

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS – UEA
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA – EST
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

JULIA VICTORIA DE SOUSA PESSOA

AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE GERAÇÃO DE NITROGÊNIO
ATRAVÉS DO AR COMPRIMIDO

MANAUS

2021

JULIA VICTORIA DE SOUSA PESSOA

**AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE GERAÇÃO DE NITROGÊNIO
ATRAVÉS DO AR COMPRIMIDO**

**Monografia apresentada ao Curso de Graduação
em Engenharia Química da Escola Superior de
Tecnologia da Universidade do Estado do
Amazonas, para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química.**

Orientador: Prof. Dr. Jefferson Luiz Grangeiro da Silva

Coorientador: Profa. Dra. Regina Yanako Moriya

MANAUS

2021

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.

P475a Pessoa, Julia Victoria de Sousa
Avaliação de eficiência do processo de geração de Nitrogênio através do ar comprimido. / Julia Victoria de Sousa Pessoa. Manaus : [s.n], 2021.
54 f.: color.; 1 cm.

TCC - Graduação em Engenharia Química -
Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2021.
Inclui bibliografia
Orientador: Silva, Jefferson Luiz Grangeiro da
Coorientador: Moriya, Regina Yanako

1. Adsorção. 2. Dessorção. 3. Eficiência. 4. PSA. I. Silva, Jefferson Luiz Grangeiro da (Orient.). II. Moriya, Regina Yanako (Coorient.). III. Universidade do Estado do Amazonas. IV. Avaliação de eficiência do processo de geração de Nitrogênio através do ar comprimido.

Elaborado por Jeane Macelino Galves - CRB-11/463

JULIA VICTORIA DE SOUSA PESSOA

**AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE GERAÇÃO DE NITROGÊNIO
ATRAVÉS DO AR COMPRIMIDO**

**Monografia de Conclusão de Curso para obtenção do título de Engenheiro, Habilitação em
Engenharia Química – Escola Superior de Tecnologia, Universidade do Estado do
Amazonas**

Banca Examinadora:

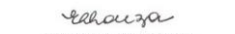


Prof. Dr. Jefferson Luiz Grangeiro da Silva – Orientador



BEATRIZ GONÇALVES DE OLIVEIRA Digitally signed by BEATRIZ GONÇALVES DE OLIVEIRA
Date: 2021.12.20 07:46:45 -04'00'

Eng. Beatriz Gonçalves de Oliveira



Prof.ª Erica Simplicio de Souza
Professor Adjunto
Curso de Engenharia Química
Escola Superior de Tecnologia - EST
Universidade do Estado do Amazonas - UEA

Profa. Dra. Erica Simplicio de Souza – UEA

Conceito: Aprovado

Manaus, 13 de dezembro de 2021.

Dedico este trabalho aos meus pais,
João Monteiro Pessoa Neto e
Maria da Paz Xavier de Sousa

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, o apreço pela ciência e por me guiar até o presente momento.

Agradeço a minha família, por serem meus maiores exemplos de dedicação e amor infinito que me tornaram a mulher e profissional que sou hoje.

Agradeço ao meu pai João Monteiro, por todo carinho, conselhos e exemplos de sabedoria. Você é a minha maior inspiração e meu melhor amigo.

Agradeço a minha amiga, Fernanda Rebeca Ribeiro por todas as conversas, incentivos, conselhos e momentos de reflexão, que me fazem querer ser uma pessoa melhor.

Agradeço ao meu companheiro de vida, Rubens Fernandes, por todo o apoio, amor, incentivo e carinho ao longo de minha jornada na graduação.

Agradeço aos meus companheiros de turma, Ana Beatriz, Catherinne Pimentel, Igor Santiago, Thayná Marães, Kennedy Silva e Verônica Chaves, por todos os conselhos e momentos de apoio durante toda esta jornada. Considero-lhes grandes engenheiros e minhas maiores inspirações e fontes de apoio.

Agradeço aos professores Jefferson Luiz e Regina Yanako, por toda a sua ajuda durante o desenvolvimento deste projeto, pela amizade e pelas oportunidades de crescimento ao longo do curso.

Agradeço aos meus amigos proporcionados pela indústria, Aldeir Aguiar, Alexsandro Pierri, Beatriz Oliveira, Fabielle Souza e Jefferson Filho pelos bons momentos vividos e por todos os ensinamentos e oportunidades de crescimento pessoal e profissional.

Agradeço a todos os amigos, professores e colegas da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas por todo o carinho, pela amizade, e pelo apoio dados a mim ao longo dos anos. Nunca serão esquecidos.

RESUMO

Em Manaus, existe grande demanda de equipamentos condicionadores de ar devido às altas temperaturas. Os processos produtivos desses equipamentos possuem grande dependência de fornecedores de nitrogênio gasoso, visto que o mesmo é utilizado como gás de teste para estes equipamentos. Para evitar isso, os processos de geração de nitrogênio passam a ser desenvolvidos através do ar comprimido, como as usinas de geração de nitrogênio por PSA- *Pressure Swing Adsorption*. Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho consiste na avaliação da eficiência das colunas de adsorção e dessorção envolvidas no processo de geração de nitrogênio através do mecanismo de adsorção por PSA do ar comprimido. Esta análise será feita por meio da obtenção das curvas de ruptura e dessorção experimentais. O equipamento utilizado foi a planta PSA JPN-150 adquirida por uma indústria da Zona Franca de Manaus. Na avaliação feita, foram utilizadas vazões de alimentação constante de 200, 300, 365, 400 e 500 m³/h. Os parâmetros foram fixados conforme os dados estabelecidos pelo fabricante: massa de adsorvente 2500g, temperatura do leito 65°C. Para cada vazão foram calculados a capacidade total do leito (t_t), capacidade utilizável do leito (t_u), eficiência de adsorção do leito (n) e eficiência de dessorção do leito (E). Os resultados mostraram que a vazão de 365 m³ /h foi a que obteve uma maior eficiência de adsorção (aproximadamente 98%) e dessorção (100%). Foi possível inferir que o equipamento opera em estado ótimo na mesma vazão estabelecida pelo fabricante. Portanto, os resultados obtidos permitem concluir que no estudo do processo de geração de nitrogênio através da adsorção do ar comprimido utilizando a tecnologia PSA, por meio da utilização do equipamento PSA JPN- 150, foi possível a obtenção de nitrogênio em excelentes taxas de pureza e operação com altos percentuais de adsorção e dessorção.

Palavras-chave: Adsorção, Dessorção, Eficiência, PSA.

ABSTRACT

In Manaus, there is a great demand for air conditioning equipment due to high temperatures. The production processes of these equipments are highly dependent on gaseous nitrogen suppliers, as it is used as a test gas for these equipments. To avoid this, nitrogen generation processes are developed through compressed air, such as PSA- *Pressure Swing Adsorption*- nitrogen generation plants. In this context, the objective of the present work is to evaluate the efficiency of the adsorption and desorption columns involved in the nitrogen generation process through the compressed air PSA adsorption mechanism. This analysis will be done by obtaining the experimental rupture and desorption curves. The equipment used was the PSA JPN-150 plant acquired by an industry in the Zona Franca de Manaus. In the evaluation carried out, constant feed flows of 200, 300, 365, 400 and 500 m³/h were used. The parameters were set according to the data established by the manufacturer: adsorbent mass 2500g, bed temperature 65°C. For each flow, the total bed capacity (t_t), usable bed capacity (t_u), bed adsorption efficiency (n) and bed desorption efficiency (E) were calculated. The results showed that the flow of 365 m³ /h was the one with the highest efficiency of adsorption (approximately 98%) and desorption (100%). It was possible to infer that the equipment operates in an optimal state at the same flow rate established by the manufacturer. Therefore, the results obtained allow us to conclude that in the study of the nitrogen generation process through the adsorption of compressed air using the PSA technology, using the PSA JPN-150 equipment, it was possible to obtain nitrogen at excellent rates of purity and operation with high percentages of adsorption and desorption.

Key words: Adsorption, Desorption, Efficiency, PSA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Condicionador de ar do tipo <i>Split- System</i>	18
Figura 2- Diferenças no mecanismo de corrosão em processos de brasagem. (1) Processo sem utilização de nitrogênio. (2) Processo utilizando nitrogênio como gás protetor.....	19
Figura 3- Ilustração do fenômeno de adsorção na superfície de um material poroso.	22
Figura 4-Esquema dos processos de adsorção e dessorção.	23
Figura 5- Comportamento cromatográfico do processo PSA.....	26
Figura 6- Processo de Adsorção do Ar Comprimido.	28
Figura 7- (1) A torre A está na fase de adsorção enquanto a torre B se regenera. (2) As duas torres igualam a pressão para se prepararem para a troca. (3) Após a troca, a torre A inicia o processo de regeneração enquanto a torre B gera nitrogênio.....	29
Figura 8- Curva de ruptura em coluna de Leito Fixo.	30
Figura 9- Planta de geração de Nitrogênio PSA JPN- 150.....	31
Figura 10- Painel com leituras dos dados de concentração do Nitrogênio.....	34
Figura 11- Curva de Ruptura para vazão de 200 m ³ /h.....	38
Figura 12- Curva de Ruptura para vazão de 300 m ³ /h.....	39
Figura 13- Curva de Ruptura para vazão de 365 m ³ /h.....	39
Figura 14- Curva de Ruptura para vazão de 400 m ³ /h.....	40
Figura 15- Curva de Ruptura para vazão de 500 m ³ /h.....	40
Figura 16- Curvas de Ruptura para os diferentes experimentos.....	41
Figura 17- Curvas de Dessorção para os diferentes experimentos.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Especificações de operação do Gerador PSA JPN- 150.....	31
Tabela 2- Especificações técnicas da CMS-220.....	32
Tabela 3- Especificações técnicas do Gerador PSA JPN- 150.....	32
Tabela 4- Planejamento experimental para curvas de ruptura.....	33
Tabela 5- Eficiência da adsorção para a Planta PSA- JPN 150.....	42
Tabela 6- Eficiência da dessorção para a Planta PSA- JPN 150	45

