+11
<b>Variância<sup>-1</sup> (m<sup>3</sup>)<sup>-2</sup></b>	2,02E-13	6,96E-13	4,18E-12	6,49E-12	1,47E-12	1,24E-12
<b>Peso Relativo</b>	1,00	3,44	20,68	32,12	7,29	6,16
<b>Peso para Reconciliação</b>	1	3	20	32	7	6

Para definir o valor máximo e mínimo que a variável reconciliada pode oscilar ao longo da reconciliação, foi definido um vetor com a fração de tolerância para o máximo e o mínimo. Se o valor for 0,01 para ambos, o intervalo definido será 0,99 a 1,01 vezes o valor da variável original, ou seja, 1% para maior e 1% para menor. A Tabela 3 traz os valores utilizados.

**Tabela 3 - Limites utilizados para cada variável em reconciliação.**

<b>LIMITES</b>	<b>S<sub>1</sub></b>	<b>F<sub>1</sub> a F<sub>5</sub></b>	<b>V<sub>INI</sub></b>	<b>V</b>
<b>Inferior "lb"</b>	0,05	0,015	0,001	0,10
<b>Superior "ub"</b>	0,05	0,015	0,001	0,10

Por se tratar de instrumentos de vazão que seguem o requisito de medição fiscal conforme o RTM, para as fontes, o valor adotado foi de 1,5%, mesmo valor da incerteza máxima permitida para este tipo de medição. Para a medição de saída, por se tratar de uma medição operacional e não ter o mesmo rigor, foi adotado o valor de 5%. O inventário inicial assumiu o valor de 0,10%, a fim de que não sofra alteração, conforme estratégia adotada nos pesos. Os demais inventários receberam valor de 10%, visto que este cálculo está sujeito a um maior erro.

O cálculo do inventário para os Dutos 1 a 5 foi realizado através de regressão de equação em função de variáveis chaves para cada duto, tais como pressão no ponto de entrada e no ponto de saída. Os dados de entrada para esta regressão foram resultados de simulação de escoamento em regime permanente de cenários operacionais deste sistema. Os cenários simulados e os resultados estão presentes no Apêndice A.

O levantamento de informações para o cálculo do inventário reuniu dados operacionais referentes ao final de cada dia do mês alvo, trazendo informações de pressão próximo às 23:59 e vazões referente à média de uma hora entre 23:00 e 23:59.

Nesta etapa, houve uma avaliação de erros sistemáticos nos dados de entrada, a fim de corrigir ou expurgar dados não consistentes com a realidade. Um exemplo típico é o de uma unidade que estava sem exportação de gás no horário indicado, tendo como consequência uma leitura de pressão não necessariamente igual à do duto, a depender do alinhamento de válvulas naquele instante. Onde necessário, os dados como pressão e vazão foram substituídos a partir de uma análise criteriosa do seu comportamento ao redor do horário alvo.

Os dados de volume entregue por fontes ou retirados pelas saídas possuem um grande rigor de apuração e rotinas de avaliação de consistência de dados, devido à sua destinação e importância econômica, o que diminui a probabilidade de ocorrência de um erro sistemático como leitura incorreta ou erro de ordem de grandeza.

A reconciliação de dados foi escrita em Matlab, com uso da função “fmincon”, que possui o formato:

$$x = \text{fmincon} ( fun, x_0, A, b, A_{eq}, b_{eq}, lb, ub ) \quad (46)$$

Onde,

$fun$  , é a função a ser minimizada;

$x_0$ , é o valor da estimativa inicial;

$Ax < b$  , é a condição de contorno do tipo inequação;

$A_{eq}x = b_{eq}$  , é a condição de contorno do tipo igualdade;

$lb$  , é o valor de mínimo para as variáveis (lower bound – limite inferior);

$ub$  , é o valor de máximo para as variáveis (upper bound – limite superior).

Os dados de entrada para a reconciliação foram organizados em um único vetor, através do empilhamento de forma ordenada, por período, de todas os volumes medidos pelas fontes e saída, seguido do empilhamento do inventário de cada duto do sistema.

## 5. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados da reconciliação volumétrica à condição padrão de medição (uma visão de balanço molar, conforme apresentado no capítulo 3.5.), os resultados da reconciliação mássica e uma avaliação do balanço em termos de poder calorífico superior sobre os dados originais e os dados reconciliados em cada uma das abordagens. Também é apresentado o resultado de uma análise sobre o possível impacto da condensação ao longo do escoamento de parte da fração gasosa escoada, chegando nos pontos de saída na condição líquida, como condensado de gás natural.

A reconciliação de dados da movimentação de gás foi realizada com dados dos meses de junho a dezembro de 2014, com a utilização dos pesos presentes na Tabela 1 e os limites superiores e inferiores para cada variável reconciliada apresentados na Tabela 3.

### 5.1. BALANÇO INICIAL

O balanço volumétrico inicial da movimentação de gás é obtido a partir da aplicação da eq.(42) e está apresentado na Tabela 4. O resultado do balanço é também calculado como porcentual sobre a quantidade total de gás entregue pelas fontes.

**Tabela 4** - Balanço volumétrico inicial da movimentação de gás. Volumes em m<sup>3</sup>.

ITEM	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO
<b>S</b>	363.503.007	379.759.946	416.144.716	391.633.207	428.075.533	363.862.601	440.870.487
$\sum F_i$	358.152.653	370.544.536	406.914.096	385.948.522	418.036.817	358.285.751	430.063.491
<b>F<sub>1</sub></b>	197.735.392	210.847.006	211.184.562	201.480.617	225.663.532	182.476.003	233.790.569
<b>F<sub>2</sub></b>	55.070.771	62.796.399	71.448.968	65.783.632	56.075.556	54.257.323	50.727.199
<b>F<sub>3</sub></b>	43.348.279	35.891.584	36.713.163	25.329.104	22.759.216	20.564.391	27.070.294
<b>F<sub>4</sub></b>	61.017.824	28.120.178	49.042.764	44.894.797	53.741.877	50.372.019	56.331.961
<b>F<sub>5</sub></b>	980.387	32.889.369	38.524.639	48.460.372	59.796.636	50.616.015	62.143.468
<b>V<sub>INI</sub></b>	14.856.286	15.219.517	14.774.654	15.300.559	16.701.099	15.284.509	15.931.125
<b>V<sub>FINAL</sub></b>	15.219.517	14.774.654	15.300.559	16.701.099	15.284.509	15.931.125	16.052.354
<b>BALANÇO</b>	-5.713.585	-8.770.547	-9.756.525	-7.085.225	-8.622.126	-6.223.466	-10.928.225
	-1,60%	-2,37%	-2,40%	-1,84%	-2,06%	-1,74%	-2,54%

A soma dos volumes iniciais e finais dos dutos do sistema foram informados, respectivamente, em  $V_{INI}$  e  $V_{FINAL}$ . Ao trabalhar com o balanço para o período de um mês, os volumes relevantes são apenas o inicial e final daquele mês, visto que todos os intermediários, calculados ao final de cada dia do período, se anulam no balanço.

Em todos os meses analisados pode-se verificar que houve maior volume de gás saindo do que entrando no sistema (balanço negativo).

Com os dados disponíveis, o balanço mássico pode ser obtido a partir da eq.(42), multiplicando cada um dos termos pela respectiva massa específica do gás, dada pela eq.(30). O balanço mássico inicial é apresentado na Tabela 5.

O resultado do balanço é também calculado como percentual sobre a massa total de gás entregue pelas fontes. A soma da massa inicial e final dos dutos do sistema foram informados, respectivamente, em  $V_{INI}$  e  $V_{FINAL}$ .

**Tabela 5** - Balanço inicial da movimentação de gás, valores em kg.

ITEM	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO
<b>S</b>	287.379.616	298.826.687	330.532.544	310.507.370	340.332.321	291.485.797	352.415.615
$\sum F_i$	288.791.635	299.751.797	338.680.158	318.307.235	350.064.299	302.907.064	356.106.181
<b>F<sub>1</sub></b>	146.769.639	160.686.488	165.689.102	156.700.483	177.696.324	145.647.671	175.555.749
<b>F<sub>2</sub></b>	40.950.879	46.479.603	52.385.734	47.983.911	40.744.303	39.731.527	37.429.844
<b>F<sub>3</sub></b>	41.501.012	34.849.745	36.177.477	24.180.558	22.142.515	20.061.424	26.553.695
<b>F<sub>4</sub></b>	58.657.614	27.032.471	47.145.757	43.158.236	51.663.106	48.423.596	57.583.919
<b>F<sub>5</sub></b>	912.491	30.703.490	37.282.088	46.284.047	57.818.051	49.042.845	58.982.974
<b>V<sub>INI</sub></b>	13.056.476	13.245.894	13.061.566	13.506.828	14.694.742	13.428.134	14.316.153
<b>V<sub>FINAL</sub></b>	13.245.894	13.061.266	13.506.828	14.694.742	13.428.134	14.316.153	13.850.905
<b>BALANÇO</b>	1.222.601	1.109.737	7.702.352	6.611.950	10.998.586	10.533.249	4.155.814
	0,42%	0,37%	2,27%	2,08%	3,14%	3,48%	1,17%

Em todos os meses analisados pode-se verificar que houve menor massa de gás saindo do que entrando no sistema (balanço positivo), comportamento contrário ao do balanço volumétrico.

## 5.2. RECONCILIAÇÃO VOLUMÉTRICA

Este capítulo traz os resultados sobre a aplicação da reconciliação com balanço volumétrico da movimentação de gás. Os resultados são apresentados da Tabela 6 à Tabela 12, nas quais a coluna “diferença” reporta o valor absoluto e o módulo da diferença percentual entre o dado reconciliado e o dado original.

Ao aplicar a reconciliação de dados para a movimentação volumétrica de gás natural à condição padrão de medição, o volume inicial adotado para o mês de junho foi o obtido por meio do cálculo de inventário, o mesmo apresentado na Tabela 4. Porém para o mês de julho, o volume inicial adotado foi volume do último dia do mês de junho após a reconciliação daquele mês, e assim sucessivamente para os demais meses.

O fundamento para esta forma de tratar o inventário é que, ao se realizar mensalmente a reconciliação de dados, o inventário do início do mês será sempre igual àquele obtido no final do mês anterior, uma vez que este já pode ser considerado congelado. Para o algoritmo utilizado, o maior peso aplicado sobre esta variável e o menor limite de variação permitido adotado fizeram com que o valor reconciliado do volume inicial não ficasse idêntico, mas apresentasse pequenas variações, da ordem de 0,10%.

**Tabela 6 - Resultado da reconciliação de dados do mês de junho. Volumes em m<sup>3</sup>.**

ITEM	JUNHO						
	ORIGINAL	PESOS A			PESOS B		
		RECONCILIADO	DIFERENÇA		RECONCILIADO	DIFERENÇA	
$S_1$	363.503.007	360.442.292	-3.060.715	0,84%	360.780.500	-2.722.507	0,75%
$\sum F_i$	358.152.653	360.271.809	2.119.156	0,59%	360.694.857	2.542.204	0,71%
$F_1$	197.735.392	198.347.424	612.032	0,31%	199.439.204	1.703.812	0,86%
$F_2$	55.070.771	55.572.879	502.108	0,91%	55.208.537	137.766	0,25%
$F_3$	43.348.279	43.782.710	434.431	1,00%	43.520.238	171.959	0,40%
$F_4$	61.017.824	61.575.726	557.902	0,91%	61.533.808	515.984	0,85%
$F_5$	980.387	993.070	12.683	1,29%	993.070	12.683	1,29%
$V_{INI}$	14.856.286	14.865.229	8.944	0,06%	14.859.967	3.681	0,02%
$V_{FINAL}$	15.219.517	14.694.746	-524.771	3,45%	14.774.324	-445.193	2,93%
BALANÇO	-5.713.585	0	-	-	0	-	-
	-1,60%	0,00%	-	-	0,00%	-	-

**Tabela 7 - Resultado da reconciliação de dados do mês de julho. Volumes em m<sup>3</sup>.**

ITEM	JULHO						
	ORIGINAL	PESOS A			PESOS B		
		RECONCILIADO	DIFERENÇA		RECONCILIADO	DIFERENÇA	
<b>S<sub>1</sub></b>	379.759.946	374.167.902	-5.592.044	1,47%	374.612.310	-5.147.636	1,36%
$\sum F_i$	370.544.536	373.591.684	3.047.148	0,82%	374.025.363	3.480.827	0,94%
<b>F<sub>1</sub></b>	210.847.006	211.940.845	1.093.839	0,52%	213.136.208	2.289.202	1,09%
<b>F<sub>2</sub></b>	62.796.399	63.536.410	740.011	1,18%	63.030.003	233.604	0,37%
<b>F<sub>3</sub></b>	35.891.584	36.391.502	499.918	1,39%	36.102.584	211.000	0,59%
<b>F<sub>4</sub></b>	28.120.178	28.460.477	340.299	1,21%	28.470.097	349.919	1,24%
<b>F<sub>5</sub></b>	32.889.369	33.262.450	373.081	1,13%	33.286.470	397.101	1,21%
<b>V<sub>INI</sub></b>	15.219.517	14.706.522	-512.994	3,37%	14.772.327	-447.189	2,94%
<b>V<sub>FINAL</sub></b>	14.774.654	14.130.304	-644.349	4,36%	14.185.381	-589.272	3,99%
<b>BALANÇO</b>	-8.770.547	0	-	-	0	-	-
	-2,37%	0,00%	-	-	0,00%	-	-

A partir da Tabela 7, o desvio do volume inicial passa a apresentar valores superiores a 0,10%. No entanto, conforme a estratégia descrita para esta variável, o desvio em relação ao volume final do mês anterior é de até 0,10%, enquanto o valor reportado na tabela é o desvio em relação ao valor original do balanço, não sendo, portanto, a mesma referência.

