

1. Introdução

Visando a formação de um mercado de gás natural aberto, dinâmico e competitivo no Brasil, o Governo Federal promoveu o programa chamado Novo Mercado de Gás. Diante deste cenário, novos desafios surgem para todos os *players* integrantes do setor.

As medidas adotadas para viabilizar a abertura do mercado, como reserva de capacidade por entrada e saída e ajustes tributários que impediam a prestação do serviço de transporte para novos entrantes, trouxeram maior complexidade para os processos comerciais e operacionais exigindo o amadurecimento dos agentes que estavam acostumados a trabalhar da mesma forma a mais de uma década.

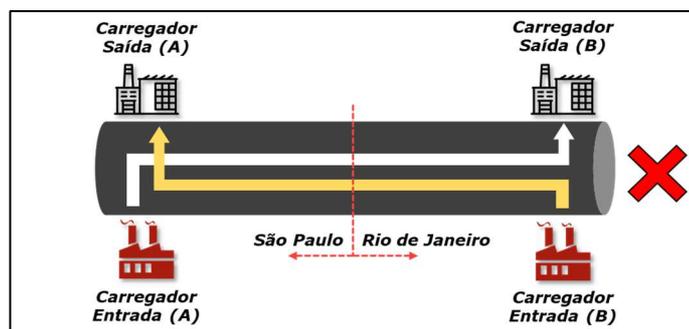
A remoção de barreiras tributárias é um dos pilares do programa Novo Mercado de Gás, e para isso foi instituído o Ajuste SINIEF nº 03/18, onde, para o Transportador, não haverá mais a obrigatoriedade de informar a rota física do gás para faturamento do serviço de transporte e tributação da mercadoria circulada no território nacional.

Neste novo cenário, o faturamento está embasado na rota definida pelos Carregadores. Ou seja, tanto o Carregador de Entrada quanto o Carregador de Saída irão nominar o volume a ser injetado em um dado ponto de entrada e onde este volume será retirado em um dado ponto de saída, cabendo ao Transportador garantir que estes volumes se realizem através do serviço de transporte na modalidade contratada.

A quantidade de gás e a composição química injetada e retirada continua sendo medida através de instrumentos de medição, porém haverá maior flexibilidade para os carregadores em criar pares ordenados de entrada e saída da maneira mais interessante comercialmente proporcionando, assim, maior liquidez no mercado de gás natural e possibilidades de negociações entre supridores e consumidores de gás no território brasileiro.

Prestar informações da rota física do gás sempre foi um dos maiores impeditivos para permitir a entrada de novos Carregadores que desejassem utilizar o sistema de transporte já existente. A figura 1 apresenta um cenário onde a nominação de transporte dos carregadores de entrada e saída (A) impedem a nominação de transporte dos carregadores de entrada e saída (B).

Figura 1- Cenário anterior a entrada do Ajuste SINIEF - 03/18

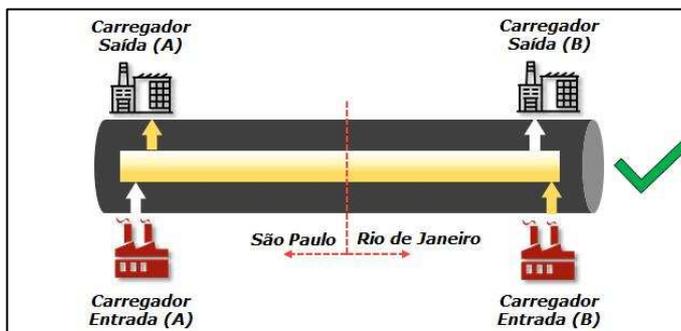


Fonte: produzido pelo autor.

Sistema de alocação de gás: aplicações inovadoras para o novo mercado de gás de um sistema que identifica a rota do gás em uma rede de dutos.

A figura 2 apresenta o cenário após a implementação do Ajuste SINIEF 03/18, onde fornecedores e consumidores de gás poderão negociar livremente, desde que o Transportador tenha capacidade para atender tal cenário.

Figura 2 - Cenário que permite a modalidade Entrada e Saída



Fonte: produzido pelo autor

Pensando no cenário de novos entrantes como consequência da abertura do mercado e sabendo que a tarifa de cobrança do serviço de transporte é realizada em energia (MMBTU/m³), a flexibilização concedida aos carregadores em definir a rota de entrada e a saída do gás torna mais complexo o controle da quantidade de gás natural em energia remanescente nos gasodutos do Transportador. Assim, há a necessidade de um controle operacional em energia mais abrangente e eficiente da gestão do controle de estoque em energia. Entretanto, como calcular o estoque em energia se não há instrumentos de medição que façam tal avaliação? Como garantir a confiabilidade das medições de entrada e saída em energia para os pontos que não possuem obrigatoriedade regulatória de instalação de cromatógrafos? Como garantir o controle em energia dos estoques físicos das origens para cada um dos Carregadores?

