

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



Realização



TÍTULO DO TRABALHO:

Estudo de Materiais Adsorventes para a Desidratação do Gás Natural

AUTORES:

Yasmin Teles Barboza^{1,2,3}, Marília Rafaele Oliveira Santos^{2,3}, Matheus Moura Oliveira^{2,3}, Juliana Faccin De Conto^{2,3}, Silvia Maria Egues², Elton Franceschi³

INSTITUIÇÃO:

¹ Engenharia de Petróleo/Universidade Tiradentes / ² Laboratório de Síntese de Materiais e Cromatografia - LSINCROM/ Instituto de Tecnologia e Pesquisa – ITP / ³ Núcleo de Estudos em Sistemas Coloidais - NUESC/Instituto de Tecnologia e Pesquisa – ITP

ESTUDO DE MATERIAIS ADSORVENTES PARA DESIDRATAÇÃO DO GÁS NATURAL

Abstract

In the current scenario, the oil and natural gas sector plays a predominant role in today's global energy supply, with about 80% of the world's primary energy coming from fossil fuels. In the midst of these fuels, natural gas is the effective energy source as it is able to perform activities using less energy. Thus, the consumption and commercialization of natural gas has been growing steadily in recent decades, thus strengthening it as a source of energy. Under natural conditions, NG is confined in deep reservoirs in a form associated or not with oil, and is formed by the degradation of accumulated organic matter for millions of years. NG is composed of a mixture of gaseous hydrocarbons being formed almost entirely of methane and other low content impurities. Among the impurities in natural gas, water is the most common, since in contact with gaseous hydrocarbons it is able to form hydrates, to cause corrosion, depletion and localized losses. Thus, the removal of this water is still necessary on the platforms and a method applied in the NG conditioning process is dehydration, when the water vapor is separated from it. Among the existing dehydration methods is adsorption, using desiccant solids to capture water vapor. Adsorption presents itself as a more advantageous separation method than the others, since it presents a greater ease of separation, application of materials with good adsorption capacity, becoming a very promising and applicable route. The literature reports some solid adsorbents that can be used in NG dehydration processes, eg, zeolites, silicas membranes, MOFs, among others. In order to ensure proper operation during the process, these adsorbents must have certain characteristics, such as high selectivity, high porosity, good adsorption capacity, thermal stability, easy regeneration, and good mechanical resistance, thus ensuring that. The material can be used for dehydration. In short, this work aims to study different types of adsorbents that can be used to remove water present in NG, as well as highlight the adsorption capacity of different classes of materials and show which promising results of water removal from natural gas to be tested in the oil industry.

1. Introdução

O Gás Natural (GN) é um combustível fóssil, não renovável, composto por hidrocarbonetos gasosos, em sua maioria metano (CH_4), e alguns contaminantes, o qual se encontra aprisionado em rochas sedimentares (THOMAS, 2004). Entretanto, a presença desses contaminantes no gás natural pode acarretar muitos problemas. Por exemplo, a presença de vapor de água no gás natural contendo CO_2 e H_2S pode formar ácido, levando à corrosão de tubulações e equipamentos; pode causar entupimento nas linhas, devido a formação de hidratos; redução da eficiência de combustão; diminuição da capacidade de transmissão do oleoduto (FARAG *et al.*, 2011; RAHIMPOUR *et al.*, 2013; ALEGHAFOURI E DAVOUDI, 2018).

Desta forma, o gás natural necessita de alguns processos de tratamento ou condicionamento para que as especificações da indústria, segurança e transporte sejam atendidas. Sendo assim, para atender as especificações das empresas, é imprescindível a remoção da água do gás natural (ROUZBAHANI *et al.*, 2014). Uma metodologia aplicada no processo de condicionamento do GN é a desidratação, quando o vapor de água é separado do mesmo. Dentre os diversos métodos existentes, a desidratação pode ocorrer através da adsorção, utilizando-se de sólidos dessecantes para a captura do vapor d'água. A adsorção se apresenta como um método de separação mais vantajoso que os demais, pois, apresenta uma maior facilidade de separação, alta seletividade, poder de regeneração do adsorvente, consequentemente, possibilita vários ciclos de adsorção, o que torna uma técnica bastante promissora e aplicável.

