33º CONGRESSO DA ABES
Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental
FITABES 2025
Feira Internacional de Tecnologias de Saneamento Ambiental

137 - ANÁLISE DE IMPACTOS E EMISSÕES DE GASES E COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS DE CHAMINÉS DE FORNOS DE CARBETO DE SILÍCIO POR MEIO DA CROMATOGRAFIA GASOSA

Danilo Barbosa Ferreira[(1)]
Estudante de Engenharia Ambiental (UFMG) e aluno pesquisador.
Daniel Aparecido da Silva Rodrigues[(2)]
Doutor em Química e pesquisador (pós-doutorado).
Thiago de Alencar Neves[(3)]
Químico (2008) e Mestre em Engenharia de Edificações e Ambiental (2011) pela Universidade Federal de Mato Grosso. Doutor em Química Analítica pela Universidade Estadual de Campinas (2018). Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA- UFMG) e do programa de pós graduação em saneamento, ambiente e recursos hídricos (SMARH-UFMG).
Cláudio Leite de Souza[(4)]
Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Professor Associado do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Endereço[(1)]**:** DESA - Escola de Engenharia, Av. Presidente Antônio Carlos, 6627, Pampulha - Belo Horizonte - Minas Gerais - 31270-901 - Brasil - Tel: +55 (31) 99820-2144 e-mail: danilobarbosaferreira00@gmail.com e thiago@desa.ufmg.br

RESUMO

O aumento na demanda por avaliações ambientais incentiva os estudos relativos às emissões atmosféricas dos processos industriais, como o caso dos fornos de produção de carbeto de silício (SiC), uma técnica de produção alternativa para a obtenção do ferro gusa. Essa metodologia de produção é relativamente nova, sendo assim, mais estudos são necessários. Este trabalho objetiva quantificar gases e compostos orgânicos voláteis (VOCs, *volatile organic compounds*) presentes nos incineradores dos fornos durante a queima. As análises foram realizadas utilizando técnicas de cromatografia gasosa com detectores de condutividade térmica (TCD, *thermal conductivity detector*), ionização de chamas (FID, *flame ionization detector*) e espectrômetro de massas (MS, *mass spectrometry*). Foram analisados os gases H_2, N_2, O_2, CH_4, CO, CO_2 e H_2S, além dos VOCs BTEX, HPAs, cetonas e terpenoides em diversas amostras. As amostras foram coletadas utilizando-sepelos impingers e sacos Tedlar acetato. Os resultados obtidos mostram uma variabilidade na concentração dos gases analisados, sendo notado níveis mais elevados de CO e do metano. A metodologia adotada no presente estudo foi eficaz na caracterização da emissão de gases. Além disso, foi possível obter um diagnóstico a partir dos valores encontrados. Esses resultados auxiliaram na construção do mapeamento ambiental e melhores práticas para controle de poluentes. Assim, destaca-se a importância do monitoramento contínuo e a potencialidade de tecnologia analítica para proporcionar práticas industriais mais sustentáveis e seguras.

PALAVRAS-CHAVE: Cromatografia gasosa, compostos orgânicos voláteis, avaliação de gases, fornos de Carbeto de Silício.

INTRODUÇÃO

O estudo de emissões atmosféricas vem ganhando cada vez mais notoriedade no âmbito de avaliações de impactos ambientais. Nesse cenário, as emissões provenientes de fornos industriais, como os de carbeto de silício (SiC), são essenciais para a compreensão e correlação junto aos estudos de emissões atmosféricas, sendo uma das vias mais vinculadas a esse tipo de segmento, para a proposição de soluções tecnológicas que promovam maior eficiência e sustentabilidade.

Diante dessa problemática, os resultados de algumas projeções mostram que, mantendo o mesmo nível de poluição, ao utilizar valores observados em 2011, haverá um total de mais de 246 mil óbitos por todas as causas entre 2012 e 2030, cerca de 953 mil internações hospitalares públicas e um gasto público estimado em internações de mais de R$ 1,6 bilhão (RODRIGUES, 2015).