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

NH_3	Amônia
t_t	Capacidade total do leito, min
t_u	Capacidade utilizável do leito, min
C_0	Concentração de alimentação, g.L^{-1}
C_{Ox}	Concentração de oxigênio, g.L^{-1}
C_s	Concentração de saída, g.L^{-1}
n	Eficiência de adsorção do leito, %
E	Eficiência de dessorção do leito, %
$m_{Ox,d}$	Massa de oxigênio dessorvida, g
$m_{Ox,ad}$	Massa de oxigênio retida ou adsorvida, g
N_2	Nitrogênio
O_2	Oxigênio
CMS	Peneira Molecular de Carbono
PSA	Pressure Swing Adsorption
t_b	Tempo de ruptura, min
F	Vazão volumétrica de alimentação, $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1 NITROGÊNIO	16
2.2.1 Aplicações do Nitrogênio no Processo de Produção de Refrigeradores de Ar.	17
2.2.1 Processos para Obtenção de Nitrogênio	20
2.2 PROCESSO DE GERAÇÃO DE NITROGÊNIO ATRAVÉS DE ADSORÇÃO POR VARIAÇÃO DE PRESSÃO	21
2.2.1 Adsorção	21
2.2.2 Processo de Separação por Adsorção	23
2.2.3 Adsorventes	24
2.2.4 Princípios de Adsorção por PSA	25
2.2.5 Adsorção por PSA Aplicada ao Processo de Geração de Nitrogênio	27
2.3 EFICIÊNCIA DE ADSORÇÃO	29
2.4 DESCRIÇÃO DA PLANTA	30
2.4.1 Especificações Técnicas de Operação	31
2.4.2 Especificações Técnicas do Adsorvente	32
2.4.3 Capacidade de Geração de Nitrogênio da Planta	32
3 MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1 EFICIÊNCIA DA COLUNA DE ADSORÇÃO	33
3.1.1 Experimentos para Curvas de Ruptura	33
3.1.2 Cálculo da Eficiência da Coluna de Adsorção	34
3.2 EFICIÊNCIA DA DESSORÇÃO OU REGENERAÇÃO	36
3.2.1 Experimentos para Curvas de Dessorção ou Regeneração	36
3.2.2 Cálculo da Eficiência da Coluna de Dessorção ou Regeneração	36

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 EFICIÊNCIA DA COLUNA DE ADSORÇÃO	38
4.1.1 Curvas de Ruptura	38
4.1.2 Cálculos da Eficiência da Coluna de Adsorção	42
4.2 EFICIÊNCIA DA COLUNA DE DESSORÇÃO	44
4.2.1 Curvas de Dessorção ou Regeneração	44
4.2.2 Cálculos da Eficiência da Coluna de Dessorção	45
5 CONCLUSÕES	47
6 PERSPECTIVAS	49
REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das sociedades modernas caminha ao lado da inovação tecnológica. Visto isso, as indústrias objetivam a condução de suas atividades de maneira a suprir as necessidades de seus nichos de mercado, aliadas ao compromisso de buscar o crescimento econômico observando conservação ambiental, que são os pilares do que hoje é conhecido por desenvolvimento sustentável. (EOS, 2017)

No cenário Brasileiro e até mundial, com o advento da globalização, os maiores desafios enfrentados nos mais diversos âmbitos da sociedade econômica são consequências do consumo desenfreado que se desenvolve nas sociedades à medida que se alcança o progresso tecnológico. (DIEHL; ALMEIDA, 2018)

A indústria de eletroeletrônicos, para Freitas (2013), no pólo manauara configura uma grande fonte de consumo de matérias-primas e geração de resíduos. Os processos de produção, com foco em produção de condicionadores de ar, acarretam impactos que contribuem para a degradação do meio ambiente.

Pereira et al. (2013) reafirmam que é imprescindível pensar em processos alternativos para o minimizar o consumo e alternativas para descarte de resíduos provenientes de indústrias de eletroeletrônicos, uma vez que estes podem apresentar alto valor agregado.

Em Manaus, Freitas (2013) destaca a relevância de se estudar os processos de produção de condicionadores de ar de janela, visto que as altas temperaturas da cidade e de toda região norte do País o tornam um bem final de alta demanda e consumo.

Como um dos principais insumos de tal processo encontra-se o nitrogênio, utilizado, segundo Freitas (2013), nas etapas de pressurização das máquinas, testes de estanqueidade e no processo de brasagem. O que revela a grande dependência de processos de produção de condicionadores de ar de tal insumo e, conseqüentemente, de seus fornecedores. (ATLAS COPCO, 2021)

Como maneira de driblar esta dependência, são desenvolvidos os processos de geração de nitrogênio através do ar comprimido, que muitas empresas de Manaus vêm adotando para alinhar eficiência econômica e ambiental em seus processos. (ATLAS COPCO, 2021; METALPLAN, 2021)

A técnica que permite a geração de nitrogênio através do ar comprimido é o consolidado mecanismo de adsorção por PSA, ou *Pressure Swing Adsorption*, que possui destaque no cenário atual como método eficiente e econômico em processos de separação da indústria química. (MADEIRA, 2008)

A técnica surgiu em meados de 1960, ganhou notoriedade atualmente e configura uma alternativa nos processos de purificação de misturas gasosas, quando processos de destilação ou absorção se mostram onerosos ou ineficientes (MADEIRA, 2008; YANG, 1987)

No processo, as moléculas de oxigênio presentes no ar comprimido são adsorvidas em uma peneira molecular de carbono, enquanto as moléculas de nitrogênio fluem para a um reservatório, onde se obtém o produto com pureza desejada. (HB AR-COMRIMIDO, 2021; METALPLAN, 2021)

Na adsorção por PSA há alternância de atividade entre duas torres de pressão separadas, ambas preenchidas com uma peneira molecular de carbono (CMS), desta forma, enquanto um dos adsorventes é regenerado, o outro produz o gás enriquecido em nitrogênio. Estes ciclos são chamados de adsorção e regeneração. (METALPLAN, 2021; MADEIRA, 2008)

Como vantagens econômicas da utilização de geradores de nitrogênio PSA tem-se a redução de custos com fretes e locações de tanques ou cilindros de fornecedores terceirizados, assim como há a minimização de imprevistos associados à logística como atraso de entrega, desvios e evaporação do nitrogênio líquido no percurso. (HBR, 2017; PARKER 2017)

Portanto, o problema científico deste trabalho refere-se ao estudo de eficiência de uma planta de geração de nitrogênio através da adsorção por variação de pressão do ar comprimido. Logo, como hipóteses ao problema proposto tem-se que: (i)estudar do fenômeno de adsorção, (ii)estudar as colunas de adsorção e dessorção, (iii)utilizar os cálculos de eficiência em colunas de adsorção e dessorção e (iv)calcular a eficiência da coluna de adsorção e dessorção no processo PSA.

O objetivo do presente trabalho consiste na avaliação eficiência das colunas de adsorção e dessorção envolvidas no processo de geração de nitrogênio através do mecanismo de adsorção por PSA do ar comprimido. Como objetivos específicos destacam-se:

- i.** Obter as curvas de ruptura para o processo de adsorção em diferentes vazões de operação;
- ii.** Calcular as eficiências da coluna de adsorção e dessorção em diferentes vazões de operação;
- iii.** Definir um ponto ótimo para operação do equipamento;

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 NITROGÊNIO

O nitrogênio é um elemento químico vital aos organismos e manutenção da vida, sendo constituinte de proteínas e ácidos nucleicos, como na estrutura de DNA e RNA, além de pigmentos e metabolitos secundários. (LUVIZOTTO, 2013; SANTOS, 2013)

O nome nitrogênio tem origem na língua grega e resulta da associação entre os termos *gênio*- “formador de” e *nitron*- “nitratos”. Deste modo, Jean- Antoine- Claude Chaptal o classificou como constituinte do ácido nítrico e dos nitratos em 1790. (PEIXOTO, 1997)

O relato histórico documental da descoberta do nitrogênio foi anunciado na tese de doutorado de Daniel Rutherford em 12 de setembro de 1772 ao estudar o ar residual que ainda restava da queima de substâncias orgânicas no ar, mesmo após a retirada do gás carbônico formado na combustão. (SANTOS, 2014; PEIXOTO, 1997)

Vieira (2017, p. 8) descreve como ocorre a distribuição de nitrogênio no ambiente terrestre:

Na litosfera o nitrogênio está distribuído nas rochas, no fundo dos oceanos e nos sedimentos. Este compartimento, representado pela crosta, contém 98 % do nitrogênio existente no planeta. Na atmosfera, onde ele existe como gás (N_2 , 78 %), seu estoque é cerca de um milhão de vezes maior que o nitrogênio total contido nos organismos vivos.

O nitrogênio gasoso presente na superfície terrestre constitui quatro quintos da atmosfera. O mesmo ocorre na biosfera terrestre nos estados de oxidação -3 e +5, sendo produtos de diversas espécies que constituem o ciclo biogeoquímico do nitrogênio. Sua contribuição para a massa total dos sistemas vivos fica atrás somente das contribuições de carbono, hidrogênio e oxigênio. (LUVIZOTTO, 2013)

Apesar da abundância na atmosfera, Silva (2016) apresenta a relação do nitrogênio como nutriente limitante para o desempenho de sistemas agrícolas. Vieira (2017, p. 8) explica tal limitação:

O N_2 não pode ser utilizado pela maioria dos organismos, em decorrência da ligação tripla entre os átomos de nitrogênio ($N\equiv N$), o que torna a molécula quase inerte. Para quebrá-la, de modo que seus átomos possam combinar com outros átomos, são necessárias quantidades substanciais de energia.

Desta forma, o nitrogênio gasoso é utilizado frequentemente em processos químicos quando se deseja uma atmosfera inerte. (PEIXOTO, 1997)

Um dos compostos mais importantes de nitrogênio é o gás amônia, NH_3 . Produzida em milhões de toneladas a cada ano e utilizada na produção de ácido nítrico, ureia e outros compostos de nitrogênio. (SANTOS, 2014; PEIXOTO, 1997)

Entre os anos de 1995 e 1997 já se notava no Brasil o aumento da produção de N_2 como consequência do crescimento do processo de produção de aços, visto que os aços nitrônicos ou nitrogenados apresentam aumento de resistência mecânica à temperatura ambiente. (CERQUEIRA; ARAUJO JUNIOR, 2018; PEIXOTO, 1997)

2.2.1 Aplicações do Nitrogênio no Processo de Produção de Refrigeradores de Ar.

A prática da refrigeração e do ar condicionado é relatada desde os primórdios da civilização. Atualmente, como um dos principais marcos do avanço das sociedades modernas, as atividades humanas ganharam perspectivas mais abrangentes e praticidade com a possibilidade de guarda e distribuição de alimentos, assim como a possibilidade de se trabalhar em climas adversos. (MATOS, 2021)

A refrigeração consiste na redução e manutenção da temperatura de corpos ou substâncias, abaixo da existente na sua vizinhança, podendo ser obtida por meios naturais ou artificiais. (ALVES, 2014)

Matos (2021, p.1) complementa:

A água foi o primeiro refrigerante, com uma longa história que se estende até os tempos modernos. Com a passagem dos anos, foram melhorando os métodos de armazenagem e manuseio, mas em todas as partes do mundo o gelo natural continua sendo usado.