**Tabela 8 - Resultado da reconciliação de dados do mês de agosto. Volumes em m<sup>3</sup>.**

ITEM	AGOSTO						
	ORIGINAL	PESOS A			PESOS B		
		RECONCILIADO	DIFERENÇA		RECONCILIADO	DIFERENÇA	
<b>S<sub>1</sub></b>	416.144.716	410.142.338	-6.002.378	1,44%	409.684.725	-6.459.991	1,55%
$\sum F_i$	406.914.096	410.747.030	3.832.934	0,94%	410.200.115	3.286.019	0,81%
<b>F<sub>1</sub></b>	211.184.562	212.384.821	1.200.259	0,57%	212.966.172	1.781.610	0,84%
<b>F<sub>2</sub></b>	71.448.968	72.374.219	925.251	1,29%	71.703.939	254.971	0,36%
<b>F<sub>3</sub></b>	36.713.163	37.232.030	518.867	1,41%	36.863.484	150.321	0,41%
<b>F<sub>4</sub></b>	49.042.764	49.688.800	646.036	1,32%	49.552.339	509.575	1,04%
<b>F<sub>5</sub></b>	38.524.639	39.067.161	542.522	1,41%	39.114.180	589.541	1,53%
<b>V<sub>INI</sub></b>	14.774.654	14.143.229	-631.425	4,27%	14.185.507	-589.146	3,99%
<b>V<sub>FINAL</sub></b>	15.300.559	14.747.921	-552.638	3,61%	14.700.897	-599.662	3,92%
<b>BALANÇO</b>	-9.756.525	0	-	-	0	-	-
	-2,40%	0,00%	-	-	0,00%	-	-

**Tabela 9** - Resultado da reconciliação de dados do mês de setembro. Volumes em m<sup>3</sup>.

ITEM	SETEMBRO						
	ORIGINAL	PESOS A			PESOS B		
		RECONCILIADO	DIFERENÇA		RECONCILIADO	DIFERENÇA	
S <sub>1</sub>	391.633.207	387.314.201	-4.319.006	1,10%	387.682.774	-3.950.433	1,01%
$\sum F_i$	385.948.522	388.987.111	3.038.589	0,79%	389.405.984	3.457.462	0,90%
F <sub>1</sub>	201.480.617	202.344.445	863.828	0,43%	203.338.874	1.858.257	0,92%
F <sub>2</sub>	65.783.632	66.512.265	728.633	1,11%	66.058.308	274.676	0,42%
F <sub>3</sub>	25.329.104	25.707.173	378.069	1,49%	25.538.419	209.315	0,83%
F <sub>4</sub>	44.894.797	45.377.778	482.981	1,08%	45.390.899	496.102	1,11%
F <sub>5</sub>	48.460.372	49.045.451	585.079	1,21%	49.079.484	619.112	1,28%
V <sub>INI</sub>	15.300.559	14.759.498	-541.061	3,54%	14.702.754	-597.805	3,91%
V <sub>FINAL</sub>	16.701.099	16.432.408	-268.691	1,61%	16.425.964	-275.135	1,65%
BALANÇO	-7.085.225	0	-	-	0	-	-
	-1,84%	0,00%	-	-	0,00%	-	-

**Tabela 10** - Resultado da reconciliação de dados do mês de outubro. Volumes em m<sup>3</sup>.

ITEM	OUTUBRO						
	ORIGINAL	PESOS A			PESOS B		
		RECONCILIADO	DIFERENÇA		RECONCILIADO	DIFERENÇA	
S <sub>1</sub>	428.075.533	423.116.633	-4.958.900	1,16%	423.061.586	-5.013.947	1,17%
$\sum F_i$	418.036.817	421.170.431	3.133.614	0,75%	421.102.708	3.065.891	0,73%
F <sub>1</sub>	225.663.532	226.639.141	975.609	0,43%	227.281.587	1.618.055	0,72%
F <sub>2</sub>	56.075.556	56.677.113	601.557	1,07%	56.255.733	180.177	0,32%
F <sub>3</sub>	22.759.216	23.056.157	296.941	1,30%	22.869.877	110.661	0,49%
F <sub>4</sub>	53.741.877	54.355.320	613.443	1,14%	54.312.132	570.255	1,06%
F <sub>5</sub>	59.796.636	60.442.700	646.064	1,08%	60.383.379	586.743	0,98%
V <sub>INI</sub>	16.701.099	16.440.019	-261.080	1,56%	16.425.836	-275.263	1,65%
V <sub>FINAL</sub>	15.284.509	14.493.817	-790.692	5,17%	14.466.958	-817.551	5,35%
BALANÇO	-8.622.126	0	-	-	0	-	-
	-2,06%	0,00%	-	-	0,00%	-	-

O mês de novembro demandou um relaxamento dos limites permitidos para a oscilação das variáveis reconciliadas, a fim de que o algoritmo conseguisse chegar a um resultado sem uma pausa prematura. O capítulo 6 traz uma discussão sobre esta necessidade.

Com isso, algumas fontes tiveram variação acima dos limites estabelecidos, caso da F<sub>3</sub> e F<sub>5</sub> com o conjunto de pesos A, e F<sub>5</sub> com o conjunto de pesos B.

**Tabela 11** - Resultado da reconciliação de dados do mês de novembro. Volumes em m<sup>3</sup>.

ITEM	NOVEMBRO						
	ORIGINAL	PESOS A			PESOS B		
		RECONCILIADO	DIFERENÇA		RECONCILIADO	DIFERENÇA	
S <sub>1</sub>	363.862.601	361.449.513	-2.413.088	0,66%	360.478.066	-3.384.535	0,93%
$\sum F_i$	358.285.751	362.857.272	4.571.521	1,28%	361.731.282	3.445.531	0,96%
F <sub>1</sub>	182.476.003	184.167.885	1.691.882	0,93%	184.087.167	1.611.164	0,88%
F <sub>2</sub>	54.257.323	55.042.386	785.063	1,45%	54.286.504	29.181	0,05%
F <sub>3</sub>	20.564.391	21.107.119	542.728	2,64%	20.673.288	108.897	0,53%
F <sub>4</sub>	50.372.019	51.118.708	746.689	1,48%	51.118.035	746.016	1,48%
F <sub>5</sub>	50.616.015	51.421.175	805.160	1,59%	51.566.288	950.273	1,88%
V <sub>INI</sub>	15.284.509	14.390.928	-893.581	5,85%	14.464.689	-819.820	5,36%
V <sub>FINAL</sub>	15.931.125	15.798.688	-132.437	0,83%	15.717.905	-213.220	1,34%
BALANÇO	-6.223.466	0	-	-	0	-	-
	-1,74%	0,00%	-	-	0,00%	-	-

**Tabela 12** - Resultado da reconciliação de dados do mês de dezembro. Volumes em m<sup>3</sup>.

ITEM	DEZEMBRO						
	ORIGINAL	PESOS A			PESOS B		
		RECONCILIADO	DIFERENÇA		RECONCILIADO	DIFERENÇA	
S <sub>1</sub>	440.870.487	434.805.947	-6.064.540	1,38%	434.487.581	-6.382.906	1,45%
$\sum F_i$	430.063.491	433.903.857	3.840.366	0,89%	433.645.795	3.582.304	0,83%
F <sub>1</sub>	233.790.569	234.978.771	1.188.202	0,51%	235.732.085	1.941.516	0,83%
F <sub>2</sub>	50.727.199	51.402.223	675.024	1,33%	50.979.281	252.082	0,50%
F <sub>3</sub>	27.070.294	27.468.510	398.216	1,47%	27.135.005	64.711	0,24%
F <sub>4</sub>	56.331.961	57.137.970	806.009	1,43%	56.919.095	587.134	1,04%
F <sub>5</sub>	62.143.468	62.916.383	772.915	1,24%	62.880.329	736.861	1,19%
V <sub>INI</sub>	15.931.125	15.809.982	-121.144	0,76%	15.718.825	-212.300	1,33%
V <sub>FINAL</sub>	16.052.354	14.907.892	-1.144.463	7,13%	14.877.039	-1.175.315	7,32%
BALANÇO	-10.928.225	0	-	-	0	-	-
	-2,54%	0,00%	-	-	0,00%	-	-

De modo geral, os resultados dos conjuntos de pesos A e B foram semelhantes. As diferenças em relação ao valor original nos dois casos analisados não trouxeram grande discrepância, alterando a distribuição da reconciliação dentro da faixa esperada de alteração para as fontes (1,5%) e a saída (5%), mas com razoável impacto nos inventários finais - em especial o mês de dezembro, tendo se manifestado mais intensamente quando o balanço original apresentou desvio superior a 2%.

### 5.3. RECONCILIAÇÃO MÁSSICA

Este capítulo traz os resultados sobre a aplicação da reconciliação com balanço mássico da movimentação de gás.

Os resultados são apresentados da Tabela 13 à Tabela 19. A coluna “diferença” reporta o valor absoluto e o módulo da diferença percentual entre o dado reconciliado e o dado original.

A partir da Tabela 14, o desvio do volume inicial passa a apresentar valores superiores a 0,10%. No entanto, conforme a estratégia descrita para esta variável, o desvio em relação ao volume final do mês anterior é de até 0,10%, enquanto o valor reportado na tabela é o desvio em relação ao valor original do balanço, não sendo, portanto, a mesma referência.

**Tabela 13 - Resultado da reconciliação de dados do mês de junho. Valores em kg.**

ITEM	JUNHO						
	ORIGINAL	PESOS A			PESOS B		
		RECONCILIADO	DIFERENÇA		RECONCILIADO	DIFERENÇA	
<b>S<sub>1</sub></b>	287.379.616	288.171.457	791.842	0,28%	288.296.091	916.475	0,32%
$\sum F_i$	288.791.635	288.237.619	-554.016	0,19%	288.379.786	-411.849	0,14%
<b>F<sub>1</sub></b>	146.769.639	146.602.938	-166.701	0,11%	146.674.919	-94.721	0,06%
<b>F<sub>2</sub></b>	40.950.879	40.839.196	-111.683	0,27%	40.922.964	-27.914	0,07%
<b>F<sub>3</sub></b>	41.501.012	41.382.042	-118.970	0,29%	41.354.466	-146.546	0,35%
<b>F<sub>4</sub></b>	58.657.614	58.499.815	-157.799	0,27%	58.505.273	-152.341	0,26%
<b>F<sub>5</sub></b>	912.491	913.628	1.137	0,12%	922.164	9.673	1,06%
<b>V<sub>INI</sub></b>	13.056.476	13.057.098	622	0,00%	13.056.584	108	0,00%
<b>V<sub>FINAL</sub></b>	13.245.894	13.123.260	-122.634	0,93%	13.140.278	-105.615	0,80%
<b>BALANÇO</b>	1.222.601	0	-	-	0	-	-
	0,42%	0,00%	-	-	0,00%	-	-

**Tabela 14 - Resultado da reconciliação de dados do mês de julho. Valores em kg.**

ITEM	JULHO						
	ORIGINAL	PESOS A			PESOS B		
		RECONCILIADO	DIFERENÇA		RECONCILIADO	DIFERENÇA	
<b>S<sub>1</sub></b>	298.826.687	299.507.828	681.141	0,23%	299.380.177	553.490	0,19%
$\sum F_i$	299.751.797	299.619.953	-131.844	0,04%	299.490.474	-261.323	0,09%
<b>F<sub>1</sub></b>	160.686.488	160.694.713	8.225	0,01%	160.458.789	-227.699	0,14%
<b>F<sub>2</sub></b>	46.479.603	46.411.206	-68.397	0,15%	46.441.086	-38.518	0,08%
<b>F<sub>3</sub></b>	34.849.745	34.766.760	-82.985	0,24%	34.847.596	-2.148	0,01%
<b>F<sub>4</sub></b>	27.032.471	27.077.985	45.514	0,17%	27.076.505	44.034	0,16%
<b>F<sub>5</sub></b>	30.703.490	30.669.289	-34.201	0,11%	30.666.498	-36.992	0,12%
<b>V<sub>INI</sub></b>	13.245.894	13.135.931	-109.963	0,83%	13.140.362	-105.532	0,80%
<b>V<sub>FINAL</sub></b>	13.061.266	13.248.056	186.789	1,43%	13.250.658	189.392	1,45%
<b>BALANÇO</b>	1.109.737	0	-	-	0	-	-
	0,37%	0,00%	-	-	0,00%	-	-

**Tabela 15 - Resultado da reconciliação de dados do mês de agosto. Valores em kg.**

ITEM	AGOSTO						
	ORIGINAL	PESOS A			PESOS B		
		RECONCILIADO	DIFERENÇA		RECONCILIADO	DIFERENÇA	
<b>S<sub>1</sub></b>	330.532.544	335.257.705	4.725.161	1,43%	335.412.815	4.880.270	1,48%
$\sum F_i$	338.680.158	335.537.031	-3.143.126	0,93%	335.699.782	-2.980.376	0,88%
<b>F<sub>1</sub></b>	165.689.102	164.750.273	-938.829	0,57%	164.021.560	-1.667.542	1,01%
<b>F<sub>2</sub></b>	52.385.734	51.716.403	-669.330	1,28%	52.139.916	-245.818	0,47%
<b>F<sub>3</sub></b>	36.177.477	35.677.657	-499.820	1,38%	36.047.215	-130.263	0,36%
<b>F<sub>4</sub></b>	47.145.757	46.614.333	-531.425	1,13%	46.703.726	-442.031	0,94%
<b>F<sub>5</sub></b>	37.282.088	36.778.365	-503.723	1,35%	36.787.366	-494.722	1,33%
<b>V<sub>INI</sub></b>	13.061.566	13.238.996	177.429	1,36%	13.251.251	189.684	1,45%
<b>V<sub>FINAL</sub></b>	13.506.828	13.518.322	11.494	0,09%	13.538.218	31.390	0,23%
<b>BALANÇO</b>	7.702.352	0	-	-	0	-	-
	2,27%	0,00%	-	-	0,00%	-	-

**Tabela 16** - Resultado da reconciliação de dados do mês de setembro. Valores em kg.

ITEM	SETEMBRO						
	ORIGINAL	PESOS A			PESOS B		
		RECONCILIADO	DIFERENÇA		RECONCILIADO	DIFERENÇA	
$S_1$	310.507.370	314.490.780	3.983.410	1,28%	314.370.119	3.862.749	1,24%
$\sum F_i$	318.307.235	315.890.576	-2.416.659	0,76%	315.696.788	-2.610.447	0,82%
$F_1$	156.700.483	155.938.253	-762.230	0,49%	155.130.515	-1.569.968	1,00%
$F_2$	47.983.911	47.442.632	-541.278	1,13%	47.789.134	-194.777	0,41%
$F_3$	24.180.558	23.865.739	-314.819	1,30%	24.128.383	-52.175	0,22%
$F_4$	43.158.236	42.759.910	-398.326	0,92%	42.830.306	-327.931	0,76%
$F_5$	46.284.047	45.884.041	-400.006	0,86%	45.818.451	-465.596	1,01%
$V_{INI}$	13.506.828	13.513.258	6.430	0,05%	13.507.790	962	0,01%
$V_{FINAL}$	14.694.742	14.913.054	218.312	1,49%	14.834.459	139.717	0,95%
BALANÇO	6.611.950	0	-	-	0	-	-
	2,08%	0,00%	-	-	0,00%	-	-

**Tabela 17** - Resultado da reconciliação de dados do mês de outubro. Valores em kg.

ITEM	OUTUBRO						
	ORIGINAL	PESOS A			PESOS B		
		RECONCILIADO	DIFERENÇA		RECONCILIADO	DIFERENÇA	
$S_1$	340.332.321	347.683.642	7.351.321	2,16%	347.505.246	7.172.925	2,11%
$\sum F_i$	350.064.299	346.248.320	-3.815.980	1,09%	346.177.613	-3.886.686	1,11%
$F_1$	177.696.324	176.263.629	-1.432.696	0,81%	175.686.607	-2.009.717	1,13%
$F_2$	40.744.303	40.173.718	-570.585	1,40%	40.479.911	-264.392	0,65%
$F_3$	22.142.515	21.810.378	-332.138	1,50%	21.938.532	-203.983	0,92%
$F_4$	51.663.106	50.942.299	-720.807	1,40%	50.953.539	-709.566	1,37%
$F_5$	57.818.051	57.058.297	-759.754	1,31%	57.119.023	-699.028	1,21%
$V_{INI}$	14.694.742	14.901.845	207.102	1,41%	14.834.303	139.561	0,95%
$V_{FINAL}$	13.428.134	13.466.523	38.388	0,29%	13.506.671	78.536	0,58%
BALANÇO	10.998.586	0	-	-	0	-	-
	3,14%	0,00%	-	-	0,00%	-	-

Da mesma forma que na reconciliação volumétrica, o mês de novembro demandou um relaxamento dos limites permitidos para a oscilação das variáveis reconciliadas, a fim de que o algoritmo conseguisse chegar a um resultado sem uma pausa prematura. O capítulo 6 traz uma discussão sobre esta necessidade.

Com isso, algumas fontes tiveram variação acima dos limites estabelecidos, caso da  $F_2$ ,  $F_3$  e  $F_4$  com o conjunto de pesos A e  $F_4$  e  $F_5$  com o conjunto de pesos B.

