

O FUTURO DO SF₆ EM EQUIPAMENTOS DE MÉDIA TENSÃO

Resumo

Este artigo analisa o futuro do hexafluoreto de enxofre (SF₆) em equipamentos de média tensão (MT), destacando o equilíbrio entre o seu elevado desempenho técnico e os impactos ambientais associados. Exploram-se as principais propriedades do SF₆, nomeadamente as excelentes características dielétricas e de extinção de arco que permitem soluções compactas e fiáveis, bem como as desvantagens relacionadas com o seu elevado potencial de aquecimento global. São comparadas as dimensões e aplicações de equipamentos isolados a SF₆ e a ar, com enfoque em quadros de MT, disjuntores e interruptores tripolares. Analisa-se ainda o enquadramento regulamentar europeu, em particular as restrições ao uso de gases fluorados, e apresentam-se tecnologias emergentes isentas de SF₆, como soluções baseadas em ar seco, vácuo e misturas gasosas alternativas. O artigo enquadra assim o papel do SF₆ na transição energética, evidenciando os desafios e oportunidades associados à sua substituição gradual por soluções mais sustentáveis.

Palavras-chave: Hexafluoreto de enxofre (SF₆); Isolamento dielétrico; Impacto ambiental, Regulamentação europeia; Tecnologias alternativas.

1. Introdução

O gás hexafluoreto de enxofre (SF₆) é amplamente utilizado em sistemas de média tensão graças às suas excelentes propriedades dielétricas e capacidade de extinção do arco elétrico. Este gás é extremamente isolante, permitindo a construção de equipamentos mais compactos e confiáveis, como disjuntores e seccionadores. A sua alta estabilidade química e térmica assegura durabilidade e reduz o risco de falhas ambientais industriais e de distribuição de energia elétrica [1].

Contudo, o SF₆ apresenta um potencial de aquecimento global (GWP) cerca de 24 mil vezes maior que o CO₂. A manipulação inadequada durante a instalação, manutenção ou desativação dos equipamentos pode levar à libertação do gás na atmosfera, contribuindo assim para o aquecimento global. Estes desafios têm impulsionado a indústria a desenvolver alternativas sustentáveis, como isolamentos livres de SF₆ [2].

Os principais equipamentos de MT que utilizam este gás como isolamento, são os quadros de média tensão, disjuntores e interruptores tripolares. Este tipo de equipamentos, com dimensões reduzidas, torna-se ideal para instalação em locais onde o espaço é limitado ou onde existem normas rigorosas de segurança, como nas subestações. Já nos disjuntores de média tensão, este gás é utilizado como meio isolante para extinção do arco elétrico que ocorre durante a interrupção de correntes decorrentes de manobras realizadas [1].

Este tipo de tecnologia, transmite maior segurança para o utilizador, devido a reduzir drasticamente o risco de incêndio quando comparado com outras soluções, uma vez que não são utilizados óleos como meio isolante. Apesar das suas reconhecidas vantagens técnicas, importa reforçar, conforme anteriormente referido, que subsistem preocupações ambientais significativas associadas à utilização deste gás [3].

2. Caracterização do SF₆

O Hexafluoreto de enxofre é um gás puro, incolor, inodoro e não inflamável. Para além disso, não se mistura com nenhum elemento da tabela periódica, e dá a possibilidade de que com ele seja possível efetuar todas as ligações químicas existentes. Esta particularidade deve-se à sua estabilidade

permitindo que quando sofre uma disrupção é capaz de se reger e reverter o processo. Esta estabilidade, torna-o deveras útil no caso do corte do arco eléctrico e faz dele um gás bastante diferente dos restantes [1].

2.1 Vantagens e Desvantagens

O estudo das vantagens e desvantagens do SF_6 é fundamental para compreender o seu papel em equipamentos de média tensão. Este tópico visa analisar de forma crítica as propriedades técnicas que tornam o SF_6 um isolante eléctrico eficaz, assim como os desafios ambientais e de segurança que condicionam a sua utilização.

Uma das principais vantagens reside nas suas excelentes propriedades dieléctricas. Para além disso, a sua utilização permite a conceção de equipamentos e subestações do tipo blindado, uma vez que possibilita soluções compactas e hermeticamente seladas, que apresentam reduzidas necessidades de manutenção, em contraste com sistemas baseados noutros meios isolantes [4].

