

Sistema orientado a dados para monitoração de perdas em processos industriais

Júlia Guardiani *** Celi Lopes ** Diego Medeiros ***
Lucas Marques **** Danilo Curvelo * Diego Cabral ** Gustavo Leitão *
Ivanovitch Silva *** Luiz Affonso Guedes ***

* Instituto Metrópole Digital, UFRN, RN, (e-mail: [danilocurvelo, gustavo.leitao]@imd.ufrn.br).

** Escola de Ciência e Tecnologia, UFRN, RN, (e-mail: celi.lopes.700@ufrn.edu.br, diego@ect.ufrn.br).

*** Departamento de Engenharia da Computação, UFRN, RN, (e-mail: [diego.medeiros.071, julia.guardiani.089]@ufrn.edu.br, ivanovitch.silva@ufrn.br, affonso@dca.ufrn.br)

**** Departamento de Engenharia Elétrica, UFRN, RN, (e-mail: lucas.marques.016@ufrn.edu.br).

Abstract: The entire industry has been striving to transition to a low carbon economy, and among these efforts are initiatives to reduce release of gas to the flare system. In order to achieve this reduction, it is necessary to measure and identify the sources of gas being released in the process. Due to the involved costs and technical difficulties, usually only the main flare lines have their flow measured in those systems. This article presents a flow inference system for major elements that release gas into the flare system, including safety relief valves (PSVs), control valves, and restriction orifices. In addition to estimating the flow, the proposed system groups gas delivery sources, making it possible to evaluate process units, areas and industrial plants, in addition to estimating the cost of this mass of gas burned in the flare system, considering even the type of involved gas. As a pilot application, the described solution comprises the monitoring of oil and gas refineries.

Resumo: Toda a indústria tem se esforçado na transição para uma economia de baixo carbono, e dentro destes esforços se encontram as iniciativas de redução de envio de massa de gás para o sistema de tocha (*flare*). Para essa redução é necessário medir e identificar as fontes de envio de gás no processo. Em função dos custos e das dificuldades técnicas envolvidas, em geral nos sistemas de tocha apenas os alinhamentos principais tem suas vazões medidas. Este artigo apresenta um sistema de inferência de vazão para os principais elementos que alinham gás para tocha, incluindo válvulas de segurança e alívio (PSVs), válvulas de controle e orifícios de restrição. Além de estimar a vazão o sistema agrupa as fontes de envio de gás, possibilitando avaliar unidades de processo, áreas e plantas industriais, além de estimar o custo dessa massa de gás para tocha, considerando o tipo de gás queimado. Como aplicação piloto, a solução descrita compreende a monitoração de refinarias da indústria de óleo e gás, sendo apresentado tanto um algoritmo para inferência de perdas quanto um sistema computacional responsável por orquestrar e monitorar a execução e processamento desses algoritmos.

Keywords: flow inference; flow measurement; flare system; flare; mass of gas to flare; data-driven.

Palavras-chaves: inferência de vazão; medição de vazão; sistema de tocha; flare; massa de gás para tocha; orientado a dados.

1. INTRODUÇÃO

No contexto de mercados globalizados, competitivos e cada vez mais exigentes e contextualizados em um cenário de transformações digitais, torna-se essencial que as instituições, empresas, indústrias e conglomerados pensem e planejem as ações estratégicas visando medidas concretas que garantam a preservação do meio ambiente e no aumento do bem-estar social. Nesse sentido, as ações da Governança Ambiental, Social e Corporativa (*Environmental, Social and Governance, ESG*)

tem se posicionado como um instrumento protagonista no sentido de atender a essas demandas bem como na garantia da sustentabilidade da própria empresa e dos mercados. Percebe-se, portanto, que os níveis de exigência, não apenas limitados a questões legais e regulatórias, mas também do mercado de consumo em relação às políticas de proteção ao meio ambiente implementadas pelas organizações têm aumentado significativamente nas últimas décadas. É possível perceber uma forte tendência dessas exigências do mercado consumidor

continuar crescendo nos próximos anos, por isso há cada vez menos espaço para empresas que causem impactos ambientais e/ou sociais.