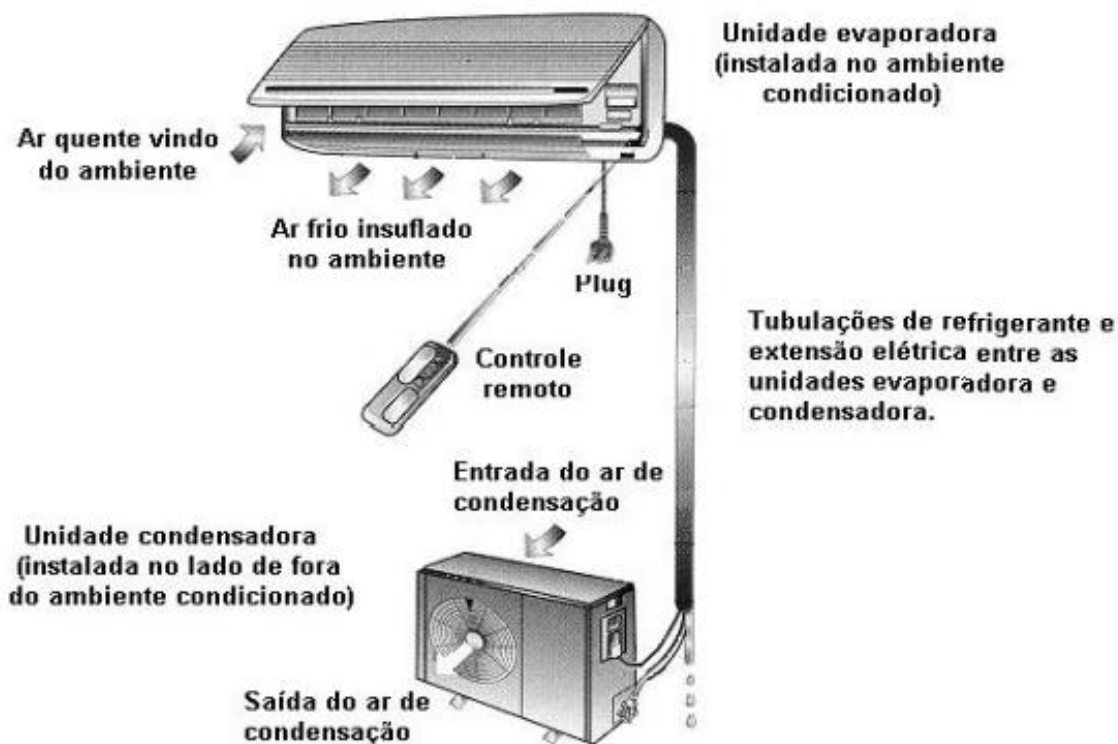
Ciclo de refrigeração consiste na transferência de energia em forma de calor de uma região com baixo potencial energético para uma região de alto potencial energético. Este saldo de variação de energia é positivo, o que indica a entrada de energia no sistema, portanto ressalta a necessidade de utilização de uma fonte de energia externa. (FERZOLA, 2010 apud GENIER; COSTA; COSTA JUNIOR, 2013)

Ar condicionado trata-se do processo que objetiva controlar simultaneamente a temperatura, a umidade relativa, a movimentação, pureza, renovação, distribuição e a qualidade do

ar de um ambiente com o objetivo de proporcionar conforto térmico aos ocupantes ou garantir condições especiais exigidas por equipamentos ou processos. (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2015; ARAUJO, 2011)

O sistema de ar condicionado do tipo *Split- System* é constituído por duas seções (condensadora e evaporadora) instaladas de modo separado e interligadas por meio de dutos ou tubulações de cobre que conduzem o gás refrigerante. A Figura 1 esquematiza tal sistema. (ALVES, 2014)

Figura 1-Condicionador de ar do tipo *Split- System*.



Fonte: ALVES (2014).

Na unidade condensadora ou unidade externa, o fluido de refrigeração sofre mudança do estado físico de vapor para o líquido por meio da troca de calor com o ambiente. Enquanto na unidade evaporadora ou interna, o fluido de refrigeração sofre mudança do líquido para vapor, absorvendo o calor trocado pela unidade condensadora. (MATOS, 2021; ALVES, 2014)

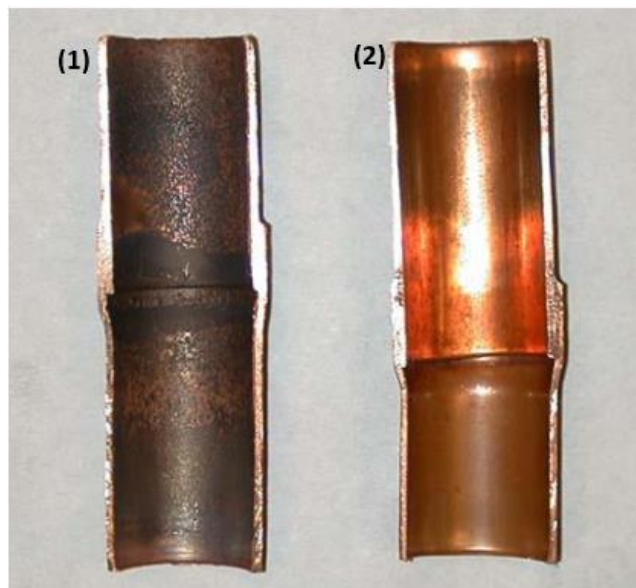
Conforme Freitas (2013) a utilização de nitrogênio configura parte do processo produtivo de aparelhos de ar-condicionado para que seja realizada a pressurização das máquinas, em testes de estanqueidade e no processo de brasagem.

Na etapa de pressurização é utilizado um gás inerte, que geralmente é o nitrogênio, a fim de realizar a limpeza do sistema, evacuar os gases não condensáveis e encontrar vazamentos. (WEB AR CONDICIONADO, 2020)

A técnica de brasagem para junção de tubos de refrigeração é uma das mais utilizadas. Nela, há a fundição de metais para criar uma união resistente entre as tubulações do sistema de ar condicionado. As juntas abrasadas devem apresentar resistência e suporte necessário a fatores como pressão, vibração, temperatura e tensão de ciclos térmicos (variação de temperatura). (AMBIENTE GELADO, 2021; DAIKIN, 2019)

No processo de brasagem, o nitrogênio é utilizado como gás protetor, para evitar que ocorra a oxidação interna da tubulação. Neste processo ocorre a inserção do fluxo de nitrogênio através de uma das extremidades da tubulação a ser abrasada, para que se evite a formação de óxidos corrosivos na superfície interior do referido tubo, que podem se depositar nas partes quentes do sistema com o passar do tempo. A Figura 2 representa a diferença do mecanismo de corrosão em tubulações com e sem uso de nitrogênio. (DAIKIN, 2019)

Figura 2- Diferenças no mecanismo de corrosão em processos de brasagem. (1) Processo sem utilização de nitrogênio. (2) Processo utilizando nitrogênio como gás protetor.



Fonte: DAIKIN (2019).

O Ministério do Meio Ambiente (2015) classifica os testes de estanqueidade como métodos indicativos da existência de vazamentos. Sendo muito úteis ao final da montagem do aparelho ou quando o sistema é aberto para manutenções. O nitrogênio gasoso é utilizado nesta etapa como gás indicador, monitorado através do sistema com espectrômetro de massa ou analisador de gás residual para indicar se o mesmo está escapando do sistema.

Deste modo, é possível verificar que a dependência do nitrogênio em processos de produção de refrigeradores de ar é um fator considerável. Portanto, possuir a capacidade de criar o próprio nitrogênio confere uma independência maior às indústrias com relação à dependência de terceiros para o fornecimento, o que, conforme Atlas Copco (2021) elimina a necessidade de processamento, reabastecimento e custos de entrega.

Para a produção própria de nitrogênio, é necessário definir o nível de pureza que se deseja alcançar no processo. Atlas Copco (2021) define como aplicações que exigem níveis de pureza mais baixos, geralmente de 90 a 99 %, estão as atividades de enchimentos de pneus e prevenção de incêndios, enquanto outras aplicações na indústria de alimentos e bebidas exigem níveis altos que variam de 97 a 99,99%.

Para aplicação de nitrogênio em processos de Brasagem, pressurização e testes de estanqueidade, é requerido que o nitrogênio possua pureza mínima de 95%. (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2015; FREITAS, 2013)

2.1.2 Processos para Obtenção de Nitrogênio

Em larga escala, a obtenção industrial de nitrogênio pode ser feita através da destilação fracionada do ar atmosférico liquefeito (geração de nitrogênio por criogenia), geradores de nitrogênio por membrana de fibra oca ou geradores de nitrogênio por adsorção. (ATLAS COPCO, 2019; PARKER, 2017; SANTOS, 2014)

A geração do nitrogênio por criogenia consiste na liquefação do ar atmosférico, resultando numa mistura líquida de componentes. A destilação fracionada ocorre através da repetição de estágios, chamados de equilíbrio líquido-vapor, onde há a separação de componentes da mistura com diferentes pontos de ebulição. Como o nitrogênio apresenta ponto de ebulição mais baixo que o oxigênio, é a primeira fração a ser destilada da mistura. (INFOSOLDA, 2013; MOTA, 2008)

O gerador de nitrogênio por membrana de fibra oca permite que oxigênio e outros gases permeiem as membranas enquanto o N₂ continua passando pelo tubo e é direcionado a uma mídia filtrante esterilizada e ativada, de modo que ao final se obtenha o nitrogênio purificado e à temperatura ambiente. (PARKER, 2017)

O gerador de nitrogênio por adsorção funciona separando as moléculas de nitrogênio das moléculas de oxigênio contidas no ar comprimido através do mecanismo de adsorção por variação de pressão ou PSA. Como vantagens, este tipo de geração alcança pureza de até 99, 999% e eficiência mais alta quando comparados com geradores de membrana. O que faz com que a tecnologia de adsorção por PSA seja considerada como a alternativa ideal e mais fácil a ser seguida. (ATLAS COPCO, 2019)

