

P318 - Desenvolvimento de software on-line de simulação, otimização e Inteligência Artificial para controle de qualidade de processos de mistura de gases (biometano, hidrogênio, gás natural).

Ciclo 24/25

Ozaná Alves Jr¹ & Arthur Lúcido².

1 Quality CH

2 Quality CH

Resumo — Este artigo apresenta o desenvolvimento e validação do *ExpertGas*, um sistema SaaS inovador para simulação, otimização e predição da qualidade de misturas gasosas em redes de distribuição de gás natural com injeção de biometano. A ferramenta integra modelagem hidráulico-química, algoritmos de otimização multiobjetivo e inteligência artificial para previsão de parâmetros críticos, como o Poder Calorífico Superior (PCS). Validado em ambiente real na rede da Comgás, o sistema demonstrou alta acurácia, capacidade de ajuste automático das vazões dos fornecedores e conformidade com a Resolução ANP nº 982/2025. A arquitetura tecnológica garante escalabilidade, segurança e integração com sensores de campo e sistemas corporativos. Os resultados evidenciam o potencial da solução como instrumento técnico, regulatório e comercial para a operação segura e eficiente de redes com múltiplas fontes de gás, promovendo a inserção de energéticos renováveis e contribuindo para a transição energética. O sistema encontra-se pronto para rollout operacional e expansão.

Palavras-chave: Biometano; Gás natural; Inteligência artificial; Otimização; Simulação

Introdução

A crescente necessidade de descarbonização da matriz energética mundial tem impulsionado o uso de fontes renováveis, como o biometano e o hidrogênio de baixa emissão de carbono, no setor de gás natural. Essa transição energética traz novos desafios técnicos e regulatórios, especialmente para as distribuidoras que passam a operar com múltiplos pontos de injeção e composição variável de gás. Nesse contexto, torna-se essencial o desenvolvimento de

ferramentas digitais capazes de garantir a qualidade, a segurança e a eficiência operacional das redes de distribuição. Este trabalho apresenta o desenvolvimento e validação de um sistema SaaS (Software as a Service) inteligente para simulação, otimização e predição da qualidade de misturas gasosas em redes urbanas. O objetivo principal do projeto foi criar uma solução capaz de operar em tempo real, garantindo conformidade com a Resolução ANP nº 982/2025 e otimizando o custo total de

fornecimento.

A metodologia envolveu modelagem hidráulico-química da rede, algoritmos de otimização multiobjetivo, técnicas de machine learning para previsão de parâmetros críticos como o Poder Calorífico Superior (PCS) e a construção de uma arquitetura tecnológica escalável e segura, integrada a sensores de campo e sistemas corporativos da distribuidora. A solução foi validada em ambiente operacional real na rede da Comgás, na região de Piracicaba-SP, demonstrando elevada acurácia, confiabilidade e aplicabilidade prática.

Como principal produto, foi desenvolvido o ExpertGas, uma plataforma web que permite o controle automatizado da qualidade do gás, a previsão do comportamento operacional da rede e o apoio à tomada de decisão técnica e comercial. A ferramenta se mostra aplicável a qualquer distribuidora que opere com múltiplos fornecedores e fontes renováveis, contribuindo para a modernização do setor de gás natural, a redução de custos operacionais e o avanço da transição energética no Brasil.

Desenvolvimento

O projeto foi estruturado em seis atividades principais:

- Infraestrutura: Mobilização da equipe técnica e administrativa, aquisição de insumos, e equipamentos de apoio.
- Gestão do Projeto: Coordenação entre a equipe da Quality CH e a Comgás,

incluindo reuniões técnicas, visitas à rede operacional e coleta de dados históricos e operacionais.