O SF_6 é amplamente utilizado devido à sua elevada capacidade de extinção do arco eléctrico e elevada fiabilidade operacional, associada a requisitos mínimos de manutenção. Estas características tornam os equipamentos que o utilizam particularmente adequados para aplicações em sistemas eléctricos de média e alta tensão [1].

Adicionalmente, o facto de o SF_6 poder ser armazenado em compartimentos de pequenas dimensões permite a construção de quadros eléctricos e equipamentos isolados a gás com dimensões substancialmente mais reduzidas face aos equipamentos isolados a ar, os quais, por norma, requerem volumes significativamente superiores para garantir níveis equivalentes de isolamento [1].

Não obstante, apresenta impactos ambientais e riscos para a saúde humana que não podem ser negligenciados. Trata-se de um gás com um potencial de aquecimento global

extremamente elevado, estimado em cerca de 24 000 vezes superior ao do dióxido de carbono e com um tempo de permanência na atmosfera superior a mil anos [2].

Para além do impacto ambiental, a presença de concentrações elevadas de SF_6 no ar constitui um risco para a segurança humana. Quando a concentração ultrapassa aproximadamente 20%, este gás torna-se perigoso por inalação, uma vez que é cerca de seis vezes mais pesado do que o ar, podendo acumular-se em espaços confinados e provocar deslocamento do oxigénio, o que, em situações extremas, pode conduzir à asfixia [4].

2.2 Condutividade Térmica

O comportamento da condutividade térmica em função da temperatura constitui um aspeto relevante na caracterização de gases isolantes, como o SF_6 . A análise desta relação permite compreender melhor as propriedades de transferência de calor do gás, bem como identificar fenómenos específicos, como alterações associadas a processos de decomposição, que influenciam o desempenho dos equipamentos eléctricos onde este gás é utilizado.

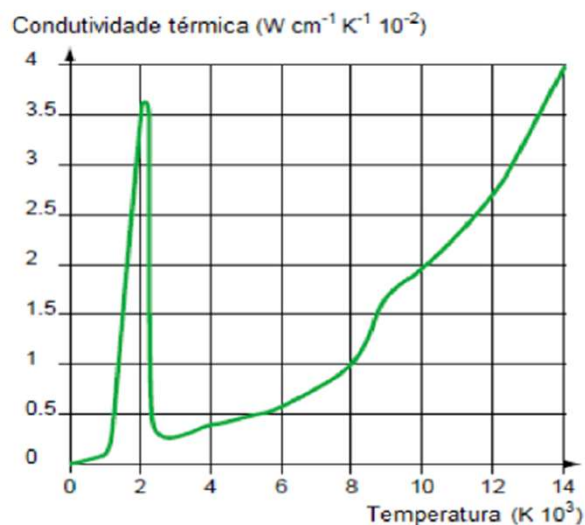


Figura 1. Condutividade térmica do SF_6 em função da temperatura [1]

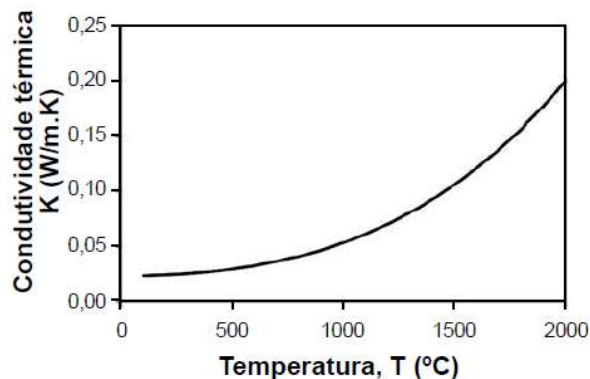


Figura 2. Condutividade térmica do Ar em função da temperatura [14]

No que se refere à relação entre a condutividade térmica e a temperatura, observa-se, a partir da Figura 1, que a condutividade térmica do gás aumenta à medida que a temperatura se eleva. Verifica-se ainda a presença de um pico quando se atinge a temperatura de decomposição, correspondendo ao ponto em que a substância se dissocia em moléculas menores [1].

A comparação entre o gráfico da condutividade térmica em função da temperatura do SF₆ (Figura 1) e o do ar (Figura 2) revela uma tendência globalmente semelhante, sendo a principal diferença a ocorrência do referido pico no SF₆, ausente no ar, que está associado ao processo de decomposição do gás [1].