Considerando o contexto industrial, em especial aquele relacionado as empresas do setor de Óleo e Gás (O&G), inúmeras práticas de ESG podem ser adotadas para minimizar os impactos naturalmente agressivos do ponto de vista ambiental e social. Como exemplo, podemos citar a conservação da biodiversidade associada, geração de renda pelo suporte às cadeias produtivas locais, promoção da equidade de gênero, segurança alimentar, manutenção de serviços ecossistêmicos, desenvolvimento de inventários florestais, capacitação das comunidades, entre outros. Apesar de um cenário promissor no tocante as práticas de ESG no setor de O&G, existem ainda alguns desafios sobre os impactos ambientais a serem superados, como é o caso das emissões de poluentes e gases do efeito estufa. Por exemplo, na queima de gases em tochas, um procedimento tipicamente utilizado em larga escala em refinarias, é iminente e prioritária a preocupação com o aspecto ambiental e social.

De fato, a emissão de gases do efeito estufa, em especial o CO₂, tem um impacto direto no meio ambiente. Alguns estudos relatam que para limitar o aquecimento global em 2,2°C há necessidade de se atingir o balanço líquido de emissões “*net-zero emissions*” até 2030 (UNEP, 2021). Neste sentido, o setor industrial brasileiro, em especial, a Indústria de O&G, vêm investindo fortemente nos impactos das emissões destes gases. As maiores empresas do setor tem metas audaciosas, cujo objetivos globais visam reduzir as emissões dos atuais 40,2 kgCO₂e/CWT em 2020 para 36 em 2025 e 30 em de 2030, sendo que uma das grandes contribuições para esta redução de emissões na área de refino se dará pela redução na quantidade de massa de gás para tocha (Petrobras, 2021). Esta redução tem como grande desafio a dificuldade em medir a quantidade de massa de gás enviado para tocha em cada subsistema, haja vista que alguns equipamentos de segurança crítica são mecânicos e não instrumentados. Dessa forma, é importante que inferências orientadas a dados e baseadas em algoritmos da ciência de dados e inteligência artificial sejam implementadas para que se possa atuar em ações para a redução das emissões.

Gerenciar as emissões atmosféricas através de buscas de ecoeficiência de operações e negócios precisa ser (e de fato já é) tema de estudo nas refinarias, visando maximizar o controle de emissões de gases de efeito estufa. Muitos estudos estão sendo feitos com o intuito de descobrir soluções que amenizem esse problema. O trabalho publicado por Javaid et al. (2021) relaciona a importância dos sensores para a chamada Indústria 4.0 junto com as suas funções, recursos e flexibilidade, sendo de alta aplicabilidade para uma solução de monitoração de fontes de perdas de gás para tocha. Nesse estudo, eles abordam as vantagens de se utilizar sensores em áreas de difícil instrumentação, tendo como resultado mais mobilidade da produção, aumento na sustentabilidade e minimização de custos na indústria. Outro estudo recente faz referência à rentabilidade e sustentabilidade nas indústrias de petróleo e gás com a Indústria 4.0, onde Roberty (2021) explica como a análise de grandes massas de dados (*Big Data*) do processo pode

auxiliar as empresas a desenvolverem modelos inteligentes com potencial de prever os principais parâmetros relacionados ao processo, permitindo assim a correção preventiva de perturbações em tempo hábil.

Ponderando a amostra de alguns trabalhos recentes referentes ao estado da arte apresentado, é possível ter uma rápida noção da pertinência em se utilizar conceitos de *Big Data* e análise de dados na realidade atual das indústrias de O&G, conforme será abordado neste artigo.

Neste contexto, este trabalho tem por objetivo apresentar o desenvolvimento de uma solução orientada a dados para monitoração de fontes de perdas de gás para o sistema de tocha (*flare*). As perdas para tocha são quantificadas a partir de todos os alinhamentos de válvulas de controle, válvulas de segurança e alívio (PSVs), e orifícios de restrição. Esse cenário possibilita a inferência da massa de gás enviada por cada unidade e a identificação dos “*bad actors*” que contribuem com as maiores perdas de massa de gás para tocha. Para realizar a quantização das perdas, foram desenvolvidos algoritmos que implementam equações de mecânicas dos fluidos possibilitando o cálculo das inferências. Além dos algoritmos com as equações, foi criada um sistema para a automatização do pipeline dos dados para que as inferências fossem calculadas periodicamente.

