

Processo de fabricação do ácido sulfúrico a partir de uma planta industrial com processo de contato

DOI: 10.5281/zenodo.15296933

Pedro Paulo Silva Marques Pinto^{a*}

Sulfuric acid (H_2SO_4) is one of the most produced chemicals globally, widely used in industrial processes such as chemical, petrochemical, and fertilizer production. It is also utilized in automotive battery electrolytes and industrial cleaning agents. Its production involves processes that generate significant thermal energy, making energy optimization essential. The acid, composed of sulfur, hydrogen, and oxygen, is a strong acid and highly corrosive in concentrated forms, posing severe burn risks. About 60% of global production is used in fertilizers. This work focuses on the production process of sulfuric acid via the contact process, the primary industrial method, and examines the involved unit operations and reactions. The process consists of four main steps: sulfur extraction, sulfur dioxide (SO_2) production, catalytic conversion of SO_2 to sulfur trioxide (SO_3), and absorption of SO_3 into concentrated sulfuric acid. Additionally, the paper highlights energy efficiency and thermodynamic losses in the production process.

O ácido sulfúrico (H_2SO_4) é amplamente utilizado em diversas indústrias, como a de fertilizantes, petróleo e tratamentos de água, com produção superior a 200 milhões de toneladas anuais. Sua produção ocorre principalmente pelo processo de contato, que envolve quatro etapas: extração do enxofre, conversão em dióxido de enxofre (SO_2), conversão catalítica de SO_2 para trióxido de enxofre (SO_3) e, finalmente, a absorção do SO_3 para formação ácido sulfúrico. A eficiência energética e a minimização das perdas termodinâmicas são aspectos importantes do processo, que deve ser otimizado para garantir a continuidade da produção, rentabilidade e sustentabilidade. O presente trabalho descreve as operações unitárias e as reações químicas envolvidas, como a combustão do enxofre, a conversão de SO_2 a SO_3 e a absorção do SO_3 , além de discutir os cuidados no projeto das plantas industriais, como a maximização da conversão de SO_2 e a eficiência de absorção de SO_3 .

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

*E-mail: ppmarques01@gmail.com

Palavras-chave: Ácido sulfúrico; processo de contato; eficiência energética.

Recebido em 19 de março de 2025,

Aprovado em 12 de abril de 2025,

Publicado em 01 de maio de 2025.

Introdução

O ácido sulfúrico (H_2SO_4) é um dos produtos químicos mais produzidos no mundo, sendo amplamente utilizado em processos industriais, como na indústria química, petroquímica e de fertilizantes. Além disso, ele é comercializado para uso em eletrólitos de baterias automotivas e agentes de limpeza domiciliar e industrial. Sua produção envolve processos que geram grande quantidade de energia térmica, tornando essencial a análise e otimização desses sistemas para um melhor aproveitamento energético.¹

O H_2SO_4 é uma molécula que possui os elementos enxofre, hidrogênio e oxigênio. As ligações existentes entre os elementos são ligações covalentes, garantindo o compartilhamento de elétrons e uma configuração tetraédrica. Esse ácido é considerado um ácido forte e, em alta concentração, é uma substância altamente oxidante, corrosiva e desidratante, de forma que, quando em contato com a pele, o ácido sulfúrico pode causar graves queimaduras químicas e até queimaduras de segundo grau, sendo perigoso mesmo em concentrações moderadas.^{2,6}

A principal utilização dessa substância é na indústria de fertilizantes (cerca de 60% da produção global). Além disso, ele é muito utilizado na indústria petrolífera, no tratamento de água, como catalisador de reações químicas em processos laboratoriais e na fabricação de explosivos, papéis e tintas. Estima-se que sua produção global anual nos últimos anos seja superior a 200 milhões de toneladas.¹

O nível de produção desse ácido é um bom indicador do desenvolvimento industrial e econômico de um país. Sua produção pode ser realizada por diferentes métodos, como o processo de contato, o processo de ácido sulfúrico a úmido e o processo de câmara de chumbo. Neste trabalho, será descrito o processo produtivo do ácido sulfúrico a partir do processo de contato, uma vez que esse é o principal processo de produção de ácido sulfúrico em escala industrial.¹ Será discutido o processo produtivo, incluindo as operações unitárias e das reações envolvidas no processo.

