

Flare and Methane Emission System (FAMES): sensoriamento remoto de Flare e avaliação de eficiência de combustão

Flare and Methane Emission System (FAMES): remote sensing of Flare and combustion efficiency assessment

Jairo Rotava, Leonardo de Farias Araujo, Antonio Arleques Gomes, Roberto Guardani, Carla Carvalho Kato, Eduardo Landulfo, Fábio J. S. Lopes, Jose Antonio Sevidanes da Matta, Alex Carlos Pellegrinetti Mendes, João Henrique Vieira da Silva.

Abstract:

There has been a growing concern about the reduction of greenhouse gas (GHG) emissions due to the impacts on climate change and the goals of the Paris Agreement. Methane is responsible for approximately 20% of global warming. The oil and gas industry is a major source of methane emissions. New initiatives like OGMP 2.0 emphasize the need for accurate monitoring of emissions. In this context, the FAMES project, developed by USP, IPEN, and ouronova, utilizes lidar technology to monitor the combustion efficiency in industrial flares. This remote system uses Rayleigh-Mie and Raman scattering detection methods to measure the optical properties of substances emitted by the flare, allowing the quantification of methane and particles. The lidar distinguishes between different plumes along the optical path. This lidar technology offers a quick assessment of operational processes, a significant advantage compared to existing technologies. The project combines remote particle sensing and methane measurement in the atmosphere, functioning as a hybrid system to evaluate flare combustion efficiency on FPSO-type platforms. Initial conceptual tests have demonstrated the effectiveness of the system, which aims to achieve a TRL 6 when installed on FPSOs to monitor emissions from their flares. With the support of Shell Brasil Petróleo Ltda and using resources from the R&D clause of the concession contracts of the National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP), the project highlights the industry's interest in solutions that improve the management of methane emissions in FPSO.

Keywords: Decarbonization | Combustion efficiency | methane emissions | lidar | flare

Há crescente preocupação com a redução dos gases de efeito estufa (GEE), devido aos impactos nas mudanças climáticas e aos objetivos do Acordo de Paris. O metano é responsável por aproximadamente 20% do aquecimento global. A indústria de petróleo e gás é uma importante fonte de emissões de metano. Iniciativas como o OGMP2.0 enfatizam a necessidade de um monitoramento das emissões. O projeto FAMES, desenvolvido pela USP, IPEN e a ouronova, utiliza tecnologia lidar para monitorar a eficiência da queima em flare industriais. Esse sistema remoto usa métodos de detecção de espalhamento Rayleigh-Mie e Raman para medir as propriedades ópticas dos elementos emitidos pelo flare, permitindo a quantificação de metano e partículas. O lidar distingue diferentes plumas ao longo da trajetória óptica. Essa tecnologia lidar oferece uma avaliação rápida dos processos operacionais, uma vantagem significativa em comparação com as tecnologias existentes. O projeto combina a detecção remota de partículas e a medição de metano na atmosfera, funcionando como um sistema híbrido para avaliar a eficiência da queima em flare em plataformas do tipo FPSO. Os testes conceituais iniciais demonstraram a eficácia do sistema, que pretende alcançar um TRL 6 quando for instalado em FPSO para monitoramento das emissões de flare. Com apoio da Shell Brasil Petróleo Ltda e utilizando recursos da cláusula de PD&I dos contratos de concessão da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), o projeto destaca o interesse da indústria em soluções que melhorem a gestão das emissões de metano em FPSO.

Palavras-chave: descarbonização; eficiência de combustão; emissão de metano; lidar; flare.

Received: September 8th, 2024 | **Accepted:** July 7th, 2024 | **Available online:** September 23th, 2024

Article n°: 2875

DOI: <https://doi.org/10.48072/2525-7579.roge.2024.2875>

1. Ouronova. Engenharia. BRASIL. E-mail: jairo.rotava@gmail.com. (<https://orcid.org/0000-0003-1132-1590>) 2. Ouronova. Engenharia. BRASIL. E-mail: leonardo.araujo@ouronova.com. (<https://orcid.org/0000-0003-0727-4912>) 3. Universidade de São Paulo - USP. Centro de Lasers e Aplicações. BRASIL. E-mail: antonio.gomes@usp.br. (<https://orcid.org/0000-0003-3158-8217>) 4. Universidade de São Paulo - USP. Engenharia Química. BRASIL. E-mail: guardani@usp.br. (<https://orcid.org/0000-0001-5890-8546>) 5. Ouronova. PD&I. BRASIL. E-mail: carla.kato@ouronova.com. (<https://orcid.org/0009-0007-5741-9557>) 6. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN. CELAP. BRASIL. E-mail: elandulf@ipen.br. (<https://orcid.org/0000-0002-9691-5306>) 7. Universidade Federal de São Paulo - UNIFESP. Ciências Ambientais. BRASIL. E-mail: fjslopes@unifesp.br. (<https://orcid.org/0000-0001-7243-7197>) 8. Universidade de São Paulo - USP. CLA. BRASIL. E-mail: jasmatta.19@gmail.com. (<https://orcid.org/0000-0002-7444-6297>) 9. Universidade de São Paulo - USP. CELAP. BRASIL. E-mail: apmendes@alumni.usp.br. (<https://orcid.org/0000-0002-1411-1153>) 10. Ouronova. Engenharia. BRASIL. E-mail: joao.silva@ouronova.com. (<https://orcid.org/0009-0007-5729-3528>)