**Tabela 18** - Resultado da reconciliação de dados do mês de novembro. Valores em kg.

ITEM	NOVEMBRO						
	ORIGINAL	PESOS A			PESOS B		
		RECONCILIADO	DIFERENÇA		RECONCILIADO	DIFERENÇA	
<b>S<sub>1</sub></b>	291.485.797	297.155.947	5.670.150	1,95%	297.953.637	6.467.841	2,22%
$\sum F_i$	302.907.064	298.660.627	-4.246.436	1,40%	299.361.149	-3.545.914	1,17%
<b>F<sub>1</sub></b>	145.647.671	144.677.563	-970.108	0,67%	144.360.616	-1.287.055	0,88%
<b>F<sub>2</sub></b>	39.731.527	38.697.584	-1.033.943	2,60%	39.252.707	-478.821	1,21%
<b>F<sub>3</sub></b>	20.061.424	19.525.115	-536.309	2,67%	20.012.935	-48.489	0,24%
<b>F<sub>4</sub></b>	48.423.596	47.492.878	-930.718	1,92%	47.628.732	-794.864	1,64%
<b>F<sub>5</sub></b>	49.042.845	48.267.488	-775.357	1,58%	48.106.161	-936.685	1,91%
<b>V<sub>INI</sub></b>	13.428.134	13.439.590	11.455	0,09%	13.514.899	86.764	0,65%
<b>V<sub>FINAL</sub></b>	14.316.153	14.944.270	628.117	4,39%	14.922.411	606.258	4,23%
<b>BALANÇO</b>	10.533.249	0	-	-	0	-	-
	3,48%	0,00%	-	-	0,00%	-	-

**Tabela 19** - Resultado da reconciliação de dados do mês de dezembro. Valores em kg.

ITEM	DEZEMBRO						
	ORIGINAL	PESOS A			PESOS B		
		RECONCILIADO	DIFERENÇA		RECONCILIADO	DIFERENÇA	
<b>S<sub>1</sub></b>	352.415.615	355.171.663	2.756.048	0,78%	354.810.433	2.394.818	0,68%
$\sum F_i$	356.106.181	354.265.109	-1.841.072	0,52%	354.043.464	-2.062.717	0,58%
<b>F<sub>1</sub></b>	175.555.749	174.800.143	-755.606	0,43%	174.183.387	-1.372.361	0,78%
<b>F<sub>2</sub></b>	37.429.844	37.128.771	-301.074	0,80%	37.186.463	-243.382	0,65%
<b>F<sub>3</sub></b>	26.553.695	26.348.820	-204.875	0,77%	26.474.272	-79.422	0,30%
<b>F<sub>4</sub></b>	57.583.919	57.283.279	-300.640	0,52%	57.459.787	-124.132	0,22%
<b>F<sub>5</sub></b>	58.982.974	58.704.096	-278.878	0,47%	58.739.555	-243.419	0,41%
<b>V<sub>INI</sub></b>	14.316.153	14.931.883	615.730	4,30%	14.925.275	609.122	4,25%
<b>V<sub>FINAL</sub></b>	13.850.905	14.025.329	174.424	1,26%	14.158.306	307.401	2,22%
<b>BALANÇO</b>	4.155.814	0	-	-	0	-	-
	1,17%	0,00%	-	-	0,00%	-	-

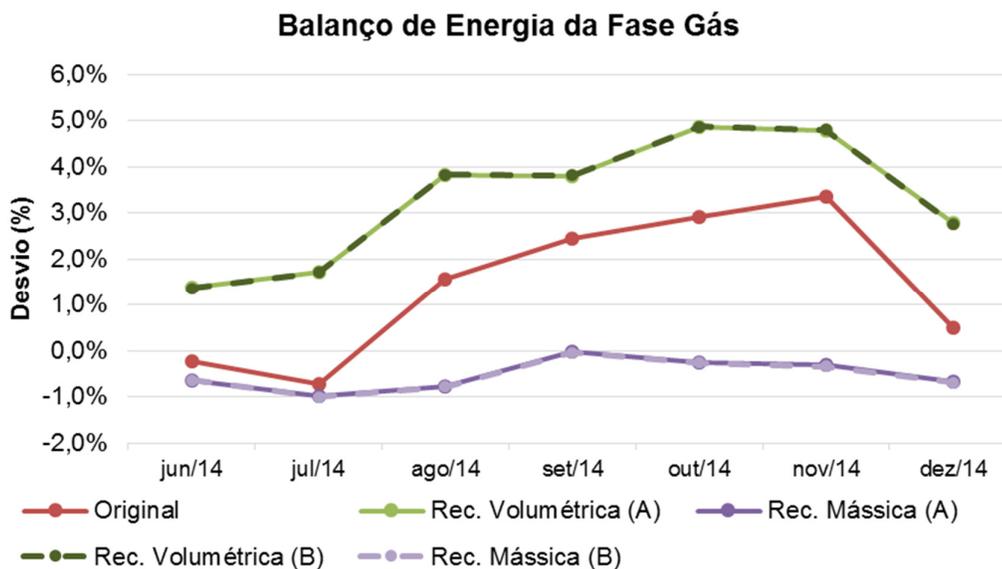
De modo geral, os resultados dos conjuntos de pesos A e B foram semelhantes. As diferenças em relação ao valor original nos dois casos analisados não trouxeram grande discrepância, alterando a distribuição da reconciliação dentro da faixa esperada de alteração para as fontes (1,5%) e a saída (5%). Diferente da reconciliação volumétrica, não houve impacto significativo nos inventários finais.

#### 5.4. BALANÇO DE ENERGIA EM TERMOS DE PODER CALORÍFICO SUPERIOR E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo traz uma proposta de análise sobre o balanço do sistema em termos de poder calorífico da fase gás, bem como o balanço resultante das reconciliações volumétrica e mássica, buscando comparar também os resultados referentes aos conjuntos de pesos A e B aplicados na reconciliação de dados.

A Figura 6 traz o resultado do balanço de energia da fase gás em termos de poder calorífico superior (PCS), apresentando-o como um percentual sobre a quantidade total de energia entregue pelas fontes. Nela verifica-se que o balanço inicial de energia da fase gás, diferente do balanço volumétrico e mássico, não esteve no período análise de um único lado do desvio, chegando a apresentar desvio negativo (saiu menos energia do que entrou) nos meses de junho e julho, e positivo (saiu mais energia do que entrou) nos demais meses.

**Figura 6** - Balanço de energia da fase gás, em termos de poder calorífico. Balanço original e comparação dos balanços oriundos da reconciliação volumétrica e mássica da fase gás, com os conjuntos de pesos A e B.



Fonte: O autor.

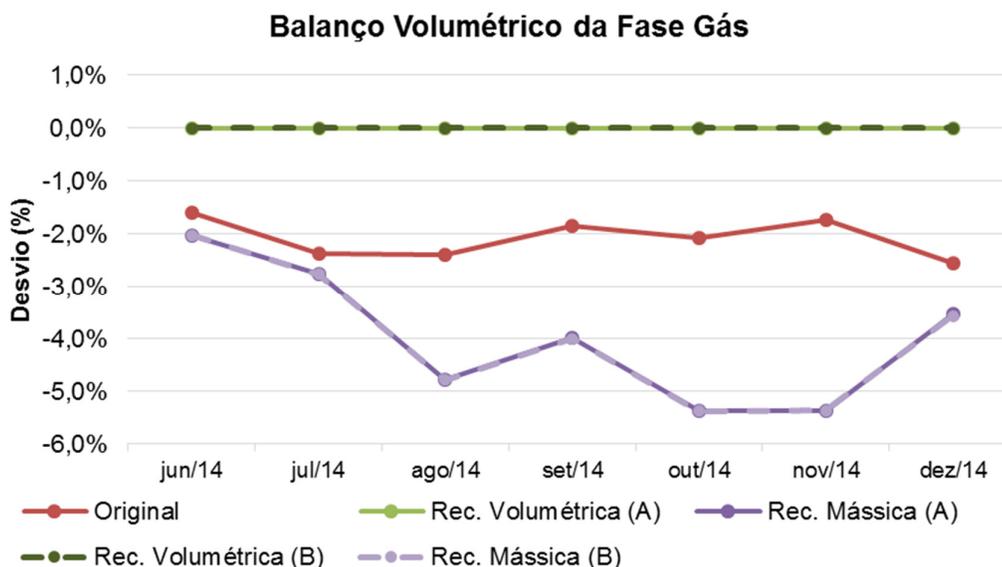
O balanço energético da fase gás gerado pelo resultado da reconciliação volumétrica tende a aumentar o desvio do balanço de energia para o lado positivo, indicado pelas

linhas verdes. Já a reconciliação mássica leva o balanço energético para o lado negativo, mas tende a diminuir a intensidade do desvio (linhas roxas).

A Figura 6 ainda mostra que, para cada reconciliação de dados, o impacto do uso dos pesos A ou B é insignificante para o balanço energético, uma vez que as linhas cheias e tracejadas de um mesmo tom não apresentaram significativa variação entre si.

A Figura 7 traz o resultado do balanço volumétrico fase gás, apresentando-o como um percentual sobre a quantidade total de volume entregue pelas fontes.

**Figura 7** - Balanço volumétrico da fase gás. Balanço original e comparação dos balanços oriundos da reconciliação volumétrica e mássica da fase gás, com os conjuntos de pesos A e B.

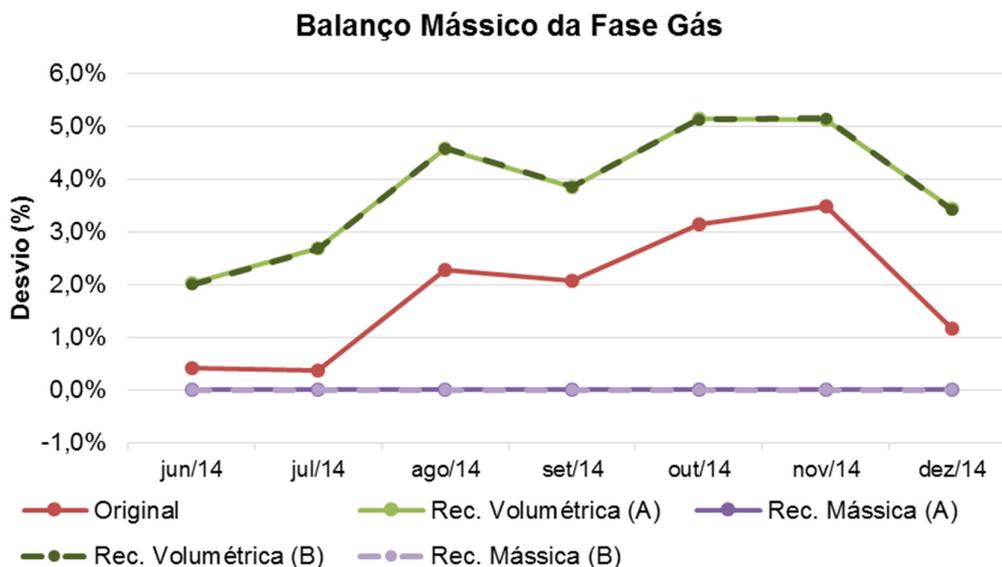


Fonte: O autor.

Da Figura 7, verifica-se que, enquanto o balanço volumétrico original era deficitário, a reconciliação mássica (linhas roxas) gera um balanço volumétrico ainda mais deficitário, pois, a fim de zerar o balanço mássico, o algoritmo levou a uma maior saída volumétrica do sistema. As linhas verdes apontam o óbvio em relação ao balanço volumétrico, o desvio do balanço reconciliado é nulo.

A Figura 8 traz o resultado do balanço mássico da fase gás, apresentando-o como um percentual sobre a quantidade total de massa entregue pelas fontes.

**Figura 8** - Balanço mássico da fase gás. Balanço original e comparação dos balanços oriundos da reconciliação volumétrica e mássica da fase gás, com os conjuntos de pesos A e B.



Fonte: O autor.

Da Figura 8, verifica-se que o balanço mássico original era superavitário e que a reconciliação volumétrica (linhas verdes) gerou um balanço volumétrico ainda mais superavitário, pois, a fim de zerar o balanço volumétrico, as saídas de gás do sistema em geral foram reduzidas. As linhas roxas apontam o resultado esperado balanço mássico, desvio nulo.

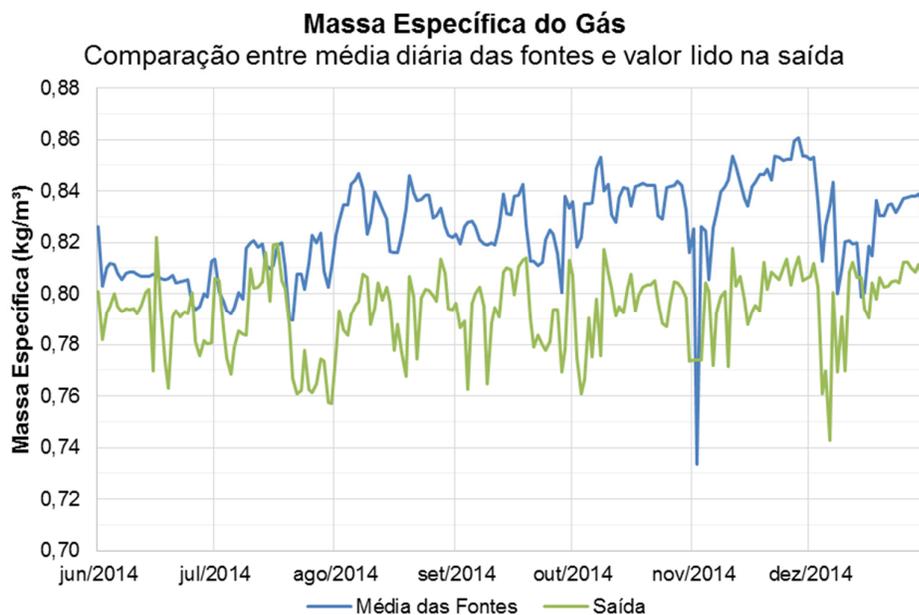
Tanto a Figura 7 quanto a Figura 8 também mostram que para cada reconciliação de dados, o impacto do uso dos pesos A ou B é insignificante para o balanço volumétrico e mássico, uma vez que as linhas cheias e tracejadas de um mesmo tom não apresentaram grande variação entre si.

Para auxiliar na avaliação dos comportamentos identificados, foi analisada a situação média do gás entregue pelas fontes ao sistema e comparado com os dados de composição obtidos em amostra única diária da saída do sistema.

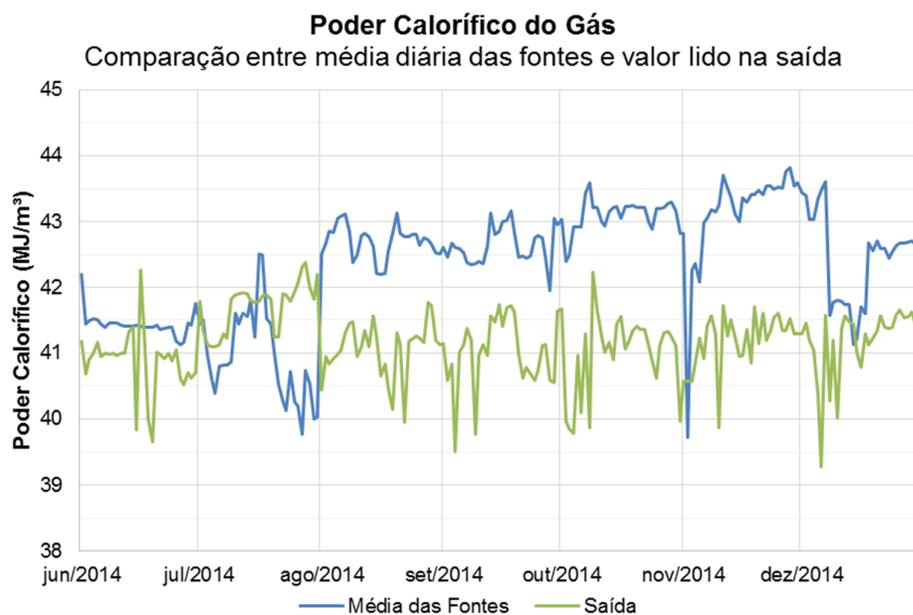
A Figura 9 traz esta comparação em relação à massa específica do gás à condição padrão, e a Figura 10 traz o poder calorífico. De modo geral, o gás na saída possui menor massa específica, ou seja, menor massa molar, e menor poder calorífico que o gás médio que entra no sistema. Esta diferença era menor até meados de julho,

tendo se intensificado após este mês. Tal fato pode estar relacionado com o início da exportação de gás pela fonte F<sub>4</sub>, a de maior PCS e maior teor de C3+ entre as fontes. Nos primeiros dias do mês de novembro houve uma parada programada da maioria das unidades, vindo a explicar a queda abrupta sobre a média das fontes.