Atualmente, o cenário brasileiro apresenta muitas dificuldades na produção e exportação do óleo, devido a necessidade de uma metodologia apropriada para o tratamento do gás. O processo de desidratação utilizando sólidos dessecantes vem sendo estudado para remoção da água do GN. Desse modo, este trabalho tem por objetivo estudar os diferentes tipos de materiais sólidos que podem ser utilizados na adsorção de água (desidratação) do Gás Natural.

1.1 Gás Natural

Estima-se que até 2050 ocorra um aumento na demanda de Gás Natural (GN), o qual irá se consolidar como “combustível ponte” na geração de energia elétrica. Dentre os combustíveis fósseis

existentes, o GN se destaca por ser considerado o mais limpo e rico em hidrogênio, além de possuir alta eficiência na geração de energia elétrica (SANTOS *et al.*, 2017). Além disso, destaca-se por possuir ampla aplicabilidade comercial, o qual é utilizado como combustível doméstico, comercial e industrial. O GN é largamente utilizado na fabricação de vidros e cerâmicas brancas, bem como é a principal matéria prima e insumo energético para fertilizantes, plásticos, resinas, dentre outros (AGUIAR E COELHO, 2017). Desta forma, o consumo e a comercialização do gás natural (GN) vêm crescendo continuamente nas últimas décadas, fortalecendo-se, assim, como fonte de energia (SEVERIANO, 2018).

Segundo a ANP, o Gás Natural é uma substância composta por hidrocarbonetos que, em condições atmosféricas normais, se encontra no estado gasoso. Assim como o petróleo, o gás natural é resultado da degradação da matéria orgânica depositada junto com os sedimentos que estão acumulados em rochas há milhares de anos (THOMAS, 2004). O mesmo pode ser encontrado na forma associada ou não ao petróleo. Em sua forma associada, o gás se encontra dissolvido no petróleo, formando uma capa gasosa, e, nestes casos, o próprio gás é utilizado para manter a pressão do reservatório durante a sua produção inicial. Já quando está em sua forma não associada, o gás se encontra livre de fluidos líquidos, tendo sua concentração formada basicamente por gás e na camada rochosa. No Brasil, geralmente, o tipo de gás encontrado é o associado (ANP, 2019).

Quando extraído dos reservatórios petrolíferos ou gasíferos, o gás é formado essencialmente por grandes teores de metano (CH_4) e, em seguida, por menores teores de etano (C_2H_6) e propano (C_3H_8). Além dessa composição, encontra-se presente no gás pequenas quantidades de diluentes e contaminantes, tais como nitrogênio, água, ácido sulfídrico, dióxido de carbono, entre outros (THOMAS, 2004). Dentre os contaminantes citados, a água é um dos mais comuns e indesejáveis do gás, uma vez que pode ocorrer a formação de hidratos, quando em ambiente favorável, irão bloquear a passagem do fluido mediante a sua acumulação. Tendo em vista que o gás é transportado em dutos de longa distância, os hidratos são formados quando há a junção de fatores como baixa temperatura, alta pressão, água livre, gás ou líquido durante o escoamento. Além disso, a água no gás traz consigo uma série de problemas, tais como corrosão em tubos, depleção, perdas localizadas e de transmissão de gases (SANTOS *et al.*, 2017; AMBRÓSIO, 2014).