As restrições quanto à emissão de poluentes atmosféricos impõem a utilização de novos sistemas de controle ambiental, principalmente em processos baseados na queima de combustíveis fósseis, como o carvão e derivados de petróleo, e alternativamente têm-se o Carbeto de Silício como combustível dos fornos na geração do ferro-gusa. Nesse contexto, a caracterização das emissões a partir da queima de combustíveis como carvão e coque já são amplamente conhecidas e os gases gerados são reutilizados em técnicas de coprocessamento. Porém, existem poucos estudos relacionados ao SiC na literatura, o combustível alternativo para a geração do ferro gusa (CAVALCANTI, 2012).

O SiC é um material cerâmico estruturalmente reconhecido por suas propriedades exclusivas como extrema dureza e resistência à altas temperaturas, essas características o tornam desejado para diversas aplicações, aumentando a demanda e, consequentemente a necessidade de estudo de impactos (SANTOS, 2017). No processo produtivo desses fornos, existem compostos que precisam de um elevado nível de controle, como CO, NOx, dentre outros, por riscos ao meio ambiente, saúde e segurança ocupacional.

As primeiras estratégias da prevenção de poluição atmosférica enfatizavam o controle de material particulado. Somente a partir da década de 1970, começou a ser considerado o controle de gases, como SO_x e NO_x, e vapores diversos, tais como: mercúrio, dioxinas/furanos, bifenilpoliclorados, hexaclorobenzenos, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e monocíclicos (CAVALCANTI, 2012).

Em geral, os fornos utilizados para usinas siderúrgicas enfrentam desafios relacionados às emissões atmosféricas; é especialmente o caso de gases e resíduos liberados durante a operação junto às Resoluções que regulamentam os níveis de concentração dessas emissões, CONAMA 491 de 2018 e COPAM 187/2013. A cromatografia gasosa acoplada ao espectrômetro de massas e ao detector de condutividade térmica é utilizada na identificação e quantificação de compostos orgânicos voláteis e gases de efeito estufa (ABRUZZI, 2019).

Além disso, o monitoramento de partículas finas geradas durante o funcionamento dos fornos é essencial para garantir a eficiência operacional e a conformidade com as regulações ambientais. O SiC, por sua natureza abrasiva, apresenta desafios operacionais, na qual a umidade e a classificação podem gerar partículas ultrafinas que aquecem para o aumento das emissões e para problemas de saúde ocupacional. Assim, compreender a dinâmica dessas emissões e propor soluções tecnológicas é essencial para minimizar os impactos ocasionados (MACHADO et al., 2011).

A análise dos processos produtivos e das emissões associadas aos fornos de SiC não se limita apenas ao contexto ambiental, mas também na busca por otimização de processos industriais, sendo possível impulsionar a redução do consumo de energia e dos custos operacionais, o que também dialoga com a sustentabilidade no cenário produtivo (SANTOS, 2017).

O estado de Minas Gerais possui diversas fontes potenciais de emissão de poluentes atmosféricos, como as indústrias metalúrgicas, da mineração, de produção de cimento e cal, dentre outras, além das emissões associadas ao elevado crescimento da frota veicular. Aliadas à expansão da malha urbana, essas fontes de emissão afetam a qualidade do ar, o meio ambiente e ainda podem dialogar com seus efeitos adversos à saúde humana (SANTOS, 2018).

Assim, a integração de tecnologias avançadas de análise contaminantes nas emissões atmosféricas, como a cromatografia gasosa, se apresenta como uma estratégia fundamental para caracterizar e diagnosticar a geração de gases, avaliar seus impactos para a saúde humana e o meio ambiente. A partir do diagnóstico, avaliar alternativas de controle, técnicas de coprocessamento e maiores eficiências na produção e, com isso, promover a sustentabilidade na produção de carbeto de silício, especialmente em regiões de alta importância produtiva, como Minas Gerais.

OBJETIVOS

O objetivo principal do presente trabalho é a quantificação de gases e compostos orgânicos voláteis emitidos de chaminés de fornos de SiC pela queima de coque no processo de formação do ferro-gusa. Com isso, nortear **Análises de Emissões Atmosféricas e Estudos de Impactos Ambientais**. Entre os gases a serem avaliados foram escolhidos de forma estratégica de acordo com a composição atmosférica natural e os respectivos poluentes que na literatura estão mais associados ao processo produtivo de interesse e à qualidade do ar, sendo eles: **H_2, O_2, N_2, CO, CO_2, CH_4** e **H_2S** e os compostos orgânicos voláteis são: BTEX, HPA, hidrocarbonetos de baixo ponto de ebulição, cetonas e alguns terpenoides.