O SAQGAS foi desenvolvido inicialmente para definir a rota física da molécula através de um sistema de equações em um programa computacional. Contudo, diante das mudanças sobre o serviço de transporte, novas aplicabilidades foram vislumbradas e desenvolvidas no software para atender a este novo cenário definido pelo Novo Mercado de Gás. São elas:

- Determinação do volume e da energia com alta precisão do gás estocado nos gasodutos do Transportador, para cada uma das possíveis origens;
- Controle da quantidade de energia estocada de cada carregador e suas origens;
- Cálculo do Poder Calorífico Superior (PCS) e da composição química para todos os pontos de saída utilizando os dados de qualidade dos pontos de entrada de gás no sistema de transporte;
- Associação do Poder Calorífico Superior e da composição química do gás de cada ponto de saída que não possua cromatógrafo utilizando o tempo de transição da mistura gasosa no duto;

Este trabalho possui o objetivo de discorrer sobre o princípio de funcionamento do software, a metodologia matemática implementada, a validação dos cálculos do sistema e a análise crítica dos resultados obtidos para cada nova funcionalidade do software, além das possíveis aplicações que visam o aprimoramento das medições realizadas e faturadas.

2. Desenvolvimento

2.1 Princípio de Funcionamento do software SAQGAS

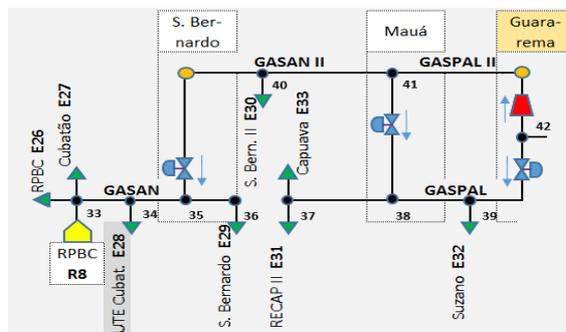
O princípio de funcionamento e a metodologia matemática base do SAQGAS divide-se em duas etapas principais: (1) cálculo das vazões intermediárias que percorrem todos os segmentos de dutos da malha de gasodutos e (2) determinação das origens do gás (pontos de entrada da malha) em cada ponto de saída da malha, através do acompanhamento do fluxo de gás.

Cálculo das vazões intermediárias dos trechos pertencentes a malha

O modelo matemático utilizado para o cálculo das vazões internas da malha foi baseado no sistema de “nós”. No desenho da malha, locais que possuem válvula, ponto de entrega, ponto de recebimento, compressor, estação de medição ou um ponto onde há uma ramificação, possibilitando mais de um caminho possível para o gás escoar, foram inseridos no sistema com a característica “nó”.

Em seguida, mapeou-se os “trechos” pertencentes à malha, ou seja, os segmentos formados pela união de dois nós. Na figura 3 abaixo é possível identificar o esquemático de **nó** e **trecho**.

Figura 3 - Esquemático simplificado da malha de gasodutos

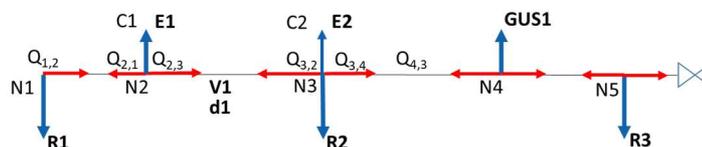


Fonte: produzido pelo autor.

Equações matemáticas utilizadas para cálculo das vazões intermediárias do sistema

O modelo matemático utilizado baseia-se em um sistema linear de equações. As equações são divididas em duas categorias: equações dos nós e equações dos trechos. A figura 4 abaixo ilustra um esquemático que possui 5 nós, 4 trechos (segmentos), 3 pontos de recebimento e 2 pontos de entrega.

Figura 4 - Esquemático sistema de equações



Fonte: produzido pelo autor.

LEGENDA:

N: Nó; **R:** Vazão de Recebimento (Volume recebido no período considerado); **E:** Vazão de Entrega (Volume entregue no período considerado); **Q:** Vazão intermediária a ser calculada; **V:** Volume contido no trecho entre dois nós (Estoque do segmento); **d:** desequilíbrio (variação do estoque no segmento); **GUS:** Gás de Uso do Sistema.