1. Introdução

Nos últimos anos tem havido uma crescente preocupação com programas destinados à redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE), para mitigar os potenciais impactos nas mudanças climáticas e alcançar os objetivos delineados no Acordo de Paris (Bloomberg, 2019). O metano, CH_4 , é reconhecido como um dos principais gases de efeito estufa de longa duração na atmosfera, sendo responsável por aproximadamente 20% do aquecimento global, além de possuir um Potencial de Aquecimento Global (PAG) 28 vezes maior do que o mesmo volume de dióxido de carbono, CO_2 , ao longo de um período de 100 anos (Kleinberg, 2021). Dentre as várias fontes de emissão de metano para a atmosfera, a indústria de petróleo e gás desempenha um papel crucial nesse cenário. Estudos indicam que os queimadores usados na indústria de óleo e gás, conhecidos como flares, possuem uma eficiência de queima em torno de 91%, em contraste com os 98% estimados pelas próprias empresas do setor (Macedo et al., 2021; Landulfo et al., 2018). É sabido que as emissões de metano ocorrem durante processos de produção em refinarias e plataformas do tipo FPSO (Floating, Production, Storage and Offloading), quando há uma combustão incompleta ou quando o flare está inativo, liberando materiais para a atmosfera. Novas regulamentações, taxas e a pressão da opinião pública em relação às emissões e seu controle, estão impulsionando melhorias no monitoramento e na quantificação correta dessas emissões. Iniciativas voluntárias, como o OGMP2.0 (Oil & Gas Methane Partnership 2.0) criado pelas Nações Unidas (ONU), têm como meta a redução das emissões de metano, visando aprimorar a confiabilidade e transparência dos relatórios de emissão. É importante salientar que sem a capacidade de medir as emissões de GEE, corrigi-las torna-se uma tarefa difícil. Portanto, torna-se imperativo mitigar essas emissões indesejadas por meio de ações preditivas e corretivas. Para tanto, um sistema de monitoramento constante e confiável dos queimadores se torna de extrema importância e valia.

Neste cenário, está em andamento um projeto de pesquisa e desenvolvimento voltado para a criação de um sistema de sensoriamento remoto ativo, com o propósito de avaliar a presença e quantificar a concentração de metano na área adjacente a um queimador industrial. Este sistema de monitoramento, chamado FAMES (Flare And Methane Emission System), fundamenta-se na tecnologia de sensoriamento remoto e utiliza métodos de detecção de espalhamento Rayleigh-Mie e Raman para adquirir dados sobre as propriedades ópticas dos elementos emitidos por um flare, possibilitando a determinação da concentração de metano e a caracterização dos perfis de retroespalhamento e extinção de partículas (Guerrero-Rascado, 2014). O FAMES baseia-se na tecnologia de sensoriamento remoto conhecida como LIDAR, e será utilizado para medir emissões diretamente e avaliar a eficiência de queima no flare, possibilitando uma aferição rápida dos processos operacionais na linha de produção. Dada a ausência de tecnologias que ofereçam essa capacidade de processamento e diagnóstico ágil e direto, essa aplicação se torna um diferencial significativo em comparação com as tecnologias atualmente em uso.

2. Monitoramento de emissões de metano

A indústria de óleo e gás tem significativa participação nas emissões e pode ajudar na redução de emissões de GEE. O GEE mais conhecido é o dióxido de carbono, CO_2 , porém o

metano tem um potencial de aquecimento global (PAG) 28 vezes maior que a mesma massa de CO₂ em um intervalo de tempo de 100 anos, e 80 vezes em 20 anos, sendo o segundo maior contribuinte para o efeito estufa, depois do CO₂ (Jacob Freeke et al., 2023).

Uma das maiores fontes de emissão de GEE na indústria de óleo e gás são os flares. É assumido que um flare tenha uma eficiência geral de 98%, porém novas pesquisas revelam que a situação é mais complexa, com casos operando em 95% ou menos de eficiência (G. Plant et al., 2022). A eficiência de um flare é afetada por diversos fatores, como composição e fluxo dos gases, condições climáticas, velocidade do vento etc. A medição em tempo real, e em condições reais de operação, é parte chave do trabalho de estimar com precisão as emissões de um flare e de tomada de ações para a redução dessas emissões.

O surgimento de novas metas, legislações e taxações sobre a emissão de metano na indústria de óleo e gás revela a importância do desenvolvimento de novas tecnologias que meçam e quantifiquem diretamente essas emissões de GEE em tempo real, e em condições reais de operação das plantas, e que, além disso, alertem os operadores para a necessidade da rápida implementação de ações mitigatórias operacionais de redução dessas emissões.

2.1. OGMP2.0

OGMP 2.0 (Oil & Gas Methane Partnership 2.0) é um programa lançado pela ONU para reportar e mitigar as emissões de metano no setor de óleo e gás. É uma iniciativa voluntária, e muitas das empresas do setor participam do programa. OGMP 2.0 é um guia baseado em medidas para reportar de forma consistente e transparente as emissões de metano. Contabilizar as emissões de forma confiável é importante para ações de mitigação: se você não consegue medir, você não consegue corrigir. O monitoramento das emissões tem grandes benefícios para o setor de óleo e gás. Dentre eles estão:

- Monitoramento contínuo das emissões do flare possibilita maior controle de emissões e menor tempo para intervenção e tomada de medidas adequadas, reduzindo o impacto ambiental e o risco de multas;
- Possível redução com custos de manutenção e operação (paradas não programadas), dada a maior disponibilidade e precisão de informações para a programação de ações preditivas;
- Viabilização de um mapa estatístico confiável das unidades de produção quanto à eficiência da combustão e o estado dos queimadores;
- Alinhamento da empresa às diretrizes de políticas ambientais de combate ao aquecimento global e melhoria da sua competitividade no mercado;
- Melhoria da imagem da empresa frente à sustentabilidade ambiental ESG (Environmental, Social and Governance) e à opinião pública.