O artigo é organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta uma breve descrição sobre a aplicação alvo do estudo, a saber, o monitoramento de sistemas de tocha; A Seção 3 descreve as ferramentas tecnológicas empregadas e a arquitetura da solução proposta, assim como seus resultados preliminares; Por fim, a Seção 4 discute as conclusões do trabalho e indica direcionamentos para estudos futuros.

2. SISTEMAS DE TOCHA (*FLARE*)

Nas refinarias de petróleo é muito comum a utilização de um sistema de tocha para queima dos gases que não são importantes, ou que foram gerados em excesso, fazendo com que válvulas de segurança e/ou de alívio atuem no redirecionamento da massa de gás.

Como explicado em Sotoodeh (2021), esses gases que vão para as tochas, majoritariamente hidrocarbonetos, não podem ser livremente despejados na natureza, por resultarem, muitas vezes, em problemas ambientais graves, como agravamento do aquecimento global e do efeito estufa. Além disso, em Bahadori (2014) é discutido que a queima de gases em excesso também resulta em problemas ambientais e pode ser usado como indicador de desempenho em uma típica planta industrial do setor petroquímico. Portanto, quantificar a massa de gás que é redirecionado para a tocha é essencial para o bom funcionamento de uma refinaria de petróleo.

Uma das formas de quantificar essa massa de gás é através do cálculo de vazão. A ABNT NBR-16777 (09/2019) estabelece requisitos para a aplicação de medidores de vazão de gás para a tocha e de gás ventilado para a atmosfera, compostos por hidrocarbonetos e outros gases. Entretanto, os equipamentos descritos na norma são financeiramente custosos para as refinarias, sendo viável a exploração de outros métodos de medição de vazão nesse cenário.

Normalmente, quando analisamos uma planta petroquímica, podemos perceber que existem equipamentos que estão na linha do *flare*. Alguns equipamentos são mais frequentes que outros, como por exemplo as válvulas de segurança, as válvulas de controle, e os elementos primários de vazão. Portanto, se soubermos as vazões nestes três equipamentos, podemos calcular a vazão total e, conseqüentemente, a quantidade de gás que é queimado na tocha. Além disso, existe outro ponto crucial para o desenvolvimento do sistema: os elementos de segurança e alívio de uma planta do setor petroquímico são totalmente mecânicos, justamente para evitar as possíveis falhas que ocorrem em componentes eletrônicos, tais como curto-circuito, circuito em aberto — devido ao rompimento de alguma trilha na PCB ou afiação —, falta de energia na planta e interferências eletromagnéticas. Portanto, a instrumentação por meio de sensores convencionais utilizados no chão de fábrica se torna ainda mais difícil.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo abordar uma solução inteligente capaz de realizar a inferência de vazão do gás de tocha para diversas refinarias. A solução gera indicadores por meio da inferência de vazão nos equipamentos instalados na linha da tocha — válvulas de segurança, válvulas de controle e elementos primários de vazão como os orifícios de restrição — e de *softwares* que realizam o processamento de diversas medições — como temperatura, pressão a montante, pressão a jusante e pressão atmosférica — em cada um desses equipamentos, retiradas da planta para a inferência de alguma outra grandeza de difícil medição. Esta técnica é denominada de *soft sensors*, e vem sendo bastante utilizada na indústria 4.0, principalmente quando a utilização de sensores eletrônicos são inviáveis, como discutido em Stanley et al. (2020).

O sistema desenvolvido centraliza todos os dados em um único banco de dados e realiza as inferências de vazões em um único serviço (escalável verticalmente e horizontalmente), sendo este desenvolvido na plataforma *Apache Airflow*. A utilização do *Apache Airflow* é de suma importância, uma vez que cada elemento do sistema possui uma inferência única, com dados de entradas específicos para o elemento envolvido, que deve ser calculado paralelamente e independentemente das demais inferências.