- Modelagem Determinística da Rede: Construção de um modelo matemático da Rede de Distribuição de Gás Natural (RDGN), considerando múltiplos fornecedores e fluxos de gás, com base em dados GIS, pressões, temperaturas, vazões e composições típicas.
- Arquitetura Tecnológica: Desenvolvimento de uma infraestrutura em nuvem com banco de dados MongoDB, APIs para integração com dispositivos automatizados (cromatógrafos, computadores de vazão), segurança de acesso e interface de comunicação com o servidor.
- Modelagem Estocástica com IA: Implementação de algoritmos de aprendizado de máquina para predição de parâmetros críticos da mistura gasosa, como PCS, com base em históricos operacionais.
- Interface Web (SaaS): Criação de uma interface gráfica intuitiva, acessível por navegadores, com licenciamento temporário para a equipe da distribuidora realizar testes, análises e tomada de decisão.

O projeto utilizou:

- Modelagem matemática com algoritmos avançados para

simulação de dados operacionais e propriedades físico-químicas da mistura;

- Otimização multiobjetivo considerando restrições regulatórias;
- Modelos clássicos de Machine Learning para predição de comportamento de vazão e variáveis de qualidade do gás.;
- MongoDB, APIs RESTful, Prometheus e infraestrutura CI/CD para automação e escalabilidade;
- Integração com equipamentos de campo (computadores de vazão e cromatógrafos).

O projeto resultou em uma solução tecnológica inovadora, capaz de simular, otimizar e prever, em tempo real, o comportamento de uma rede de distribuição de gás natural operando com múltiplas fontes, incluindo o biometano. Os principais achados obtidos ao longo do desenvolvimento e validação da ferramenta incluem:

- Precisão na Simulação da Qualidade do Gás: O simulador desenvolvido demonstrou elevada acurácia na representação do comportamento físico-químico da mistura de gás natural e biometano ao longo da rede de distribuição, considerando variações operacionais, e características específicas de fornecedores.
- Capacidade de Otimização em Cenários Complexos: O

sistema foi capaz de calcular, de forma automática, as vazões ótimas de injeção de cada fornecedor com base em critérios de custo e qualidade, respeitando as exigências regulatórias (Resolução ANP nº 982/2025) e as restrições específicas de clientes industriais estratégicos.

- Integração com Equipamentos de Campo: A arquitetura tecnológica permitiu a coleta de dados em tempo real diretamente de cromatógrafos e computadores de vazão instalados na rede, possibilitando um modelo dinâmico e responsivo às flutuações operacionais.
- Predição com Inteligência Artificial: O módulo de IA foi bem-sucedido na previsão de variáveis críticas (como volume, PCS, e composição) com elevado grau de correlação, contribuindo para decisões proativas de operação e garantindo maior estabilidade e segurança da rede.
- Validação em Ambiente Real: A ferramenta foi validada na região de Piracicaba-SP, utilizando dados operacionais reais da Comgás. Essa validação confirmou a robustez dos modelos e a aplicabilidade prática do sistema em contextos reais de operação com múltiplos fornecedores de gás.
- Conformidade Regulamentar e Apoio à Tomada de Decisão: O software

demonstrou ser um instrumento eficiente de apoio à gestão técnica e comercial, ao permitir a operação segura com biometano e ao viabilizar a rastreabilidade e controle contínuo da qualidade do gás entregue.

Também mostrou ser uma ferramenta eficaz para contemplar a possibilidade da resolução 982/25 da ANP referente a injeção de gás off spec, ou até mesmo elevar a injeção de Biometano, ainda que off spec – como no caso de sucesso realizado no Ceará.

Esses resultados evidenciam o potencial do sistema como plataforma estratégica para distribuidoras de gás natural, promovendo a integração segura de fontes renováveis e fortalecendo a sustentabilidade técnica, econômica e regulatória do setor.

Simulação

No contexto operacional da rede de distribuição da região de Piracicaba, a qualidade da mistura do gás natural com o Biometano comercializado deve ser rigorosamente monitorada para garantir a segurança, a eficiência dos processos industriais e a conformidade regulatória. Embora alguns consumidores utilizem o gás natural como matéria-prima, a maior parte do mercado consumidor o emprega como combustível em caldeiras, fornos, turbinas e termelétricas. Nesses casos, parâmetros como Poder Calorífico Superior (PCS), Índice de Wobbe e Número de Metano são críticos para o desempenho dos equipamentos. Esses parâmetros são fundamentais para garantir a estabilidade da queima.