3. Tecnologias de monitoramento de flare

Nos últimos anos, tem havido um aumento do interesse em monitorar as emissões de flares industriais, e diversas abordagens de monitoramento têm sido estudadas, incluindo a utilização de técnicas de amostragem e simulações de diferentes condições ambientais e de processo (Macedo et al., 2020). Formas de detecção direta incluem a medição de fluxos de

plumas em ambiente de laboratório, permitindo a captação controlada de produtos complexos resultantes da combustão (M. T. Stroscher, 2000; D. J. Corbin e M. R. Johnson, 2014). Bourguignon et al. (1999) estudaram a eficiência da chama em fluxo cruzado, investigando o efeito do vento na queima através da utilização de túneis de vento em circuito fechado. Essas investigações ajudaram a esclarecer dúvidas sobre as emissões e condições de flares, mas os modelos de previsão de emissões sob uma variedade de condições operacionais ainda não se mostraram completos.

Entre os métodos combinados estão técnicas de apoio, como ferramentas matemáticas, simulação, análise de estatística multivariada e técnicas ópticas. Tais ferramentas, usadas em conjunto, mostram-se capazes de avaliar dados de sensoriamento remoto via satélite e imagens, resultando em uma medida mais consistente da eficiência de combustão (CE) do flare. Zeng et al. (2016) propuseram um novo método que utiliza câmeras hiperespectrais e multiespectrais na região do infravermelho para realizar medidas diretas e remotas da eficiência de combustão de flares industriais. Além disso, propuseram um cálculo de um índice de fumaça emitida pelos queimadores que pode ajudar a otimizar o funcionamento do flare. Castiñeira et al. (2012) conduziram testes com diferentes características de flares e condições de operação para a determinação de um modelo de previsão da eficiência de combustão utilizando técnicas de aprendizado de máquina.

Alguns estudos têm utilizado dados de instrumentos a bordo de aeronaves para estimar as emissões de CH₄ provenientes de flares industriais. Por exemplo, Zavala-Araiza et al. (2012) realizaram medidas top-down com aeronaves, estimando emissões em regiões de instalações onshore e offshore, usando dados do satélite TROPOMI como referência independente. Outros estudos, como o de Anna Karion et al. (2015), utilizaram a técnica de espectroscopia "Cavity Ring-Down Spectroscopy" (CRDS) a bordo de aeronaves para medir a concentração de CH₄ em diferentes níveis de altitude e estimar a emissão total de CH₄ por meio de balanços de massa. Outros trabalhos têm empregado formulações matemáticas que incluem balanços de massa para estimar as emissões totais de CH₄ a partir de medidas de concentração de metano, como em M. Pühl et al. (2023).

Contudo, o monitoramento direto das emissões de um flare se mostra uma tarefa muito complexa devido às condições da operação, com altas temperaturas e locais de difícil acesso para a instalação e manutenção de sensores. A realização das medidas em atmosfera aberta, sujeita a severas variações climáticas e com potencial exposição a atmosferas explosivas, com é o caso de um FPSO, dificultam ainda mais este monitoramento. Como solução, o projeto FAMES propõe, de forma inovadora, a adaptação da tecnologia LIDAR para o monitoramento direto, e de forma remota, das emissões do flare de um FPSO, sem a necessidade de alterações na planta da plataforma ou da instalação de equipamentos no flare.