Segundo DAMASCENA (2018), a maior fração do gás sempre se encontra próximo ou na saturação da água, em condições de pressão e temperatura de produção. O excesso de gás se vaporiza e forma condensados, exceto se ocorrer alguma mudança nas condições de produção, as quais quando associadas a gases ácidos, elevam o teor de água presente no gás. A fim de atender as especificações de mercado, segurança e transporte, estima-se que a concentração máxima de água presente no gás deve ser de 1775 ppm (SEVERIANO, 2018; DAMASCENA, 2018). Deste modo, tratamentos precisam ser feitos no gás com o objetivo de remover a água presente no mesmo e uma das técnicas aplicadas para o seu condicionamento é a desidratação.

1.2 Desidratação do Gás Natural

A desidratação é um tratamento pelo qual o gás é submetido, de modo a remover ou reduzir o teor de contaminantes, que, neste caso, é a água (THOMAS, 2004) a fim de reduzir a temperatura de condensação da água mediante ao fluxo (FARAG *et al.*, 2011). Obrigatoriamente o gás deve passar pelo processo de desidratação durante o seu condicionamento, uma vez que todo gás produzido nacionalmente deve seguir as condições exigidas pela ANP, de acordo com a Resolução nº 16/2008.

Existem diversas técnicas que podem ser aplicadas para a desidratação do gás, porém dois métodos são os mais utilizados atualmente pela indústria petrolífera: absorção por líquidos e adsorção por sólidos dessecantes (FARAG *et al.*, 2011).

1.2.1 Tecnologias utilizadas na Desidratação

A absorção é uma metodologia aplicada na remoção da água através do borbulhamento de gás natural em contracorrente com líquidos que tenham afinidade com a água. Existem vários absorventes líquidos que podem ser usados para absorver a água de gases naturais, porém os glicóis, mais especificamente o trietilenoglicol (TEG), são os mais usuais por apresentarem boa capacidade de absorção de água, baixa pressão de vapor, fácil regeneração, baixa solubilidade e baixo custo

operacional. (GANDHIDASAN *et al.*, 2001, THOMAS, 2004). Segundo GOMIDE (1988), a adsorção é um processo de transferência de massa de compostos do tipo sólido-fluido, em que o sólido concentra em sua superfície determinadas substâncias fluidas. A adsorção gás-sólido ocorre quando o gás entra em contato com um sólido, fazendo com o que as moléculas gasosas entrem em contato com a superfície sólida formando uma camada na superfície da fase condensada.

A adsorção por sólidos dessecantes se apresenta como um método de separação mais vantajoso em relação aos processos convencionais empregados na remoção de impurezas do gás natural (isto é, absorção de amina e destilação criogênica), pois, apresenta uma maior facilidade de separação, bem como produtos com maior pureza, aplicação de materiais de baixo custo, alta eficiência, baixo consumo de energia e simplicidade (SHALELI *et al.*, 2018; SCHEER, 2002). É uma técnica bastante utilizada em escala industrial por conta da sua eficiência de remoção, como por exemplo, separação de gases (TSENG *et al.*, 2015) remoção de contaminantes (MATIAS *et al.*, 2015), desumidificação de gases (SCHNEIDER, 2008), dentre outras aplicações.

A remoção de água através da adsorção é feita através de sólidos dessecantes que, por sua vez, de modo geral, estes materiais apresentam, dentre outras características, grande área superficial e afinidade pela água, além da capacidade do adsorvente de ser regenerado pela ação do calor e ser quimicamente inerte frente a fase de contato (AMBRÓSIO, 2014). Apesar das condições citadas, de acordo com CAMPBELL (1984), os adsorventes precisam atender requisitos que os tornam mais indicados para determinadas aplicações, como: alta capacidade de adsorção de água quando em equilíbrio, diminuindo, assim, a massa de adsorvente utilizada no processo, apresentar elevada seletividade à água que deseja remover e facilidade de regeneração a temperatura e pressão.