Equação dos nós - A equação de cada nó se resume ao somatório de todas as entradas e saídas de gás no nó, igualando-se a zero. Uma vez que o nó não se expande ou se contrai, o somatório de todo o

Sistema de alocação de gás: aplicações inovadoras para o novo mercado de gás de um sistema que identifica a rota do gás em uma rede de dutos.

volume de entrada e todo o volume de saída do nó resultará no valor zero, o que será sempre verdade. Com isso, podemos considerar que a equação (1) do nó N1 apresentado no exemplo acima é:

$$R1 + Q1,2 = 0 \quad (1)$$

Equação dos Segmentos - A fim de obter-se novas equações para que o sistema seja solucionável, foram também utilizadas as equações de segmento. Um segmento consiste num trecho de gasoduto que liga 2 nós distintos. Logo, no exemplo apresentado, tem-se o segmento que liga os nós 1 e 2. Observando Q1,2 (vazão do nó 1 para o nó 2) e a seta Q2,1 (vazão do nó 2 para o nó 1), infere-se que somatório de Q1,2 com Q2,1 refere-se ao desequilíbrio (variação do estoque entre dois períodos).

Considerando a variação de estoque igual a zero para o trecho que liga os pontos 1 e 2, temos:

$$Q1,2 + Q2,1 = 0 \quad (2)$$

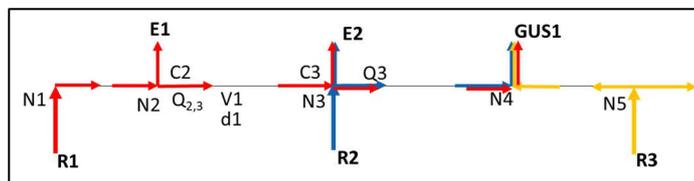
O sistema atualmente possui 227 nós cadastrados, 207 trechos que, interligados, recebem 434 fluxos de gás ou vazões internas a serem calculadas. A malha da NTS contém 9 Pontos de Recebimento e 47 Pontos de Entrega.

Determinação das origens do gás para cada ponto de entrega através do acompanhamento do fluxo de gás.

Após calcular as vazões intermediárias da malha, torna-se possível determinar a proporção de cada origem para cada ponto de entrega da malha, ou seja, é possível calcular a *corrente de gás*. No diagrama apresentado na Figura 3, a corrente de gás será representada como uma matriz contendo vetores com valores para os Pontos de Recebimento R1, R2 e R3 → [R1, R2, R3].

Considerando as vazões calculadas indicando os sentidos do fluxo físico de gás, tem-se:

Figura 5 - Esquemático - cálculo da corrente de gás



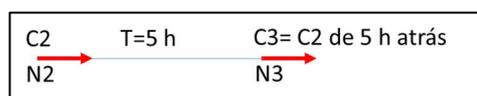
Fonte: produzido pelo autor.

Tomando como exemplo o trecho entre os nós N2 e N3, sabendo-se o valor de Q2,3 e o sentido do fluxo do gás, é possível calcular o tempo de trânsito entre os nós, ou seja, o tempo necessário para o gás percorrer o segmento N2-N3:

Cálculo do tempo de trânsito de N2 até N3:

$$T = V1/Q2,3 \quad (3)$$

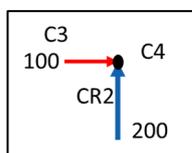
Por exemplo, se $V1 = 1000m^3$ e a vazão $Q2,3 = 200m^3/h$, o tempo para o gás percorrer o segmento N2-N3, na pressão operacional de trabalho, será de 5 horas. A determinação da corrente $C=[R1;R2;R3]$, que escoa em cada trecho pertencente ao sistema, no tempo (T), ocorrerá da seguinte forma:



Ou seja, a corrente C3 será a mesma de C2 de 5 horas atrás.

Nos casos de mistura de correntes, o cálculo resultante de cada nó utiliza a média ponderada das vazões das correntes de entrada no nó. No exemplo abaixo para o nó 4 tem-se que C4 é:

$$C4 = [10/30] * C3 + [20/30] * CR2 \quad (4)$$



2.2 Cálculo do Poder Calorífico Superior (PCS) dos Pontos de Entrega:

O poder calorífico de uma substância trata-se da quantidade de calor produzida durante a combustão, que pode ser expressa de duas maneiras: Poder calorífico superior (PCS) - quantidade de calor produzida durante a combustão completa de uma unidade de volume ou massa; Poder calorífico inferior (PCI) - quantidade de calor produzida durante a combustão completa de uma unidade de volume ou massa sem que ocorra a condensação do vapor de água contido.

A nível de faturamento, importa contabilizar a quantidade de energia entregue em cada Ponto de Entrega e não somente o volume entregue diariamente. Para informar esta energia, utiliza-se um equipamento de análise química denominado cromatógrafo. Este equipamento indica a composição química presente em uma mistura gasosa.