3. SISTEMA E ARQUITETURA

Uma das principais plataformas utilizadas no desenvolvimento da solução proposta é a ferramenta *open-source* conhecida como *Apache Airflow*. Nesta Seção serão explorados os conceitos da orquestração de dados com o *Apache Airflow* e, posteriormente, a arquitetura detalhada do sistema desenvolvido.

3.1 Apache Airflow

O *Apache Airflow* é um orquestrador de dados cuja estrutura desenvolve fluxo de dados (*data pipelines*) orientados a lote. Seu principal recurso é uma plataforma para construção de *data pipelines*, cujo principal recurso é permitir que o usuário crie facilmente os fluxos de dados e tarefas através de uma estrutura flexível programada na linguagem Python. Adicionalmente, o orquestrador fornecer interfaces conectoras que permitem a união de tecno-

logias de comunicação diferentes tipicamente encontradas na indústria (RUITER, 2021).

Um *pipeline* de dados pode ser representado como um conjunto encadeado de tarefas que irá “transformar” os dados. Em sistemas orientados a dados, esse conjunto de tarefas costumam ser executados periodicamente à medida que novos dados vão surgindo, entretanto, as regras de negócio tendem a ser mantidas por um período maior de tempo. Nesse contexto, o *Apache Airflow*, de acordo com a documentação, funciona como uma plataforma de código aberto que permite criar, agendar e monitorar os fluxos de trabalho das tarefas utilizando programação. Os *pipelines* do *Apache Airflow* utilizam a linguagem de programação Python e são representados como grafos acíclicos direcionados (*Directed Acyclic Graphs*, DAG), conforme exemplificado na Figura 1. Cada nó do grafo representa uma tarefa e os traços do grafo fazem o encadeamento das operações para formar o *pipeline*, direcionando o fluxo de trabalho.

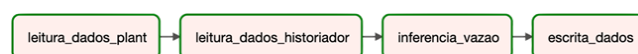


Figura 1. Exemplo de *pipeline* modelado como um grafo direcionado acíclico (DAG).

Do ponto de vista arquitetural e de infraestrutura, o *Apache Airflow* possui os seguintes componentes principais: o *scheduler*, os *workers* e o *webserver*. O *scheduler* diz respeito ao componente que define a agenda e intervalo entre execuções do *pipeline*, os *workers* são responsáveis pela execução do código Python para realização das tarefas e o *webserver* é a interface da aplicação que permite o monitoramento e auditoria da execução dos fluxos. A interação entre esses componentes pode ser vista na Figura 2.

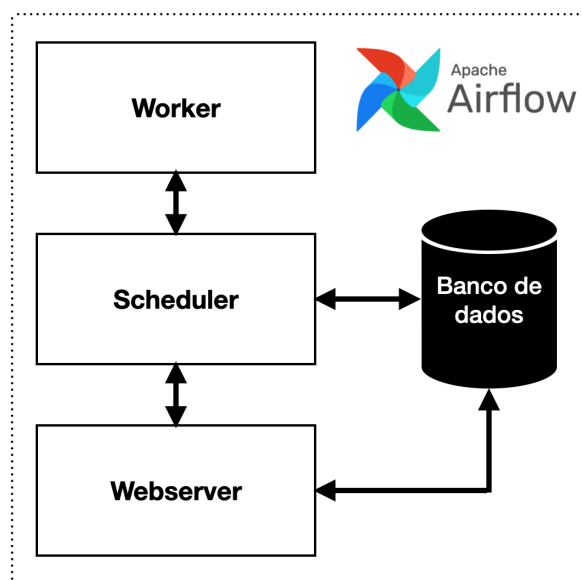


Figura 2. Arquitetura básica dos componentes do Apache Airflow.