2. Adsorventes Sólidos utilizados na Desidratação

A literatura apresenta uma vasta gama de materiais que podem ser utilizados como adsorventes, dentre eles, os mais utilizados são as sílicas (AMBRÓSIO, 2014; LAKHI *et al.*, 2016), MOFs (RAMOS *et al.*, 2014), zeólitas (SALEHI *et al.*, 2018; AREFI POUR *et al.*, 2015), peneiras moleculares (MONDAL *et al.*, 2012; DANTAS *et al.*, 2015). Como foi citado acima, é preciso escolher adsorventes que se adequem aos requisitos das indústrias, gerando processos adsorptivos mais sustentáveis, cíclicos e regenerativos.

2.1 Sílica

A sílica é um material mesoporoso que vem se destacando bastante nos processos de adsorção por conta da sua estrutura de poro uniforme, grande área de superfície e tamanho de poro bem definido (WANG *et al.*, 2015). A sílica é um material inorgânico, cuja composição química é de dióxido de silício (SiO_2). Estruturalmente falando, ela é formada por várias ligações de grupos siloxanos (Si-O-Si) na parte interior e, na parte exterior é formada por grupos silanóis (Si-OH), o que permite que modificações sejam realizadas em sua estrutura, melhorando, assim, a sua eficiência na adsorção. Suas características morfológicas podem ser definidas como cristalina ou amorfa, enquanto as propriedades físico-químicas desses materiais sólidos são definidas de acordo com o diâmetro médio de poros: microporosa (< 2 nm), mesoporosa (2 a 50 nm) ou macroporosa (SANTOS, 2018).

As nanoestruturas à base de sílica despertaram interesse na área acadêmica e industrial, pois até hoje são alvos de estudos para diversas aplicações como catalisadores (POLSHETTIWAR e VARMA, 2008), dispositivos ópticos (DUNN e ZINK, 2007), adsorventes (YU *et al.*, 2013; ZHU *et al.*, 2014), etc. Conforme MELÉNDEZ-ORTIZ *et al.* (2016), a sílica se apresenta como um adsorvente promissor, pois tem resistência a solventes orgânicos, boa capacidade de adsorção, alta área superficial e um maior volume de poros. De acordo com LENZA e colaboradores (2015), a síntese de sílica através do processo sol-gel é o mais utilizado, isso porque, segundo CAMPBELL (1984), é um material recomendado para a adsorção de qualquer substância que possa ser adsorvida pelas ligações de hidrogênio, por apresentar diversas vantagens, tais como, menor perda de carga do gás, maior resistência ao atrito e carregamento do leito poroso.

2.2 MOFs (Redes Metalorgânicas)

Atualmente, as estruturas metalorgânicas (MOFs) ganharam a atenção de diversos estudiosos por se mostrarem adsorventes eficientes. MOFs são estruturas cristalinas porosas bem definidas, e com cavidades moleculares, as quais possuem um aglomerado de metais interconectados à ligantes orgânicos devido a sua tenacidade. Os MOFs se destacam frente aos adsorventes comuns por possuírem propriedades únicas, como solvente atuante com molde na síntese, modificação na superfície do poro, adsorção seletiva de moléculas, grande porosidade e geometria de poros, além da tenibilidade (LI *et al.*, 2016).

Suas características texturais servem de parâmetro de controle durante o processo, tendo em vista suas ligações do tipo pi, hidrogênio, eletrostática e do tipo ácido-base, dependem do tipo de contaminante e da estrutura da MOF escolhida. RAMOS e colaboradores (2014) afirmam que esses materiais podem ser aplicados como sensores químicos, sítios metais ativos, catalisadores (RAMOS *et al.*, 2014). No entanto, essas redes metalorgânicas apresentam algumas limitações como baixa estabilidade a altas temperaturas, umidade das condições experimentais e alto custo (LI *et al.*, 2016).

2.3 Zeólitas

Zeólitas são compostos cilíndricos, granulares ou esféricos formados por alumínio e silício que apresentam excelentes propriedades quando aplicados à desidratação. São obtidos naturalmente ou na forma sintética, apresentam uma estrutura cristalina muito resistente, o que o leva a atuar em elevadas temperaturas. Esses materiais possuem uma alta capacidade de adsorção, bem como são altamente seletivos a água (SALEHI *et al.*, 2018; AREFI POUR *et al.*, 2015).