Como cada composto químico possui um PSC padrão, é possível calcular o PCS resultante da mistura de gás. O software SAQGAS utiliza a informação dos PCSs determinados através da análise cromatográfica dos Pontos de Recebimento para calcular o Poder Calorífico Superior referente a mistura gasosa entregue em cada Ponto de Entrega.

O cálculo consiste na utilização dos dados de composição química de cada ponto de recebimento, que são armazenados diariamente como vetores pertencentes à matriz [R1,R2,R3]. Conhecendo-se a corrente que foi entregue em um ponto de entrega, utiliza-se tal proporção de maneira ponderada para calcular o PCS resultante da mistura.

1º) Exemplo de matriz da corrente resultante ao Ponto de Entrega:

$$[R1,R2,R3] = [0,1;0,3;0,6]$$

2º) PCS e composição química resultante:

$$[PCS_{R1}; PCS_{R2}; PCS_{R3}]$$

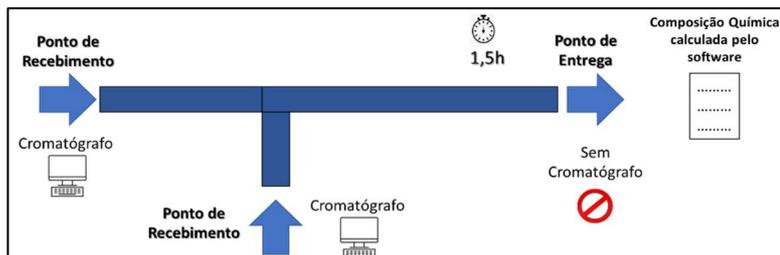
$$PCS_{RESULTANTE} = [PCS_{R1} * 0,1] + [PCS_{R2} * 0,3] + [PCS_{R3} * 0,6] \quad (5)$$

Neste caso, o tempo de fluxo da mistura gasosa na malha é de extrema importância para a precisão do resultado entregue no Ponto de Entrega. Isto significa que, se a mistura gasosa de entrada no Ponto de Recebimento R1 chegou em um Ponto de Entrega cinco dias após sua entrada na malha, emprega-se o PCS_{R1} de cinco dias atrás na média ponderada.

Sendo assim, conhecendo o tempo de trânsito da mistura gasosa, a composição química das origens, os pontos de entrada de gás na malha, as vazões intermediárias que percorrem os gasodutos e o e a variação de estoque é possível determinar a composição química e o poder calorífico superior para todos os Pontos de Entrega pertencentes à malha de gasodutos, sem a utilização de cromatógrafo nos pontos de saída.

Sistema de alocação de gás: aplicações inovadoras para o novo mercado de gás de um sistema que identifica a rota do gás em uma rede de dutos.

Figura 6 - Esquemático do cálculo da composição química dos pontos de entrega a partir dos dados dos cromatógrafos dos pontos de recebimento



Fonte: produzido pelo autor.

A utilização desta metodologia implica em dois grandes benefícios ao processo de medição de gás:

1º) Realizar a associação energética (composição química e PCS) com alta precisão para os pontos de entrega que não possuem obrigatoriedade regulatória de possuir cromatógrafo. Evitando contestações dos clientes;

2º) Comparação entre a composição química apresentada pelos cromatógrafos e o produto calculado, descobrindo erros de medição do equipamento cromatógrafo.

Uma forma de aprimoramento de cálculo, resultando em uma melhor associação é utilizar as medições dos cromatógrafos vizinhos ao ponto de entrega que não possui este instrumento. Esta metodologia foi aplicada no software, o que aumentou a precisão dos valores calculados de composição química para tais pontos de saída da malha.

2.3 Estoque em Energia

A maior dificuldade encontrada pelos Transportadores com o ingresso do Modelo de Entrada e Saída é o controle físico de estoque por energia com alta precisão de toda a malha de gasodutos, pois não existe um equipamento que meça a energia de um volume de gás remanescente em dutos. O cálculo comumente utilizado é a média do PCS da mistura gasosa entregue por um período definido. Porém, esta metodologia possui baixa confiabilidade, já que o tempo de trânsito da molécula e possíveis misturas de fluxo no duto não são levados em consideração.

Como o SAQGAS armazena os dados de composição química de todos os pontos de entrada da malha, calcula o tempo de transição da molécula com as informações dos volumes de gás estocados no duto e as vazões intermediárias de cada segmento de trecho dos gasodutos, é possível controlar e monitorar cada variável do sistema e retirar do software a informação de energia (MMBTU) armazenada em qualquer trecho da malha.

Figura 7 - Esquema de um segmento de duto contendo gás de 3 origens da malha da NTS.



Fonte: produzido pelo autor.