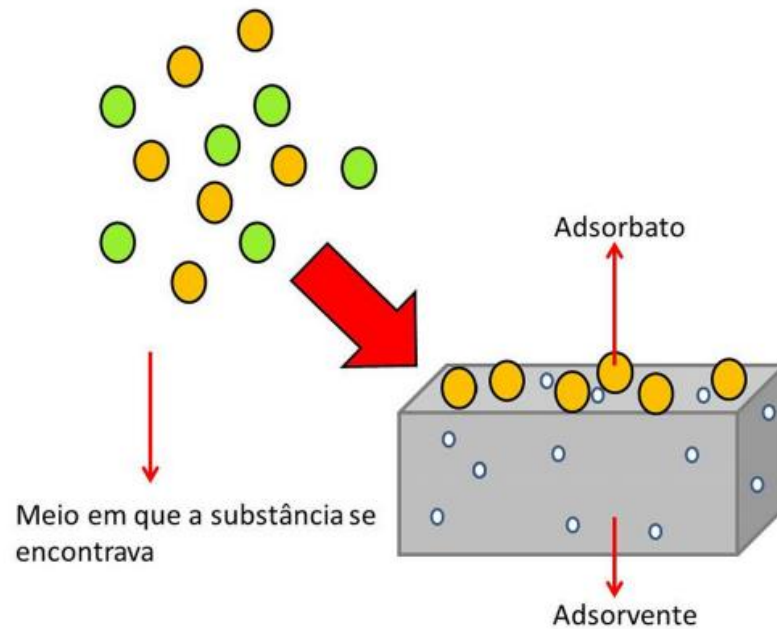
2.2 PROCESSO DE GERAÇÃO DE NITROGÊNIO ATRAVÉS DE ADSORÇÃO POR VARIAÇÃO DE PRESSÃO

Consideradas as vantagens na utilização de geradores de nitrogênio através de adsorção por PSA. Para que se estudem os fenômenos e operações envolvidas neste processo é necessário fazer uma breve contextualização sobre o fenômeno de adsorção:

2.2.1 Adsorção

Khajuria (2011) define adsorção como o processo no qual as moléculas ou átomos, estes puros ou em mistura, de um sistema fluido em fases líquida, gasosa ou supercrítica tendem, sob efeito de forças intermoleculares, a se concentrar na superfície de um sólido. O efeito das formas intermoleculares se dá entre a fase fluida (adsorbato) e a fase sólida (adsorvente). O fluido em contato com o adsorvente é denominado adsortivo. O esquema do fenômeno de adsorção é mostrado na Figura 3.

Figura 3- Ilustração do fenômeno de adsorção na superfície de um material poroso.



Fonte: SANTOS et al. (2015).

Duarte (2019, p.36), em seus estudos, enuncia:

Uma vez que a adsorção é um fenômeno de superfície, é importante que os adsorventes proporcionem uma grande área superficial externa e interna associada à sua estrutura porosa. A capacidade de adsorção depende, portanto, do tipo e tamanho dos poros, bem como da sua distribuição, e da natureza da superfície do adsorvente. O adsorbato é a substância que será removida da fase líquida na interface. O adsorvente é a fase sólida, líquida ou gasosa na qual o adsorbato se acumula.

De modo que Peixoto (2015, p.25) complementa:

Este fenômeno depende de toda a extensão da zona interfacial, ou seja, é diretamente proporcional à área específica do sólido. As moléculas adsorvidas podem ter seu lugar na superfície do sólido e retornar para a fase gasosa, fenômeno conhecido como dessorção.

Ainda para Peixoto (2015, p.25) a depender dos tipos de forças entre o fluido e o sólido, podem ser caracterizados dois tipos de Adsorção:

Adsorção física (fisissorção), envolvendo apenas forças intermoleculares relativamente fracas, como de dispersão e repulsão (van der Waals) e eletrostáticas (polarização, dipolo e quadrupolo) e adsorção química (quimissorção), que envolve, essencialmente, a transferência ou o compartilhamento de elétrons entre as moléculas de adsorbatos e a superfície do adsorvente, caracterizando a formação de ligação química.

Bonilla, Mendoza e Reynel (2017) ainda ressaltam que a viabilidade econômica e técnica dos processos de adsorção dependem de vários fatores, incluindo o tipo de adsorvente, propriedades do fluido, contaminantes a serem removidos, condições operacionais, configuração do processo, regeneração e destino final de resíduos.

2.2.2 Processo de Separação por Adsorção

Madeira (2008) explica que o processo de separação por adsorção é utilizado na separação de gases em misturas gasosas, visto que diferentes gases são atraídos por diferentes superfícies sólidas. Tal propriedade é vista pelo fato de que, sob pressão, os gases possuem atração por superfícies sólidas adsorventes, logo, quanto mais alta a pressão, maior quantidade de gás é adsorvida, tal como quanto menor a pressão, o gás é liberado ou dessorvido.

Keller (1995) salienta que a adsorção é usada economicamente em processos de separação da indústria química e em muitos casos, o adsorvente sólido pode reter o adsorvato e em seguida liberá-lo através do processo de dessorção, as duas etapas ocorrendo em ciclos reversíveis. A Figura 4 a seguir ilustra tal processo.

Figura 4-Esquema dos processos de adsorção e dessorção.



Fonte: KELLER (1995).

Sobre o processo de adsorção, Madeira (2008, p.24) destaca:

O processo de adsorção é exotérmico, gerando uma grande quantidade de calor que é cedida para o ambiente, o calor de adsorção, que indica a intensidade das forças que atraem as moléculas do adsorvato à superfície do adsorvente. O processo de dessorção é endotérmico e consome energia do ambiente, sendo a energia recebida, o calor de dessorção. A energia envolvida em ambos os processos é muito maior do que o calor de vaporização do adsorvato.

Garg e Ausikaitis (1983, p.47) enunciam que, nos processos de separação ou purificação de misturas gasosas, a temperatura na qual ocorre o processo é próxima da temperatura de corrente na alimentação, na qual a adsorção pode ocorrer por dois mecanismos:

Na primeira, o gás mais fortemente adsorvido é o contaminante removido do produto, sendo este último adsorvido em menor grau. Na segunda, ocorre o processo inverso, ou seja, o gás mais fortemente adsorvido é o produto desejado que deve ser separado do contaminante, sendo este adsorvido com menor intensidade.

2.2.3 Adsorventes

A característica do adsorvente é considerada o principal fator de influência no processo de adsorção. (NASCIMENTO et al., 2014)

A natureza físico- química do adsorvente é fator determinante, pois a capacidade e a taxa de adsorção dependem da área superficial específica, porosidade, volume específico de poros, distribuição do tamanho de poros, dos grupos funcionais presentes na superfície do adsorvente e da natureza do material precursor. (DOMINGUES, 2005 apud NASCIMENTO et al., 2014)

Em escala industrial, os adsorventes mais utilizados atualmente são o carvão ativado, a sílica- gel, a alumina ativada e as peneiras moleculares. (RODRIGUES FILHO, 2012)

Estes adsorventes se classificam em amorfos (carvão ativado, sílica- gel e alumina), cuja faixa de distribuição e tamanho de poros é bem ampla ou em peneiras moleculares, cujo tamanho de poro e ordem de grandeza molecular é definido pela estrutura cristalina, que praticamente não permite variações. (RODRIGUES FILHO, 2012)

O fenômeno de adsorção tem descrições da história desde o século XVIII, porém até o início da década de 60 mostrava sua exploração e aplicabilidade limitada à secagem do ar e purificação de gases de exaustão. A mudança foi observada com a descoberta e aplicação de novos

materiais adsorventes como peneiras moleculares, com destaque para as zeólitas sintéticas e a peneira molecular de carbono, que possuem importantes características sob a ótica de processos químicos como alta seletividade, capacidade de adsorção e vida útil. De tal forma, desenvolveram-se processos de separação utilizando estes novos adsorventes. (NEVES; SCHVARTZMAN; JORDÃO, 1999)

As peneiras moleculares de carbono - *Carbon Molecular Sieve* – (CMS) são estudadas como alternativa tecnológica para aplicações em processos de separação de misturas gasosas. Esta família de poderosos adsorventes é considerada atrativa por apresentar alta seletividade e produtividade, podendo ser utilizadas em altas temperaturas e pressões. (BARBARINI, 2010).

Por serem materiais altamente porosos, as CMS's possuem uma alta capacidade de permeabilidade gasosa, enquanto a morfologia da rede cristalina permite uma discriminação precisa dos gases penetrantes, o que confere uma alta seletividade ou adsorvente. (BARBARINI, 2010).

Atualmente, a CMS é utilizada nos mais variados processos químicos, sendo empregada principalmente na síntese de amônia, separação de hidrogênio em refinarias de petróleo, regeneradores catalíticos em poços de gás natural e separação de gases N_2 e O_2 pelo processo PSA. (CAPOBIANCO, 2005).

2.2.4 Princípios de Adsorção por PSA

A adsorção por PSA, conforme Madeira (2008), ou *Pressure Swing Adsorption* baseia-se na separação de misturas gasosas através de processos cíclicos de adsorção e dessorção.

Yang (1987) descreve que os processos PSA foram comercializados a partir de 1960 e ganharam notoriedade e extensa aplicação industrial, sendo utilizados em processos para remoção de contaminantes de matérias-primas, recuperar e purificar insumos ou produtos primários e eliminar gases considerados contaminantes de efluentes em estado gasoso.

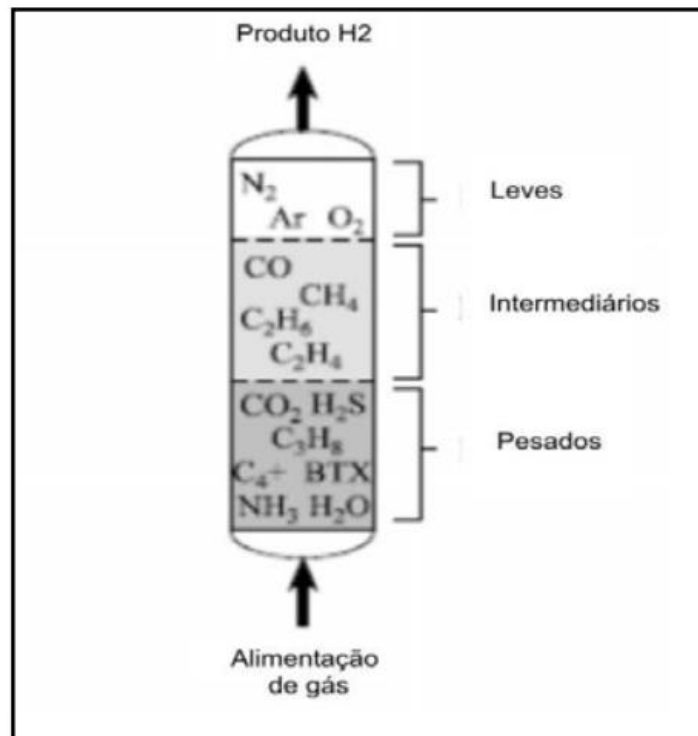
Yang (1987) ainda afirma que a nova tecnologia PSA surgiu como adicional aos processos de separação já existentes, configurando uma alternativa quando os processos de destilação por vias convencionais ou a absorção se mostram ineficientes e/ou onerosos. Deste modo a técnica PSA proporciona um meio eficiente e flexível para separação de misturas gasosas.