A utilização dos alumino-silicatos possibilita a obtenção de um gás natural com teor de água inferior a 0,1 ppm, pois são materiais que apresentam afinidade por compostos polares, destacando-se frente aos demais materiais adsorventes porque também são capazes de remover impurezas como, por exemplo, H₂S (SALEHI *et al.*, 2018). A adsorção das zeólitas são baseadas na forma estrutural, polaridade e no tamanho das suas moléculas, ou seja, moléculas pequenas são adsorvidas de maneira mais facilitada nos sítios ativos do que moléculas maiores. Apesar de apresentarem um ponto de orvalho extremamente baixo durante o condicionamento do GN, são suscetíveis a envenenamento e apresentam elevada perda de carga (AMBRÓSIO, 2014; AREFI POUR *et al.*, 2015).

2.4 Peneiras Moleculares

Peneiras moleculares são formadas por materiais sólidos que apresentam características a alta porosidade e cavidades cristalinas de dimensões uniformes, tais como, zeólita, carvões ativados, sílica, alumina ativada, óxidos de metal, naturais ou sintéticos (DANTAS *et al.*, 2015). As peneiras são recomendadas para sistemas de adsorção, mais especificamente de gases, os quais envolvem variáveis como elevada temperatura, pressão e seletividade. Esse processo é baseado na remoção de um ou mais componentes indesejáveis de uma mistura gasosa com auxílio de uma superfície sólida. Essa técnica consiste na interação das forças intermoleculares entre os gases e as superfícies dos materiais. (MIESEN e SHUAI, 1997; MONDAL *et al.*, 2012).

Na indústria petrolífera, a demanda por esses materiais é maior no que se diz respeito à desidratação e captura de CO₂. São utilizados em coluna de leito fixo preenchida por adsorventes em formato de *pellets*, em que um fluxo de gás atravessa esses adsorventes retirando compostos indesejáveis devido a seletividade do material adsorvente. Depois de um determinado tempo, a coluna estará saturada e é necessário que se faça a remoção deste leito, regenere esse adsorvente e, assim, reutilizá-lo. Salienta-se que depois de regenerado, o adsorvente possui praticamente a mesma eficiência (MONDAL *et al.*, 2012).

3. Aplicação dos Adsorventes Sólidos utilizados na Desidratação

Com base no objetivo do presente trabalho, a seguir, serão explanados estudos sobre os dessecantes sólidos (sílica, zeólitas, carvão ativado, MOFs) que foram utilizados na remoção da água presente no gás natural, explicitando a capacidade de adsorção desses materiais na desidratação para serem testados na indústria de petróleo e, no final deste material, após esse estudo comparativo, será discutido qual material melhor se destaca para uso industrial.

GANDHIDASAN *et al.*, (2001), tiveram como objetivo estabelecer um procedimento de projeto para desidratar um milhão de m³ padrão de gás natural por dia utilizando a sílica-gel como um sólido dessecante, avaliando parâmetros como pressão e temperatura. Neste estudo, foram avaliadas propriedades dessecantes básicas das peneiras moleculares, sílica-gel e alumina, bem como a área superficial, diâmetro e volume de poros, resistência mecânica, entre outros, de cada material. Com base nisso, foi observado que a sílica-gel se sobressaía dentre as demais, uma vez que apresenta uma alta capacidade de adsorção, fácil regeneração, atividade não catalítica para determinadas reações, além de possuir uma alta capacidade de hidrocarbonetos. Observou-se que quanto menor a pressão/temperatura inserida no sistema, menor seria a quantidade de massa do sólido dessecante.