Os princípios do Airflow, de acordo com a Apache Software Foundation (2022), afirmam que a aplicação é elegante, dinâmica, extensível e escalável. Sendo uma ferramenta robusta para lidar com a transferência e monitoramento

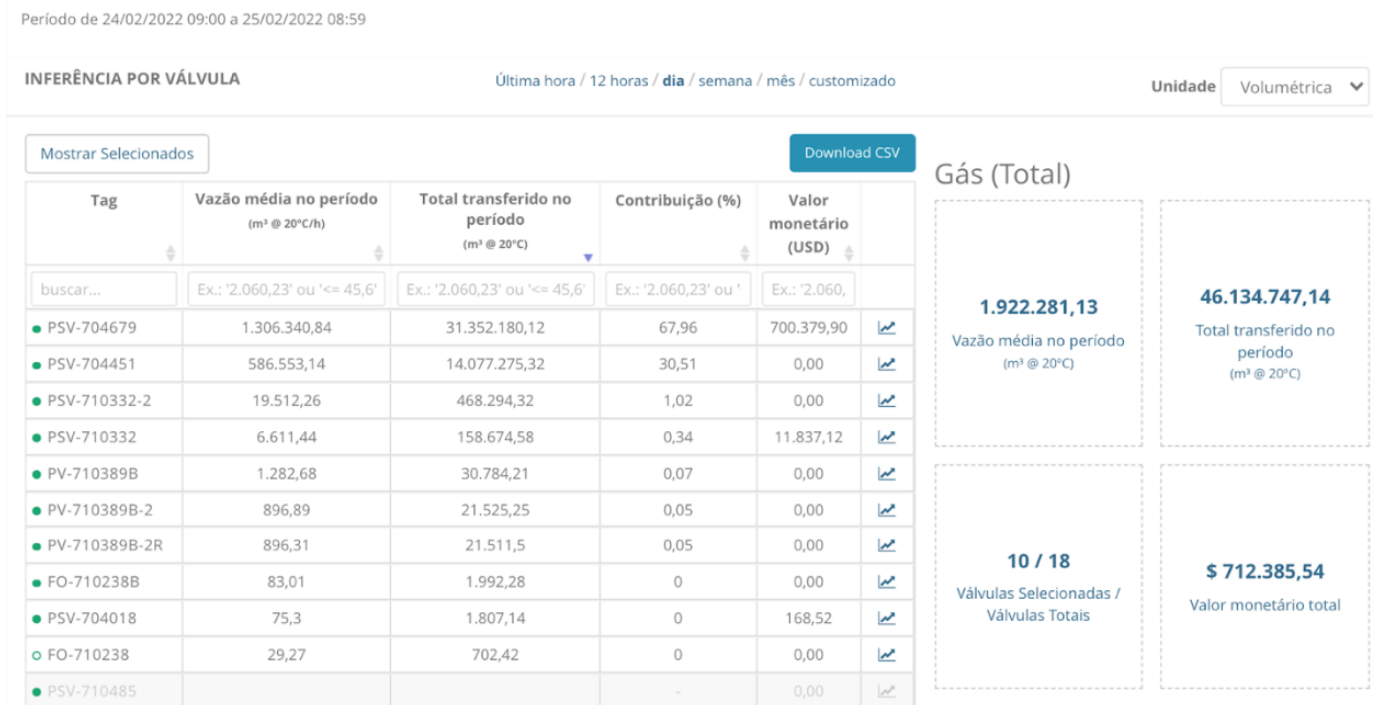


Figura 3. Painel de apresentação dos resultados em termos da contribuição de massa de gás para tocha através de indicadores e totalizadores.

de dados que precisam ser enviados periodicamente em lotes, permitindo ainda computação paralela.

O principal propósito de se adotar uma ferramenta consolidada de orquestração de fluxos de dados é, além de se beneficiar das vantagens de uma solução altamente escalável, permitir a execução automática e periódica conforme as necessidades da aplicação. No caso contrário, o processo de extração, transformação e carga dos dados deverá ser realizada manualmente ou por implementações próprias menos robustas.

3.2 Arquitetura proposta

Conforme previamente descrito, a proposta desta solução computacional inteligente é monitorar determinados elementos de uma planta industrial a fim de realizar a inferência de vazão mássica de gás para a tocha através de algoritmos que realizam o processamento de diversas medições do processo. A implementação dos algoritmos para estimativa das perdas para a tocha é dependente do equipamento em questão, sendo modelados, a princípio, lógicas para quantificação da vazão em válvulas de controle, válvulas de segurança e alívio (PSVs) e orifícios de restrição.