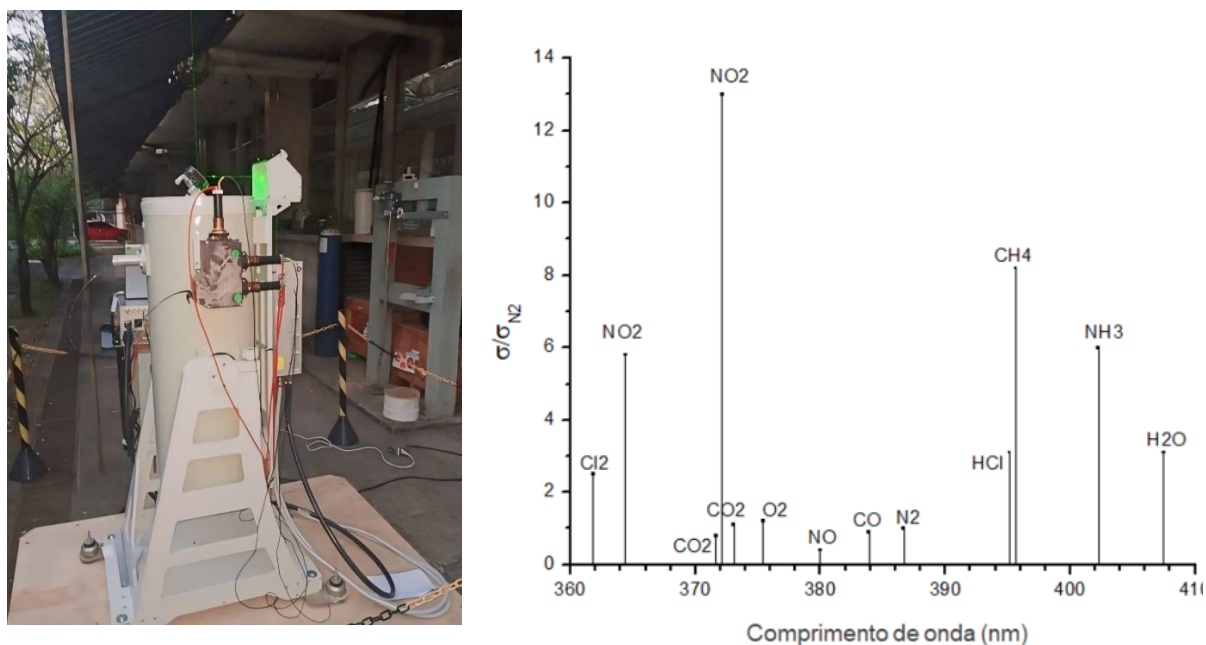
Nos últimos anos, a técnica de sensoriamento remoto LIDAR tem sido utilizada em diversas áreas de monitoramento de poluentes na atmosfera (E. Landulfo et al., 2018; H. Riris et al., 2019; Yakovlev et al., 2019). O LIDAR elástico é a forma mais tradicional dessa técnica, que utiliza um laser e um detector para medir a radiação retroespalhada por partículas e moléculas presentes na atmosfera - a técnica é conhecida também como LIDAR Rayleigh-Mie (N. Kravtsova et al., 2020). Por outro lado, o LIDAR Raman é baseado na fraca dispersão

inelástica da luz quando esta interage com as moléculas presentes na atmosfera, apresentando vantagens como a alta resolução temporal e espacial, além de obter informações à distância e em tempo real. A técnica LIDAR pode ser aplicada para o mapeamento de emissões em flares industriais em tempo real (R. F. Da Costa et al., 2011), para a caracterização e classificação de aerossóis em nuvem utilizando canal de fluorescência e outras propriedades ópticas das partículas e moléculas (I. Veselovskii et al., 2020), além da caracterização de materiais particulados provenientes de queimadas, tendo a capacidade de distinguir os sinais de nuvens cirrus na região da alta-troposfera, dos sinais referentes às partículas de aerossol (Veselovskii et al., 2022).

4. Descritivo LIDAR Raman

LIDAR é o análogo óptico do radar, utilizando pulsos de laser para a medição ao longo de uma trajetória. É utilizado um laser pulsado de alta potência e um sistema de detecção formado por um telescópio e fotodetectores altamente sensíveis. Um conjunto de filtros seleciona os comprimentos de onda captados em cada fotodetector, de acordo com os materiais a serem medidos. Por ser um sistema pulsado e com detecção do sinal que é refletido/espalhado (retroespalhado), é possível saber a distância em que se encontra o material e a sua intensidade ao longo da trajetória do feixe. A resolução espacial da resposta detectada irá depender da largura do pulso e resolução temporal do sistema de detecção.

Figura 1- Sistema LIDAR Raman para testes de medidas de metano na esquerda. Na direita, linhas de emissão Raman e seção de choque para diferentes gases para excitação em 355 nm.



Fonte: foto elaborada pelos autores. Gráfico: Macedo et al., 2020

A espectroscopia de espalhamento Raman é amplamente utilizada para identificar e medir a concentração de gases. O espalhamento Raman é proveniente do espalhamento inelástico de luz por moléculas que podem ter seus estados vibracionais e/ou rotacionais alterados pelo fóton.

Esta luz espalhada tem comprimento de onda diferente da excitação, e seu deslocamento espectral é uma característica de cada molécula, ou seja, é uma impressão digital da molécula, Figura 1. Assim, é possível identificar o tipo da molécula através do espectro do espalhamento.

A técnica LIDAR Raman combina os princípios de medição do LIDAR com a espectroscopia Raman. As duas técnicas juntas permitem medidas remotas com resolução espacial e identificação das moléculas.

Dessa forma, utilizando a técnica LIDAR Raman e sabendo-se do fluxo total de hidrocarbonetos antes da queima, é possível determinar a eficiência de combustão de um flare e a sua eficiência de remoção e destruição (Tao et al., 2024), a partir da distribuição 3D das concentrações dos gases CH₄ e CO₂ ao redor da chama do queimador. Utilizam-se comumente para tal determinação, as fórmulas (1) e (2) a seguir:

$$CE(\%) = \frac{[CO_2]}{[CO_2]+[CH_4]} \times 100 \quad (1)$$

$$DRE(\%) = \left(1 - \frac{[CH_4]_{out}}{[CH_4]_{in}}\right) \times 100 \quad (2)$$

Onde CE (Combustion Efficiency) é a eficiência de combustão e DRE (Destruction and Removal Efficiency) representa a porcentagem de poluentes destruídos ou removidos da emissão final do flare.