Um dos principais desafios enfrentados neste projeto foi justamente a variabilidade da composição e vazão das correntes de

gás natural e do biometano injetados na rede, isso justifica a necessidade de um software de simulação capaz de:

- Coletar os dados de perturbação do sistema (vazão e composição) em tempo real a partir de uma arquitetura tecnológica robusta e segura;
- Avaliar a viabilidade técnica de diferentes proporções de mistura;
- Ajustar automaticamente as vazões de entrada de cada fornecedor;
- Assegurar que a composição final atenda à legislação vigente, mesmo com oscilações na qualidade das correntes de gás.

Otimização

O módulo de otimização do software SaaS - ExpertGas - tem como principal função determinar a vazão ideal de gás a ser injetada por cada fornecedor, de forma a minimizar o custo total de fornecimento e garantir que a mistura final atenda aos parâmetros de qualidade estabelecidos pela ANP ou alguma especificidade do cliente.

Com base na Resolução ANP nº 982/2025 – Anexo 1, que define os limites técnicos obrigatórios (como Poder Calorífico Superior, Índice de Wobbe, concentração de metano, etc.), o módulo realiza as seguintes funções:

- Aplica em tempo real a composição e vazão de cada fornecedor, a partir dos dados coletados em campo.
- Aplica restrições regulatórias

para que a mistura final esteja em conformidade com os limites de qualidade.

- Ajusta as vazões de entrada automaticamente, priorizando fornecedores com menor custo e maior compatibilidade técnica com a mistura.
- Garante a segurança e a integridade da rede, impedindo que misturas fora da especificação requerida sejam direcionadas a consumidores finais.

Com isso, o módulo permite que distribuidoras operem com múltiplos supridores (GN, biometano, hidrogênio), de forma eficiente, segura e regulatoriamente aderente, promovendo a diversificação do suprimento e a inserção de fontes renováveis na matriz energética. Na Comgás, a otimização foi realizada considerando o limite hipotético mínimo de PCS requerido pelo cliente no valor de 9100 kcal/m³.

Inteligência Artificial

O Módulo de Inteligência Artificial integra o sistema de previsão e otimização da operação de redes de distribuição de gás, com foco na antecipação de comportamentos operacionais e na tomada de decisão baseada em dados. Seu desenvolvimento foi estruturado em ciclos evolutivos, de acordo com o fornecimento dos dados por parte da Comgás. O trabalho no Módulo de IA contempla análise exploratória, análise e modelagem de séries temporais, desenvolvimento das rotinas de previsão com modelos clássicos de Machine Learning e avaliação rigorosa do desempenho dos modelos preditivos com múltiplas métricas estatísticas.

A modelagem baseia-se em dados históricos de vazão e qualidade do gás, obtidos em pontos estratégicos da rede, como pontos de entrega e estações de consumo de grandes clientes. Esses dados foram analisados e tratados previamente para garantir sua consistência, incluindo etapas de detecção de outliers, imputação de valores faltantes e estratificação por cliente.

Diversas arquiteturas foram investigadas, incluindo modelos single-output e multi-output, com horizontes de previsão com foco em 1 e 2 horas e 1 e 2 dias à frente. Os experimentos compararam o desempenho de diferentes técnicas, desde métodos estatísticos clássicos até algoritmos de machine learning, com foco na capacidade de prever:

- Volume de gás de fornecedores e clientes em pontos específicos da rede;
- Variáveis de qualidade do gás, como o PCS, PCI, N2, CO2, C1, C2, C3, IC4, NC4, IC5, NC5 e C6+;

A avaliação dos modelos preditivos incluiu métricas como RMSE, MAE, e R.

Em seguida, técnicas de *feature augmentation* são aplicadas para enriquecer as informações disponíveis, considerando aspectos temporais e operacionais relevantes. Os dados são então divididos em conjuntos de treino e teste, garantindo uma avaliação imparcial dos modelos. Modelos de Machine Learning, tanto de saída única quanto múltipla, são treinados com diferentes horizontes de previsão (1 e 2 horas, 1 e 2 dias à frente), visando antecipar comportamentos operacionais da rede.