Metodologia

A metodologia deste trabalho centrou-se na análise do processo produtivo do ácido sulfúrico, destacando sua

importância para a indústria e a complexidade envolvida em sua fabricação. Foram examinados os principais métodos de produção, com ênfase no processo de contato, além de aspectos relacionados às operações unitárias e reações químicas envolvidas. Para isso, fontes bibliográficas relevantes, como King e colaboradores foram revisadas a fim de contextualizar a relevância do ácido sulfúrico na indústria. Além disso, a análise exergética - o quanto da energia disponível pode ser convertida em trabalho útil - do processo produtivo foi explorada com base no estudo de Ferreira *et al.*, permitindo uma avaliação detalhada da eficiência energética e das perdas termodinâmicas associadas à fabricação do ácido sulfúrico por duplo contato.

Resultados e discussão

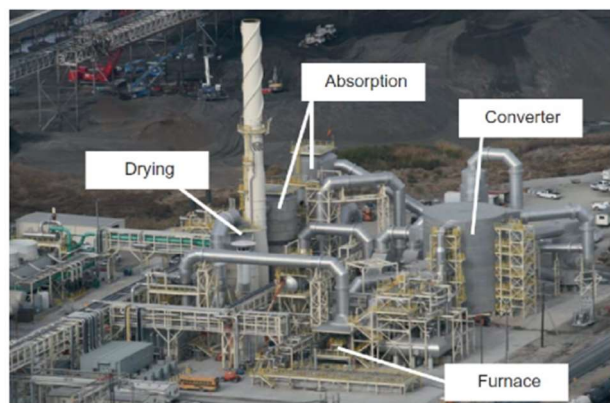
Visão geral do processo

Em sua maioria, as instalações industriais de produção de ácido sulfúrico são feitas a partir do processo de contato, ou seja, o enxofre elementar é utilizado como matéria prima para obtenção do dióxido de enxofre (SO_2). O processo de contato se desenvolve basicamente em quatro etapas, sendo elas:³

- 1 - Extração de enxofre (S)
- 2 - Obtenção do dióxido de enxofre (SO_2) a partir do enxofre (S)
- 3 - Conversão catalítica do dióxido de enxofre (SO_2) no trióxido de enxofre (SO_3)
- 4 - Conversão de trióxido de enxofre em ácido sulfúrico

Uma planta industrial que representa essas etapas juntamente com as operações unitárias é exemplificada na Figura 1.

Figura 1. Imagem da produção industrial de ácido sulfúrico. Extraído da referência 1.



Os processos de contato podem ser classificados como simples contato ou duplo contato, estando a principal diferença entre as duas na terceira etapa do processo de contato, que corresponde à conversão do dióxido de enxofre (SO_2) para trióxido de enxofre (SO_3). No processo de simples contato há somente uma coluna de absorção para a qual os gases efluentes do último leito de conversão catalítica são transferidos visando a remoção do SO_3 . Já no processo de duplo contato, é incluída outra torre de absorção, outro sistema de circulação de ácido e resfriadores intermediários para a troca de calor entre gases circulantes nessa etapa de conversão do dióxido de enxofre.⁴

A primeira etapa é a extração do enxofre elementar (S), que pode ser feita em áreas vulcânicas, regiões sedimentares ou a partir de metais na forma de sulfetos. Todavia, as principais fontes de enxofre elementar são o gás natural e o petróleo, que representam cerca de 70% da produção. Esse processo de extração do enxofre em depósitos subterrâneos se dá por meio do processo Frasch, no qual se injeta água superaquecida (cerca de 165 °C) para derreter o enxofre, que é então extraído à superfície com auxílio de ar comprimido. O enxofre obtido por esse método apresenta alta pureza, entre 99% e 99,9%, e é isento de impurezas como arsênico, selênio e telúrio.¹

A segunda etapa é a obtenção do dióxido de enxofre (SO_2) a partir do enxofre (S) por meio purificação e combustão do enxofre. Nesse estágio, são realizadas as operações de sedimentação e filtração, a fim de remover as impurezas presentes no enxofre. Partículas sólidas agregadas ao enxofre pelo vento e pela chuva, se não removidas, são arrastadas através da instalação pelos gases efluentes do forno de combustão de enxofre e, com o tempo, se acumulam na câmara de combustão, reduzem a vida útil do catalisador e aumentam a perda de carga no sistema. A sedimentação é normalmente realizada em reservatórios associados ao tanque de fusão, de onde o enxofre líquido flui por gravidade. As partículas sólidas tendem a depositar-se no fundo dos reservatórios, enquanto o enxofre sobrenadante é bombeado para o resto do processo. O tempo de residência do enxofre nestes tanques depende basicamente do teor de cinzas presente. A filtração envolve o uso de filtros sob pressão para a retirada de impurezas.⁴