TAKBIRI e colaboradores (2013) estudaram a eficiência das aluminas ativadas nano-estruturadas e alumina ativada por nanoestrutura de sílica na remoção da água presente no gás natural. Os autores observaram a capacidade de sorção dos adsorventes a 60% e 10% de umidade relativa. Fazendo um comparativo, foi possível observar que a amostra ativada com sílica obteve uma sorção de 5,1% a 10% de umidade e de 15,1% a 60% de umidade, enquanto as aluminas não híbridas obtiveram valores inferiores. Esse aumento na capacidade de sorção ocorreu por causa da acidez presente na composição da sílica, devido à adição do agente percussor durante a síntese, como também devido à esfoliação, a qual aumentou o contato dos poros com o gás úmido.

O trabalho apresentado por FURUKAWA e colaboradores (2014) explora a capacidade de adsorção de água de 23 materiais sólidos porosos. Estes dessecantes são as estruturas metal-orgânicas (MOFs), a sílica e zeólitas. Por sua vez, os autores avaliaram o desempenho dos materiais com base na sua capacidade de absorção e reciclo, estabilidade do material. Através dos resultados, perceberam que o MOF-801-P, o MOF-802, o MOF-841, o UiO-66, o CAU-10 e a sílica MCM-41 apresentam os melhores resultados para o processo de adsorção. São materiais estáveis à água, não perdem a capacidade de adsorção após cinco ciclos de adsorção/dessorção e são facilmente regenerados à temperatura ambiente.

AMBRÓSIO (2014) teve como objetivo apresentar sistemas e cenários de desidratação do gás natural utilizando peneiras moleculares compostas por zeólitas baseados em diferentes processos de adsorção. O autor afirma que esse tipo de adsorvente se destaca entre os demais na desidratação do gás natural por ser uma tecnologia madura e comercialmente disponível mundialmente e em comparação com outros dessecantes. Na metodologia aplicada, o autor estudou o efeito da temperatura e pressão na desidratação do gás e, com base nisso, em um ciclo de 5000s a temperatura oscilou entre 25 a 55 °C e pressão entre 67,5 a 82,5 bar. Como resultado, verificou-se que em ambas as condições a redução de água presente no gás girou em torno de 98,7%.

4. Conclusões

O estudo consistiu em estudar diferentes tipos de adsorventes que podem ser utilizados para a remoção da água presente no gás natural, assim como destacar a capacidade de adsorção dos diferentes tipos de dessecantes sólidos, enaltecendo aqueles que apresentam resultados promissores de remoção de água para serem testado no ramo petrolífero. À vista disso, é sabido que para um adsorvente possa ser utilizado na desidratação do GN, este deve possuir algumas propriedades como baixa densidade, baixo custo, alta área superficial e volume de poro, hidrofobicidade, boa estabilidade e fácil regeneração, afim de suportar os ciclos de adsorção/dessorção.

Por sua vez, as características químicas de um material podem ser alteradas mediante modificações em sua estrutura, fazendo com que a escolha final do material atenda aos requisitos impostos pela indústria. De acordo com os trabalhos apresentados e estudos feitos durante a realização deste trabalho, o material escolhido como sólido dessecante que mais se destaca é a sílica, visto que a mesma apresenta baixo custo, boa seletividade, alta capacidade de adsorção e regeneração, e fácil modificação na superfície.

5. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. As instituições Fapitec, CNPq, Petrobras, UNIT e ITP pela oportunidade de desenvolvimento do trabalho.