Stockker, Whysall e Miller (1998) descrevem como ocorre o processo de adsorção por PSA:

A dinâmica deste processo ocorre através de leitos adsorventes ou combinações destes em diferentes zonas de uma coluna, de forma semelhante a um processo cromatográfico. Essas diferentes zonas de adsorção são responsáveis pela reversibilidade e seletividade do processo de remoção gasosa.

O comportamento cromatográfico do processo PSA descrito por Stockker, Whysall e Miller (1998) pode ser ilustrado conforme a Figura 5.

Figura 5- Comportamento cromatográfico do processo PSA.



Fonte: STOCKKER; WHYSALL; MILLER (1998).

O desempenho de sistemas concentradores de nitrogênio permite gerar nitrogênio a até 99,99 % de concentração sem custos adicionais como segurança de instalações, frete, locação de cilindros/tanques, monitoramento, atraso na entrega, desvios ocasionais e a evaporação normal do nitrogênio líquido. (ATLAS COPCO, 2021)

Ruthven e Knaebel (1994) enumeram as três etapas básicas, que se devem conhecer sobre o processo PSA: pressurização, liberação de produto e despressurização.

Na etapa de pressurização, comprime-se o gás de alimentação no leito até que se atinja a pressão de operação. Quando a alimentação é inserida no leito, os componentes que são adsorvidos

com facilidade são extraídos da fase gasosa preferencialmente, formando, na saída do leito, uma zona de gás rica em componentes pouco adsorvidos. A liberação do produto envolve a remoção de parte do gás e produção de uma corrente de gasosa contendo os componentes que foram menos adsorvidos na saída da torre e, simultaneamente, a introdução da nova corrente de alimentação. A etapa de despressurização reduz, ao mínimo, a pressão do leito, descarregando o gás na direção oposta à alimentação, criando uma corrente de gás enriquecida em substâncias adsorvidas. Este ciclo é repetido várias vezes para separar a mistura de gases em fluxos contendo os componentes desejados. (RUTHVEN; KNAEBEL, 1994)

2.2.5 Adsorção por PSA Aplicada ao Processo de Geração de Nitrogênio

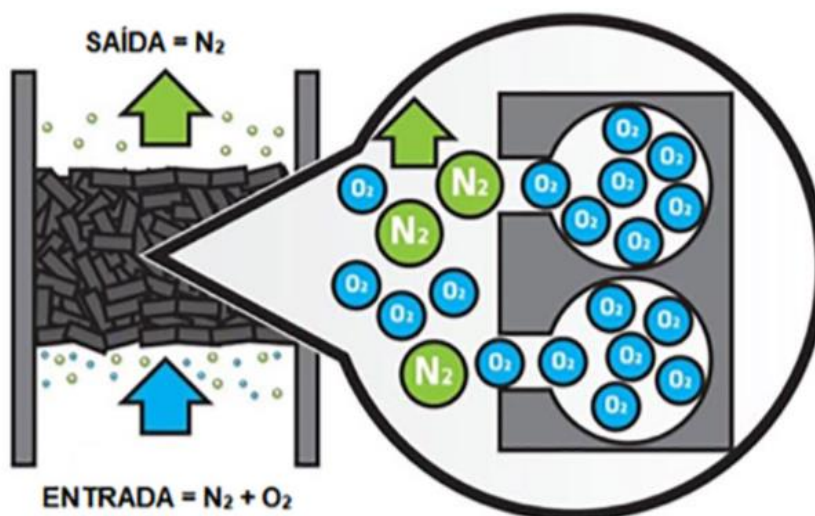
A Adsorção por Variação de Pressão funciona separando as moléculas de nitrogênio das de oxigênio que estão contidas no ar comprimido. O processo ocorre a partir da retenção do oxigênio presente no fluxo de ar comprimido, usando a adsorção. (ATLAS COPCO, 2021)

O mecanismo de adsorção empregado no processo consiste na ligação de moléculas de oxigênio a uma peneira molecular de carbono. A mesma atua como adsorvente, separando as moléculas de oxigênio das moléculas de nitrogênio, que possuem tamanho ligeiramente maior. (HB AR-COMPRIMIDO, 2021; METALPLAN, 2021)

A planta de geração de nitrogênio é composta por duas torres de pressão separadas, denominadas torre A e B, ambas preenchidas com uma CMS, desta forma, enquanto um dos adsorventes é regenerado, o outro produz o gás enriquecido em nitrogênio. Estes ciclos são chamados de adsorção e regeneração. (METALPLAN, 2021; MADEIRA, 2008)

O processo inicia com a entrada do ar comprimido limpo e seco na primeira coluna, denominada torre A. Devido à diferença de tamanhos entre as moléculas, ocorre a adsorção das moléculas de oxigênio entre os poros da CMS. Em contrapartida, as moléculas de nitrogênio que não se encaixaram nos poros da peneira terão como caminho realizar o contorno da peneira saturada, fluindo na saída da coluna de adsorção e sendo encaminhadas a um reservatório, obtendo, ao fim do processo, o nitrogênio com a pureza desejada. O esquema de Adsorção é apresentado na Figura 6. (ATLAS COPCO, 2021; HB AR- COMPRIMIDO, 2021; MADEIRA, 2008)

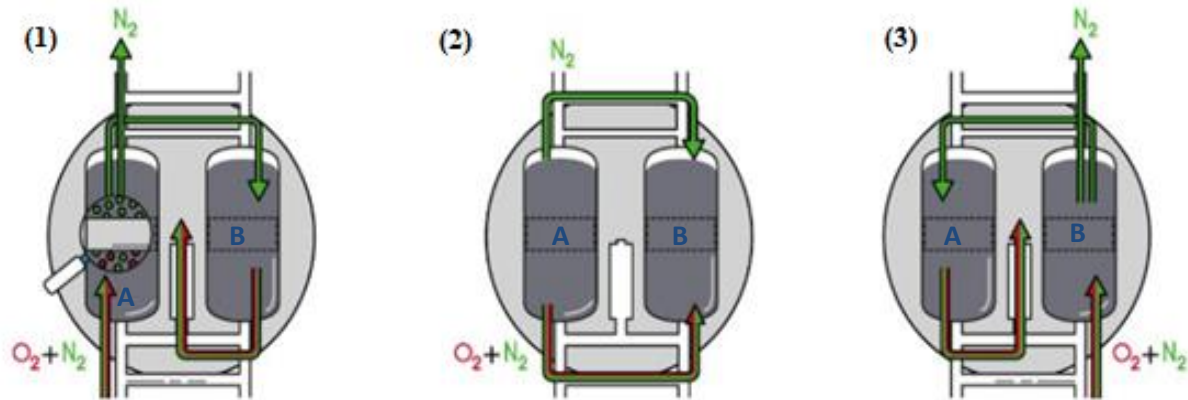
Figura 6- Processo de Adsorção do Ar Comprimido.



Fonte: HB AR-COPRIMIDO (2021).

Dado que a maior parte do nitrogênio produzido sai da torre A pronto para uso direto ou armazenamento, uma pequena parte é levada para a torre B, em sentido oposto ao fluxo de alimentação. Este fluxo é necessário para expulsar o oxigênio que foi capturado na fase anterior de adsorção pela qual passou a torre B. Através da modulação de pressão na torre B, as peneiras moleculares de carbono perdem sua capacidade de reter as moléculas de oxigênio, fazendo com que as mesmas sejam soltas da peneira e levadas pelo mecanismo de escape através do pequeno fluxo de nitrogênio proveniente de torre A. Assim, o nitrogênio é levado novamente à atmosfera, enquanto libera espaço para retenção de novas moléculas na CMS. Finalizado este ciclo, o sistema permite que, na próxima fase de adsorção, novas moléculas de oxigênio possam ser retidas nas peneiras. Tal processo é descrito como fase de limpeza de uma regeneração de torre saturada de oxigênio. O processo pode ser ilustrado conforme mostra a Figura 7. (ATLAS COPCO, 2021; JOTAFLEX, 2021; METALPLAN, 2021)

Figura 7- (1) A torre A está na fase de adsorção enquanto a torre B se regenera. (2) As duas torres igualam a pressão para se prepararem para a troca. (3) Após a troca, a torre A inicia o processo de regeneração enquanto a torre B gera nitrogênio.



Fonte: ATLAS COPCO (2021).

Em tal ponto, a pressão nas duas torres será igualada, de forma que as fases entre elas alternem entre adsorção e regeneração. Quando a CMS na torre A estiver saturada, a torre B, devido aos efeitos da despressurização, poderá reiniciar o processo de adsorção. (ATLAS COPCO, 2021)

Tal processo também pode ser denominado por “variação” ou “modulação” de pressão, de tal forma que permita com que certos gases sejam inseridos no sistema com uma pressão mais alta e liberados a uma pressão inferior. Portanto o sistema PSA de duas torres permite a produção contínua de nitrogênio em níveis de pureza de 95% a 99,999%. (ATLAS COPCO, 2021; JOTAFLEX, 2021; MADEIRA, 2008)

2.3 EFICIÊNCIA DE ADSORÇÃO

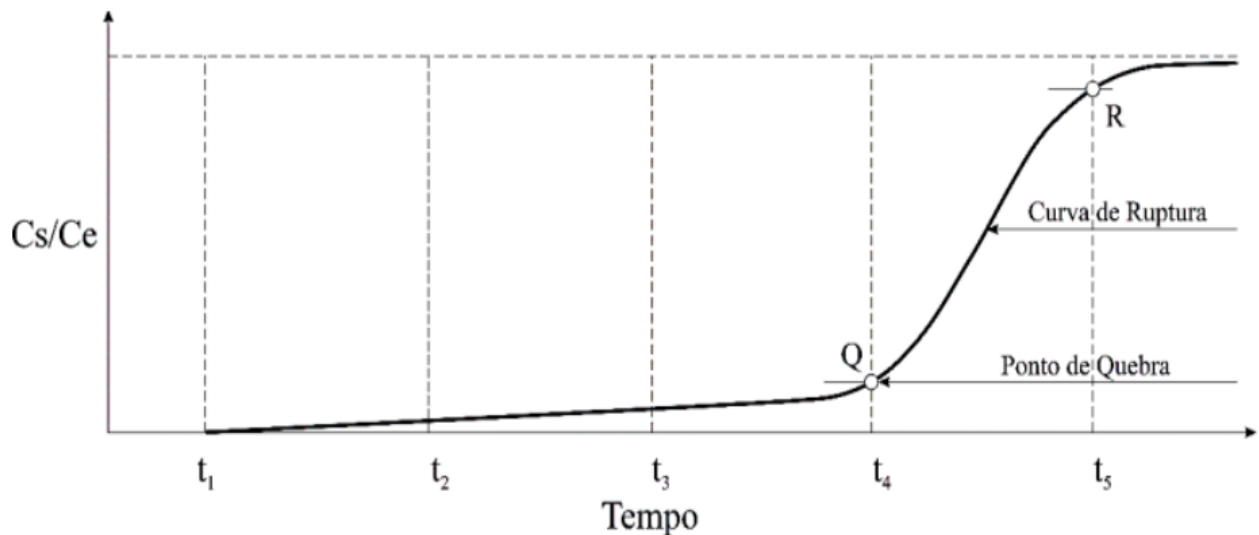
Os processos de adsorção utilizam, em larga escala, colunas de leito fixo de fluxo contínuo. Desta forma, tem-se uma configuração eficaz para tratamentos de grandes volumes de efluentes e ciclos de adsorção e dessorção, o que permite a utilização do adsorvente de forma eficiente. (NASCIMENTO et al., 2014)