A terceira etapa é a conversão catalítica do dióxido de enxofre (SO_2) para trióxido de enxofre (SO_3) na qual o gás resultante da combustão de enxofre passa por uma massa catalítica, onde o SO_2 é convertido a SO_3 . Nessa reação a quantidade de calor dissipada eleva a temperatura do gás

suficientemente para permitir que a conversão se aproxime do limite determinado pelo equilíbrio termodinâmico.⁴

A quarta e última etapa do processo de produção do ácido sulfúrico por contato é a absorção do SO₃. O gás proveniente do conversor catalítico é borbulhado em contracorrente com ácido sulfúrico concentrado, através de uma torre recheada de absorção. O SO₃ presente nos gases reage com água (H₂O) presente junto ao ácido, formando novas moléculas de ácido sulfúrico. A operação de absorção pode ocorrer uma ou duas vezes, conforme o processo empregado seja de contato simples ou de contato duplo como foi explicado anteriormente.⁴

É importante ressaltar que, durante o processo produtivo do H₂SO₄ por contato, há operações unitárias acessórias, como a secagem do gás da etapa de combustão do enxofre elementar. Essas operações serão descritas adiante.

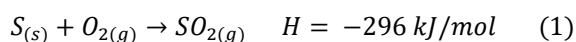
Pontos de atenção para o projeto da planta

Visando atender aos interesses de rentabilidade e sustentabilidade, alguns pontos devem ser priorizados durante a elaboração de uma planta industrial de produção de ácido sulfúrico. Entre eles, pode-se destacar:⁵

- Maximização da conversão de SO₂ (maior rendimento e menor teor de gases sulfurosos lançados à atmosfera);
- Maximização da eficiência de absorção de SO₃ (evitando o lançamento de H₂SO₄ na atmosfera);
- Aproveitamento do vapor de água produzido;
- Produção contínua em capacidade nominal durante longos períodos de operação;
- Minimização dos custos de operação e de manutenção;
- Operação segura e higiênica.

Reações Químicas

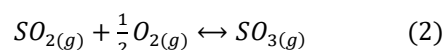
A primeira reação química que ocorre durante o processo de produção do ácido sulfúrico por contato é a combustão do enxofre elementar:⁶



Nessa reação, há a queima do enxofre para produção de dióxido de enxofre e liberação de calor (reação exotérmica). Dentro da câmara (forno de combustão), o enxofre reage com o ar, elevando a temperatura do meio reacional a 1000 °C. Considerando a massa molar do enxofre elementar (32,07

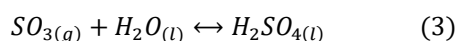
g/mol), cada quilograma de enxofre elementar queimado libera cerca de 9 MJ de energia, que pode ser aproveitada para aquecimento de vapor⁶.

Os gases produzidos que estão em alta temperatura são resfriados até aproximadamente 400 °C, trocam calor com a água dos tubos da caldeira e evaporam. A mistura gasosa contendo N₂, O₂, SO₂ alimenta o reator onde ocorre a segunda etapa da produção que é a conversão catalítica do SO₂ em SO₃.⁶



Essa é uma reação reversível em que ocorre a reação de oxidação do dióxido de enxofre produzindo trióxido de enxofre na presença de um catalisador. Esses catalisadores podem ser platina, óxido de ferro e pentóxido de vanádio, sendo esse último o mais utilizado hoje em dia nas plantas industriais. O equilíbrio e velocidade da reação são função da temperatura, da pressão, da relação O₂/SO₂ e da concentração de SO₃.⁶

A última reação do processo envolve a absorção do trióxido de enxofre formado a partir do leito catalítico (reação exotérmica). Para absorver o SO₃, a massa gasosa de efluente do conversor é borbulhada em uma ou mais torres recheadas, em contracorrente com ácido sulfúrico. Por fim, a água de diluição reage com SO₃.⁶



É importante ressaltar que a água pura não pode ser usada nessa reação, isso, pois por se tratar de uma reação exotérmica, a alta temperatura pode gerar vapor de ácido sulfúrico, o que acarretaria em problemas no processo.⁷

Operações Unitárias

Torre de secagem: Para esse processo, é utilizada uma torre de absorção, onde não ocorrem reações, apenas o equilíbrio entre as fases. Para manter a pressão requerida dentro da torre, utilizam-se bombas e compressores. Nesse sentido, é possível realizar o processo de secagem do objeto de interesse para não oxidar a tubulação.⁸

Torre de absorção: A torre de absorção é a operação unitária responsável por capturar o SO₃ em contato com H₂SO₄ concentrado como absorvente e resultará no fim do processo em ácido sulfúrico como produto final. É válido pontuar que parte do ácido sulfúrico produzido é utilizado em

contracorrente para absorção do trióxido de enxofre por meio da transferência de massa da fase gasosa para líquida.⁸