**Figura 9** - Massa específica da fase gás. Comparação entre a média diária global entrega pelas fontes com os valores diários lidos na saída do sistema.



**Figura 10** - Poder calorífico da fase gás. Comparação entre a média diária global entrega pelas fontes com os valores diários lidos na saída do sistema.



## 5.5. IMPACTO DA CONDENSAÇÃO AO LONGO DO ESCOAMENTO

Dentre as possíveis causas para o desvio no balanço volumétrico da fase gás estão a condensação de parte da fase gás ao longo do escoamento e o fato da fonte  $F_1$  injetar no gasoduto uma corrente líquida de condensado de gás natural não estabilizado. Este capítulo traz resultados de uma análise sobre estes dois fatores.

Por se tratar de uma corrente de gás não processado e de um escoamento que possui pontos do par temperatura e pressão que se localizam dentro do envelope de fases deste gás, é possível que uma condensação de parte da fase gás ao longo do escoamento tenha potencial de reduzir o volume de gás verificado na saída do sistema.

Já a fonte  $F_1$  injeta no gasoduto, em conjunto com a fase gás, uma fase de condensado de gás natural não estabilizado, que pode perder massa ao longo do escoamento devido à queda de pressão, vindo a colaborar para um aumento do volume de fase gás na saída do sistema.

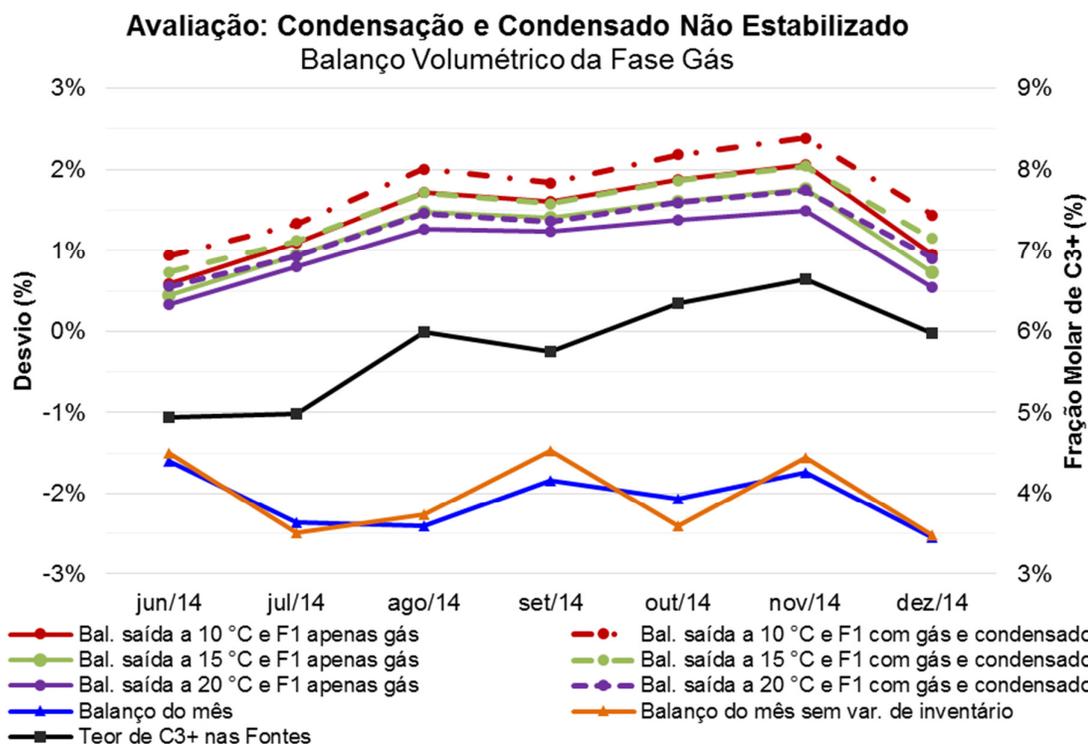
Para a avaliação destes dois itens, foram utilizados os valores médios de exportação de gás medido e de composição referentes a cada fonte para alimentar um cálculo termodinâmico no simulador de processos Hysys, utilizando a equação de estado de Peng-Robinson, sendo o interesse analisar a fase gás na saída do coletor de condensado a uma determinada pressão de chegada (definida como 42 bar g) e em três valores de temperatura (10 °C, 15 °C e 20 °C), a fim de prover uma análise de sensibilidade.

A Figura 11 traz os resultados em termos de balanço volumétrico da fase gás, apresentando-os como um percentual sobre o volume total entregue pelas fontes.

Em azul é apresentado o balanço referente ao mês, em laranja, o mesmo sem a variação de inventário, ou seja, traz apenas a diferença entre fontes e saída. Em vermelho, verde e roxo é apresentado o potencial de impacto da condensação no balanço de acordo com cada temperatura avaliada. Linhas cheias trazem a fonte  $F_1$  injetando apenas gás e as linhas tracejadas consideram também a injeção da fase

condensado por ela. Valores positivos significam saída menor que entrada (acúmulo). Em preto é representado o teor médio de C3+ da mistura de gás entregue pelas fontes, em % molar.

**Figura 11** - Avaliação do efeito da condensação da fase gás ao longo do escoamento e da injeção de fase condensado não estabilizado pela fonte F<sub>1</sub>. Balanço volumétrico da fase gás.



Fonte: O autor.

Da Figura 11 verifica-se que o impacto da condensação no escoamento deveria ser notado como um volume de gás na saída inferior ao da entrada (desvio positivo), visto que parte das moléculas que entraram no sistema na fase gás saem na fase líquida, e este comportamento é de maior intensidade quanto menor a temperatura de chegada do gás na saída do sistema. No entanto, o fato verificado é que o balanço do sistema (linhas azul e laranja) mostrou sempre um desvio negativo, ou seja, saída de gás maior que entrada de gás do sistema.

Em relação à injeção de condensado pela fonte F<sub>1</sub>, na presença do condensado há uma maior redução da fase gás na saída, indicando que mais moléculas de gás tendem a condensar no escoamento, compensando alguma perda por vaporização da

fase líquida injetada. Portanto, este condensado da fonte  $F_1$  intensifica o efeito de condensação da fase gás.

Já o maior efeito de condensação verificado está relacionado à fração molar na fase condensado dos componentes de maior massa molar da fase gás. Na presença do condensado injetado pela fonte  $F_1$ , que possui significativa presença de  $C_{10+}$ , a fração molar dos demais componentes diminui no condensado, levando a uma maior condensação destes, a fim de atingir o equilíbrio termodinâmico. Desta forma, há uma maior quantidade de moléculas que deixam a fase gás em comparação ao cenário da fonte  $F_1$  não injetando condensado.

O potencial de condensação da fase gás pode ser associado ao teor de  $C_{3+}$  médio entregue pelas fontes, devido ao comportamento similar das curvas – algo que se repete nos demais gráficos analisados.

Ainda na Figura 11 é possível avaliar o impacto da variação de inventário sobre o balanço do mês. Quanto maior a distância entre a linha azul (balanço completo) e a linha laranja (apenas diferença de entradas e saída, sem variação de inventário), maior terá sido a variação do inventário no mês. Os meses em que esta diferença se fez notar foram setembro e outubro, onde este valor chegou a representar aproximadamente 0,35% do total entregue pelas fontes. Nos demais meses oscilou entre 0,10% e 0,20%.

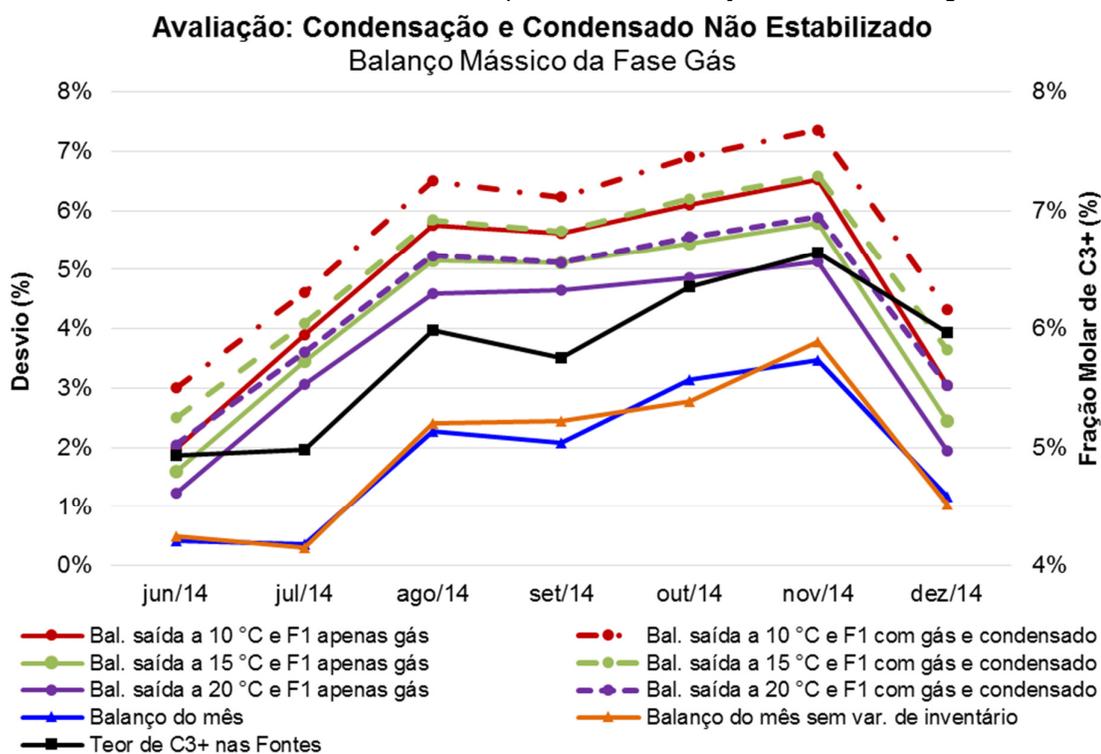
Da Tabela 4, o mês de setembro apresentou no seu último dia um aumento significativo de inventário em relação ao inventário do fechamento de agosto, que por sua vez voltou aos patamares anteriores no final do mês de outubro, explicando, assim, a maior variação de inventário.

A Figura 12 traz a avaliação em termos de balanço mássico, apresentando o resultado do balanço como um percentual sobre a quantidade total de massa entregue pelas fontes.

O efeito esperado pela condensação ao longo do escoamento levaria para uma menor quantidade de massa saindo do sistema na fase gás do que entrando nele, e tal efeito é aumentado quando se considera a injeção de condensado pela fonte F<sub>1</sub>.

Este comportamento também segue um perfil similar à variação de C3+ médio entregue pelas fontes. Nesta avaliação o balanço mensal do sistema aponta um desvio para o lado esperado (positivo), embora em menor intensidade.

**Figura 12** - Avaliação do efeito da condensação da fase gás ao longo do escoamento e da injeção de fase condensado não estabilizado pela fonte F<sub>1</sub>. Balanço mássico da fase gás.



Fonte: O autor.

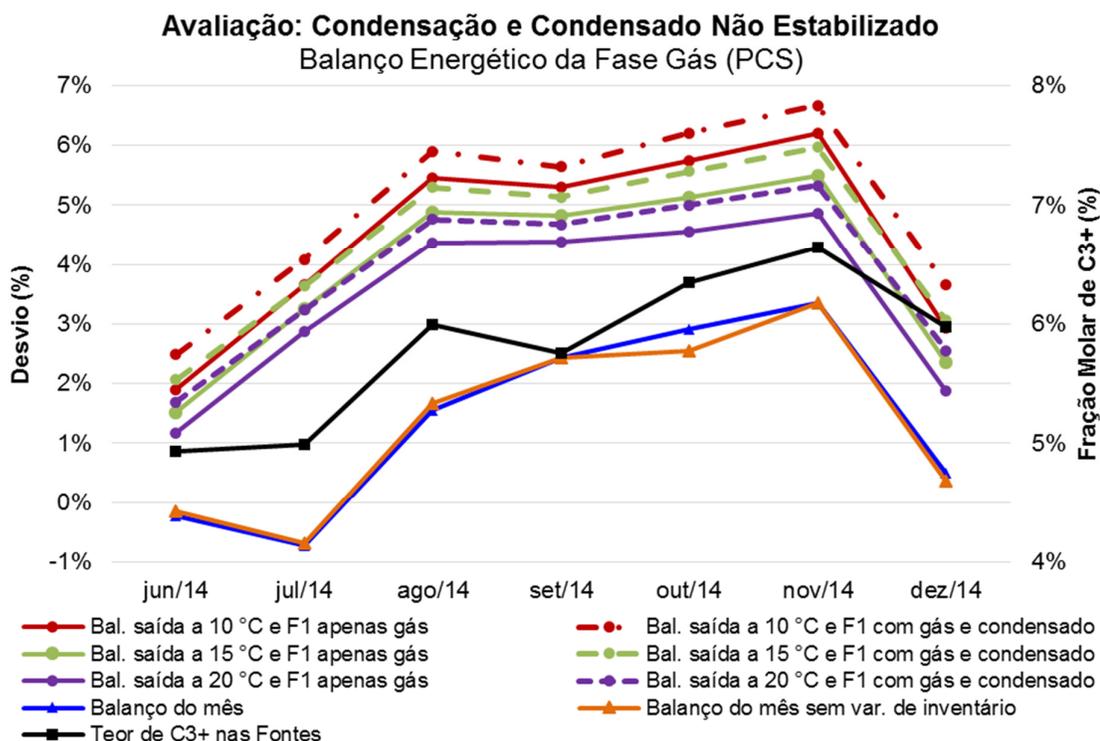
A Figura 13 apresenta o balanço energético da fase gás em termos de poder calorífico superior, apresentando-o como um percentual sobre a energia total entregue pelas fontes.

O efeito esperado pela condensação ao longo do escoamento levaria para uma menor energia saindo do sistema na fase gás do que entrando, e tal efeito é também aumentado quando se considera a injeção de condensado pela fonte F<sub>1</sub>. Este

comportamento também segue um perfil similar à variação de C3+ médio entregue pelas fontes.

O balanço mensal do sistema apresentou grande variação, foi desde um desvio negativo (saída supera entradas) nos dois primeiros meses a desvio positivo nos demais meses, mas a intensidade do desvio foi sempre menor que o potencial. Esta diferença de comportamento dos meses de junho e julho para os demais também pode estar associada ao início de exportação de gás pela fonte F<sub>4</sub>, a de maior PCS e maior teor de C3+ entre as fontes.

**Figura 13** - Avaliação do efeito da condensação da fase gás ao longo do escoamento e da injeção de fase condensado não estabilizado pela fonte F<sub>1</sub>. Balanço energético (PCS) da fase gás.



## 6. DISCUSSÃO

No capítulo 5 foram apresentados os resultados da reconciliação volumétrica e mássica, bem como das análises sobre o balanço de energia em termos de poder calorífico superior e o potencial de impacto nos balanços da condensação de frações mais pesadas do gás natural ao longo do escoamento.

Nos balanços iniciais, foi verificado que o balanço volumétrico foi sempre positivo nos meses analisados, com maior saída de gás do sistema do que entrada, considerando as variações de inventário. Porém, o balanço mássico inicial possui comportamento oposto, com menos massa saindo do sistema na fase gás do entrando nele. Já o balanço de energia começou negativo nos dois primeiros meses, mais energia saindo do que entrando, mas ficou positivo nos meses seguintes, caindo de intensidade no último avaliado, indicando uma menor saída de energia.