Para válvulas de segurança e alívio (PSVs) foi implementado um algoritmo de detecção de abertura e fechamento dessas válvulas, incluindo a inferência de abertura abaixo da pressão de ajuste prevista para as mesmas em alguns casos, e a estimativa de vazão baseada no API STD 520 (2020) considerando os dados de projeto e as medições de pressão e temperatura a montante e pressão a jusante. Uma vez que o algoritmo detecta a abertura da PSV, a vazão é estimada considerando os dados de projeto e as medições de pressão e temperatura a montante e pressão

a jusante. O algoritmo também considera a pressão de reassentamento da válvula em função do seu *blowdown*, que infere o fechamento da PSV abaixo da pressão de ajuste da mesma. A estimativa numérica de vazão mássica (W_{gas} em kg/h) para este tipo de válvula para fluidos no estado gasoso é apresentada nas Equações (1a) para fluxos críticos e (1b) para fluxos sub-críticos.

$$W_{gas} = A \cdot C \cdot K_d \cdot K_b \cdot K_c \cdot P_{mon} \sqrt{\frac{M}{T \cdot Z}} \quad (1a)$$

$$W_{gas} = \frac{1}{17,90} A \cdot F_2 \cdot K_d \cdot K_c \sqrt{\frac{M \cdot P_{mon} \cdot \Delta P}{T \cdot Z}} \quad (1b)$$

Onde A representa a área interna da válvula, C o coeficiente de gases ideais, M o peso molecular do fluido, Z o fator de compressibilidade do fluido, F_2 o coeficiente de fluxo sub-crítico, além de fatores de correção (K_d , K_b e K_c) e variáveis de processo como temperatura e pressão.

Para as válvulas de controle, o algoritmo considera a estimativa de vazão a partir da norma ISA75.01 (2012) e medições de pressão e temperatura a montante e pressão a jusante, além da abertura da válvula. No sentido de dar maior acurácia ao modelo, a inferência de vazão verifica se a válvula se encontra em escoamento subcrítico ou crítico, corrigindo os efeitos da variação de massa específica do gás em função do regime de escoamento. O modelo considera adicionalmente um fator de ajuste pela diferença entre o diâmetro da linha de processo e o corpo da válvula, compensando o efeito da existência de reduções e expansões entre a tubulação e a válvula. A Equação (2) foi utilizada para estimar a vazão mássica deste tipo de válvula.

$$W_{gas} = C_V \cdot \frac{2,73}{3600\sqrt{1000}} \cdot y \cdot \sqrt{X \cdot P_{mon} \cdot \rho} \quad (2)$$

Onde C_V é o coeficiente de fluxo da válvula, ρ a massa específica, y o fator de expansão, X a razão entre o diferencial de pressão e a pressão a montante absoluta, além de variáveis de processo como pressão.

Em relação aos orifícios de restrição, presentes em alguns sistemas de depressurização e normalmente associados a válvulas de bloqueio, além de levar em consideração aspectos de dilatação térmica, o algoritmo verifica a abertura da válvula de bloqueio e avalia se a condição é de escoamento crítico, estimando nestes casos a vazão pelo mesmo através de metodologias presentes em Miller (1983). Nessa primeira versão, o algoritmo é capaz de calcular a vazão mássica para o orifício de restrição em regime de escoamento crítico isentrópico para gás real. A Equação (3) reflete o modelo matemático para inferir a vazão mássica deste tipo de ativo.

$$W_{gas} = C \cdot \beta^2 \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot Y \cdot (P_1)_t \cdot \sqrt{\frac{M}{8314,3 \cdot Z \cdot T_1}} \quad (3)$$

Onde C representa o coeficiente de descarga, β o beta do orifício à temperatura de operação, D o diâmetro interno da tubulação, M o peso molecular do gás, Z o fator de compressibilidade do gás, Y o coeficiente de escoamento crítico isentrópico, além de variáveis de processo como temperatura e pressão.

A arquitetura por meio da qual essa aplicação foi desenvolvida é baseada em diferentes módulos integrados com o intuito de oferecer uma plataforma robusta e escalável para orquestração e execução dos algoritmos responsáveis pela identificação e quantificação de massa de gás para o sistema de tocha.