Considerações Gerais do software

Visando a adaptabilidade do sistema a qualquer expansão da malha da NTS, o software foi projetado de forma a receber e englobar em suas equações o recebimento de novos pontos de entrega, pontos de recebimento, novos gasodutos, sistemas de compressores, pontos de medição, válvulas garantindo um

software completamente parametrizável a qualquer tipo de alinhamento operacional e a possibilidade de crescimento da malha.

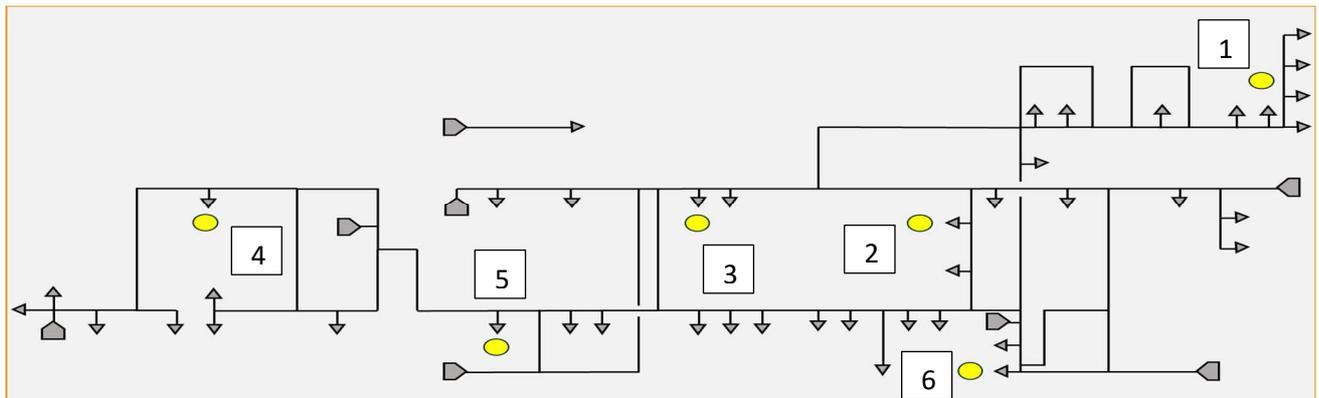
3. Resultados e Discussões

Validação dos cálculos dos PCSs dos Pontos de Entrega a partir de dados das origens

Para validar os resultados de PCS calculado pelo SAQGAS para cada Ponto de Entrega, a partir dos dados de qualidade das origens da malha, utilizou-se como comparativo a medição dos cromatógrafos instalados nos Pontos de Entrega. O intuito principal é a comparação entre o valor do PCS calculado pelo cromatógrafo calibrado e o PCS calculado pelo software.

O esquemático abaixo refere-se a malha de gasodutos da NTS, onde as setas que apontam para fora indicam os pontos de saída da malha e as setas que apontam para a direção dos dutos indicam os pontos de entrada do gás. Os círculos em amarelo com a numeração indicam os pontos de entrega avaliados com o critério de estarem localizados em pontos estratégicos da malha, ou seja, recebem gás das 3 grandes origens recebidas pelos pontos de entrada da malha.

Figura 8 - Esquemático da malha da NTS - pontos de saída avaliados.

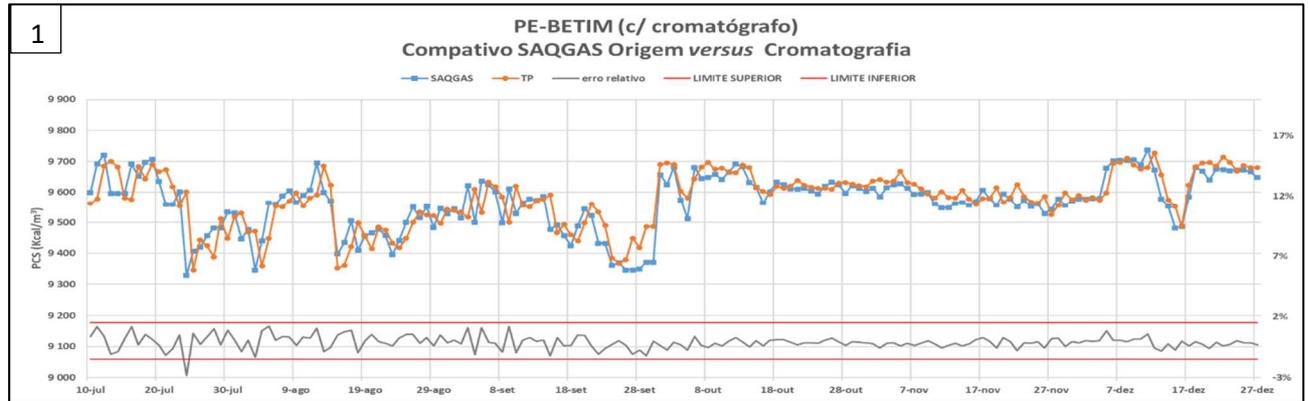


Os gráficos que se encontram abaixo representam o comparativo entre o valor de PCS calculado pelo SAQGAS durante o período indicado no eixo das abcissas e o valor de PCS indicado pelo cromatógrafo instalado nestes pontos de saída. A curva de coloração azul indica o resultado calculado pelo SAQGAS, já a curva de coloração laranja indica o resultado do medidor calibrado.