O estudo visa aplicar a metodologia analítica desenvolvida em cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS), em modo *Full SCAN*, para identificação de VOC's emitidos de altos-fornos de carbeto de silício na queima redutora de coque. As amostras foram coletadas em hexano, utilizando frascos do tipo *impingers* para coleta das amostras. Para quantificação dos gases, foi utilizado um cromatógrafo gasoso acoplado a um detector de condutividade térmica (GC-TCD) e ionização em chamas (FID). Dessa forma, é possível estabelecer um mapeamento de impactos e emissões no processo industrial, auxiliando na tomada de decisão e medidas mitigatórias.

METODOLOGIA UTILIZADA

As amostras para análises de gases inertes, H_2, CO, CH_4 e H_2S, foram coletadas utilizando sistema isocinético e armazenadas em sacos do tipo *Tedlar Bag*. As amostras foram obtidas em uma indústria siderúrgica localizada na região metropolitana de Belo Horizonte. As análises instrumentais foram analisadas no mesmo dia da coleta, para minimizar os efeitos de difusão e troca gasosa com a atmosférica pelos sacos de amostragem.

Para obter as concentrações de H_2, O_2, N_2, CO, CO_2, CH_4 foi utilizado um cromatógrafo gasoso modelo GC-2014 (Shimadzu) acoplado sequencialmente a um detector de condutividade térmica (TCD) e detector de ionização por chama (FID). Para separação dos gases, foi utilizada uma coluna capilar carboxen 1010 (Supelco), com 30 metros de comprimento, 0,53 um de diâmetro e 10 um de espessura de filme. Para quantificação de H_2S nas amostras, foi utilizado o equipamento Jerome 631-X (Ametek), com faixa analítica entre 3 ppb a 10 ppm. As demais informações instrumentais podem ser observadas na Tabela 1.

Visando a determinação dos VOCs, foi utilizado um cromatógrafo gasoso Thermo Scientific modelo GC TRACE 1300 acoplado ao espectrômetro de massas modelo MS ISQ 7000, com amostrador automático modelo AI 1310. Para separação dos VOCs, foi utilizada uma coluna cromatográfica DB5-MS, com 30 metros de comprimento, 0,25 um de diâmetro e 0,25 um de espessura de filme.

Tabela 1: Configurações e condições operacionais aplicadas aos equipamentos.

Condições cromatográficas e dos detectores TCD e FID (H2, N2, O2, CO, CO2 e CH4)		Condicionamento para determinação dos VOC's	
Temperatura do Forno	35°C (13 min) – 185°C (15 min, 150°C/min)	Rampa de Aquecimento	45 ºC por 1 min, 5 ºC min-1 por 3 min (até 60 ºC) e 8 ºC min-1 até 250 ºC
Temperatura do injetor (*split*)	100°C	Temperatura do injetor	250ºC
Rampa de Aquecimento	50°C/min	Fluxo do *split*	15 (mL min-1)
Pressão na Coluna	12,5 kPa	Modo de operação	Split (1:30)
Gás de arraste	He	Gás de arraste	He
Temperatura TCD	210°C	Temperatura da linha de transferência	280 (ºC)
Temperatura FID	210°C	Temperatura da fonte de íons	280 (ºC)
Corrente TCD	150 mA	Energia de ionização	70 eV

Para determinação da concentração dos gases presentes nas amostras, foram utilizados gases de alto grau de pureza (White Martins, 99,999%). Misturas gasosas com diferentes níveis de concentração foram preparadas para obtenção de modelos de calibração analítica a fim de determinar a composição e concentração dos compostos presentes nas amostras. Para determinação dos VOCs, foi utilizada uma mistura padrão de referência contendo 48 compostos (Supelco), em destaque, HPAs, BTEX, Cetonas e hidrocarbonetos alifáticos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo permitiu nortear, avaliar concentrações gasosas junto à análise de suas eventuais classificações e impactos na análise de risco à saúde humana e ao meio ambiente de cada um dos compostos que foram mapeados ao longo das medições de amostras e, com isso, auxiliar na tomada de decisão na condução de processos e eventuais medidas de controle e mitigação.