A entrada dos algoritmos de quantificação de perdas é baseada em dados históricos armazenados em uma infraestrutura computacional de alta fidelidade para dados industriais, devidamente adequada ao atual contexto de *big data* com uma arquitetura distribuída e escalável suprimindo os mais exigentes requisitos de disponibilidade e desempenho. Tal solução de armazenamento de dados industriais históricos é detalhada no trabalho de Bezerra et al. (2020). Esta mesma solução de armazenamento de dados é utilizada para persistir os resultados da quantificação das perdas para uma posterior utilização destes dados para outras aplicações de visualização e/ou análise, tais como ferramentas de *Business Intelligence* (BI).

A solução conta com uma interface de aplicação responsável por permitir a parametrização dos ativos que serão monitorados como transmissores, válvulas de controle, PSVs e orifícios de restrição. Desta forma, todos os parâmetros necessários para o cálculo das inferências são configurados através desta interface conforme o ativo a ser monitorado.

Além da parametrização dos ativos envolvidos, para cada elemento com possibilidade de envio de gás para tocha, os parâmetros das inferências devem ser configurados com informações de pressão e temperatura a montante, pressão a jusante e características do fluido.

Esta mesma solução disponibiliza painéis de apresentação dos resultados em termos da contribuição de massa de gás para tocha e em valores financeiros através de indicadores, totalizadores e gráficos interativos, conforme as Figuras 3 e 4.



Figura 4. Painel de apresentação dos resultados em termos da contribuição de massa de gás para tocha através de gráficos.

O núcleo responsável pelo processamento dos cálculos das inferências é baseado no *Apache Airflow*, plataforma popular e *open-source* de construção, agendamento e execução de fluxos de dados e tarefas. A arquitetura lógica é baseada em um orquestrador responsável por periodicamente consultar todos os ativos com monitoração de perdas ativa, instanciando, para cada ativo, um respectivo *pipeline* de tarefas parametrizados pela natureza do equipamento em questão. Desta forma, a plataforma será continuamente um reflexo dos ativos a serem monitorados para identificação e quantificação da vazão mássica de gás para tocha. A Figura 5 ilustra esse cenário, desde a monitoração por parte do orquestrador até a geração dos fluxos de inferência de dados.

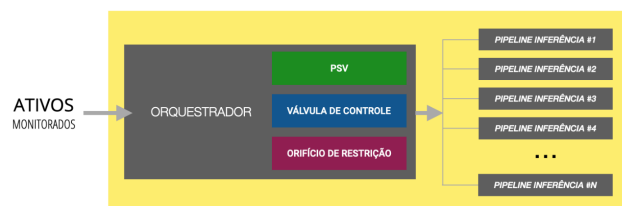


Figura 5. Arquitetura lógica do orquestrador instanciando novas inferências.

A organização interna do fluxo de dados da monitoração de perdas para a tocha de um ativo é estruturada em quatro tarefas: a obtenção dos metadados operacionais do equipamento; a obtenção dos dados das variáveis de processo envolvidas através do historiador; o cálculo da inferência da vazão mássica e volumétrica; a escrita dos resultados obtidos. Esse fluxo é ilustrado na Figura 6.

Tal *pipeline* é agendado para executar periodicamente a cada hora, para cada um dos ativos devidamente para-

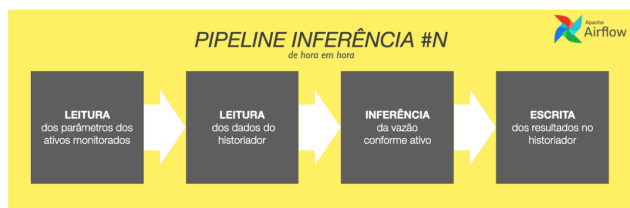


Figura 6. Fluxo de dados e tarefas (*pipeline*) de uma inferência.

metrizados e monitorados. Desta forma, o algoritmo realiza o cálculo da inferência da vazão mássica (kg/h) e volumétrica (m_3/h) para cada uma das amostras de dados provenientes dos sistemas de historiamento na janela temporal analisada. Além de realizar a análise da vazão instantânea, o algoritmo também determina a vazão de massa e volume média na janela analisada (hora), grandeza na qual diversos outros totalizadores são calculados, como o total transferido e valor monetário total no período analisado.