O eixo que se encontra à direita refere-se a diferença percentual relativa entre os valores calculados e medidos. Ancorou-se também neste eixo, os limites inferior e superior de $\pm 1,5\%$ entre as medições (linhas em vermelho) que servem como base para os limites aceitáveis entre medições em série pelo Regulador brasileiro do setor de óleo e gás.

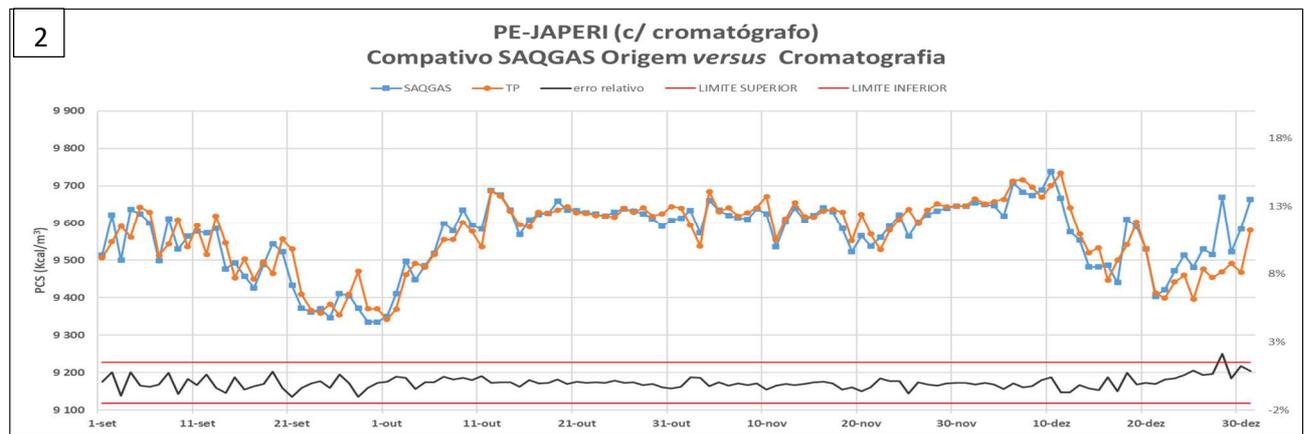
Sistema de alocação de gás: aplicações inovadoras para o novo mercado de gás de um sistema que identifica a rota do gás em uma rede de dutos.

Figura 9 - Gráfico representativo do resultado de comparação entre o valor calculado pelo SAQGAS e medido pelo cromatógrafo.



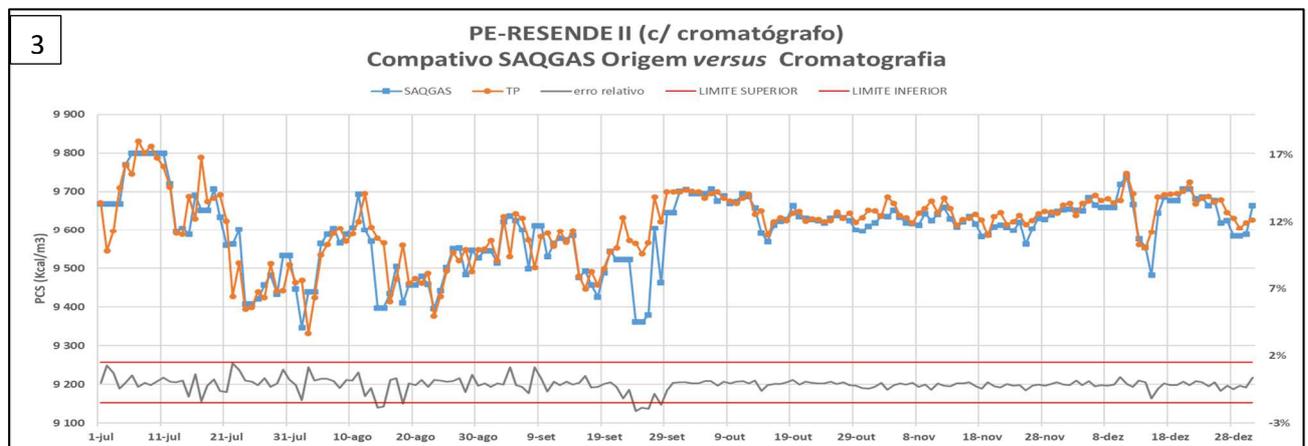
Fonte: produção do software SAQGAS.