3. Dimensões e Aplicações

O estudo das dimensões e aplicações de equipamentos isolados a SF₆ permite compreender como as propriedades do gás influenciam o design e a funcionalidade de dispositivos elétricos.

Este subtópico aborda tanto a concepção compacta de quadros e equipamentos, como as principais áreas de aplicação, evidenciando o equilíbrio entre desempenho técnico, segurança e eficiência do espaço ocupado.

3.1 Dimensões quadros isolados a Gás e Ar

Os dois tipos de isolamento mais utilizados em quadros de média tensão são o Gás e o Ar, sendo a principal diferença entre eles as dimensões dos equipamentos [1].

Quadros isolados a Gás (GIS – *Gas Insulated Switchgear*): sistemas de manobra e proteção em que os componentes energizados estão selados em compartimentos metálicos preenchidos com gás isolante (geralmente SF₆), permitindo design compacto, elevada fiabilidade e menor manutenção, especialmente adequados para espaços confinados [5], [6].

Quadros isolados a Ar (AIS – *Air Insulated Switchgear*): sistemas em que o ar ambiente serve de isolante entre os componentes, exigindo maiores distâncias de isolamento, resultando em equipamentos de maiores dimensões, mais simples e de manutenção acessível, mas mais sensíveis a influências ambientais [5].

Nos quadros isolados a Ar, de forma simplificada cada kilovolt (kV) corresponde a um centímetro de distanciamento entre fases [7].

Na Figura 3 encontra-se representado um quadro de média tensão de distribuição secundária da SIEMENS, com isolamento em SF₆, tensão de 24 kV e respectivas dimensões.



Figura 3. Quadro isolado a SF₆ – Gama 8DJH SIEMENS [8]

Na Figura 4, é apresentado um quadro com as mesmas características do representado na figura 3, mas com isolamento a AR [8], [9].

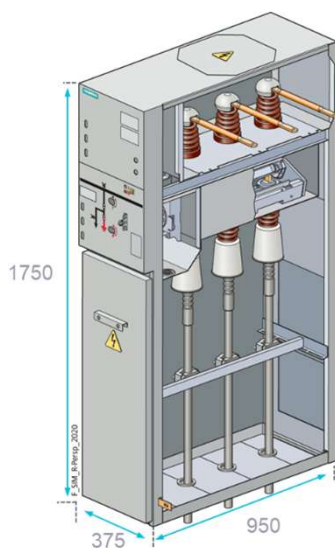


Figura 4. Quadro isolado a Ar – Gama Simosec SIEMENS [9]

É possível constatar através da análise da Figura 3 e Figura 4, que as dimensões são bastante diferentes, ou seja, as dimensões, principalmente a altura e largura do quadro isolado a Ar (Figura 4) são significativamente maiores.

Quando existe a necessidade de implementação de um quadro de média tensão num local com espaço reduzido, o quadro isolado a gás é possivelmente a melhor solução, uma vez que é composto por celas mais compactas, devido a ser um monobloco de isolamento integral. [8].

Nos quadros isolados a SF_6 , a aparelhagem e barramento encontram-se fechados numa cuba de aço inox estanque, hermeticamente selada. Estas características permitem que a segurança na exploração aumente e que os procedimentos de manutenção reduzam [6].

3.2 Aplicações

Este gás pode ser aplicado em diversas áreas, contudo, no âmbito da média tensão assume particular relevância, uma vez que desempenha três funções essenciais.

No isolamento elétrico, uma vez que este é um gás dielétrico com excelente capacidade de isolamento, podendo ser utilizado para evitar falhas e curto-circuitos entre componentes. Na extinção de arco elétrico, devido às suas propriedades de absorção de energia, que permitem que seja possível a rápida extinção do arco. E por fim, para proteção de equipamentos, uma vez que auxiliam na proteção contra a humidade, poeira e outros resíduos, garantido assim a extensão da vida útil do material [7], [1].

No que diz respeito aos equipamentos de média tensão, este gás pode ser utilizado em interruptores tripolares, equipamentos capazes de realizar o estabelecimento e interrupção da corrente de serviço, permitindo assim com que seja possível extinguir o arco elétrico que existe dentro de uma cápsula. Estes dispositivos podem ser acionados eletricamente ou mecanicamente através de um motor [7].