A reconciliação volumétrica apresentou resultados semelhantes com os conjuntos de pesos A e B em termos de balanço global, tendo ambos apresentado dificuldade de reconciliar o mês de novembro, no qual foi necessário relaxar os limites das variáveis para a convergência, resultando em algumas saindo da tolerância previamente estipulada.

Neste mês houve uma parada programada de produção nos primeiros dias, o que pode ser a causa do comportamento observado, por gerar significativa variação nos volumes medidos e redução da pressão no sistema, devido à redução ou interrupção do escoamento, refletindo no valor de inventário total. O mês de dezembro, por sua vez, destoou por apresentar uma grande variação do inventário final reconciliado em relação ao valor original.

A reconciliação mássica apresentou também resultados semelhantes com os conjuntos de pesos A e B, repetindo dificuldade de reconciliar o mês de novembro, demandou o mesmo ajuste de relaxamento dos limites das variáveis para a convergência, resultando em algumas saindo da tolerância previamente estipulada. Já o mês de dezembro teve uma variação do inventário final reconciliado em linha com os demais meses.

A comparação dos valores médios de massa específica e poder calorífico da entrada com a saída mostram que os valores na saída são majoritariamente menores, com a distância entre eles aumentando após o mês de julho. Portanto, indicam que o gás da saída é mais pobre em frações de maior massa molar do que o gás médio de entrada.

Esse comportamento vem a explicar o motivo da reconciliação volumétrica, que de modo geral atua para reduzir o volume retirado de gás, resultar em um balanço mássico ainda mais positivo que o original, e, por sua vez, a reconciliação mássica, que atua para aumentar a saída de massa do sistema, gerar um balanço volumétrico ainda mais negativo que o original, pois há mais volume de gás saindo.

Do ponto de vista do balanço energético, a reconciliação volumétrica manteve todos os meses no lado positivo do balanço (menor saída de energia em relação às entradas), aumentando a intensidade do desvio, enquanto o balanço mássico colocou todos os meses no lado negativo (maior saída de energia em relação às entradas), mantendo a intensidade média do desvio mais baixa, entre 0 e 1%.

Em todos os meses analisados houve maior volume de gás saindo do que entrando no sistema (balanço negativo) e o inverso no balanço mássico. Como este comportamento não se apresenta como algo aleatório, e somado ao histórico de que o balanço volumétrico apresentou sempre um desvio para negativo durante a operação deste sistema, algumas hipóteses foram levantadas e avaliadas para compreender o comportamento verificado:

- O menor rigor de medição da saída  $S_1$ , visto que se trata de uma medição de caráter operacional, diferente das medições de entrada, que seguem o rigor de medição fiscal de acordo com o Regulamento Técnico de Medição;
- O impacto da condensação da corrente de gás natural ao longo do escoamento, o que pode diminuir o volume total de fase gás que sai do sistema, sendo verificada a presença de líquidos no coletor de condensado nestes pontos de saída do sistema de escoamento;
- O potencial impacto ao balanço da fase gás do fato da fonte  $F_1$  injetar um

condensado de gás natural no duto  $V_1$ , que, por ser um líquido não estabilizado, ou seja, de elevada pressão de vapor, pode, ao longo do escoamento, perder parte de sua massa para a fase gasosa, aumentando o volume de gás que sai do sistema;

Conforme explicado no capítulo 4.1, os volumes de líquidos não foram considerados ao longo das reconciliações volumétrica e mássica, baseando-se apenas nos volumes movimentados de gás. Porém, uma análise sobre o nível de impacto das duas últimas hipóteses foi realizada no capítulo 5.5.

Foi apresentado que o impacto da condensação no escoamento deveria ser notado como um volume de gás na saída inferior ao da entrada (desvio positivo), visto que parte das moléculas que entraram no sistema na fase gás saem na fase líquida. No entanto, o fato verificado é que o balanço do sistema (linhas azul e laranja) mostrou sempre um desvio negativo, ou seja, saída de gás maior que entrada de gás do sistema.

Já no balanço mássico, o efeito esperado pela condensação ao longo do escoamento também levaria para uma menor massa saindo do sistema na fase gás (desvio positivo), e tal efeito é aumentado quando se considera a injeção de condensado pela fonte  $F_1$ . O balanço mássico do sistema teve desvio positivo nos meses analisados, coerente com o comportamento esperado, porém em menor intensidade do que o potencial.

O balanço de energia em termos de poder calorífico superior mostra que o efeito esperado seria também o desvio positivo, com menor saída de energia na fase gás em relação ao que nele entrou. Os dados do balanço original mostram um comportamento contrário nos dois primeiros meses, que se inverte a partir de agosto, tornando-se positivo e crescendo em intensidade, sendo verificada uma redução da intensidade no mês de dezembro, último da série.

Os três balanços apresentam uma tendência com perfil similar ao de variação de  $C3+$  médio entregue pelas fontes, comportamento esperado uma vez que esta fração

compõe em grande parte o condensado de gás natural formado ao longo do escoamento e possui maior PCS. As variações mais bruscas verificadas a partir de agosto podem estar relacionadas com o início de exportação de gás pela fonte F<sub>4</sub> em julho, a de maior PCS e maior teor de C<sub>3+</sub> entre as fontes.

Vale destacar que além da medição de saída, a medição de composição também afeta o resultado do balanço mássico e energético.

A saída é o ponto do sistema sujeito à maior variação de composição ao longo de um dia, visto que a corrente naquele ponto é resultante da mistura de todas as fontes. Ela está, portanto, sujeita a todas as variações individuais de vazão das fontes e eventuais variações de composição em cada uma. Nela há apenas uma medição pontual diária, o que pode não gerar uma massa específica bem representativa da fase gás.

Nas entradas, a composição é atualizada mensalmente com o valor de uma análise pontual, de acordo com norma estabelecida pelo Regulamento Técnico de Medição. Embora a frequência seja menor que a da saída, é esperado que a composição de entrada sofra menores variações por depender de variáveis com uma frequência de alteração pouco frequente. São elas: arranjo de poços produtores, que pouco se altera uma vez que a unidade está em regime normal de produção, e do desempenho da remoção de CO<sub>2</sub> nas unidades que possuem esta operação, cujos possíveis descontroles são pontuais e pouco frequentes. Logo, é um tipo de variação menos recorrente que a variação da paridade entre as vazões entregues por todas as fontes ao qual a saída está sujeita.

Em termos de frequência de atualização da composição no computador de vazão dos pontos de medição utilizados, um fator que pode afetar a medição de volumes escoados, nos pontos de entrada a frequência é mensal, conforme estabelecido pelo RTM, porém é irregular no ponto de saída, por se tratar de uma medição operacional, de menor rigor de gestão metrológica.

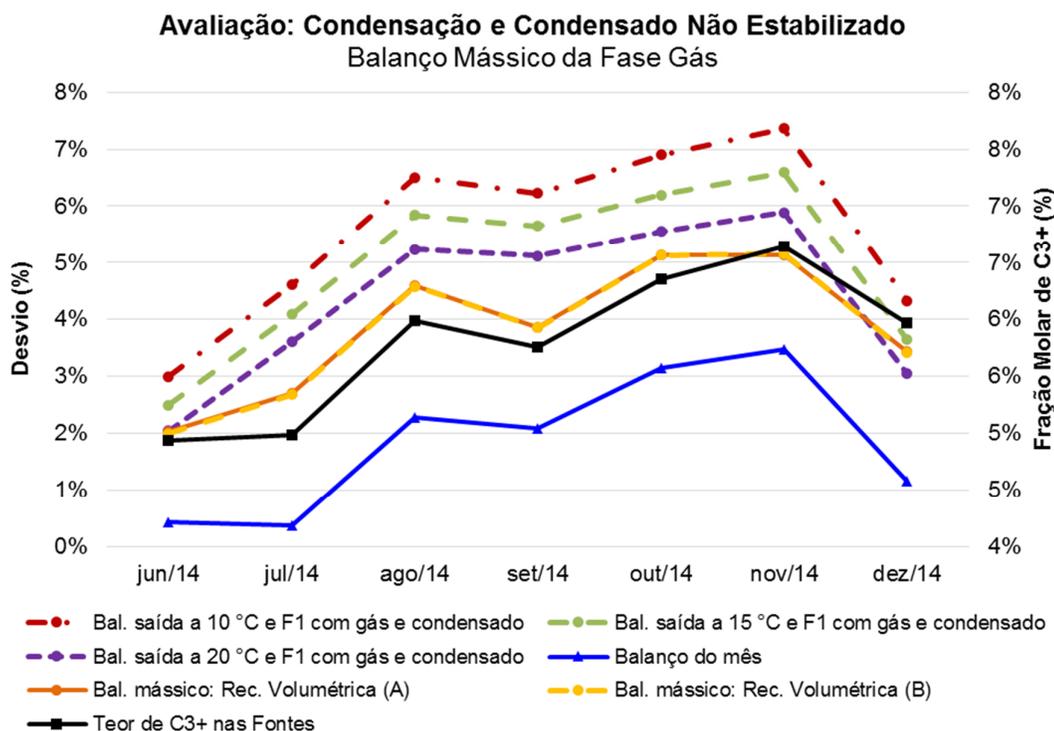
Ao se analisar conjuntamente os resultados da reconciliação de dados com o potencial impacto da condensação de parte do gás ao longo do escoamento e da injeção de

uma corrente de condensado não estabilizado pela fonte  $F_1$ , pode-se concluir que em relação ao balanço original do sistema, os balanços mássico e energético possuem um comportamento que mais se aproxima do esperado por conta dos impactos citados, enquanto o balanço volumétrico destoa do comportamento esperado.

A reconciliação mássica tende a piorar o comportamento esperado do balanço volumétrico e do energético, já a reconciliação volumétrica levou os balanços mássico e energético para um comportamento dentro do esperado pela avaliação dos fatores citados.

A Figura 14 traz, em forma de balanço mássico da fase gás, a comparação dos resultados da reconciliação volumétrica com o potencial de impacto dos efeitos da condensação da fase gás ao longo do escoamento e da injeção de fase condensado não estabilizado pela fonte  $F_1$ . Nota-se que a intensidade e o perfil ficam bem próximos do potencial de impacto esperado.

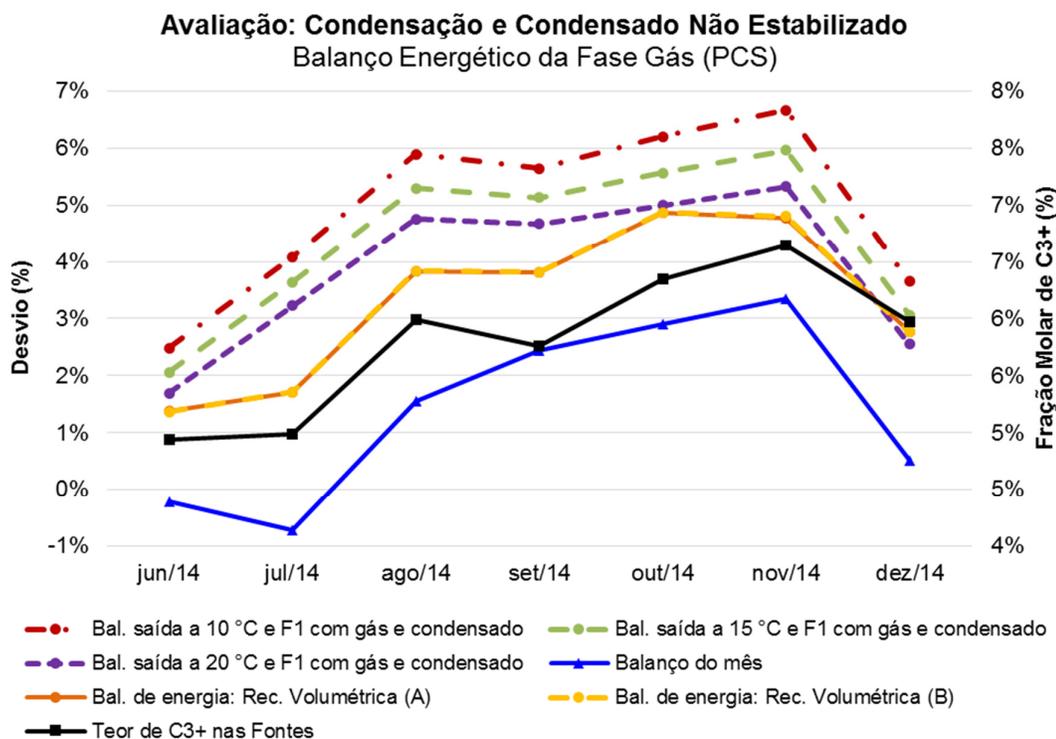
**Figura 14** - Comparação dos resultados da reconciliação volumétrica com o potencial de impacto dos efeitos da condensação da fase gás ao longo do escoamento e da injeção de fase condensado não estabilizado pela fonte  $F_1$ . Balanço mássico da fase gás.



Fonte: O autor.

A Figura 15 traz, em forma de balanço de energia da fase gás, a mesma comparação anterior. Nota-se como também a intensidade e o perfil ficam bem próximos do potencial de impacto esperado.

**Figura 15** - Comparação dos resultados da reconciliação volumétrica com o potencial de impacto dos efeitos da condensação da fase gás ao longo do escoamento e da injeção de fase condensado não estabilizado pela fonte F<sub>1</sub>. Balanço energético (PCS) da fase gás.



Portanto, os dados indicam que a reconciliação volumétrica é a mais apropriada para este sistema, pois leva as demais variáveis para dentro do perfil esperado de comportamento. A medição de volume da saída aparenta ser a variável de maior urgência de melhora da medição, seguida da composição naquele ponto.

Devido ao impacto da condensação ao longo do escoamento, o comportamento esperado seria obter um balanço reconciliado da fase gás com entradas menores que saídas do sistema (positivo), e não um balanço volumétrico da fase gás que seja nulo. No entanto, para desenvolver um balanço mais robusto seria necessário considerar as frações líquidas presentes no sistema, agregando maior dificuldade na aquisição e qualidade dos dados.

## 7. CONCLUSÃO

O método proposto para a reconciliação de dados da movimentação de gás pode ser utilizado com resultados satisfatórios. Foram testados dois conjuntos de pesos para a aplicação do algoritmo. Um foi arbitrado em função da familiaridade do autor com a qualidade dos pontos de dados, e outro obtido através da ponderação pela variância dos volumes diários medidos, abordagem tradicional presente na literatura, como verificado em Narasimhan e Jordache (2000) e Romagnoli e Sanchez (1999). Ambos tiveram resultados consistentes, sendo preferível a abordagem presente na literatura, cabendo ao usuário uma avaliação crítica quando os pesos obtidos são muito discrepantes entre si, o que gera um maior esforço computacional e pode levar a resultados não satisfatórios.

A condensação de parte da fase gás ao longo do escoamento, por se tratar de um sistema de escoamento de gás não processado, e a injeção de uma corrente de condensado de gás natural não estabilizado por uma das fontes, impactam o balanço da fase gás, comportamento que foi demonstrado a partir de uma abordagem termodinâmica do sistema. Como resultado, é observado um menor volume e massa de gás na saída, bem como menor energia em termos de poder calorífico superior. A massa reduzida da fase gás irá compor uma fase de condensado de gás natural, composta em grande parte pelas frações de maior massa molar desse gás. O efeito é acentuado pela presença da corrente de condensado de gás natural em uma das fontes.

Outros fatores de considerável impacto na qualidade dos dados e no resultado final da reconciliação são a qualidade da medição de saída do sistema, notadamente uma medição de menor rigor em termos construtivos e de gestão metrológica em relação às demais, a representatividade da composição do gás neste mesmo ponto, que apesar de possuir uma taxa de amostragem diária, de maior frequência que as fontes, a saída é o ponto mais suscetível à variação de composição.