Os resultados obtidos foram expressos em razão do percentual para os gases **H_2, O_2, N_2, CO, CO_2, CH_4**. Na Figura 1 são apresentados os resultados em *BoxSplot* referente as 14 amostras analisadas por GC-FID e GC-TCD.

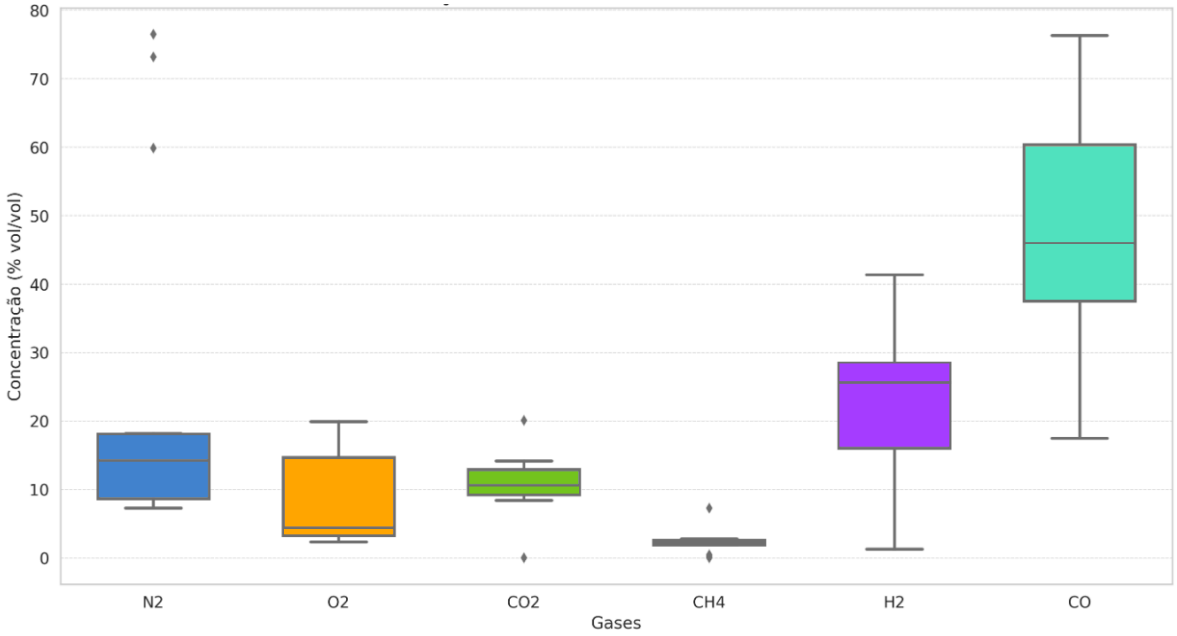

Figura 1: BoxPlot de resultados das amostras para os gases H_2, O_2, N_2, CO, CO_2, CH_4.

Os valores obtidos das amostras oscilaram entre os gases, na qual a faixa de concentração de N_2 foi de 7.3% e 76.5% com a média de 24.54%, o O_2 ficou 5.74% de média, abaixo do limite de detecção experimental para misturas do sensor (0,1%) e chegou até 19,9%, CO_2 7.46% de média, mínimo também foi abaixo do limite e o máximo 20,1%. Para CH_4, H_2 e CO, obtivemos médias de 2.42, 20.5 e 38.31%, também foram obtidos resultados abaixo do limite de detecção desses gases e suas máximas foram de, respectivamente, 7,3%, 41,4% e 76,3% conforme apresentado no gráfico.