A utilização de uma coluna de adsorção admite como pressuposto seu bom desempenho ou resultados satisfatórios. O comportamento dinâmico e a eficiência de colunas de adsorção em leito fixo são descritos como função da concentração de efluente/ afluente *versus* tempo ou volume de

líquido tratado, o que caracteriza o termo curva de ruptura ou *breakthrough*. (NEVES et al., 2019; SILVA NETO, H. et al., 2018; NASCIMENTO et al., 2014)

Os estudos da curva de ruptura ou *breakthrough* permitem predizer o ponto de saturação da coluna de adsorção conforme as suas condições de alimentação. Assim, a curva de ruptura representa graficamente a relação entre a razão de concentração de saída (C_s) pela concentração de alimentação (C_0) e o tempo. A representação da curva de ruptura é mostrada na Figura 8. (SILVA NETO, H. et al., 2018)

Figura 8- Curva de ruptura em coluna de Leito Fixo.



Fonte: SILVA NETO, H. et al. (2018).

2.4 DESCRIÇÃO DA PLANTA

A planta de geração de nitrogênio, objeto de estudo do seguinte trabalho, foi adquirida por uma indústria eletroeletrônica situada no Distrito Industrial de Manaus com finalidade de geração de nitrogênio *on-site* para ser utilizado como gás de teste durante o processo de produção de condicionadores de ar domésticos.

Segundo dados do fabricante, a pureza de nitrogênio atingida pelas torres é de 99,99% (JANUS & PERGHER, 2020). A planta de geração de nitrogênio PSA JPN- 150 do fabricante Janus & Pergher é representada na Figura 9.

Figura 9- Planta de geração de Nitrogênio PSA JPN- 150.



Fonte: Própria.

2.4.1 Especificações Técnicas de Operação

A planta possui duas torres, denominadas SN-51 e SN-52, cujas especificações técnicas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1- Especificações de operação do Gerador PSA JPN- 150.

Gerador PSA JPN- 150: Especificações técnicas	
Torre	SN- 51 e SN- 52
Volume total (L)	1.215
Diâmetro interno (mm)	751
Comprimento do cilindro (mm)	2.690
Pressão de trabalho (Kgf/cm ²)	8,0
Temperatura de trabalho (°C)	65

Fonte: JANUS & PERGUER (2016)

2.4.2 Especificações Técnicas do Adsorvente

O contato entre sólido e gás acontece, em ambas as torres, no recheio, constituído pela peneira molécula de carbono CMS- 220, cujas especificações técnicas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2- Especificações técnicas da CMS-220.

Peneira Molecular de carbono CMS- 220	
Diâmetro (mm)	1,3 a 1,5
Força de esmagamento (N/P min)	100
Nível de poeira (PPM Max)	100
Pressão adsorvente (MPa)	0,8
Pureza do nitrogênio (%)	99,99
Recuperação de nitrogênio ((%) N ₂ / Ar	25

Fonte: GOPHIN CHEMICAL (2021).

2.4.3 Capacidade de Geração de Nitrogênio da Planta

Conforme as especificações do fabricante, a planta PSA JPN- 150 é capaz de gerar nitrogênio em purezas de 99,5% a 99,9%. A capacidade, em m³, de geração de nitrogênio pela planta é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3- Especificações técnicas do Gerador PSA JPN- 150.

Gerador de Nitrogênio PSA JPN-150	
Pureza de N ₂ (%)	99,9
Produção nominal (Nm ³ /h)	108,8
Espaço físico (m ²)	15
Ar Comp. Requerido (Nm ³ /h)	465

Fonte: JANUS & PERGHER (2020).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 EFICIÊNCIA DA COLUNA DE ADSORÇÃO

3.1.1 Experimentos para Curvas de Ruptura.

A etapa experimental consistiu na utilização das colunas de adsorção SN- 51 e SN-52 da planta PSA JPN- 150. A planta operou em condições usuais recheada com 2500g do recheio CMS-220. A temperatura utilizada no leito foi de 65 °C, conforme estabelecido pelo fabricante. As vazões de alimentação de ar comprimido foram moduladas conforme planejamento apresentado na Tabela 4.

Tabela 4- Planejamento experimental para curvas de ruptura.

Experimento	Vazão de alimentação (m ³ /h)
1	200
2	300
3	365
4	400
5	500

Fonte: Própria.

Cada experimento foi realizado em triplicata, com duração total de 240 minutos e os dados de concentração foram coletados em intervalos de 20 minutos.

Para a determinação da concentração de nitrogênio no decorrer de cada experimento, foram utilizados os dados de leitura fornecidos pelo painel responsável por realizar a interface entre o operador e a máquina. O painel apresenta as leituras do analisador de nitrogênio, acoplado na saída da coluna de adsorção, conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10- Painel com leituras dos dados de concentração do Nitrogênio.



Fonte: Própria.

Os dados de concentração foram coletados até o momento em que se atingiu o equilíbrio de transferência de massa ou capacidade máxima de remoção de oxigênio. Tal fenômeno foi observado quando a pureza de nitrogênio atingiu 100,00 %, indicando que a coluna atingiu sua exaustão ou saturação. (BORBA, 2006 apud NEVES et al., 2019; NASCIMENTO et al., 2014)

Uma vez que cada experimento foi realizado em triplicata, calcularam-se suas respectivas médias de cada valor de concentração a cada 20 minutos. Os valores médios foram utilizados para elaboração das curvas de ruptura para cada experimento, conforme cada vazão de alimentação.

3.1.2 Cálculo da Eficiência da Coluna de Adsorção

A eficiência da coluna de adsorção foi calculada a partir da relação entre os tempos de operação do leito. (NEVES et al., 2019; NASCIMENTO et al., 2014)

A partir das curvas de ruptura obtidas, foi realizado o ajuste matemático das mesmas no Excel, a fim de se obterem as equações que descreviam seu comportamento.

Obtidas as equações que descreviam matematicamente o comportamento de cada curva. Calculou-se o tempo de exaustão total do leito, ou capacidade total (t_t) conforme a Equação 1. (NEVES et al., 2019)

$$t_t = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{C_s}{C_0}\right) dt \quad (01)$$

Onde:

C_0 : concentração de alimentação (g.L^{-1});

C_s : concentração de saída (g.L^{-1});

O tempo que a coluna suportou até atingir a ruptura, ou capacidade utilizável do leito (t_u) foi determinado conforme a Equação 2. (NEVES et al., 2019)

$$t_u = \int_0^{t_b} \left(1 - \frac{C_s}{C_0}\right) dt \quad (02)$$

Onde:

t_b : tempo de ruptura (h)

A eficiência de adsorção do leito (n) foi calculada conforme a Equação 3. (NEVES et al., 2019)

$$n(\%) = \frac{t_u}{t_t} \cdot 100 \quad (03)$$

A eficiência foi calculada em tempo utilizável de leito, quando ocorreu a máxima adsorção, sem que houvessem outros componentes além do nitrogênio na corrente de saída, dividido pelo tempo de exaustão do leito, quando as concentrações de entrada e saída se igualaram.

3.2 EFICIÊNCIA DA DESSORÇÃO OU REGENERAÇÃO

3.2.1 Experimentos para Curvas de Dessorção ou Regeneração

O processo de dessorção ou regeneração do adsorvente ocorreu como etapa posterior a cada um dos experimentos de adsorção, seguindo o mesmo planejamento apresentado na Tabela 4.

Para cada vazão de alimentação, os experimentos de dessorção também foram realizados em triplicata, com duração de 240 minutos e dados de concentração coletados a cada 20 minutos.

De forma análoga ao procedimento utilizado para obtenção das curvas de ruptura, os valores médios de concentração foram calculados conforme os dados de cada triplicata e construíram-se as curvas de dessorção referentes a cada vazão de alimentação.

3.2.2 Cálculo da Eficiência da Coluna de Dessorção ou Regeneração

A eficiência da dessorção ou regeneração foi calculada a partir da relação entre a quantidade de massa de oxigênio dessorvida pela massa de oxigênio retida na CMS proveniente da adsorção anterior. (NASCIMENTO et al., 2014; LORDEIRO et al., 2006)

A massa de oxigênio dessorvida ($m_{Ox,d}$) foi calculada conforme a Equação 4. (LORDEIRO et al., 2006)

$$m_{Ox,d} = F \cdot \int_0^{T_f} C_{Ox} dt \quad (04)$$

Onde:

C_{Ox} : concentração de oxigênio ($g.L^{-1}$);

T_f : tempo final da dessorção (min);

F : Vazão volumétrica de alimentação ($m^3.min^{-1}$);

A eficiência de dessorção do leito (E) foi calculada conforme a Equação 5. (NEVES et al., 2019; LORDEIRO et al., 2006)

$$E (\%) = \frac{m_{Ox,d}}{m_{Ox,ad}} \cdot 100 \quad (05)$$

Onde:

$m_{Ox,d}$: massa de oxigênio dessorvida (g);

$m_{Ox,ad}$: massa de oxigênio retida ou adsorvida (g);

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

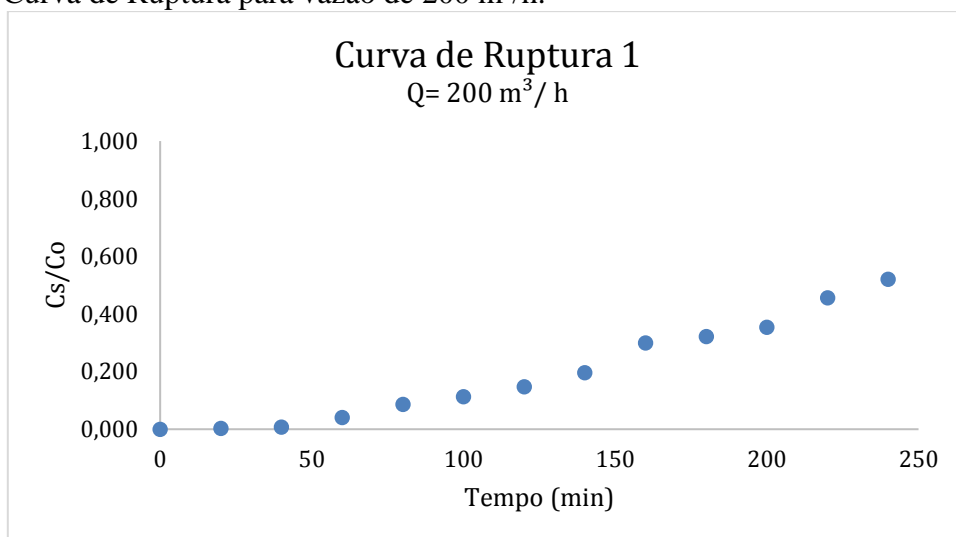
4.1 EFICIÊNCIA DA COLUNA DE ADSORÇÃO

Os experimentos para curvas de ruptura foram realizados na planta PSA JPN- 150 em cinco vazões diferentes a fim de analisar os efeitos provocados pela vazão de alimentação na operação da coluna de adsorção de leito fixo para produção de nitrogênio.