Por fim, o inventário é calculado a partir de uma regressão que se baseia em um regime permanente de escoamento, o que pode apresentar maior desvio quando

fortes transiente estão ocorrendo no último dia do mês, porém a variação de inventário entre o início e final do mês possui baixo impacto no balanço.

A análise dos resultados indica que a reconciliação volumétrica é a mais apropriada para este sistema, pois os dados reconciliados levam os balanços mássicos e de energia em termos de poder calorífico, ambos na fase gás, para dentro do perfil esperado de comportamento. A medição de volume da saída aparenta ser a variável de maior urgência de melhora da medição, seguida da composição naquele ponto.

Embora um balanço volumétrico nulo apenas da fase gás não seja por si só o comportamento esperado quando se considera os efeitos descritos de condensação de parte da fase gás, pois uma menor saída em volume em relação à entrada no sistema seria o mais adequado, para desenvolver um balanço mais robusto seria necessário considerar as frações líquidas presentes no sistema. Acrescentar a fase condensado, entretanto, acarreta maior dificuldade na aquisição e qualidade dos dados.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-RASHEED, M.; WALLOPPILLAI, R.; WAGNER, G.; SCHEERER, H. MGS-STAT. A Pipeline Management Tool for Saudi Aramco's Master Gas System. **Pipeline Simulation Interest Group**, 2011.

ALVES, R.M.B.; NASCIMENTO, C.A.O. Gross errors detection of industrial data by neural network and cluster techniques. **Braz. J. Chem. Eng.**, São Paulo, v. 19, n. 4, p. 483-489, Dec. 2002.

BAGAJEWICZ, M. J. **Smart Process Plants: Software and Hardware Solutions for Data Accuracy: Data Reconciliation, Gross Error Detection, and Instrumentation Upgrade**. McGraw-Hill Education, 2010.

BAGAJEWICZ, M. J.; CABRERA, E. Data reconciliation in gas pipeline systems. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 42, n. 22, p. 5596-5606, 2003.

COELHO, P. M.; PINHO, C. Considerations about equations for steady state flow in natural gas pipelines. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 29, n. 3, p. 262-273, 2007.

D'ANDREA, T. Z. et al. Santos Operational Simulation System: Integrated Dynamic Compositional Simulation of Multiphase Pipeline Network and Treatment Facilities to Assist in Planning, Operation and Production Management In: **Rio Pipeline Conference & Exposition**. Brazilian Petroleum, Gas and Biofuels Institute, 2015.

D'ANDREA, T. Z.; ROTAVA, E.; RODINI NETO, J. A.; VIANNA JR, A. S. Estimation of Gas Pipeline Inventory: A Comparison of Quick Approaches to Calculate Linepack in a Wet Gas Network In: **Rio Pipeline Conference & Exposition**. Brazilian Petroleum, Gas and Biofuels Institute, 2015.

ETTOUNEY, R. S.; EL-RIFAI, M. A. Quick estimation of gas pipeline inventory. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 69, n. 1, p. 139-142, 2009.

GASSCO. **Gassled tariff areas**. Noruega. Disponível em: <<http://www.gassco.no/en/our-activities/capacity-management/gassled-tariff-areas/>>. Acesso em: 08 nov. 2015.

GEIGER, G. State-of-the-art in leak detection and localization. **Oil Gas European Magazine**, v. 32, n. 4, p. 193, 2006.

FUKUSHIMA, K. et al. Gas pipeline leak detection system using the online simulation method. **Computers & Chemical Engineering**, v. 24, n. 2, p. 453-456, 2000.

INMETRO. **Avaliação de dados de medição**: Guia para a expressão de incerteza de medição – GUM 2008. Duque de Caxias, Rio de Janeiro, 2012. 141 p.

KATZ, D. L. V. et al. **Handbook of Natural Gas Engineering**. New York: McGraw-Hill, 1959.

KEYAERTS, N.; HALLACK, M.; GLACHANT, J.; D'HAESELEER, W. Gas market distorting effects of imbalanced gas balancing rules: Inefficient regulation of pipeline flexibility. **Energy Policy**, v. 39, n. 2, p. 865-876, 2011.

MCALLISTER, E. W. **Pipeline Rules of Thumb Handbook: A Manual of Quick, Accurate Solutions to Everyday Pipeline Engineering Problems**. Gulf Professional Publishing, 2013.

MENON, E. S. **Gas Pipeline Hydraulics**. Taylor and Francis Group, CRC Press, 2005.

NARASIMHAN, S.; JORDACHE, C. **Data reconciliation and gross error detection: an intelligent use of process data**. Gulf Professional Publishing, 2000.

NØRSTEBØ, V. S. **Optimum operation of gas export systems**. 2008. Tese de Doutorado. Departamento de Energia e Engenharia de Processo, NTNU, Trondheim.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W.; MALONEY, J. O. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 7th ed. New York: McGraw-Hill, 1997.

PETROBRAS. **Incorporação de Reservas e Novos Recordes de Produção no Pré-sal**. Rio de Janeiro, 15 jan. 2014. Disponível em: <<http://www.investidorpetrobras.com.br/pt/comunicados-e-fatos-relevantes/incorporacao-de-reservas-e-novos-recordes-de-producao-no-pre-sal>>. Acesso em: 08 nov. 2015.

REED, D.; NARVAEZ, O.; TEPEDINO, A.; FRISOLI, C. An Example of Business and Operational Integration for a Gas Pipeline, **Pipeline Simulation Interest Group**, 2006.

ROMAGNOLI, J. A.; SANCHEZ, M. C. **Data processing and reconciliation for chemical process operations**. Academic Press, 1999.

ROTAVA, E.; D'ANDREA, T. Z.; SERPEJANTE, C. G.; HARTMANN, D.; RODINI NETO, J. A.; SCHUHLI, J. B. Gas Network Flow Simulation Based on Lagrangian Approach – Santos Basis In: **Rio Pipeline Conference & Exposition**. Brazilian Petroleum, Gas and Biofuels Institute, 2015.

SCHROEDER, D. W. A tutorial on pipe flow equations, **Pipeline Simulation Interest Group**, 2001.

VELDE, B.; POSTVOLL, W.; HANMER, G.; MUNRO, J. Application Benefit of the Online Simulation Software for Gassco's Subsea Pipeline Network. **Pipeline Simulation Interest Group**, 2013.

WEISS, G. H.; ROMAGNOLI, J. A.; ISLAM, K. A. Data reconciliation - an industrial case study. **Computers & Chemical Engineering**, v. 20, n. 12, p. 1441-1449, 1996.

WOLDEYOHANNES, A. D.; MAJID, M. A. A. Simulation model for natural gas transmission pipeline network system. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 19, n. 1, p. 196-212, 2011.

## APÊNDICE A – CÁLCULO DE INVENTÁRIO DE DUTOS

Para a realização da reconciliação de dados da movimentação de gás, é necessário obter o inventário de cada duto do sistema no período utilizado.

No capítulo 3.6 da Revisão Bibliográfica, são apresentadas algumas abordagens de cálculo de inventário de dutos. Uma comparação entre três métodos de cálculo rápido de inventário foi realizada pelo autor (D'ANDREA et al., 2015).

O primeiro método baseia-se na abordagem clássica de duto horizontal com escoamento monofásico de gás, no qual a pressão média é dada pela eq.(36), o segundo baseado na eq.(40), apresentada por Katz (1959) e o terceiro que utiliza uma abordagem de regressão não-linear de um conjunto de dados gerado a partir de simulação rigorosa de escoamento de um envelope de condições operacionais para cada duto. O método escolhido para aplicação na reconciliação de dados foi a abordagem de regressão não-linear, que é apresentada neste apêndice.

A fim de obter um valor de referência para a comparação dos métodos, foi elaborado um mapa de condições operacionais para o sistema em estudo. As variáveis de interesse foram obtidas por meio de simulação rigorosa de escoamento em regime permanente no simulador Olga. Foi utilizado um modelo composicional, com uso da equação de estado de Peng-Robinson.

Para as simulações, dois nós foram considerados na definição de cenários.

O primeiro ponto foi a pressão do duto no final do  $V_1$ , representando a pressão no coletor de condensado da saída  $S_1$ . Com este nó, foi definida uma composição de referência para o gás ali escoado e um conjunto de vazões para cada ponto de pressão.

O segundo ponto foi a pressão no nó  $N_1$ , que representa a chegada dos dutos a montante da unidade  $F_1$ . Neste ponto, todo o escoamento dos dutos  $V_2$  e  $V_3$  convergem para um único equipamento submarino, de onde parte um riser que

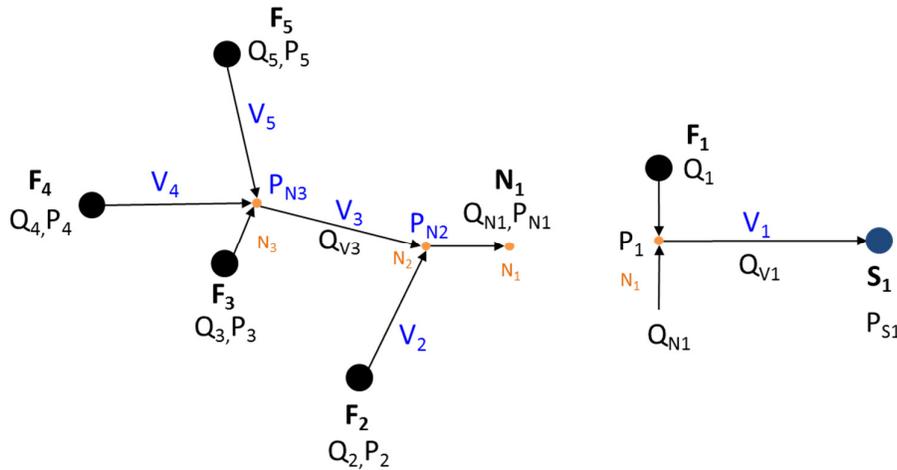
interliga o sistema à unidade  $F_1$ . Para cada ponto de pressão neste nó, foram criados diversos pares de vazão para as unidades de  $F_2$  a  $F_5$ .

Os valores de pressão e vazão adotados neste envelope refletem características operacionais do sistema e representam pontos factíveis de operação. A Figura 16 traz um diagrama com as variáveis utilizadas no estudo de inventário e a Tabela 20 traz o significado das variáveis.

**Tabela 20** - Variáveis utilizadas no estudo de inventário.

VARIÁVEL	UNIDADE	DESCRIÇÃO
$P_1$	bar a	Pressão na entrada do duto $V_1$ , lida na exportação da unidade $F_1$ .
$P_2$	bar a	Pressão na entrada do duto $V_2$ , lida na exportação da unidade $F_2$ .
$P_3$	bar a	Pressão na entrada do duto $V_3$ , lida na exportação da unidade $F_3$ .
$P_4$	bar a	Pressão na entrada do duto $V_4$ , lida na exportação da unidade $F_4$ .
$P_5$	bar a	Pressão na entrada do duto $V_5$ , lida na exportação da unidade $F_5$ .
$P_{N1}$	bar a	Pressão na saída do duto $V_1$ , lida na importação da unidade $F_1$ .
$P_{N2}$	bar a	Pressão no nó $N2$ , ponto submarino de interligação dos dutos $V_2$ e $V_3$ . Obtida apenas por simulação.
$P_{N3}$	bar a	Pressão no nó $N3$ , ponto submarino de interligação dos dutos $V_3$ , $V_4$ e $V_5$ . Obtida apenas por simulação.
$P_{S1}$	bar a	Pressão na saída do duto $V_1$ , lida no coletor de condensado da unidade $S_1$ .
$Q_1$ a $Q_5$	$10^6$ m <sup>3</sup> /d	Vazão instantânea de cada uma unidade de $F_1$ a $F_5$ , respectivamente.
$Q_{N3}$	$10^6$ m <sup>3</sup> /d	Vazão instantânea de importação da unidade $F_1$ .
$Q_{V1}$	$10^6$ m <sup>3</sup> /d	Vazão instantânea do duto $V_1$ , obtida da soma de $Q_1$ e $Q_{N1}$ .
$Q_{V3}$	$10^6$ m <sup>3</sup> /d	Vazão instantânea do duto $V_3$ , obtida da soma de $Q_3$ , $Q_4$ e $Q_5$ .
$V_1$ a $V_5$	m <sup>3</sup>	Volume de gás natural nos dutos de $V_1$ a $V_5$ , respectivamente. Obtidos apenas por simulação.

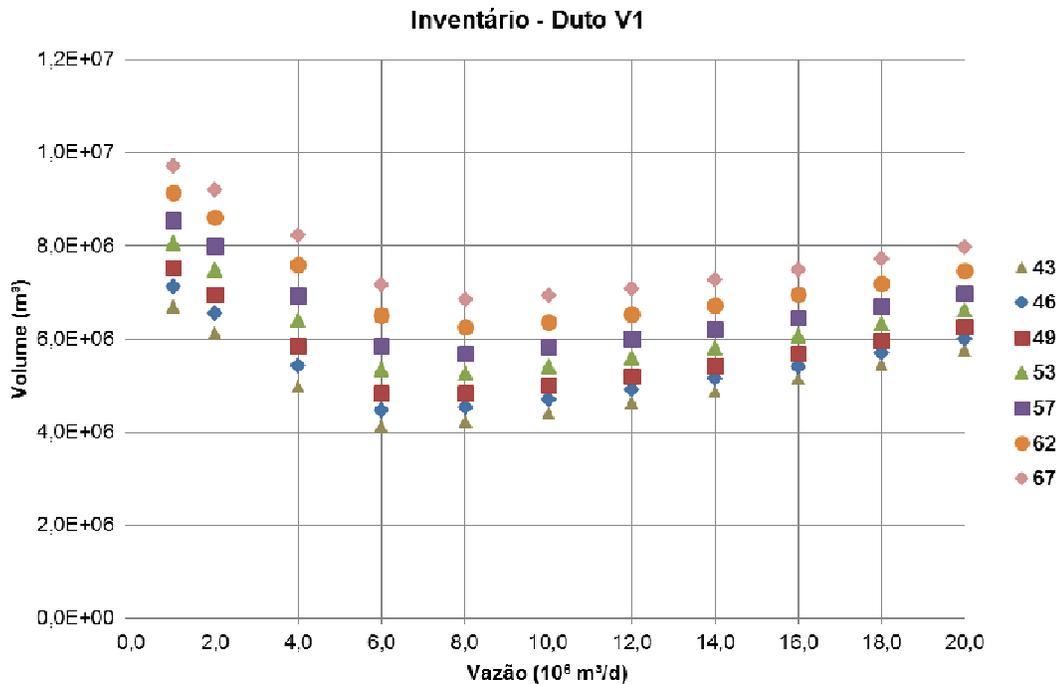
Figura 16 - Representação das variáveis utilizadas no estudo de inventário.



Fonte: O autor.

A Figura 17 traz o resultado da simulação de inventário da fase gás para o duto  $V_1$ . Cada grupo de dados, representado por cores diferentes, traz uma pressão de chegada na unidade  $S_1$ , e estes estão plotados em função da vazão no duto  $V_1$ .

Figura 17 - Inventário do duto  $V_1$  (fase gás), resultado de simulação em regime permanente.



Fonte: O autor.

Na Figura 17 pode-se verificar uma mudança de tendência do inventário abaixo da vazão de  $8,0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ . Tal fato ocorre também nos dutos  $V_2$  e  $V_3$  e sua explicação

deve-se ao fato do escoamento neste sistema estar dentro do envelope de condensação do gás natural, de modo que ocorre acúmulo de uma fase líquida, levando a um escoamento bifásico.