Poderá ainda ser utilizado no isolamento de disjuntores de média tensão, para interrupção das correntes de serviço e curto-circuitos. Estes equipamentos têm a capacidade de abrir o circuito de forma automática quando o valor da intensidade de corrente apresenta valores superiores os valores da corrente estipulada. É possível verificar se a corrente é superior ou inferior através de relés de proteção que são normalmente acoplados nos compartimentos de baixa tensão, fazendo assim com que seja possível identificar possíveis falhas ou irregularidades [1].

Este conjunto de equipamentos, incluindo disjuntores, seccionadores, interruptores, transformadores e relés, pode ser implementado em subestações elétricas destinadas à distribuição de energia em sistemas urbanos e industriais, sendo particularmente comum em zonas densamente povoadas. No setor industrial, onde são frequentemente utilizados em sistemas de distribuição elétrica de fábricas em refinarias e outras instalações que operam com média tensão [3], [1].

Além disso, a utilização destes equipamentos é recorrente em sistemas de energia renovável, nomeadamente em parques eólicos e solares, bem como em edifícios comerciais e complexos residenciais, assegurando uma distribuição de energia segura e eficiente [3], [1].

Por fim, as soluções de média tensão isoladas a SF_6 são também amplamente empregues em infraestruturas críticas, como aeroportos, hospitais, centros de dados e outras instalações que requerem um fornecimento contínuo, estável e altamente fiável de energia.

4. Transição para novas tecnologias

Com a expansão elétrica mundial, aumento da população, transição para energias renováveis, desenvolvimento económico, entre outras, deverá existir cada vez mais a necessidade de aumentar a utilização de equipamentos de média tensão, recorrendo a quadros com isolamento em SF_6 [1]. Contudo, a sua utilização deixará de ser permitida de acordo com o Regulamento (UE) 2024/573 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 7 de fevereiro de 2024. No artigo 13.º, “Restrições de utilização”, ponto 9, é estabelecido que, a partir de 1 de janeiro de 2026, será proibida a utilização de comutadores elétricos de média tensão, tanto de distribuição primária como secundária, até 24 kV inclusive. Já aqueles equipamentos com mais de 24 kV e menos de 52 kA (inclusive) a sua utilização é mais alargada, até 1 de janeiro de 2030 [10].

Atualmente, empresas do setor têm vindo a desenvolver alternativas ao SF_6 , uma vez que este gás, como referido anteriormente, tende a ser progressivamente eliminado dos equipamentos de média tensão, em conformidade com as diretivas europeias [10]. Diversas alternativas já se encontram a ser implementadas em equipamentos elétricos de média tensão, garantindo desempenho equivalente e alinhado com metas globais de sustentabilidade.

Atualmente, estão a ser desenvolvidas e implementadas tecnologias alternativas ao SF_6 em equipamentos elétricos

de média tensão, com o objetivo de reduzir o impacto ambiental sem comprometer o desempenho técnico. Entre estas soluções destacam-se sistemas baseados em ar seco comprimido e em isolamento a ar combinado com interrupção a vácuo, que oferecem níveis de fiabilidade e segurança comparáveis aos equipamentos tradicionais, eliminando simultaneamente a emissão de gases com efeito de estufa. Estas tecnologias são aplicáveis tanto em novos equipamentos como na modernização de instalações existentes, sendo particularmente adequadas para redes de transporte e distribuição em ambientes urbanos e industriais [11] [12] [13].

Paralelamente, têm sido desenvolvidas misturas gasosas alternativas ao SF_6 , com reduzido potencial de aquecimento global, que mantêm propriedades dielétricas e de extinção de arco semelhantes às do SF_6 . Um exemplo desta abordagem é a tecnologia blue GIS, aplicada nos quadros de média tensão da SIEMENS, nomeadamente na gama de distribuição secundária 8DJH24, que permite a conceção de quadros isolados a gás sem utilização de SF_6 [8].

Estas soluções refletem os avanços na procura de equipamentos tecnicamente equivalentes, capazes de responder aos requisitos de fiabilidade e segurança, contribuindo simultaneamente para um futuro mais sustentável. Estas iniciativas encontram-se alinhadas com as regulamentações ambientais internacionais e desempenham um papel relevante na promoção da descarbonização do setor elétrico.