4.1.1 Curvas de Ruptura

A Figura 11 apresenta a curva de ruptura para o experimento com vazão de alimentação ajustada em 200 m³/h. Observou-se que os valores de pureza de nitrogênio obtido permaneceram na faixa de 50 %.

Figura 11- Curva de Ruptura para vazão de 200 m³/h.



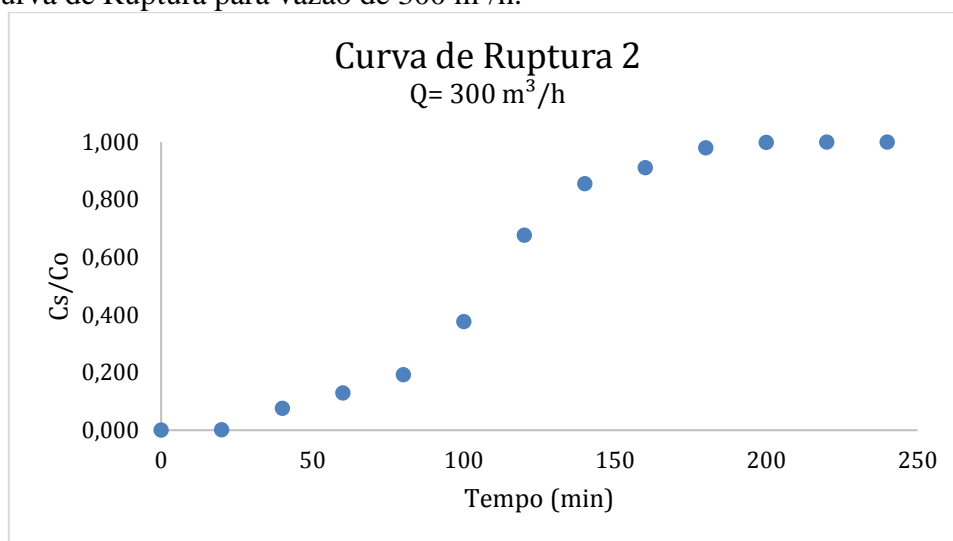
Fonte: Própria.

Conforme apresentado na Figura 11, a coluna não atingiu sua saturação total e consequentemente, no intervalo de tempo adotado, não se atingiu o tempo de ruptura para o experimento. Silva (2005) enuncia que a concentração inicial da espécie adsorvida constitui parâmetro de influência na adsorção. Deste modo, ao se adotar uma vazão relativamente pequena em relação à vazão de operação do equipamento (365 m³/h), houve o fornecimento de uma

quantidade reduzida de moléculas ao sistema, característica que promoveu pouca ou nenhuma competição entre as moléculas de oxigênio para se adsorverem na superfície da CMS.

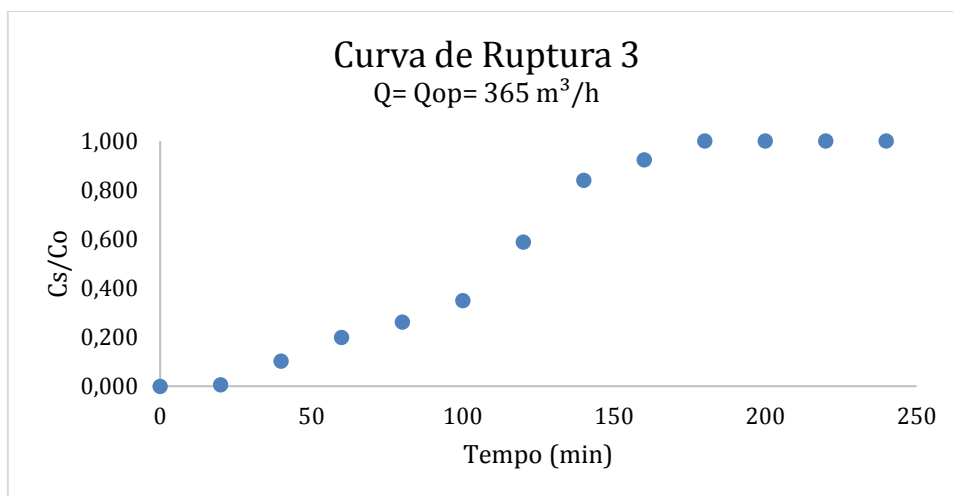
Para a vazão de alimentação ajustada em 300 m³/h (Figura 12) foi observado que a coluna atingiu a saturação em cerca de 220 minutos e a ruptura do sistema ocorreu em 160 minutos. Com um incremento de 65 m³/h, ajustando a vazão de alimentação do equipamento em 365 m³/h, vazão de operação definida pelo fabricante, observou-se que a coluna atingiu sua saturação em 180 minutos e sua respectiva ruptura ocorreu em 140 minutos (Figura 13).

Figura 12- Curva de Ruptura para vazão de 300 m³/h.



Fonte: Própria.

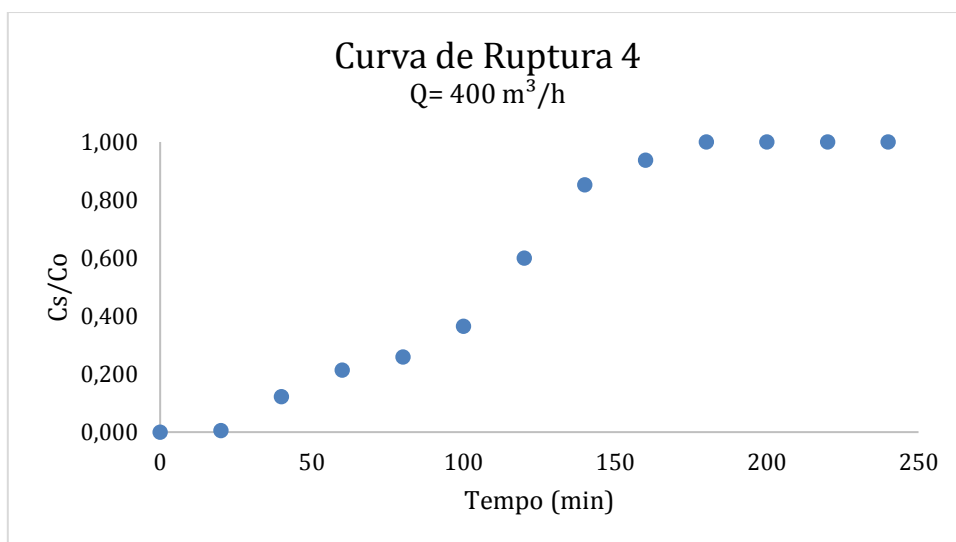
Figura 13- Curva de Ruptura para vazão de 365 m³/h.



Fonte: Própria.

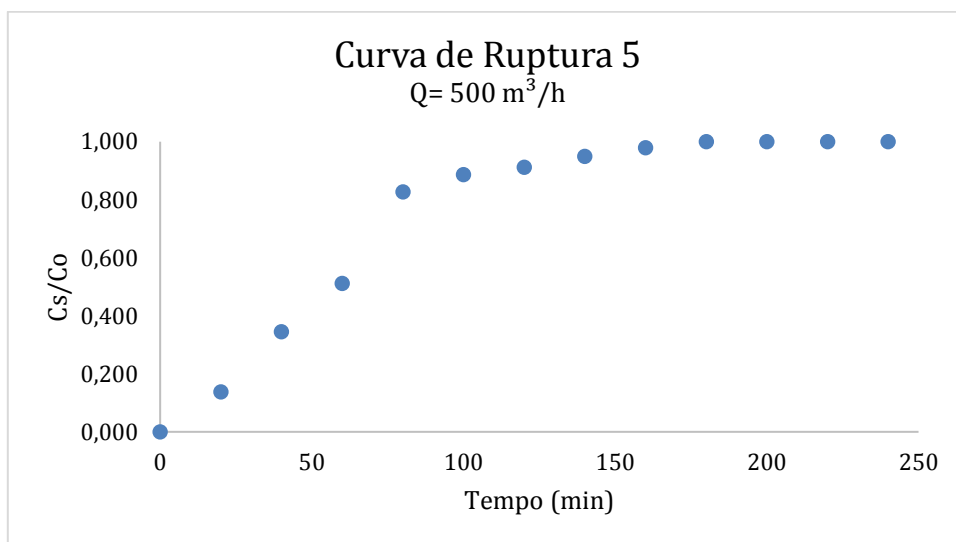
Operando com vazão de 400 m³/h, a coluna atingiu a saturação em 180 minutos e a ruptura ocorreu em 140 minutos de operação (Figura 14). Enquanto que operando com vazão de 500 m³/h a coluna atingiu a saturação em 160 minutos e ruptura em 80 minutos (Figura 15).

Figura 14- Curva de Ruptura para vazão de 400 m³/h.



Fonte: Própria.