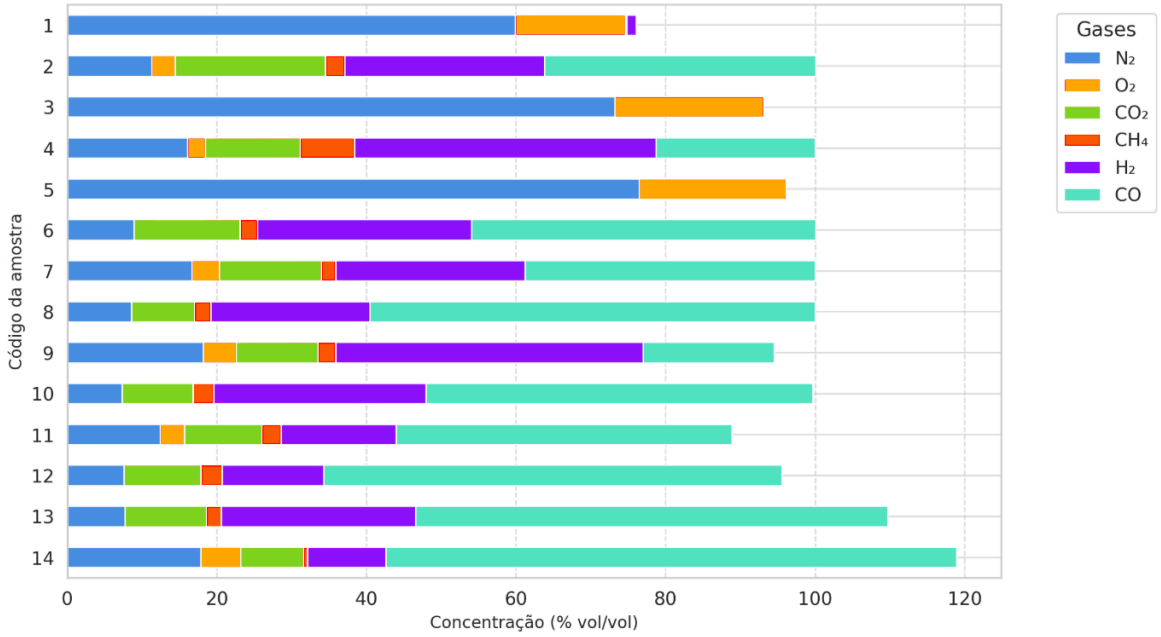

Figura 2: Resultados percentuais da análise das amostras para os gases H_2, O_2, N_2, CO, CO_2, CH_4.

O CO, CO_2, CH_4 e o H_2 são substâncias são de maior interesse se tratando de fontes de emissão com um sinal de alerta quando comparadas aos valores naturais e previstos de concentração de gases na atmosfera, devido ao seu elevado potencial de prejudicialidade na avaliação de risco à saúde humana e ao meio ambiente. Dentre os gases analisados, o nitrogênio, por exemplo, obteve uma média de 24.54% de concentração com máximos e mínimos de 76.5 e 7.3%. O N_2 possui elevados valores naturais na atmosfera, em torno de 78% em geral, não é considerado um poluente e, por isso, não é estabelecido limite de emissão perante a Resolução CONAMA 491 de 2018 e COPAM 187/2013, o mesmo é válido para o O_2. Porém, os valores desse gás serão de grande relevância para maximizar a formação de poluentes no processo produtivo dos fornos, sendo assim, quanto menor a sua concentração, melhor a eficiência e funcionamento do sistema, detalhe que é previsto nas normativas COPAM 187, que tange as emissões de fontes fixas, com até 7% de concentração para melhor eficiência do processo, valor que foi respeitado na média das amostras de O_2 (5.74%).

Já metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2), apesar de não possuírem menções nas resoluções mencionadas, são pertinentes no âmbito de mudanças climáticas por serem gases capazes de reter ondas longas de radiação solar e assim, contribuem diretamente para intensificação do efeito estufa. O CO_2 responde por 77% do total de emissões de gases de efeito estufa, sendo o setor de transporte responsável por 23% do total de emissões relacionadas a combustíveis fósseis e o CH_4, 23 vezes maior no potencial de impacto (ABRUZZI, 2019).

O monóxido de carbono (CO), por outro lado , é um poluente e estabelece diversos efeitos nocivos em concentrações elevadas, sendo estabelecido com limites de 9 ppm com intervalo de 8 horas de medição em fontes de emissão, sendo um composto que, assim como o H_2, tem potencial explosivo. Além disso, a emissão de gases de fontes fixas contribui para a formação de ozônio (O_3), sendo gerado por interações entre os gases e a atmosfera, sendo considerado um poluente secundário previsto em Norma, CONAMA 491 e COPAM 187.