6. Referências Bibliográficas

- AMBRÓSIO A. A. P. G.O.; Análise de desempenho de desidratação de gás natural por adsorção em peneiras moleculares. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ, 2014.
- AGUIAR, M. F.; COELHO, G. L. V. Adsorption of sulfur compounds from natural gas by different adsorbents and desorption using supercritical CO₂, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 5, p. 4353–4364, 2017.
- ALEGHAFOURI A.; DAVOUDI M. Modeling and simulation of a pressure–temperature swing adsorption process for dehydration of natural gas, *Adsorption*, 24, p. 121 – 133, 2018.
- ANP. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. Rio de Janeiro, ano 2019.
- AREFI POUR, A.; SHARIFNIA, S.; SALENI, R. N.; GHODRATI, M. Adsorption separation of CO₂/CH₄ on the synthesized NaA zeolite shaped with montmorillonite clay in natural gas purification process, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, v. 36, p. 630–643, 2016.
- CAMPBELL, John M. Gas Conditioning and Processing – Volume 2 – Equipment Modules. Seventh Edition. Oklahoma. 1984.
- DAMASCENA, M. A. Aplicação da espectroscopia de infravermelho próximo (NIR) para quantificação do teor de água em sistemas modelo de gás natural a alta pressão, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos, Universidade Tiradentes, Aracaju, SE, Brasil, 2018.
- DANTAS, T. C. M.; JUNIOR, F. V. J.; SANTOS, A. P. B.; BEZERRA, F. A.; ARAUJO, A. S.; GUEDES, A. P. M. A. CO₂ Adsorption on Modified Mg-Al-Layered Double Hydroxides. *Adsorption Science & Technology*, v. 33, n. 2, p 165-173, 2015.
- DUNN, B.; ZINK, J. I.; Acc. Chemical. Rev. 2007, 40, 747.
- FARAG, H. A. A.; EZZAT, M. M.; AMER, H.; NASHED, A. W. Natural gas dehydration by desiccant materials, *Alexandria Engineering Journal*, v. 50, p. 431–439, 2011.
- FURUKAWA, H.; GANDARA, F.; ZHANG, Y. B.; JIANG, J.; QUEEN, W. L.; HUDSON, M. R.; YAGHI, O. M. Water Adsorption in Porous Metal–Organic Frameworks and Related Materials, *Journal American Chemical Society*, 136, p. 4369 – 4381, 2014.
- GANDHIDASAN, P.; AL-FARAYEDHI, A. A.; MUBARAK, A. A. Dehydration of natural gas using solid desiccants. *Energy*, v. 26, p. 855–868, 2001.
- GOMIDE, R. Operações Unitárias: Operações de Transferência de Massa. 1ª ed. São Paulo: Dag Gráfica e Editora LTDA., 1988 v. 4, p. 311 – 315.
- GRANDE, C. A.; ROCHA, L. A. M.; ANDREASSEN, K. A. Separation of CO₂/CH₄ using carbon molecular sieve (CMS) at low and high pressure, *Chemical Engineering Science*, v. 164, p. 148–157, 2017.
- LAKHI, K. S.; CHA, W. S.; CHOY, J. H.; EJJI, M. A.; ABDULLAH, A. M.; ENIZI, A. M. A.; VINU, A. Synthesis of mesoporous carbons with controlled morphology and pore diameters from SBA-15 prepared through the microwave-assisted process and their CO₂ adsorption capacity, *Microporous and Mesoporous Materials*, v. 233, p. 44-52, 2016.
- LENZA, R. F. S.; NUNES, E. H. M.; VASCONCELOS, D. C. L.; VASCONCELOS, W. L. Preparation of sol-gel silica samples modified with drying control chemical additives, *Journal of Non-Crystalline Solids*, v. 423-424, p. 35-40, 2015.
- LI, X; GUO, W; LIU, Z; WANG, R; LIU, H. Fe-based MOFs for efficient adsorption and degradation of acid orange 7 in aqueous solution via persulfate activation. *Applied Surface Science*, v. 369, p. 130–136, 2016.
- MATIAS, T; MARQUES, J; QUINA, M. J; FERREIRA, L. G; VALENTE, A. J. M; PORTUGAL, A, DURÃES.; Silica-based aerogels as adsorbents for phenol-derivative compounds. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, xxx, p. xxx-xxx, 2015.

MELÉNDEZ-ORTIZ H. I.; PUENTE-URBINA B.; CASTRUITA-DE LEON G.; MATA-PADILLA J. M.; GARCÍA-URIOTEGUI L. Synthesis of spherical SBA-15 mesoporous silica. Influence of reaction conditions on the structural order and stability, *Ceramics International*, 42, p. 7564–7570, 2016.