Em baixas vazões, o acúmulo pode ser significativo a ponto de impor grande perda de carga ao escoamento, refletindo em uma maior pressão na entrada do duto e maior pressão média em todo o duto. Esta maior perda de carga, em um sistema cujo padrão de fluxo majoritariamente é estratificado, resulta de um menor diâmetro efetivo para o escoamento de gás. Em maiores vazões, o volume acumulado é menor e a fração de vazios se aproxima de um, de modo que todo diâmetro hidráulico está praticamente disponível para o escoamento do gás.

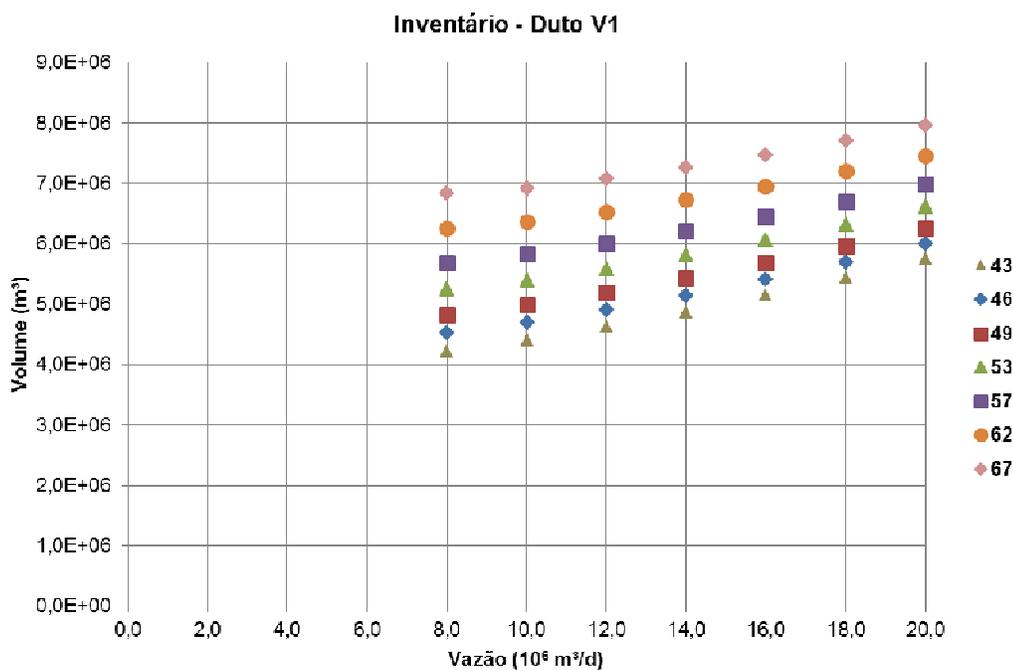
A simulação, portanto, representa a solução de regime permanente, na qual houve tempo suficiente para se atingir o estado em que o volume de líquidos acumulado não mais se altera com o tempo. Em uma situação normal de operação, não se espera que tal regime seja atingido, uma vez o inventário de líquido acumulado no sistema é removido periodicamente por meio de passagem de pig. Desta forma, o inventário de baixas vazões segue a tendência estabelecida pelas maiores vazões.

Logo, para o estudo realizado, foram desconsiderados os pontos anteriores à inversão de tendência, por não representarem uma condição real de operação. O equacionamento obtido, no entanto, é usado para extrapolar o inventário para estes cenários de menor vazão.

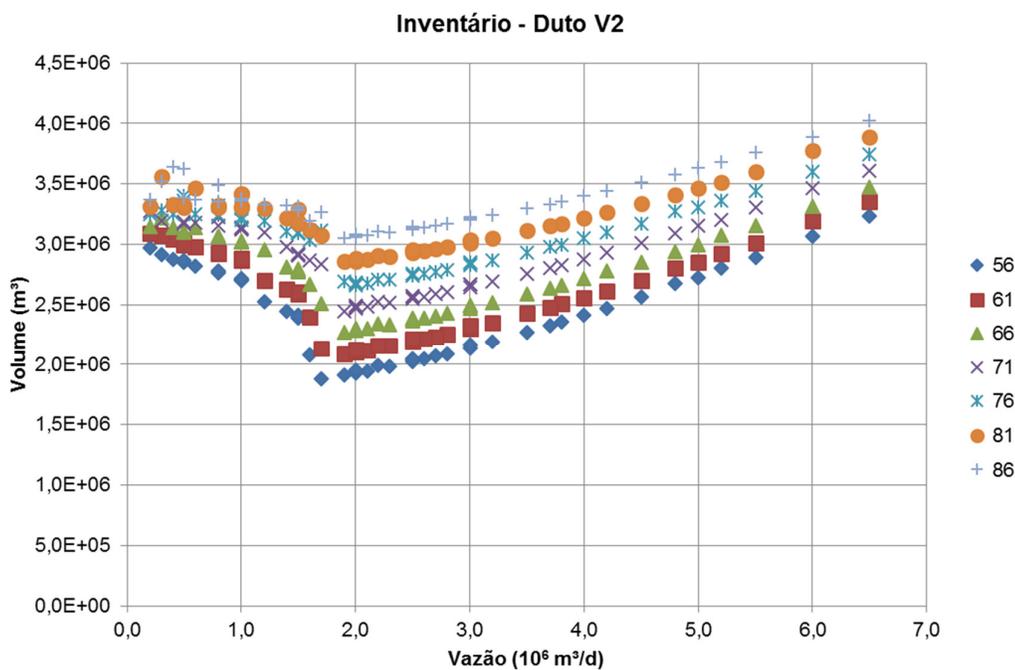
A Figura 18 traz os pontos efetivamente utilizados na análise de inventário para o duto  $V_1$ .

A Figura 19 traz o resultado da simulação de inventário para o duto  $V_2$ . Cada grupo de dados, representado por cores diferentes, traz uma pressão de chegada na unidade  $F_1$ , e estes estão plotados em função da vazão no duto  $V_2$ .

**Figura 18** - Inventário do duto V<sub>1</sub> (fase gás), dados utilizados no estudo.

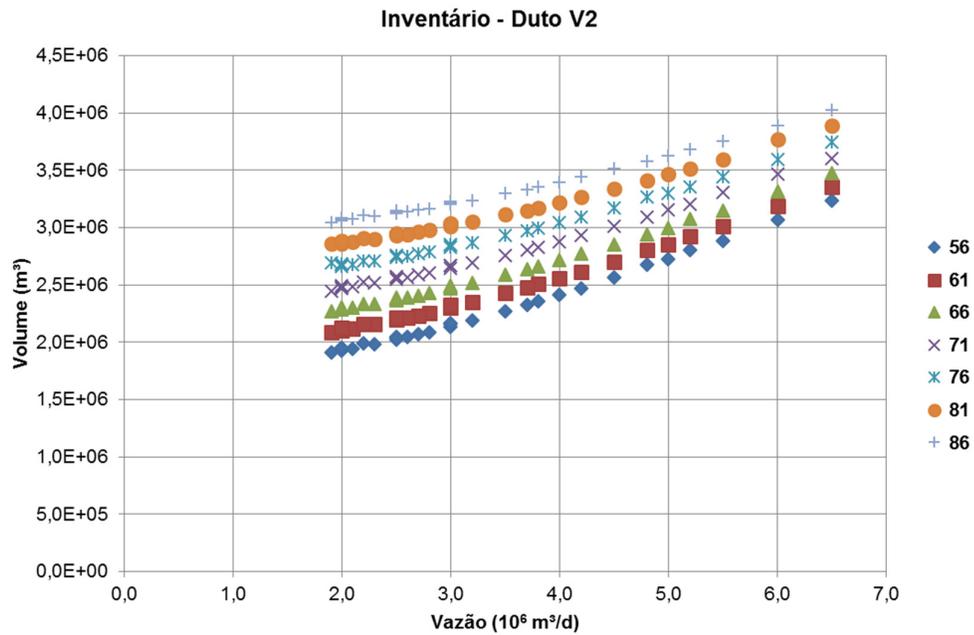


**Figura 19** - Inventário do duto V<sub>2</sub> (fase gás), resultado de simulação em regime permanente.



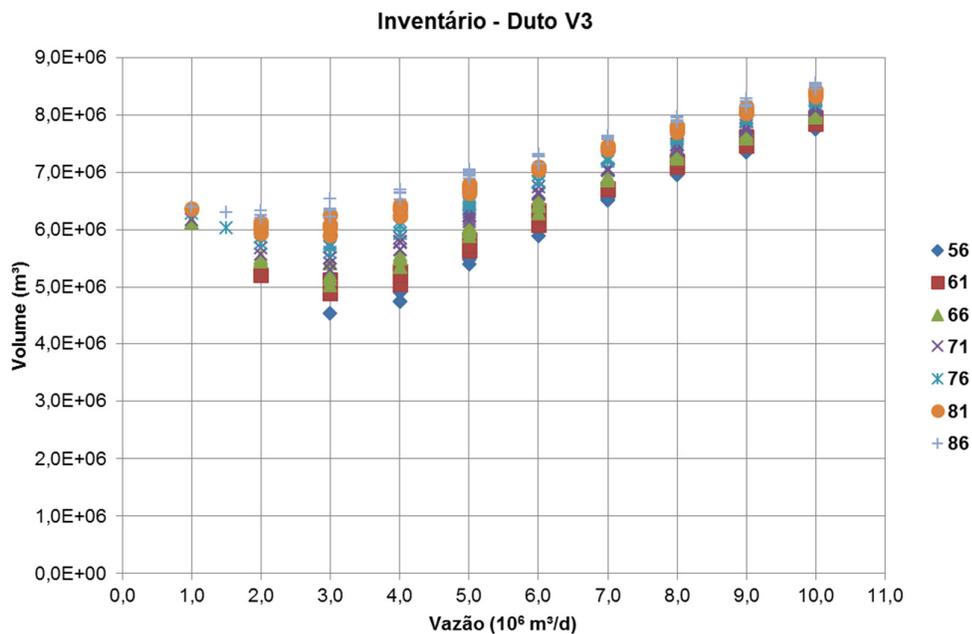
Pode-se verificar que a inversão da tendência ocorre para os pontos cuja vazão está abaixo de  $1,9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ . A Figura 20 traz os pontos efetivamente utilizados na análise de inventário para o duto V<sub>2</sub>.

**Figura 20** - Inventário do duto V<sub>2</sub> (fase gás), dados utilizados no estudo.



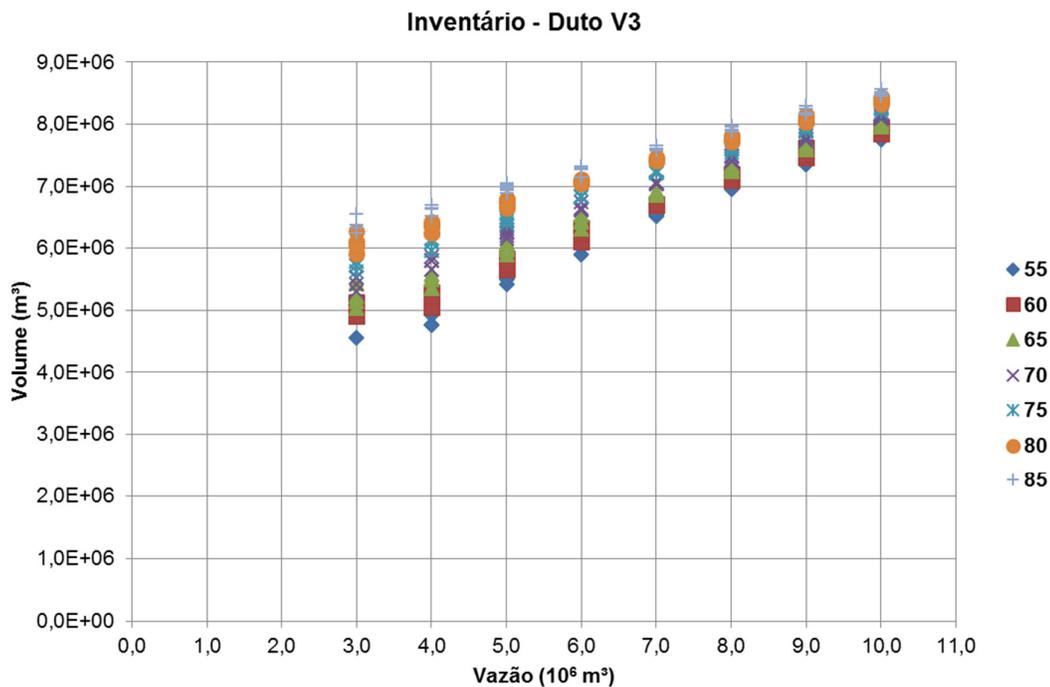
A Figura 21 traz o resultado da simulação de inventário para o duto V<sub>3</sub>. Cada grupo de dados, representado por cores diferentes, traz uma pressão de chegada na unidade F<sub>1</sub>, e estes estão plotados em função da vazão no duto V<sub>3</sub>.

**Figura 21** - Inventário do duto V<sub>3</sub> (fase gás), resultado de simulação em regime permanente.



Pode-se verificar que a inversão da tendência ocorre para os pontos cuja vazão está abaixo de  $3,0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ . A Figura 22 traz os pontos efetivamente utilizados na análise de inventário para o duto  $V_3$ .

**Figura 22** - Inventário do duto  $V_3$  (fase gás), dados utilizados no estudo.

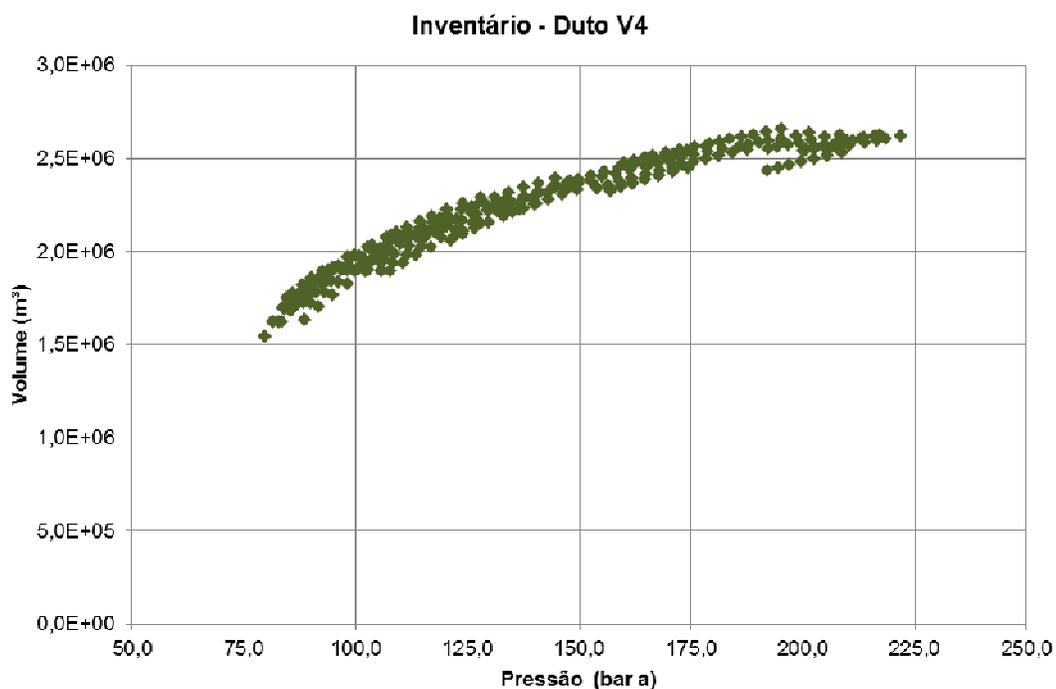


Fonte: O autor.