5. FAMES

O projeto FAMES (Flare And Methane Emission System) combina duas ideias aplicadas anteriormente pela Universidade de São Paulo (USP), em parceria com o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), como um sistema piloto para: (i) detecção remota de partículas na região de um flare; e (ii) a obtenção do perfil de CH₄ na atmosfera para avaliação de emissões fugitivas com um sistema LIDAR de espalhamento Raman. Tal projeto foi uma prova de conceito e permitiu estabelecer a robustez da técnica proposta. O conceito do projeto FAMES envolve a construção de um sistema de detecção híbrido para medição de material particulado, CH₄ e CO₂ para avaliar a eficiência de queima de um flare. Este sistema está sendo projetado para operação em ambiente FPSO, e será dotado de um sistema de aquisição, processamento e transmissão de dados online, tudo em um recurso compacto e robusto. Os testes conceituais realizados inicialmente demonstraram que a técnica LIDAR Raman empregada pelo sistema FAMES possibilita a obtenção de resultados que ajudam a diagnosticar a qualidade de detecção do próprio sistema e de seus dados de medidas, permitindo assim obter-se parâmetros de correção, e as aplicações pertinentes, para análise dos dados e monitoramento, com menor incerteza, do material particulado e dos gases de efeito estufa emitidos por flares. Com tecnologia desenvolvida no Brasil, o sistema atualmente se encontra entre os TRL's 3 e 4 (escala ISO 16290:2013 – Technology Readiness Levels, variando de 1 a 9) e pretende atingir o TRL 6 ao ser instalado e testado em um FPSO para o monitoramento das emissões do seu flare.

Em 2020, através do projeto “Estudos da aplicação do método de sensoriamento remoto com laser (LIDAR) para medição de poluentes atmosféricos”, foi desenvolvido um sistema LIDAR que usava a técnica de detecção de sinal Raman para obter o perfil de retroespalhamento

de material particulado e das moléculas de N_2 , CH_4 e o sinal de fluorescência com 3 canais de medidas, i.e., 355 nm, 353 nm, 396 nm e em alternância com o canal de fluorescência (460 nm). Os resultados gerados nesse projeto estão apresentados em Landulfo et al., 2018.

Com os resultados preliminares conseguidos, identificou-se a necessidade de desenvolvimento de novas soluções para a correção de problemas como a contaminação de sinal entre os canais e a melhoria do sinal de fluorescência. O sistema FAMES é um protótipo inédito para prova de conceito em campo que tem por objetivo solucionar essa interferência e melhorar a qualidade do sinal, viabilizando assim a instalação do sistema em um ambiente hostil de plataforma offshore do tipo FPSO. Dentre as melhorias em desenvolvimento com o protótipo do projeto FAMES estão:

- Aumento da velocidade de aquisição;
- Novos canais de detecção para separação do sinal Raman e fluorescência;
- Sistema para otimização do sinal de medição e redução de ruído;
- Adequação do sistema para operação em ambiente hostil, com invólucro selado e controle de temperatura e umidade;
- Posicionamento motorizado;
- Controle remoto.

A Figura 2 apresenta o projeto do “canhão óptico” do protótipo do projeto FAMES, onde todo o sistema óptico, formado pelo laser, telescópio e detectores, está instalado dentro de um invólucro de proteção para operação em áreas com ambientes agressivos e explosivos, como em instalações marítimas do tipo FPSO. Para isso, ele conta com um sistema de pressurização por ar comprimido instrumental, alarmes de proteção e controle de temperatura e umidade. Todo o sistema é montado sobre um estágio de movimentação azimutal e zenital. O invólucro e o estágio de movimentação são projetados para operação em áreas explosivas ATEX Zona 2. Um considerável esforço de engenharia foi necessário a fim de conciliar os requisitos de áreas explosivas com os requisitos do sistema óptico e de detecção. O sistema contará com controle remoto através de internet para operação, otimização e manutenção. Todos os dados obtidos serão armazenados e processados localmente, e posteriormente enviados para verificação e análise durante o desenvolvimento. Um painel apresentará os resultados de forma intuitiva e prática no local de instalação para o operador do sistema.

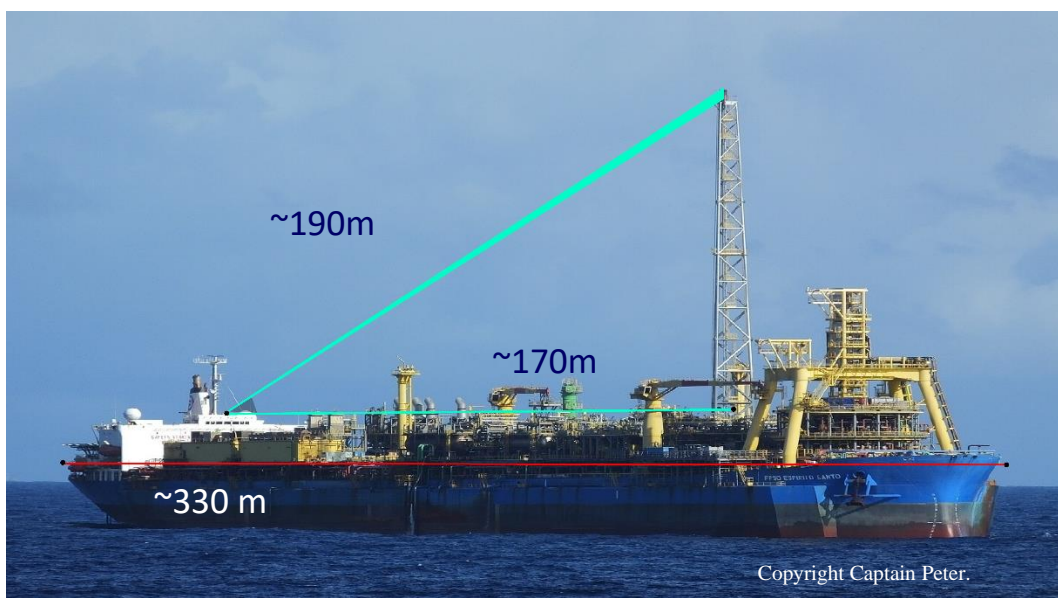
O FAMES necessita de visada direta para a chama do flare para possibilitar a aplicação da técnica. Por isso, em um FPSO, um dos lugares mais adequados para a sua instalação é acima do casario, próximo às antenas, conforme mostrado no exemplo da Figura 3.