Bombas e Compressores: As bombas são responsáveis pela circulação de fluidos líquidos como o produto de interesse para armazenagem e para uso na torre de absorção e também tem o fim de adequar a pressão do sistema. Já os compressores auxiliam no transporte de gases nas diferentes etapas de produção, como o transporte do ar atmosférico, do gás SO_3 e do SO_2 , além de pressurizar o gás para os processos seguintes quando há necessidade.⁸

Operações Unitárias de Troca de Calor

Sendo muitas das etapas da produção de ácido sulfúrico pelo processo de contato altamente exotérmicas, é importante direcionar adequadamente o calor liberado nessas etapas a fim de ter maior aproveitamento energético dentro da planta e evitar a queda da eficiência desses processos.⁸

O primeiro ponto de atenção é a fornalha onde ocorre a combustão de enxofre elementar (S) para formação de SO_2 . O uso da fornalha piscina, na qual o enxofre sólido é abastecido continuamente a uma piscina que é aquecida para vaporizá-lo, não é conveniente para a produção em escala industrial por dificultar o controle da vazão de gás utilizado pela fornalha e a concentração de enxofre na piscina em regime permanente. Já o uso da fornalha cascata apresenta como vantagem a eficiência trazida pelo fluxo do enxofre líquido em cascata ao longo das paredes internas da fornalha, mas tem como limitação a escala de produção na qual é aplicável. Sendo assim, a fornalha atomizadora é a mais indicada e utilizada atualmente para produção de ácido sulfúrico em grande escala, uma vez que a dispersão do enxofre na forma de pequenas gotículas dentro da fornalha permite um controle adequado da vazão de gás e da concentração de enxofre sem limitar a escala de produção.¹ Essa atomização pode ser realizada simplesmente por diferença de pressão na entrada da fornalha para produções de menor escala, mas é necessária a introdução de um agente atomizante para produções de maior escala. O vapor de água pode ser utilizado com esse propósito. Ele possui como vantagem sobre o ar seco comprimido possibilitar a integração energética dentro do processo. O calor liberado pela combustão pode ajudar a aquecer (e, portanto, pressurizar) o vapor que é utilizado para atomizar o enxofre. Nesse caso, é importante se ater ao efeito que a umidade traz para o processo.⁹

Na etapa de conversão catalítica de SO_2 para SO_3 , também deve ser observada, uma vez que o calor liberado pela

reação no sentido direto causa o aquecimento do meio reacional, favorecendo a reação no sentido inverso, isso é, deslocando o equilíbrio de maneira oposta à desejada. Todavia, o aumento da temperatura favorece a ação do catalisador. É, portanto, ideal controlar a temperatura desse processo dentro de uma faixa ótima. Esse controle, em geral, é feito através da divisão da conversão catalítica em múltiplas etapas com períodos de resfriamento entre elas, o qual pode ser feito por injeção de um agente refrigerante diretamente no leito catalítico ou através de trocadores de calor externos. O arrefecimento direto, geralmente feito com ar seco, tem como vantagem facilitar que o resfriamento seja homogêneo, mas introduz complicações nos cálculos de concentração devido à introdução de novas espécies. A utilização de trocadores de calor externos, por outro lado, tem como vantagem a possibilidade da utilização de água como agente refrigerante, o que produz vapor que pode ser utilizado para integração energética com a etapa de combustão descrita anteriormente.⁹

O vapor aquecido produzido nas etapas anteriores pode ainda ser aproveitado para ajudar a movimentar as turbinas que borbulham ar em contracorrente com o ácido sulfúrico na torre de secagem.⁹ Além disso, o ácido saído da torre de secagem também passa por trocadores de calor para ser resfriado.

É importante, por fim, destacar que o sistema deve ser fechado o quanto possível para evitar a liberação de resíduos sulfurosos para o ambiente. Portanto, deve-se priorizar a recirculação da água que teve contato com o enxofre após sua filtração e resfriamento (em torres de resfriamento, por exemplo).⁹

Composições das Correntes de Processo

No processo de produção de ácido sulfúrico por duplo contato, diversas correntes de processo são essenciais para a conversão do dióxido de enxofre (SO_2) em trióxido de enxofre (SO_3) e a produção de ácido sulfúrico. O processo começa com o enxofre líquido, que é inicialmente queimado para formar o SO_2 . Este gás é então combinado com oxigênio (O_2) e passa pelos leitos catalíticos, onde ocorre a conversão do SO_2 em SO_3 . Nos leitos catalíticos, a temperatura e a pressão são controladas para garantir a máxima conversão do SO_2 .⁴