Figura 10 - Gráfico representativo do resultado de comparação entre o valor calculado pelo SAQGAS e medido pelo cromatógrafo.



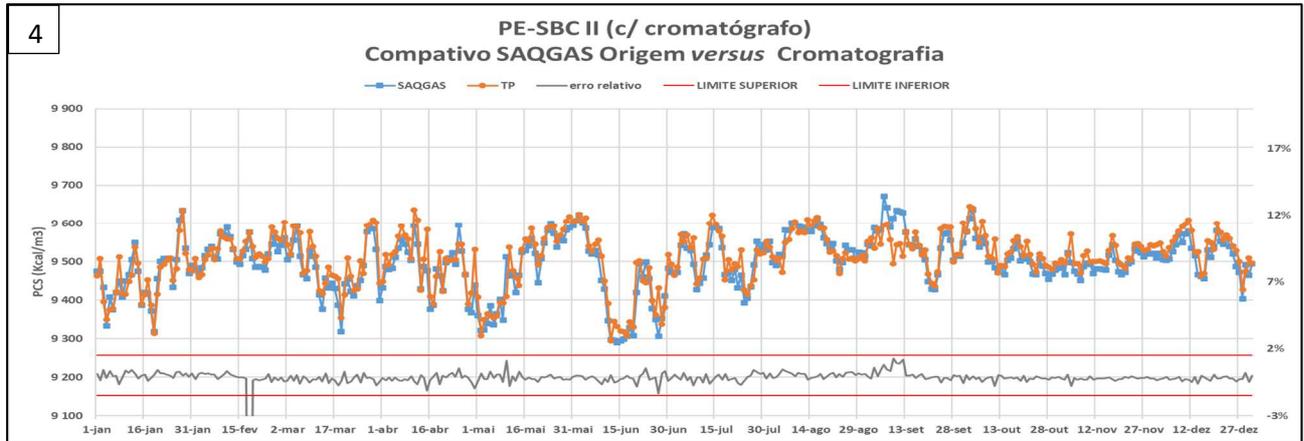
Fonte: produção do software SAQGAS.

Figura 11 - Gráfico representativo do resultado de comparação entre o valor calculado pelo SAQGAS e medido pelo cromatógrafo.



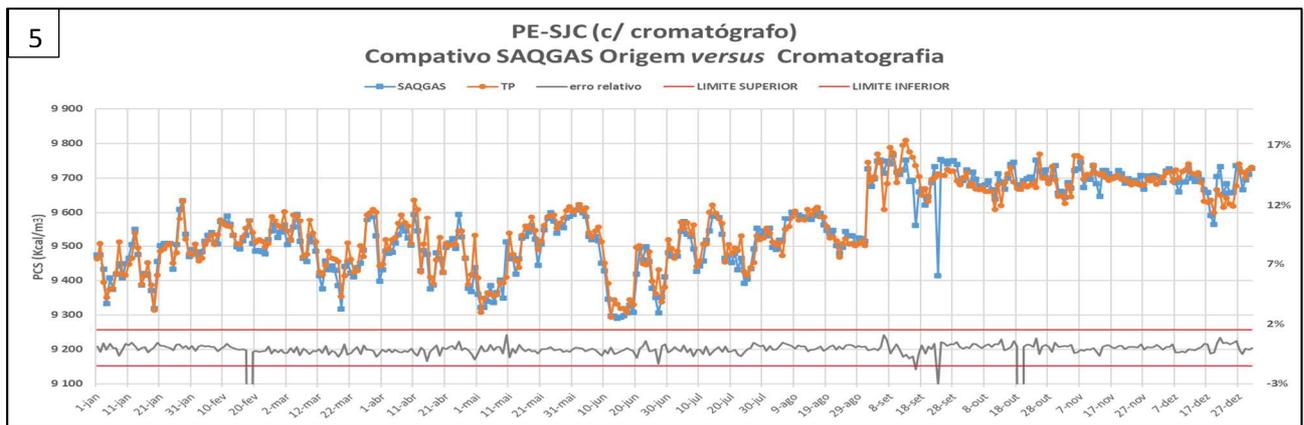
Fonte: produção do software SAQGAS.

Figura 12 - Gráfico representativo do resultado de comparação entre o valor calculado pelo SAQGAS e medido pelo cromatógrafo.