Figura 2 - Projeto FAMES: invólucro de proteção para zona explosiva e área de instalação



Fonte: elaborado pelos autores

Figura 3 – Exemplo de ponto de instalação no casario e visada para o flare em um FPSO



Fonte: adaptado pelos autores

6. Medidas preliminares de CH₄

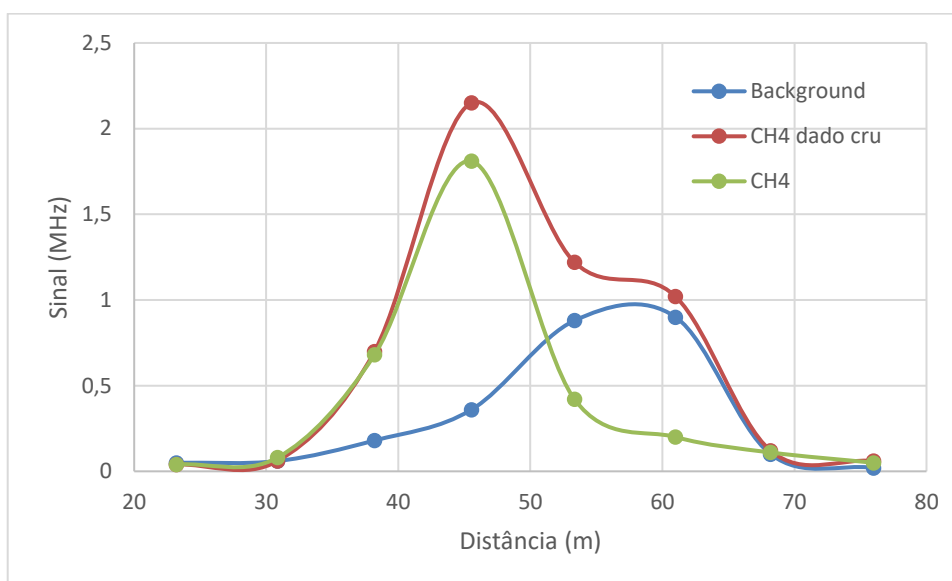
Medidas preliminares foram realizadas com o objetivo de confirmar o funcionamento da técnica e identificar o limite de detecção do CH₄ na atmosfera. Primeiramente foram realizadas medições em um ambiente confinado com um pequeno vazamento controlado de CH₄. Posteriormente foram realizadas medidas externas, da atmosfera (Macedo, 2020).

6.1. Medida confinada

A medida confinada foi realizada em um ambiente de aproximadamente 3x3 m, onde um cilindro de CH₄ era descarregado em taxa constante. O ponto de emissão estava a

aproximadamente 45 m do equipamento LIDAR. Um cromatógrafo de gás foi utilizado ao lado do cilindro de gás, mas não detectou a presença de CH_4 , indicando que a concentração estava muito abaixo do limite de detecção do aparelho. O sistema LIDAR, no entanto, foi capaz de identificar um pico de concentração de CH_4 na distância de 45 m (ver Figura 4), onde estava localizado o cilindro. Os valores para distâncias menores que 20 m não são válidos pois estão fora do limite de detecção do sistema (Macedo et al., 2020).