Sob o aspecto fisiológico, o monóxido de carbono é considerado um dos mais importantes poluentes primários (JUANEZ, 2019) em virtude dos efeitos prejudiciais que possui para o meio ambiente e saúde humana. Nas amostras analisadas o CO ultrapassou a 60% da concentração total de gases.

Além de interferir na formação de ozônio troposférico, o CO também possui impactos significativos na saúde humana. Em pequenas quantidades, o CO no corpo humano pode funcionar como um mensageiro químico no cérebro e como “ativador” da enzima guanilil ciclase. Entretanto, em grandes quantidades (800 ppm) o CO é tóxico. Cerca de 80 a 90 % do CO absorvido liga-se reversivelmente com o átomo de ferro da fração heme da hemoglobina (Hb), presente no eritrócito, formando a carboxihemoglobina (COHb) e, consequentemente, traz malefícios à saúde humana (PERES, 2005).

A partir dos resultados, pode-se deduzir que, assim como no processamento do coque, onde a queima de carvão ativado pela entrada de ar quente fornece calor e CO, a reação que não obtêm parte em CO_2 devido a

altas temperaturas (1500°C) gera excesso de carbono, evidenciado pelos valores observados. O excesso de CO torna o gás do alto forno combustível. O gás do alto-forno limpo de pó se usa como combustível nos recuperadores e nas caldeiras a vapor, o que leva ao coprocessamento e recirculação em processo, tendo um grande poder calorífico, aproximadamente de 1000 cal/m³ (ROMEIRO, 1997).

O potencial energético de uma substância segue a premissa de quanto maior a quantidade de energia liberada por um combustível pela mesma massa, mais eficiente ele é considerado, pois oferece mais energia para ser convertida em energia mecânica. Nesse contexto, o calor liberado pela combustão do hidrogênio por unidade de massa é maior que o de qualquer outro combustível (SILVA, 2016). Diante dos resultados obtidos, percebe-se um percentual significativo do H_2, com valores médios de aproximadamente 20%, o que melhora ainda mais o poder calorífico do gás analisado.

Ao todo foram analisadas 23 compostos de VOC's, dispostos na Tabela 2, porém, alguns desses compostos obtiveram resultados abaixo dos limites experimentais do aparelho em todas as amostras, por isso, foram retirados da tabela de resultados finais (Tabelas 3 e 4).

Tabela 2: Listagem dos VOC's analisados.

Analitos	ID	Analitos	ID	Analitos	ID	Analitos	ID
Tricloroetileno	15	Etilbenzeno	24	3-etiltolueno	31	1,4 diclorobenzeno	40
Bromodiclorometano	17	m + p xileno	25	1, 3, 5 trimetilbenzeno	33	Naftaleno	49
4-metil-2-pentanona	18	o-xileno	27	β-pireno	34	Enxofre amarelo	50
Tolueno	20	Estireno	28	2 etil tolueno	35	2-metilnaftaleno	51
Tetracloroetileno	21	α-pineno	29	1, 2, 4 trimetilbenzeno	36	benzonitrila	52
Dibromoclorometano	22	n-decano	30	R (+) limoneno	37		

Já os resultados obtidos para quantificação de H_2S foram realizados separadamente e tiveram uma média de 319811 ppm, com oscilações de mínimas abaixo do limite de sensibilidade e máxima de 36715 ppm.

As concentrações resultantes dos compostos analisados são apresentadas nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3: Identificação e análise semiquantitativa de VOC's (ppm) nas amostras enumeradas de 1 a 7.

Amostras	Concentração (ppm)							
Analitos	**ID**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Tolueno	20	> 5	> 5	> 5	> 5	> 5	> 5	> 5
m + p xileno	25	> 1 e < 5	> 1 e < 5	> 1 e < 5	> 1 e < 5	> 1 e < 5	> 1 e < 5	> 1 e < 5
n-decano	30	> 1 e < 5	< LOD	> 1 e < 5	< LOD	> 1 e < 5	< LOD	> 1 e < 5
3-etiltolueno	31	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD

Legenda: LOD = Limite de detecção experimental

Tabela 4: Identificação e análise semiquantitativa de VOC's (ppm) nas amostras enumeradas de 8 a 14.