5. Conclusões

Através da elaboração deste tipo de artigos, tendo em conta diferentes perspetivas, é possível contribuir positivamente para caminhos que interligam a eficiência energética e sustentabilidade.

A utilização do SF_6 em equipamentos de média tensão, nomeadamente, disjuntores, interruptores tripolares, painéis blindados e quadros de distribuição, possibilita a

criação de soluções eficientes, compactas, robustas e confiáveis para a distribuição de energia, isso deve-se às suas propriedades dielétricas e de extinção de arco elétrico. Estes equipamentos desempenham um papel fundamental tanto em sistemas urbanos como industriais.

Apesar de este tipo de isolamento apresentar condições muito favoráveis à sua utilização, subsistem desafios ambientais que não podem ser ignorados. Estes desafios exigem um aperfeiçoamento contínuo das práticas de manuseamento, das soluções atualmente existentes e dos processos de recuperação e reciclagem, bem como o desenvolvimento e a adoção de alternativas que visem minimizar ou mesmo eliminar a sua utilização.

A obrigatoriedade de eliminação dos gases fluorados no isolamento de equipamentos de média tensão, têm levado as grandes empresas, como a SIEMENS, a adotar novas soluções que passam por misturas gasosas, materiais sólidos e equipamentos livres de SF₆, direcionando assim para um futuro mais sustentável e eficiente [8].

Relativamente às novas soluções pioneiras para a substituição do SF₆, observa-se ainda uma disponibilidade limitada de informação no que diz respeito à composição dos novos gases isentos de SF₆.

As novas soluções livres de SF₆ apresentam desafios técnicos significativos nomeadamente a necessidade de operar a pressões mais elevadas, o que exige o reforço das estruturas, sobretudo nos quadros GIS, a otimização dos processos de isolamento e de soldadura, e a melhoria das soluções de dissipação térmica interna, de modo a assegurar a estabilidade operacional e a longevidade dos equipamentos em condições de serviço reais.

Concluindo, atualmente o SF₆ continua a ser indispensável para diversas soluções de média tensão, no entanto deve existir um equilíbrio entre práticas responsáveis e inovação tecnológica, garantindo que os avanços sejam alcançados de forma sustentável, mas sempre alinhadas com o que o sistema necessita em determinado momento.

Referências Bibliográficas

- [1] T. Paiva, "Aparelhagem de Média Tensão: Definição e Aplicação Prática," 2020.
- [2] E. Green, "Euronews," 07 04 2024. [Online]. Available: <https://www.euronews.com/green/2024/04/07/what-is-sf6-study-raises-concerns-about-gas-that-is-24000x-more-powerful-than-co2>. [Acedido em 25 10 2024].
- [3] Â. Guimarães, "Descritivo e apresentação de uma subestação elétrica isolada a SF₆ para alta tensão," 2020.
- [4] T. Pinheiro, "Hexafluoreto de Enxofre - Conceitos sobre o gás e a sua reutilização".
- [5] R. Nagarsheth, "Study of gas insulated substation and its comparison with air insulated," p. 5, 2013.
- [6] A. Gomes, Postos de transformação e seccionamento, 2024.
- [7] M. Bolotinha, Subestações - Projeto, Construção, Fiscalização, 2019.
- [8] SIEMENS, Catálogo 8DHJ24 - blue GIS, 2022.
- [9] SIEMENS, SIMOSEC, 2017.
- [10] P. Europeu, "Regulamento (UE) 2024/573 do parlamento europeu e do conselho," Jornal Oficial da União Europeia, 2024.
- [11] S. Energy, "Siemens Energy," 19 10 2021. [Online]. Available: <https://www.siemens-energy.com/br/pt/home/stories/new-hv-substation-burladingen-germany.html>. [Acedido em 19 12 2024].
- [12] Schneider, "Schneider," [Online]. Available: <https://www.se.com/pt/pt/work/products/product-launch/sf6free-mv-technology/>. [Acedido 19-12- 2024].
- [13] Paranoaenergia, "Paranoaenergia," 28 04 2021. [Online]. Available: <https://www.paranoaenergia.com.br/o-que-se-diz/2021/04/28/ge-e-hitachi-abb-usam-gas-alternativo-ao-sf6/>. [Acedido em 19-12-2024].
- [14] D. O. Vivaldini, "Revisão: fundamentos e materiais para o projeto da microestrutura de isolantes térmicos refratários de alto desempenho," Junho 2014.