Figura 4 - Sinal de espalhamento Raman para CH_4 em espaço confinado

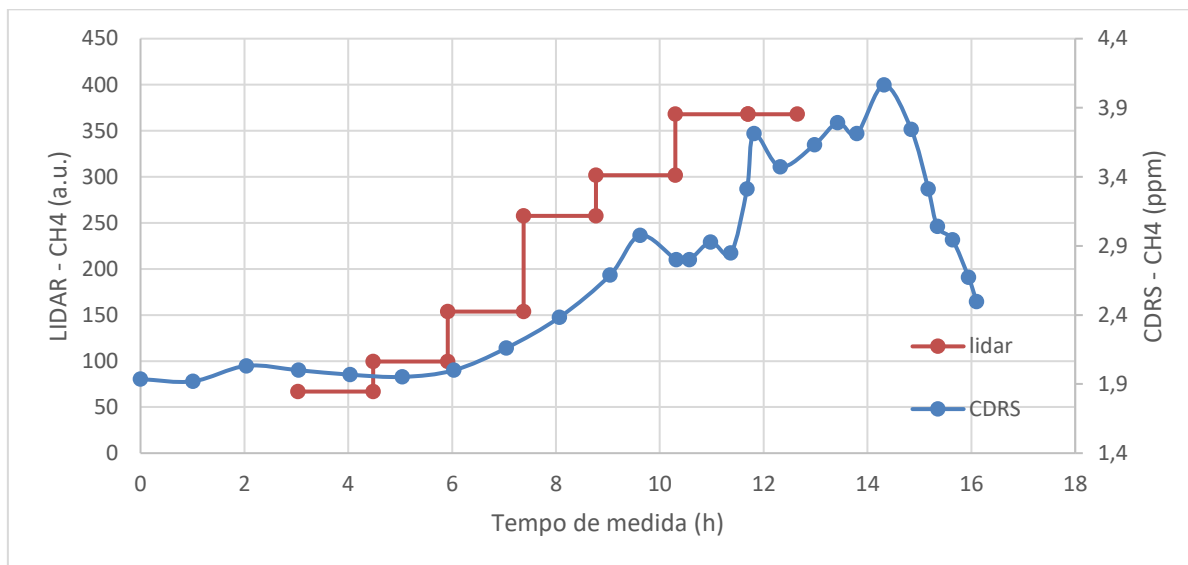


Fonte: Macedo et al. (2020)

6.2. Medida atmosférica

As medições atmosféricas foram realizadas no campus da Universidade de São Paulo (USP), nas instalações do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), no período noturno, e foram acompanhadas de um analisador de gases CDRS para referência. As medidas foram tomadas com uma inclinação de 54° , e limite de detecção de 2-3 ppm, com início das medições às 19:00 horas do dia 03 de abril de 2019. Os resultados são apresentados da Figura 5. A medição detectou um evento natural que quase dobrou o sinal de base: o evento foi um incêndio na floresta do pico do Jaraguá, em São Paulo, localizado a aproximadamente 10 km do ponto de aquisição (Macedo et al., 2020). Na Figura 5 é apresentada a medida LIDAR na menor altura disponível (67,5 m) junto com a medida de referência do CDRS (altura = 0 m). É possível observar que houve uma correlação entre as duas medidas, mesmo elas sendo realizadas em alturas diferentes por limitações do experimento e dos equipamentos. A concentração de CH_4 medida pelo instrumento de referência CDRS passou de 2 ppm para quase 3.5 ppm, enquanto o sinal LIDAR passou de ~66 a.u. para ~370 a.u. Para eventos na indústria de óleo e gás, são esperadas concentrações muito acima desses valores, da ordem de milhares de ppm. A técnica, portanto, tem sensibilidade suficiente para as condições esperadas na indústria de óleo e gás.

Figura 5 - Medida de referência CDRS para altura = 0 m e LIDAR para altura = 67,5 m.



Fonte: Macedo et al., (2020)

7. Considerações finais

A medição em tempo real das emissões de um flare é importante para entender e monitorar a eficiência de combustão desse flare. O projeto FAMES propõe um protótipo, para uso científico e comercial, para a caracterização, otimização e o monitoramento contínuo de emissões em flares, além do cálculo da eficácia de queima desse flare. Ao contrário de outras técnicas, que inferem as emissões a partir de medidas indiretas e modelos de laboratórios extrapolados para indústria, o protótipo do projeto FAMES realizará as medidas de forma direta e em tempo real. Um diferencial do projeto é a disponibilidade do sistema para realizar medidas de forma constante, permitindo o monitoramento do flare a qualquer momento, ao contrário de medidas pontuais feitas uma ou duas vezes por dia por satélites ou através de medidores portáteis, por exemplo. Outra vantagem do sistema FAMES é a sua capacidade de fazer a detecção dos gases ao longo de toda a trajetória da luz, e não somente no ponto de interesse, ou seja, plumas e vapores na trajetória do feixe até o flare, poderão ser caracterizados e não interferem na medida final.

Como os resultados obtidos até o momento estão de acordo com as expectativas, novas campanhas de medição com o novo sistema FAMES estão sendo planejadas em instalações de produção, tanto onshore quanto offshore, para dar continuidade à maturação dessa tecnologia.

8. Agradecimentos

O projeto FAMES conta com o apoio da Shell Brasil Petróleo Ltda. e utiliza recursos da cláusula de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação dos contratos de concessão da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

Agradecimentos aos times da USP e do IPEN pelo suporte e estrutura para o desenvolvimento do projeto.

Agradecimentos também à toda equipe de engenharia da Ouronova, principalmente a Diego Magno Mendes Rodrigues e Leonardo Campos.