MIESEN, A.; SHUAI, X.. Research and development issues in CO₂ capture. *Energy Convers. Mgrnt*, v. 38, n. 96, p. 37-42, 1997.

MONDAL, M. K.; BALSORA, H. K.; VARSHENEY, P. Progress and trends in CO₂ capture/separation Technologies: A review. *Elsevier Ltd. Energy*, v.46, n. 1, p. 431-441, 2012.

POLSHETTIWAR, V.; VARMA, R. S.; *Tetrahedron* 2008, 64, 4637.

RAHIMPOUR M. R.; SAIDI M.; SEIFI M., Improvement of natural gas dehydration performance by optimization of operating conditions: A case study in Sarkhun gas processing plant, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 15, p. 118 – 126, 2013.

RAMOS, A. L. D.; TANASE, S.; ROTHENBERG, G.; Redes metalorgânicas e suas aplicações em catálise. *Química Nova*, v. 37, p. 123-133, 2014.

ROUZBAHANI A. N.; BAHMANI, M.; SHARIATI, J.; TOHIDIAN, T; RAHIMPOUR M. R. Simulation, optimization, and sensitivity analysis of a natural gas dehydration unit, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 21, p. 159 – 169, 2014.

SALEHI, R. N.; SHARIFNIA, S.; RAHIMPOUR, F. Natural gas upgrading by selective separation on zeotype adsorbents, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, v. 54, p. 37–46, 2018.

SANTOS, M. R. O.; Síntese e caracterização de sílica mesoporosa sba-15 modificada com aptes: comparação de métodos de síntese e aplicação na adsorção de fenol assistido por ultrassom. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade Tiradentes, Aracaju/SE.

SANTOS, M. G. R. S.; CORREIA, L. M. S.; MEDEIROS, J. L.; ARAÚJO, O; Q; F. Natural gas dehydration by molecular sieve in offshore plants: Impact of increasing carbon dioxide content, *Energy Conversion and Management*, 2017.

SCHEER, A. P. Desenvolvimento de um sistema para simulação e otimização do processo de adsorção para avaliação da separação de misturas líquidas. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Química/UNICAMP, Campinas, Brasil, 2002.b

SCHNEIDER, E. L.; Adsorção de composto fenólico sobre carvão ativado. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Química) – Universidade Estadual do oeste do Paraná, Toledo – PR, 2008.

SEVERIANO, F. M. C., Estudo da Desidratação do Gás Natural por Absorção. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal Do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil, 2018

TAKBIRI, M.; JOZANI, K. J.; RASHIDI, A. M.; BOZORGZADEH, H. R. Preparation of nanostructured activated alumina and hybrid alumina–silica by chemical precipitation for natural gas dehydration, *Microporous and Mesoporous Materials*, 182, p. 117 – 121, 2013.

THOMAS, J.E. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. 2ªEdição, Editora Interciência: Rio Janeiro, 2004.

TSENG, R. L; WU, F. C; JUANG, R. S; Adsorption of CO₂ at atmospheric pressure on activated carbons prepared from melamine-modified phenol-formaldehyde resins, *Separation and Purification Technology*, 140, p. 53-60, 2015.

WANG, X.; LU, M.; WANG, H.; PEI, Y.; RAO, H. e DU, X. Three-dimensional graphene aerogels-mesoporous silica frameworks for superior adsorption capability of phenols. *Separation and Purification Technology*, 153, 7-13, 2015.

YU, W. H.; FANG, W.; TONG, D. S.; SHAO, P.; XU, T. N.; ZHOU, C. H.; *Biochem. Eng J.* , 70-97. 2013

ZHU, J.; XIN, F.; HUANG, J.; DONG, X.; LIU, H. Adsorption and diffusivity of CO₂ in phosphonium ionic liquid modified silica. *Chemical Engineering Journal*, v. 246, p. 79–87, 2014.