Amostras	Concentração (ppm)							
Analitos	**ID**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**
Tolueno	20	< LOD	> 5	> 5	> 5	> 5	> 5	> 5
Etilbenzeno	24	< LOD	> 1 e < 5	< 1	> 1	> 5	> 5	> 5
m + p xileno	25	< LOD	> 1 e < 5	> 1 e < 5	> 1 e < 5	> 5	> 5	> 5

Legenda: LOD = Limite de detecção experimental

É importante apresentar que existem diversos gases e substâncias de grande interesse no que tange os estudos de avaliação de impactos, sobretudo, no segmento de poluição atmosférica a respeito dos processos produtivos relacionados a fornos de Carbeto de Silício.

Na determinação de VOCs, os compostos que tiveram resultados máximos acima de 5 ppm foram Tolueno; 3-etiltolueno; Etilbenzeno; m + p xileno; n-decano; 1, 2, 4-trimetilbenzeno; Naftaleno e 2-metilnaftaleno. Resultados entre 1 e 5 ppm, Enxofre amarelo e Benzonitrila. O restante das substância ou ficaram abaixo do limite ou ficaram com valores abaixo de 1 ppm.

A Deliberação Normativa vigente da COPAM 187 estabelece, por meio de sua Tabela de Condições e Limites Máximos de Emissão (LME), os padrões aplicáveis a fontes fixas pontuais listadas nos demais anexos da norma. Para o grupo dos VOC's, o limite de emissão estabelecido é de **100 mg/Nm³**. Ao se aplicar a conversão com base na massa molar média dos VOC's e no volume molar padrão, esse valor resulta em uma concentração, em geral, aproximada de **38,2 ppm**, o que demonstra que, em termos quantitativos, os VOC's não configuram o principal foco de preocupação em relação às emissões provenientes dos fornos de produção de carbeto de silício (SiC). Constatação já esperada, tendo em vista a natureza predominantemente mineral e inorgânica do combustível utilizado no processo, o que favorece a geração de outros poluentes mais relevantes, como materiais particulados, que não foi quantificado no presente estudo, ou óxidos inorgânicos conforme discutido.

Em geral, os maus odores são provenientes de uma mistura complexa de moléculas com enxofre (H_2S e mercaptanas), nitrogenadas (NH_3 e aminas), fenóis, aldeídos, álcoois, ácidos orgânicos, etc (COSTA, 2014). As emissões odorantes independentemente da fonte e do tipo são causas de diversos casos de reclamações e queixas públicas, de modo que o assunto tem sido objeto de preocupação pelos gestores públicos e privados no sentido de identificar e gerenciar essas fontes de maneira que os efeitos estejam em níveis adequados aos interesses da coletividade e meio ambiente (LIED, 2018).

Vale ressaltar que o H_2S é ofensivo mesmo em concentrações na ordem de 3 a 5 ppm, e em concentrações atmosféricas superiores a 300 ppm pode ser letal, quando a exposição for superior a 20 minutos. Além disso, no âmbito ambiental, está diretamente associado à formação de chuva ácida (Price e Cheremisinoff, 1995).

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As constatações do estudo mostraram a necessidade de um tratamento prévio antes dade não permitir a emissão dos gases presentes nos fornos de SiC. Recomenda-se o monitoramento dessas emissões e, acompanhamento do sistema com manutenções periódicas para não permitir contaminação atmosférica por intermédio de vazamentos, outras forçantes e o aproveitamento desse gás visando otimização de processos e redução de impactos, prática que já é amplamente estudada na literatura. O CO gerado nos fornos, por exemplo, já é utilizado como combustível para alimentação energética do processo produtivo industrial na fabricação do ferro gusa conforme mencionado anteriormente. Existem também alguns compostos citados como poluentes atmosféricos que retornam ao sistema para geração de subprodutos e ainda, tem-se a possibilidade do impulsionamento de outros gases para melhorar a eficiência do poder calorífico pela queima, como no caso de CH_4 e H_2.