Arquitetura Tecnológica

A arquitetura tecnológica do sistema foi concebida para garantir alta disponibilidade, escalabilidade e segurança no tratamento e análise de dados provenientes da rede de distribuição de gás natural com injeção de biometano. O sistema foi implementado como uma solução SaaS (Software as a Service), acessível remotamente por navegadores web, com backend estruturado para processar grandes volumes de dados operacionais em tempo real.

O núcleo da solução integra modelos de simulação hidráulico-químicos, algoritmos de otimização e previsão baseados em machine learning, todos orquestrados em uma infraestrutura modular e distribuída. A base de dados foi construída em MongoDB, banco não relacional com alto desempenho para dados semiestruturados e leitura intensiva. Os dados são coletados diretamente de sensores em campo, como cromatógrafos e computadores de vazão, por meio de APIs RESTful seguras e padronizadas.

Uma mudança significativa no escopo do projeto foi a adoção da plataforma WSO2 para gerenciamento das APIs e orquestração de serviços. Inicialmente, a arquitetura previa apenas integrações ponto a ponto entre os dispositivos de campo e o backend. Contudo, para atender o padrão de segurança da Comgás foi essencial implementar uma camada de governança de APIs robusta. O WSO2 permitiu:

- O gerenciamento centralizado das APIs com controle de versionamento, autenticação e autorização;
- A definição de políticas de

segurança e rate limiting, aumentando a confiabilidade do sistema frente a ataques ou picos de uso;

- O monitoramento em tempo real das chamadas de API e do tráfego de dados por meio de dashboards interativos e logs detalhados.

Resultados

O controle em tempo real dos processos de mistura de gases é uma demanda crescente entre distribuidoras que operam com múltiplos pontos de injeção de gás natural, biometano e/ou hidrogênio, provenientes de fontes com diferentes características físico-químicas e custos. O aumento da complexidade operacional exige ferramentas avançadas para o monitoramento e controle da qualidade do gás entregue.

Neste projeto, foi desenvolvido e validado um modelo dinâmico de simulação e otimização, capaz de lidar com múltiplos cenários e variações de composição. A modelagem foi aplicada a uma região operacional representativa, com múltiplos pontos de suprimento e consumo, e validada com sucesso em ambiente real.

Para ampliar a robustez do sistema, foi incorporado um módulo de inteligência artificial (IA) voltado à predição de volume e qualidade da mistura final em diversos nós da rede. O módulo de otimização foi customizado para considerar diferentes fornecedores com condições contratuais e custos variados, permitindo o cálculo da vazão ótima de cada ponto de injeção, com foco na minimização do custo total de fornecimento e na garantia da

qualidade exigida pela regulação vigente.

A ferramenta desenvolvida representa uma contribuição significativa para o setor de distribuição de gás natural, ao permitir maior segurança e confiabilidade no controle da qualidade da mistura, além de apoiar decisões comerciais e técnicas. O projeto também subsidia avanços regulatórios, especialmente no contexto da Resolução ANP nº 982/2025, que permite a comercialização de gás fora de especificação desde que a mistura final esteja em conformidade com os parâmetros normativos.

A validação do software de simulação foi conduzida com o objetivo de verificar sua capacidade de representar fielmente o comportamento físico-químico do gás ao longo da rede, incluindo o impacto da mistura de biometano sobre parâmetros críticos como o Poder Calorífico Superior (PCS). A modelagem considerou variações na composição do biometano, efeitos de diluição ao longo da rede, e condições operacionais como pressão, temperatura e perdas de carga.

A coleta e análise contínua de dados em tempo real foi identificada como fator crítico de sucesso para a validação e operação do sistema. A ausência de sensores distribuídos pode limitar a comparação entre os resultados simulados e os dados reais, reforçando a importância de uma infraestrutura de monitoramento adequada.

O módulo de otimização do software calcula, em tempo real, a vazão ideal de gás a ser injetada por cada fornecedor, aplicando restrições regulatórias e priorizando fornecedores mais econômicos e tecnicamente

compatíveis. Isso assegura a integridade da rede e o atendimento aos padrões de qualidade definidos pela ANP.