Referências

- Bloomberg. (2019). <https://www.bloomberg.com/news/articles/2019-09-25/gas-flare-hiccups-arebiggest-methane-offender-satellites-show>
- Bourguignon, E., Johnson, R., & Kostiuk, L. W. (1999). The use of a closed-loop wind tunnel for measuring the combustion efficiency of flames in a cross flow. *Combust. Flame*, 119(3), 319-334.
- Castiñeira, D., Rawlings, B. C., & Edgar, T. F. (2012). Multivariate image analysis (MIA) for industrial flare combustion control. *Ind. Eng. Chem.*, 51(39), 12642-12652.
- Corbin, D. J., & Johnson, M. R. (2014). Detailed expressions and methodologies for measuring flare combustion efficiency, species emission rates, and associated uncertainties. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 53(49), 19359-19369.
- Facundes da Costa, R., Steffens, J., Landulfo, E., Guardani, R., Nakaema, W., Moreira, P., Lopes, F., & Ferrini, P. (2011). Real-time mapping of an industrial flare using LIDAR. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 8182(09), 1. <https://doi.org/10.1117/12.897907>
- Guerrero-Rascado, J. L., Costa, R. F., Bedoya, A. E., Guardani, R., Alados-Arboledas, L., Bastidas, A. E., & Landulfo, E. (2014). Multispectral elastic scanning lidar for industrial flare research: characterizing the electronic subsystem and application. *Opt Express*, 22(25), 31063-31077.
- Karion, A. (2015). Aircraft-Based Estimate of Total Methane Emissions from the Barnett Shale Region. *Environ. Sci. Technol*, 49(13), 8124-8131.
- Kleinberg, R. (2021). Methane Emission Controls: Toward More Effective Regulation. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3860311>
- Landulfo, E., Guardani, R., Macedo, F.M., Costa, R. F., Arleque, A. G., Korenskii, M., & Veselovskii, I. (2018). A novel lidar system for CH₄ and VOC's detection of fugitive emissions and environmental monitoring. 10791, 107910B.
- Landulfo, E., Guardani, R., Macedo, F. M., Costa, R. F., Alerques, A. G., Korenskii, M., & Veselovskii, I. (2018). Monitoring the environmental impact of aerosol loading and dispersion from distinct industrial sources in Cubatao, Brazil, using a scanning lidar. 10791, 107910B.
- Landulfo, E., Guardani, R., Macedo, F. M., Costa, R. F., Arleques, A. G., Korenskii, M., & Veselovskii, I. (2018). A novel lidar system for CH₄ and VOC's detection of fugitive emissions and environmental monitoring. 107910B, 1.
- Macedo, F. M. (2020). Implementação de um sistema lidar Raman para detecção de metano em baixa troposfera, na região de São Pualo [Ph.D. Thesis, Universidade de São Paulo]. <https://repositorio.usp.br/item/003131538>
- Macedo, F., Correa, T., Araújo, E. C., Andrade, I. S., Guardani, R., Veselovskii, I., & Landulfo, E. (2020). Methane detection in the lower troposphere related to the burning of biomass and leakage in a petrochemical pole, using Raman lidar technique. *Holos Environment*, 21(1), 138-152. <https://doi.org/10.14295/holos.v21i1.12425>
- Pühl, M. (2024). Aircraft-based mass balance estimate of methane emissions from offshore gas facilities in the southern North Sea. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(2), 1005--1024. <https://doi.org/10.5194/acp-24-1005-2024>
- Pei, L., Xu, Z., Kang, Y., Cao, Y., & Liu, B. (2020). Air pollution lidar echo signals preprocessing and classification. 2020, 1. <https://doi.org/10.23919/CCC50068.2020.9189207>
- Plant, G., Kort, E. A., Brandt, A. R., Chen, Y, Fordice, G., & Negron, A. M. G. (2022). Inefficient and unlit natural gas flares both emit large quantities of methane. *Science*, 377(6614), 1566-1571. <https://doi.org/10.1126/science.abq0385>
- Riris, H., Numata, K., Wu, S., & Fahey, M. (2019). The challenges of measuring methane from space with a LIDAR. *CEAS Space Journal*, 11(9), 1. <https://doi.org/10.1007/s12567-019-00274-8>
- Strosher, M. T. (2000). Characterization of emissions from diffusion flare systems. *J Air Waste Manag Assoc*, 50(10), 1723-1733.
- Tao, C., Jon, C., Sui, L., Wang, A., Bottino, G., Newman, D., & Lowe, J. (2024). Validation of a New Method for Continuous Flare Combustion Efficiency Monitoring. *Atmosphere*, 15(3), 356. <https://doi.org/10.3390/atmos15030356>
- Veselovskii, I. (2020). Combined use of Mie-Raman and fluorescence lidar observations for improving aerosol characterization: Feasibility experiment. *Atmos. Meas. Tech*, 13(22), 6691-6701.
- Veselovskii, I., Hu Q., Ansmann, A., Goloub, P, Podvin, T., & Korenskiy, M. (2022). Fluorescence lidar observations of wildfire smoke inside cirrus: a contribution to smoke-cirrus interaction research. *Atmos. Chem. Phys*, 22(8), 5209-5221.
- Weitkamp, C. (2005). Lidar, Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere. Lidar, Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere, Edited by Claus Weitkamp. Berlin: Springer, 2005., 102(1), 1. <https://doi.org/10.1007/b106786>

Yakovlev, S., Sadovnikov, S., Kharchenko, O., & Kravtsova, N. (2020). Remote sensing of atmospheric methane with IR OPO lidar system. *Atmosphere (Basel)*, 11(1), 1-13.

Yakovlev, S., Sadovnikov, S., Kharchenko, O., & Kravtsova, N. (2020). Remote Sensing of Atmospheric Methane with IR OPO Lidar System. *Atmosphere*, 11(1), 70. <https://doi.org/10.3390/atmos11010070>

Zavala-Araiza, D. (2021). A tale of two regions: Methane emissions from oil and gas production in offshore/onshore Mexico. *Environ. Res. Lett.*, 16(2), 1.

Zeng, Y. (2016). Validation of a new method for measuring and continuously monitoring the efficiency of industrial flares. *J. of the Air & Waste Management Association*, 66(1), 76-96.



Access all Papers:

biblioteca.ibp.org.br