Após a conversão, o SO_3 é absorvido em uma torre de absorção intermediária. Nessa etapa, o SO_3 entra em contato com ácido sulfúrico concentrado (98 a 99% de pureza), que atua como agente absorvente, formando ácido sulfúrico (H_2SO_4) mais concentrado, com uma pureza entre 99% e

99,5%. Esse ácido sulfúrico formado é então dividido em duas correntes: uma parte é retirada como produto final, enquanto o restante é reciclado, diluído com água e resfriado antes de ser reinjetado no processo.⁴

A corrente gasosa proveniente da absorção intermediária, que ainda contém SO₂ remanescente, é encaminhada para o próximo leito catalítico, onde o SO₂ será novamente convertido em SO₃. O ácido formado na primeira torre de absorção, após ser diluído, é enviado para a torre de absorção final que funciona de maneira similar à primeira, com a diferença de que o ácido sulfúrico utilizado como agente absorvente tem uma pureza um pouco mais baixa. O SO₃ é então absorvido novamente, produzindo ácido sulfúrico com uma pureza de 98,8%.⁴

No final do processo, os gases que saem da última torre de absorção são liberados na atmosfera, cumprindo as normas ambientais, pois atingem a concentração de SO₂ permitida. O ácido gerado nas torres de absorção é bombeado para a armazenagem, de onde parte dele é utilizado na torre de secagem de ar e parte volta para o sistema de absorção.⁹

Este processo envolve o controle rigoroso das composições das correntes, com a temperatura e pressão ajustadas para otimizar as reações e garantir a eficiência do processo. Além disso, a troca de calor entre as correntes também é um aspecto importante, com trocadores de calor sendo usados para aquecer ou resfriar as correntes de acordo com as necessidades do processo.

Conclusões

Em se tratando da temática supracitada nota-se, portanto, a importância do ácido sulfúrico em diversos processos da indústria em processos petroquímicos, além do uso como insumo para produção de fertilizantes. Nesse contexto, é perceptível a complexidade do processo produtivo do produto de interesse e como o processo de contato descrito como parte fundamental para obtenção do H₂SO₄ líquido. O processo químico conta com reações químicas específicas desejadas e condições para tal além de operações unitárias para cada etapa.

Além do estudo realizado, é fundamental avaliar os custos econômicos da planta, além de uma análise termodinâmica detalhada avaliando gastos energéticos e uma análise exergética. Para esse fim pode-se utilizar softwares

como o Aspen Plus ou Aspen Hysys em simulações para as análises da planta. Também é importante realizar análise de ciclo de vida para validar questões ambientais de todo processo produtivo.

Contribuições por Autor

A resenha sobre o artigo em referência e a inclusão de algumas observações são de Pedro P. Marques.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Agradeço ao PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SESU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) por todo o apoio concedido através do Programa de Educação Tutorial. Ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

Notas e referências

- 1 M. King, W. Davenport, M. Moats, *Sulfuric Acid Manufacture. Analysis. Control and optimization*, 2013.
- 2 M.B. CONSULTORES, Manual de Ácido Sulfúrico. Disponível em: <https://h2so4.com.br/downloads/Download/Tecnologia/MBC/MB%20CONSULTORES%20-%20Manual%20de%20Acido%20Sulfurico%20.pdf>
- 3 M. Sousa, Otimização do Sistema de Conversão de uma Fábrica de Ácido Sulfúrico. Sistemas de Processos Químicos em Informática, Dissertação de Mestrado, *Universidade Estadual de Campinas*, 1996.
- 4 U. G. Ferreira, S. Neiro, Simulação e Análise Exergética de uma Planta de Produção de Ácido Sulfúrico por Duplo Contato utilizando o Simulador de Processos Unisim Design, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, *XL Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Universidade Federal de Uberlândia*, 2022.

- 5 K. B. Grievink, Dynamic modeling and process optimization of na industrial sulfuric acid plant, *Chemical Engineering Journal*, 2010, **158**, 240–249.
- 6 A. Morgato, O Enxofre e o Ácido Sulfúrico, *Universidade de Porto*, 2012.
- 7 W. Seider, D. Seader, S. Gani, K. NG, *Product and process design principles. Synthesis, analysis and evaluation*, 2017, 287-309.
- 8 R. Turton, J. Bhattacharyya, W. Whiting, *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*, 2018, 245-248.
- 9 G. Boroumandjazi, B. Rismanchi, R. Saidur, A review on exergy analysis of industrial sector, *Renewable and Sustainable Energy*, 2013, **27**, 198-203.