O módulo de IA foi desenvolvido para prever o comportamento operacional da rede com base em dados históricos de vazão e qualidade, utilizando técnicas de machine learning. Foram testadas diferentes arquiteturas, incluindo modelos single-output e multi-output, com horizontes de previsão de 1 a 2 horas e de 1 a 2 dias.

Principais Resultados Obtidos:

- **Alto desempenho preditivo:** Modelos com coeficientes de correlação superiores a 0,95 para previsões de vazão diária em pontos estratégicos da rede.
- **Eficiência em previsões de curto prazo:** Modelos como Gradient Boosting, Extra Trees, Random Forest e CatBoost apresentaram excelente desempenho em horizontes de 1 a 2 horas.
- **Capacidade de antecipação de desvios:** A integração entre IA e otimização permite prever violações nos parâmetros de qualidade e sugerir ajustes operacionais proativos.
- **Robustez na previsão de múltiplas variáveis:** A abordagem multi-output permitiu prever simultaneamente variáveis como PCS, C1, N2, CO2, entre outras, com boa acurácia.
- **Flexibilidade operacional:** O sistema se adapta a diferentes configurações de rede e perfis de fornecimento, promovendo a inserção eficiente de fontes renováveis.
- **Aderência regulatória:** A ferramenta opera em conformidade com a Resolução

ANP nº 982/2025, inclusive em cenários de injeção de gás fora de especificação.

- **Potencial de redução de custos:** A otimização da alocação de fornecedores contribui para a redução do custo total de fornecimento e para a racionalização do uso de equipamentos analíticos.

Apesar dos avanços, o projeto identificou a necessidade de continuidade na coleta de dados e no aprimoramento dos modelos preditivos, especialmente para variáveis mais voláteis e horizontes de previsão mais longos. A consolidação da ferramenta como solução operacional requer a manutenção de uma base de dados confiável e a integração plena com os sistemas da distribuidora.

Em síntese, o projeto demonstrou a viabilidade técnica e regulatória de um sistema inteligente para controle da qualidade de misturas gasosas em redes de distribuição, com potencial de replicação em outras regiões e empresas do setor. A solução desenvolvida contribui diretamente para a modernização da infraestrutura de gás, a digitalização dos processos operacionais e a aceleração da transição energética no Brasil.

Conclusões e Contribuições

O projeto resultou em uma solução tecnológica inovadora que alia simulação, otimização e inteligência artificial para o controle da qualidade de misturas gasosas em redes de distribuição de gás natural, incorporando fontes renováveis como o biometano. A principal contribuição está na criação de um software SaaS – ExpertGas validado em ambiente real, com capacidade de operar de forma dinâmica e autônoma, promovendo ganhos operacionais, econômicos, ambientais e regulatórios.

Durante a execução do projeto, diversos aprendizados relevantes foram adquiridos. A necessidade de dados operacionais contínuos e confiáveis mostrou-se um fator crítico para o sucesso da modelagem e do treinamento dos algoritmos. A integração com a infraestrutura tecnológica da distribuidora, por meio de sistemas corporativos e soluções de integração de dados, foi essencial para garantir segurança, rastreabilidade e escalabilidade da solução. Também foi possível compreender, de forma mais aprofundada, as limitações dos métodos tradicionais de medição e a importância de desenvolver abordagens alternativas que ampliem a precisão e a cobertura da malha de monitoramento.

Os principais desafios enfrentados envolveram a integração entre diferentes fontes de dados, a ausência de históricos longos de operação de alguns fornecedores e a necessidade de personalizar o sistema às condições específicas de clientes industriais sensíveis às variações de PCS. A superação desses desafios fortaleceu o produto final e demonstrou sua flexibilidade e capacidade de adaptação.

Com base nos resultados obtidos, torna-se evidente o potencial da ferramenta para impulsionar a transição energética no Brasil. A solução permite a ampliação do uso de biometano e, futuramente, de hidrogênio de baixa emissão de carbono, de maneira segura e econômica. Além disso, ela contribui para uma maior transparência nos processos de medição e faturamento, e poderá ser um catalisador para mudanças regulatórias de grande impacto.