4. CONCLUSÃO

O sistema desenvolvido possibilita o acompanhamento da massa de gás enviada para tocha, assim como a estimativa de custo dessa queima, permitindo avaliar a contribuição de cada unidade e de cada elemento de alívio. Com essa informação é possível identificar os “*bad actors*” em termos de envio de gás para tocha e assim direcionar as ações de redução de queima.

A inferência com maior precisão das fontes de perda de massa de gás para tocha contribui para visualização de informações que não são facilmente observáveis a partir das salas de controle, contribuindo para uma melhor gestão operacional, e estudos para detecção de outras fontes de perdas não mensuráveis, como passagem através de válvulas devido a perdas de estanqueidade, quando estes dados são reconciliados com os poucos medidores de vazão existentes nos sistemas de tocha.

A presente solução se encontra em operação piloto em uma refinaria de óleo de gás, atualmente com mais de 100 inferências cadastradas para diferentes tubulações que alinham para o sistema de tocha e operadas por diferentes ativos (válvulas de controle, PSVs e orifícios de restrição). Os resultados preliminares são promissores, inicialmente fundamentados em uma análise qualitativa baseada na expertise e conhecimento prévio dos operadores dos processos monitorados. O próximo passo é implantar a solução em uma unidade industrial onde transmissores de vazões estejam presentes, possibilitando assim a validação quantitativa dos resultados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Petrobras e ao CENPES pelo apoio financeiro concedido às pesquisas desenvolvidas no referido trabalho.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR-16777 (09/2019). *Norma Brasileira: Medidores de vazão de gás de tocha (flare) e de gás ventilado para a atmosfera*. ABNT, Brasil, 1 edition.

Apache Software Foundation (2022). Apache airflow documentation. Disponível em: <https://airflow.apache.org/docs/apache-airflow/stable/index.html>.

API STD 520 (2020). *Sizing, Selection, and Installation of Pressure-relieving Devices Part I—Sizing and Selection*. API, United States, 10 edition.

Bahadori, A. (2014). Chapter 6 - blow-down and flare systems. In A. Bahadori (ed.), *Natural Gas Processing*, 275–312. Gulf Professional Publishing, Boston. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099971-5.00006-4>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080999715000064>.

Bezerra, A., Greati, V., Campos, V., Silva, I., Guedes, L.A., Leitão, G., and Silva, D. (2020). Enabling interactive visualizations in industrial big data. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 11162–11167. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.292>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896320305723>. 21st IFAC World Congress.

ISA75.01 (2012). *Control Valve Sizing Equations*. ISA, United States, 1 edition.

Javaid, M., Haleem, A., Singh, R.P., Rab, S., and Suman, R. (2021). Significance of sensors for industry 4.0: Roles, capabilities, and applications.

Miller, R. (1983). *Flow Measurement Engineering Handbook*. McGraw-Hill Companies, United States, 1 edition.

Petrobras (2021). Refinarias da petrobras adotam inteligência artificial no controle de tochas. Disponível em: https://www.agenciapetrobras.com.br/Materia/ExibirMateria?p_materia=983745.

Roberty, E.A.M. (2021). Predictive analytics applications for oil and gas processing facilities.

RUITER, J.D. (2021). *Data Pipelines with Apache Airflow*. MANNING, United states, 1 edition.

Sotoodeh, K. (2021). Chapter 7 - hipps for fugitive emission reduction. In K. Sotoodeh (ed.), *Prevention of Actuator Emissions in the Oil and Gas Industry*, 135–146. Gulf Professional Publishing. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91928-9.00007-4>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323919289000074>.

Stanley, D., Liu, C., and John Schroeder, A. (2020). Hard data, soft sensors and process expertise: a recipe for industry 4.0 success. In *PaperFirst Magazine Autumn*, 48–51.

UNEP (2021). United nations environment programme. Disponível em: <https://www.greenclimate.fund/ae/unep>.