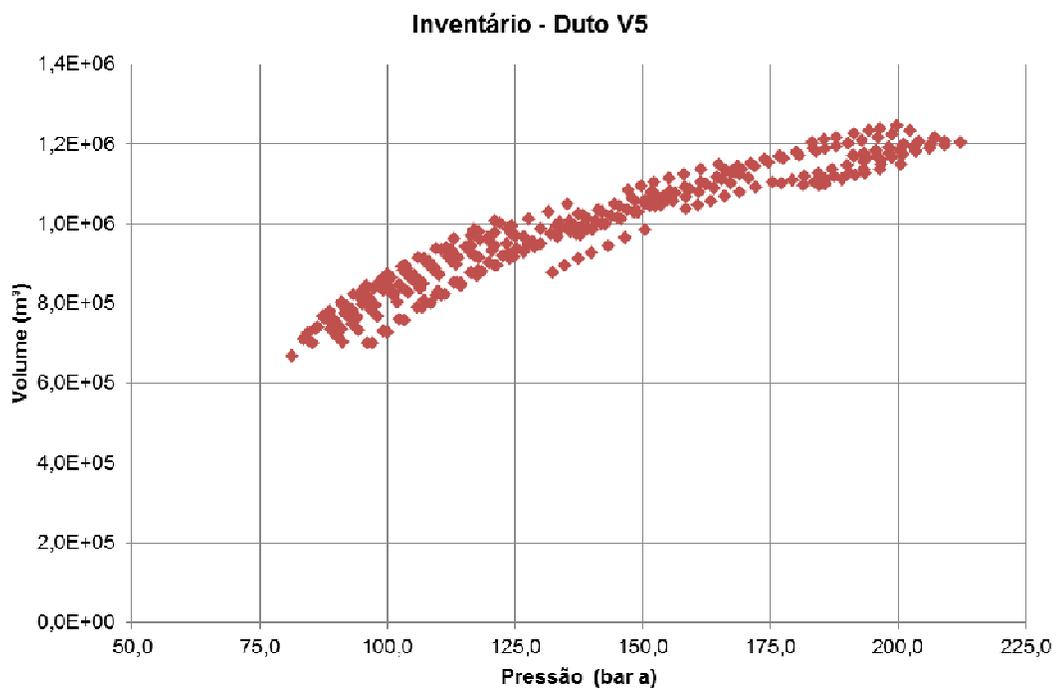
Os dutos  $V_4$  e  $V_5$  operam com pressão média superior aos demais, de modo que o escoamento se situa fora do envelope de condensação do gás que por ali esco. Portanto, há apenas uma fase gás e o efeito de inversão de tendência do inventário não é esperado.

A Figura 23 traz o resultado da simulação de inventário para o duto  $V_4$ . Os dados estão plotados em função da pressão na exportação da unidade  $F_4$ .

A Figura 24 traz o resultado da simulação de inventário para o duto  $V_5$ . Os dados estão plotados em função da pressão na exportação da unidade  $F_5$ .

**Figura 23** - Inventário do duto V<sub>4</sub> (fase gás), resultado de simulação em regime permanente.

Fonte: O autor.

**Figura 24** - Inventário do duto V<sub>5</sub> (fase gás), resultado de simulação em regime permanente.

Fonte: O autor.

Para a obtenção de uma equação de cálculo de inventário em função de variáveis mensuráveis do sistema, foi utilizado o software Matlab e a função de regressão não linear “nlinfit”, que possui o formato:

$$b = \text{nlinfit} (X, y, \text{fun}, b_0) \quad (47)$$

Onde,

$b$ , é o valor dos coeficientes oriundos do ajuste da regressão;

$X$ , é uma matriz  $n \times p$ , contendo  $p$  variáveis a serem utilizadas na regressão para cada uma das  $n$  observações;

$\text{fun}$ , é o modelo a ser utilizado na regressão;

$y$ , é o vetor  $n \times 1$  das respostas para cada uma das  $n$  observações;

$b_0$ , é o valor da estimativa inicial.

O formato final escolhido para representar cada duto é dado pelas equações (48) a (52) e os coeficientes estão descritos na Tabela 21.

O volume do duto  $V_1$  é dado por:

$$y = b(1)*P_{S1} + b(2)*(P_{S1})^2 + b(3)*P_1 + b(4)*(P_1)^2 + b(5)*Q_{V1} + b(6)*(Q_{V1})^2 + b(7) \quad (48)$$

O volume do duto  $V_2$  é dado por:

$$y = b(1)*P_2 + b(2)*(P_2)^2 + b(3)*P_{N1} + b(4)*(P_{N1})^2 + b(5)*Q_2 + b(6)*(Q_2)^2 + b(7) \quad (49)$$

O volume do duto  $V_3$  é dado por:

$$y = b(1)*P_{N1} + b(2)*(P_{N1})^2 + b(3)*P_3 + b(4)*(P_3)^2 + b(5)*Q_{V3} + b(6)*(Q_{V3})^2 + b(7)*Q_3 + b(8)*(Q_3)^2 + b(9)*Q_{N1} + b(10) \quad (50)$$

O volume do duto  $V_4$  é dado por:

$$y = b(1)*P_4 + b(2)*(P_4)^2 + b(3)*P_3 + b(4)*(P_3)^2 + b(5)*Q_4 + b(6)*(Q_4)^2 + b(7) \quad (51)$$

O volume do duto  $V_5$  é dado por:

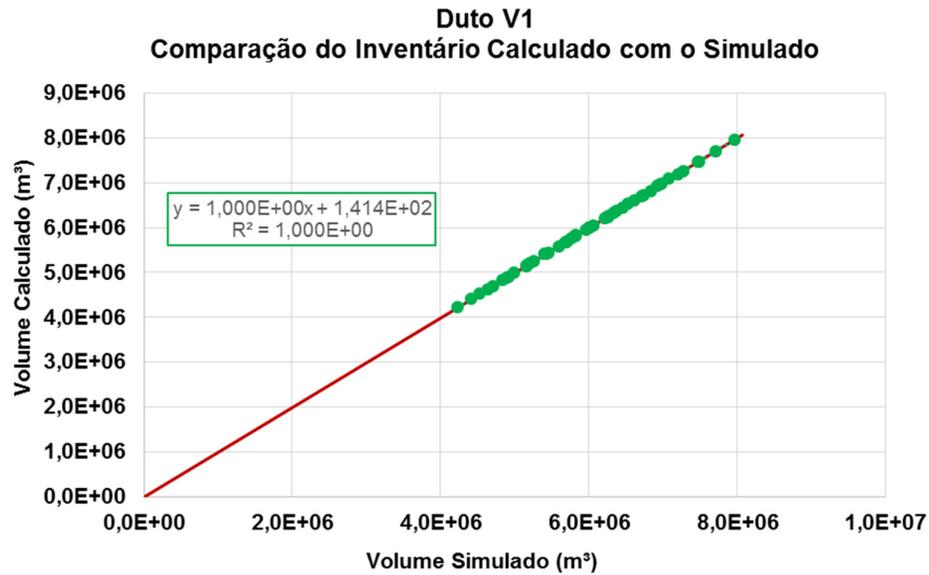
$$y = b(1)*P_5 + b(2)*(P_5)^2 + b(3)*P_3 + b(4)*(P_3)^2 + b(5)*Q_5 + b(6)*(Q_5)^2 + b(7) \quad (52)$$

**Tabela 21** - Coeficientes para o cálculo de inventário dos dutos  $V_1$  a  $V_5$ .

COEFICIENTE	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$
<b>b(1)</b>	3,3527E+04	2,6972E+04	2,8097E+04	1,0879E+04	6,7441E+03
<b>b(2)</b>	-2,4644E+02	7,2217E+01	-3,4231E+02	-5,4908E+00	-6,2060E+00
<b>b(3)</b>	4,6133E+04	8,7979E+03	1,2624E+05	1,4546E+04	6,0581E+03
<b>b(4)</b>	5,5914E+02	-3,5824E+01	-1,1339E+02	-5,2752E+01	-2,1720E+01
<b>b(5)</b>	-3,7000E+04	-5,0683E+04	-1,7304E+05	-5,2367E+04	-4,1825E+04
<b>b(6)</b>	-2,1273E+03	-1,5554E+04	-5,5071E+04	-2,7494E+03	1,0725E+03
<b>b(7)</b>	3,2043E+04	-3,9685E+05	-2,0903E+05	1,9539E+04	-1,2773E+05
<b>b(8)</b>	-	-	-1,8035E+04	-	-
<b>b(9)</b>	-	-	-1,3757E+04	-	-
<b>b(10)</b>	-	-	-4,0271E+06	-	-

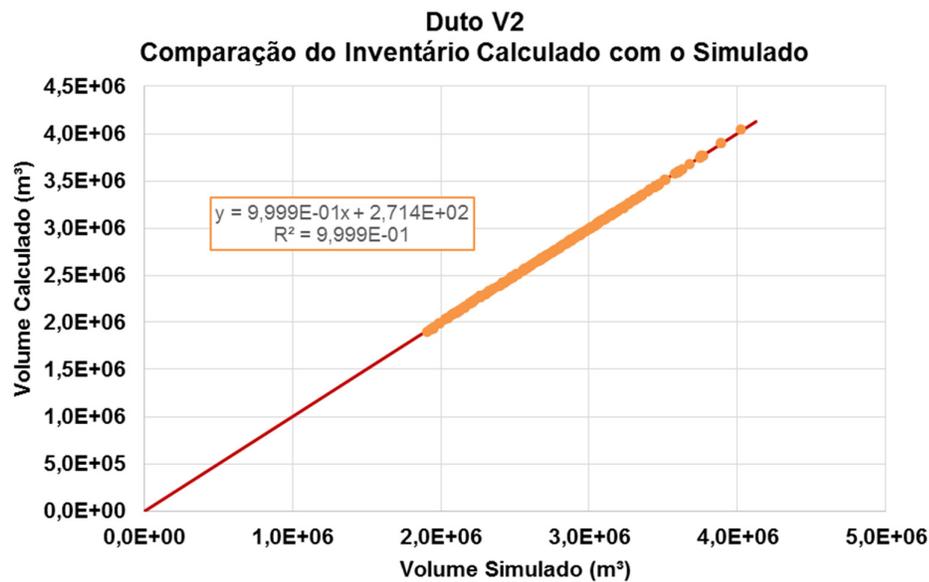
Da Figura 25 à Figura 29 são apresentadas as comparações entre inventário calculado a partir da equação obtida por regressão não linear e o inventário simulado.

Figura 25 - Duto V<sub>1</sub>, comparação entre inventário calculado e simulado.

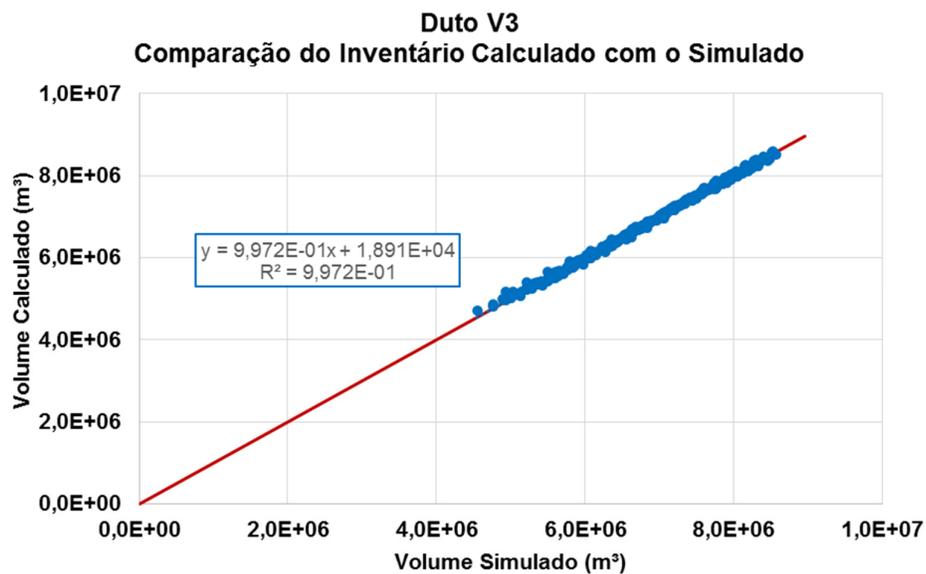


Fonte: O autor.

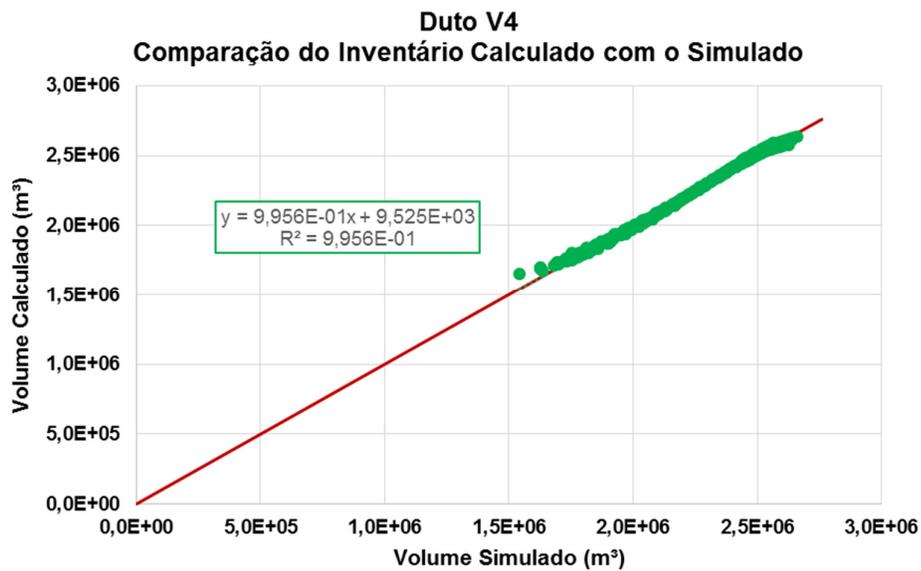
Figura 26 - Duto V<sub>2</sub>, comparação entre inventário calculado e simulado.



Fonte: O autor.

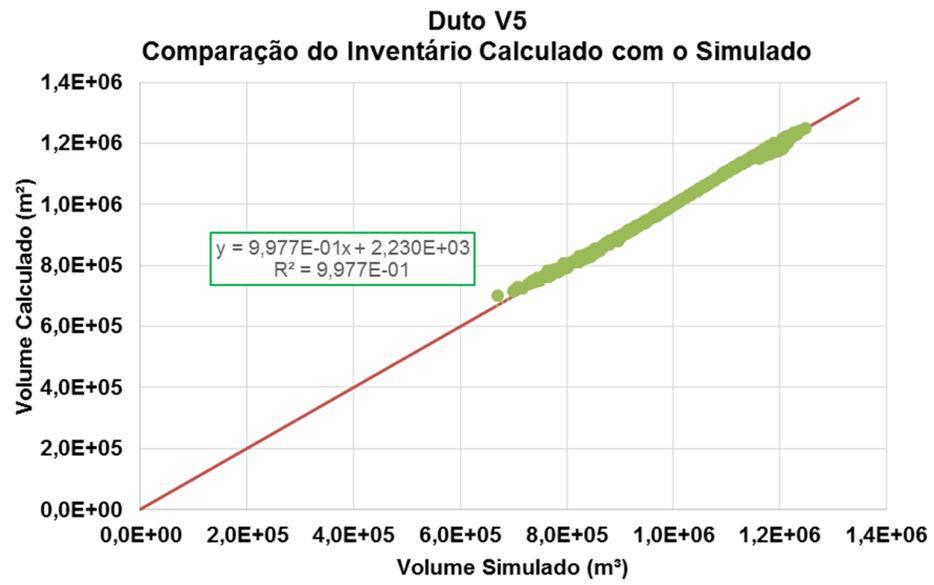
Figura 27 - Duto V<sub>3</sub>, comparação entre inventário calculado e simulado.

Fonte: O autor.

Figura 28 - Duto V<sub>4</sub>, comparação entre inventário calculado e simulado.

Fonte: O autor.

Figura 29 - Duto V<sub>5</sub>, comparação entre inventário calculado e simulado.



Fonte: O autor.