Os resultados obtidos também reforçam a necessidade de aprofundar a investigação sobre os gases e compostos orgânicos voláteis emitidos, devido ao elevado risco ao ecossistema, à saúde humana e à qualidade do ar. Estudos adicionais devem explorar fatores como as condições operacionais dos fornos, a interação química entre os compostos e os efeitos dessas emissões no ambiente, através de novos monitoramentos e análises de risco humano e ecológico.

Por isso, recomenda-se implementar um sistema de monitoramento regular das emissões gasosas ou amostragem periódica para avaliar as variações temporárias e garantir o cumprimento das normas ambientais, prática que pode identificar tendências e prever riscos.

Além disso, é importante que os gases emitidos sejam considerados como potenciais fontes de energia por meio de técnicas de coprocessamento, aproveitando seu poder calorífico em processos industriais compatíveis. Essa abordagem pode reduzir a demanda energética em meio ao processo produtivo e contribuir para uma gestão ambiental mais eficiente. No entanto, é fundamental ressaltar que a liberação direta desses gases na atmosfera, sem qualquer tipo de tratamento ou aproveitamento, representa um risco significativo à saúde humana e ao meio ambiente, principalmente devido ao seu potencial tóxico, explosivo e persistência na cadeia atmosférica no que tange às interações físico-químicas do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRUZZI, R. C.; DEDAVID, B. A.; BITENCOURT, A. K.; PIRES, M. J. R. *Artefatos na análise e avaliação de recipientes de baixo custo para amostragem e armazenamento de gases de efeito estufa*. Química Nova, v. 1, p. 84–94, 2019.

BRASIL. *Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA.* Resolução n.º 491, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre os padrões de qualidade do ar. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, 20 nov. 2018.

CAVALCANTI, P. P. S. *Gestão ambiental na Indústria Siderúrgica: Aspectos relacionados às Emissões Atmosféricas*. UFRJ, Rio de Janeiro - RJ, set. 2012.

COHEN, A. J.; ANDERSON, H. R.; OSTRO, B.; PANDEY, K. D.; KRZYZANOWSKI, M.; KÜNZLI, N.; GUTSCHMIDT, K.; POPE, A.; ROMIEU, I.; SAMET, J. M.; SMITH, K. *The global burden of disease due to outdoor air pollution*. Journal of Toxicology and Environmental Health - Part A, v. 68, n. 13–14, p. 1301–1307, 2005.

JUANES, M. C. *Quantificação dos componentes carbonosos presentes no sistema de despressurização do gás do alto-forno*. 2019. 64 f. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

KAWASHIMA, A. B. *Desenvolvimento de um inventário de emissões atmosféricas por fontes fixas para o Brasil*. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, TOLEDO – PR, 2005.

LIED, E. B. *Degradação do H2S contido em poluentes gasosos utilizando fotocatalisador revestido de TiO_2. Programa de Pós-Graduação "Stricto Sensu" em Engenharia Química*, TOLEDO – PR, fev. 2018.

MACHADO, A. S. et al. Quantificação por DRX dos componentes carbonosos presentes no pó de balão do alto-forno. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, São Paulo, v. 4, n. 8, p. 254–260, 10 out. 2011.

MINAS GERAIS. *Conselho Estadual de Política Ambiental – COPAM.* Deliberação Normativa COPAM n.º 187, de 13 de setembro de 2013. Estabelece os padrões de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas e dá outras providências. *Minas Gerais: Diário do Executivo*, Belo Horizonte, MG, 14 set. 2013.

PRICE, E. C.; CHEREMINSINOFF, P. N. *Biogas – Production and utilization*. New York, NY: Ann Arbor Science, 1995.

ROCHA, S. D. F.; LINS, V. D. F. C.; SANTO, B. C. D. E. Aspectos do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer. *ABES*, Belo Horizonte - MG, v. 16, n. 1, p. 1, set. 2009.

SALES, G. J. C. *Otimização do processo na rota de processamento de carbeto de silício*. 2023. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.

SANTOS, F. S. D. *Diagnóstico das emissões atmosféricas em Minas Gerais: um estudo para as fontes fixas e veiculares*. *Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG*, Belo Horizonte - MG, dez. 2018.

SANTOS, P. H. T. S. *Influência da adição de carbeto de silício em matriz cerâmica à base de alumina*. [s.l.: s.n.], 2017.