O projeto resultou em uma base tecnológica sólida, testada e validada em ambiente real, representada pelo

sistema SaaS ExpertGas, que demonstrou robustez, desempenho e aderência às necessidades operacionais da rede de distribuição de gás. A solução comprovou sua eficácia, confiabilidade e escalabilidade durante o projeto piloto, estando agora pronta para implantação em larga escala na Comgás. Esse avanço viabiliza o rollout operacional da tecnologia e contribui diretamente para a modernização e digitalização dos processos da companhia, além de abrir caminho para sua expansão a novos casos de uso, como a mistura com hidrogênio, e sua adoção por outras distribuidoras, promovendo um sistema de gás mais eficiente, inteligente e sustentável.

Referências

Chaczykowski, M., & Zarodkiewicz, P. (2017). Simulation of natural gas quality distribution for pipeline systems. *Energy*, 134, 681–698. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.020>

CHELI, Lapo et al. Steady-state analysis of a natural gas distribution network with hydrogen injection to absorb excess renewable electricity. *international journal of hydrogen energy*, v. 46, n. 50, p. 25562-25577, 2021.

Dyachenko, S. A., Zlotnik, A., Korotkevich, A. O., & Chertkov, M. (2017). Operator splitting method for simulation of dynamic flows in natural gas pipeline networks. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 361, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2017.09.002>

Elaoud, S., Hafsi, Z., & Hadj-taieb, L. (2017). Journal of Petroleum Science and Engineering Numerical modelling of hydrogen-natural gas mixtures flows in looped networks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 159(September), 532–541. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.09.063>

Cristello, J. B., Yang, J. M., Hugo, R., Lee, Y., & Park, S. S. (2023). Feasibility analysis of blending hydrogen into natural gas networks. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(46), 17605-1

Guandalini, G., Colbertaldo, P., & Campanari, S. (2017). Dynamic modeling of natural gas quality within transport pipelines in presence of hydrogen injections. *Applied Energy*, 185, 1712–1723. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.006>

Herrán-González, A., De La Cruz, J. M., De Andrés-Toro, B., & Risco-Martín, J. L. (2009). Modeling and simulation of a gas distribution pipeline network. *Applied Mathematical Modelling*, 33(3), 1584–1600. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2008.02.012>

Karpash, O., Darvay, I., & Karpash, M. (2010). New approach to natural gas quality determination. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 71(3–4), 133–137. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2009.12.012>

Osiadacz A. J. and Chaczykowski M. Comparison of isothermal and non-isothermal pipeline gas flow

models. *Chemical Engineering Journal*, 81(1):41–51, 2001.

Ríos-Mercado, R. Z., & Borraz-Sánchez, C. (2015). Optimization problems in natural gas transportation systems: A state-of-the-art review. *Applied Energy*, 147, 536–555.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.017>

Di Somma, M., Graditi, G., & Lanna, A. (2018). Optimal operation of natural gas networks with multiple sources. *Energy*, 152, 960-973.

Khosravanian, M., Shayegan, J., & Amini, M. (2020). Prediction of natural gas composition using artificial neural networks. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 76, 103169.

Kumar, S., Sharma, R., & Mehta, S. (2023). Deep learning approaches for gas quality prediction in smart distribution systems. *Energy AI*, 11, 100209.

OIML. (2008). R 140: Measuring systems for gaseous fuel. International Organization of Legal Metrology.

Torres, R. F., Almeida, R. T., & Silva, F. D. (2019). Dynamic simulation of biogas injection in natural gas networks. *Energy Reports*, 5, 814-822.

Van de Poel, W., De Schutter, B., & Van den Boom, T. (2021). Gas quality tracking with software-based methods in distribution networks. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(23), 12481–12491.

Zhao, Y., Liu, G., & Zhou, M.

(2021). Simulation of multi-source gas networks under composition fluctuation. *Applied Energy*, 285, 116460.