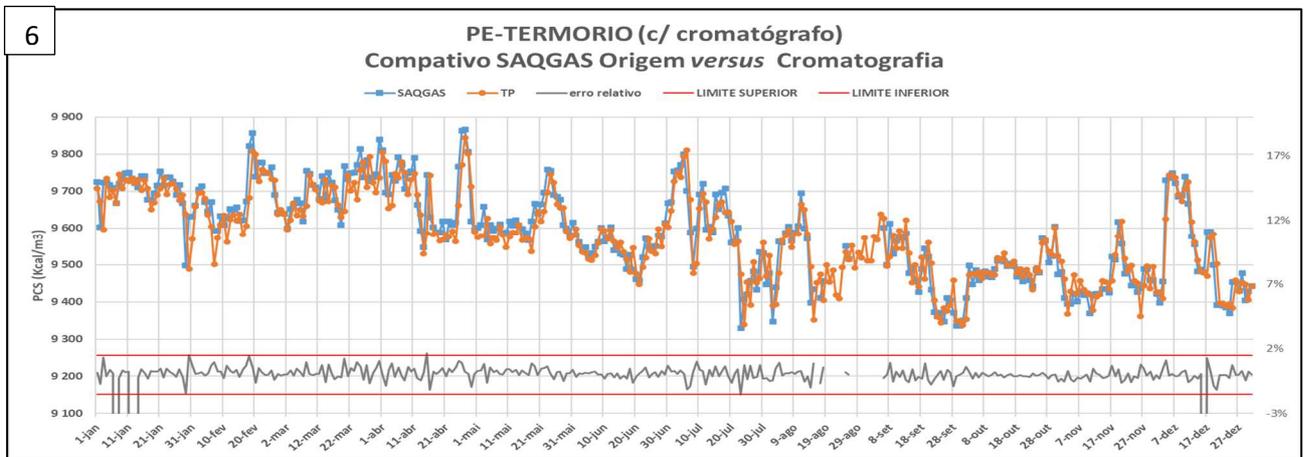
Fonte: produção do software SAQGAS.

Figura 13 - Gráfico representativo do resultado de comparação entre o valor calculado pelo SAQGAS e medido pelo cromatógrafo.



Fonte: produção do software SAQGAS.

Figura 14 - Gráfico representativo do resultado de comparação entre o valor calculado pelo SAQGAS e medido pelo cromatógrafo.



Sistema de alocação de gás: aplicações inovadoras para o novo mercado de gás de um sistema que identifica a rota do gás em uma rede de dutos.

Observando todos os gráficos reportados acima, pode-se concluir que os valores do SAQGAS e do medidor seguem a mesma tendência durante todo o período analisado. A diferença relativa entre as curvas encontra-se majoritariamente entre os dois limites estabelecidos pelas retas em vermelho de $\pm 1,5\%$. Isto indica que os cálculos efetuados pelo software possuem alta precisão em simular a realidade operacional da operação do gasoduto de forma impressionante no quesito PCS entregue em cada um dos pontos de saída da malha avaliados.

Aplicabilidade Estoque em Energia

A partir dos resultados do cálculo do Poder Calorífico Superior para todos os Pontos de Entrega utilizando apenas os dados de qualidade (composição química) do gás dos Pontos de Recebimento, é possível inferir que a quantidade de energia estocada nos gasodutos calculadas pelo SAQGAS possui a mesmo grau de precisão que os resultados apresentados nos gráficos acima.

4. Considerações Finais

O presente artigo é a continuação do trabalho apresentado na programação técnica da Rio Pipeline Conference and Exhibition 2019, em que foram abordados os primeiros passos do software SAQGAS bem como seus resultados e validações. Como reconhecimento ao ano de dedicação e vontade de inovação, o trabalho recebeu a premiação de Menção Honrosa da Conferência.

No decorrer do ano de 2019, diante dos novos desafios apresentados pelas mudanças no Mercado de Gás Brasileiro, já percorridas na introdução deste *paper*, buscando a liderança da transformação do setor de gás no país, a equipe de Operações da NTS buscou inovar novamente com a implementação de módulos de Qualidade do gás e Estoque em energia, seguindo a tendência do mercado europeu, que utiliza softwares de simulação que definem a energia entregue para as redes distribuidoras de gás.

Este exemplo pode ser visto em grandes companhias transportadoras do setor, como a Open Grid Europe, uma empresa alemã que opera mais de 12.000 km de gasodutos e que, buscando novas soluções e otimização de custos operacionais, validou junto a seu Órgão Regulador a utilização de um sistema em substituição a um instrumento de medição.

O SAQGAS, como simulador de distribuição de energia, apresentou excelentes resultados, como os descritos e comentados no presente trabalho. Hoje, este software utiliza valores de entrada em base diária, ou seja, representa uma média do retrato do dia. Futuramente, utilizando-se bases com períodos menores, como por exemplo, base horária ou *on time* juntamente com a operação, este programa fornecerá resultados ainda melhores, com maior precisão.