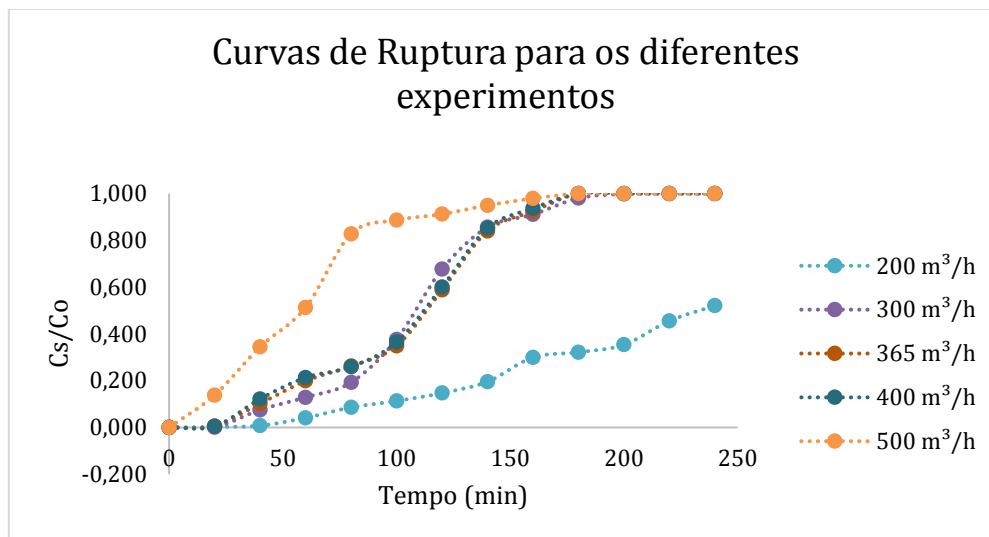
Figura 15- Curva de Ruptura para vazão de 500 m³/h.



Fonte: Própria.

A Figura 16 apresenta o comportamento das 5 Curvas de Ruptura obtidas conforme a variação da vazão de alimentação no sistema.

Figura 16- Curvas de Ruptura para os diferentes experimentos.



Fonte: Própria.

Foi observado para o processo de adsorção em coluna de leito fixo que o aumento da vazão de alimentação provocou uma redução no tempo necessário para obtenção dos pontos de ruptura e exaustão da coluna.

Em estudos sobre adsorção em batelada em colunas de leito fixo, Figueiredo (2014) enuncia que aumento da vazão de alimentação promove um aumento na quantidade de moléculas ao sistema, logo os tempos de exaustão e ruptura são atingidos mais rapidamente em vazões de alimentações maiores. Portanto, a mudança no gradiente de concentração afeta a taxa de saturação do adsorvente, assim, considerando a capacidade de carregamento da CMS finita, uma maior vazão de alimentação resulta numa saturação mais rápida no leito.

Silva (2005) afirma que, em um sistema de agitação, as moléculas de adsorbato adquirem movimento na solução, resultando em maiores chances de ocorrer adsorção. Assim, para os experimentos, o aumento de vazão promoveu um aumento no movimento turbulento do sistema, ao que Neves et al. (2019) complementa que tal aumento de vazão volumétrica acaba por reduzir o tempo de residência do fluido no interior do leito fato este que também colaborou para sua saturação mais rápida.

Observou-se que as curvas de ruptura que apresentaram comportamentos mais semelhantes ao comportamento previsto pela literatura correspondem aos experimentos que estão em torno da vazão de operação descrita pelo fabricante, sendo estes com as vazões de 300, 365 e 400 m³/h.

4.1.2 Cálculos da Eficiência da Coluna de Adsorção

Obtidas as curvas de ruptura para os experimentos, calculou-se o tempo de exaustão total do leito (t_t), determinado conforme a Equação 1. A capacidade utilizável do leito (t_u) até a ruptura foi calculada conforme a Equação 2. Por fim, calcularam-se as eficiências para cada experimento conforme a Equação 3. Os dados foram dispostos na tabela 5.

Tabela 5- Eficiência da adsorção para a Planta PSA- JPN 150.

Vazão de alimentação (m ³ /h)	t_u (min)	t_t (min)	n (%)
200	-	-	-
300	100,609	159,203	63,20
365	98,368	100,901	97,49
400	79,508	84,029	94,62
500	31,511	35,618	88,47

Fonte: Própria.

Conforme apresentado na Tabela 5, não foi possível calcular o tempo de exaustão e tempo utilizável do leito para o experimento com alimentação de 200 m³/h uma vez que a baixa vazão não promoveu a ruptura tampouco a exaustão da coluna.

A eficiência obtida no experimento com vazão de 300 m³/h foi de 63,20%. Neves et al. (2019) enuncia que operações de adsorção em baixas vazões volumétricas, por aumentarem o tempo de residência do fluido no interior da coluna, permitem que a adsorção ocorra com uma boa transferência de massa, aumentando a eficiência da coluna de adsorção. Não foi possível observar tal comportamento no experimento, visto que as vazões de 365 e 400 m³/h apresentaram as melhores eficiências.

O comportamento controverso pode ser explicado considerando as especificações do projeto. Observando que a bomba instalada no sistema é uma bomba centrífuga, a mesma não foi projetada

para receber fluxos muito abaixo da vazão de operação. Devido à baixa aceleração do fluido, a pressão absoluta do meio líquido pode baixar até que atinja a pressão de vapor do líquido, iniciando a vaporização em certos locais do fluido ao passar pela coluna, as bolhas de vapor formadas podem criar zonas mortas no interior da coluna, dificultando a transferência de massa e resultando na diminuição da eficiência da adsorção para o experimento. (DUNLOG, 2021)

Em seus estudos sobre o efeito da cavitação em bombas, Coelho (2006) complementa que as bombas centrífugas sofrem alteração mais drástica em suas curvas de operação característica. Desta forma, conclui-se que as bolhas formadas influenciam consideravelmente no desempenho do equipamento. Logo, para os experimentos com vazão de 200 e 300 m³/h, o fenômeno da cavitação pode ter contribuído para a diminuição das eficiências.

A maior eficiência foi verificada no experimento realizado com vazão de operação de 365 m³/h. O experimento com a segunda melhor eficiência foi obtido na vazão de alimentação a 400 m³/h, uma variação de 35 m³/h acima da vazão de operação. A influência da vazão na zona de transferência de massa é considerada como uma das etapas que controlam a transferência de massa do fluido para o adsorvente. Porém este efeito só é relevante até certo ponto, uma vez que as vazões citadas apresentaram valores de eficiência semelhantes. Logo, pode-se inferir que a vazão ótima, na qual houve a mínima resistência difusional, condiz com a vazão de operação de 365 m³/h, estabelecida pelo fabricante. (NEVES et al., 2019; GEANKOPLIS, 1993)

O experimento com a maior vazão de 500 m³/h obteve uma eficiência de 88,47 %, desta forma, o aumento da vazão provocou uma diminuição do tempo de residência no qual o fluido poderia permanecer no interior do leito, condição esta que atuou como uma limitação para que ocorresse a transferência de massa conforme desejado (BORBA, 2006). Neves et al. (2019) também explica que a alta vazão de alimentação do fluido provoca a diminuição de sua respectiva dispersão axial no interior da coluna. Assim, ao passar em alta velocidade, a transferência de massa provocada pela sua passagem a partir do centro em direção às extremidades da coluna foi reduzida, deste modo houve a redução de transferência de massa no sistema, o que resultou na diminuição de sua respectiva eficiência.

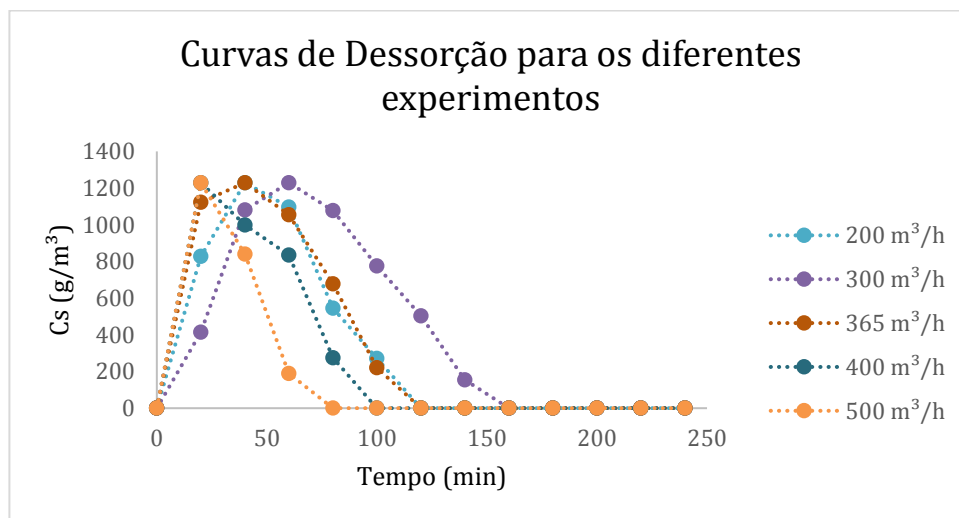
4.2 EFICIÊNCIA DA COLUNA DE DESSORÇÃO

Os experimentos para as curvas de dessorção foram realizados como etapa posterior referente a cada experimento para as curvas de adsorção. Desta forma, foram realizados 5 experimentos a fim de regenerar o material adsorvente e analisar os efeitos provocados pela vazão de alimentação com relação à dessorção ou regeneração da coluna previamente saturada pela etapa anterior.

4.2.1 Curvas de Dessorção ou Regeneração

A Figura 17 apresenta o comportamento das 5 Curvas de Dessorção obtidas conforme a variação da vazão de alimentação no sistema.

Figura 17- Curvas de Dessorção para os diferentes experimentos.



Fonte: Própria

Observou-se para o processo de dessorção que o aumento na vazão de alimentação provocou uma redução do tempo necessário para a total regeneração do adsorvente. Para Neves et al. (2019) a efetiva operação do processo de dessorção está intimamente ligada à eficiência obtida na operação de adsorção anterior. Desta forma, o aumento do fluxo volumétrico de alimentação provocou uma redução no tempo de exaustão para a coluna durante o processo de adsorção, o que

refletiu no processo de dessorção, uma vez que os tempos de regeneração da coluna também diminuíram.

As curvas obtidas apresentaram um comportamento em comum. Antes de apresentar a diminuição de concentração que corresponde ao processo de regeneração do adsorvente, ambas apresentaram um aumento inicial crescente de concentração de oxigênio retido. Este efeito, também foi observado por Lordeiro et al. (2006), que atribuiu ao comportamento a ocorrência do fenômeno de adsorção aparente, onde uma força externa promove a redistribuição dos sítios de ligação do adsorvente.

Deste modo, a modulação de pressão na coluna para a etapa de regeneração, por meio do diferencial de pressão aplicado, promoveu uma movimentação espacial da massa do adsorvente, liberando novos sítios de ligação que antes estariam inacessíveis devido às limitações estruturais, o que refletiu um comportamento semelhante ao de adsorção, visto que inicialmente houve retenção de moléculas de oxigênio. (LORDEIRO et al., 2006)

4.2.2 Cálculos da Eficiência da Coluna de Dessorção

Obtidas as curvas de dessorção para os experimentos, calcularam-se as eficiências para cada experimento conforme a Equação 5. Os dados foram dispostos na tabela 6.

Tabela 6- Eficiência da dessorção para a Planta PSA- JPN 150.

Vazão de alimentação (m ³ /h)	t_f (min)	E (%)
200	120	88,97
300	160	100
365	120	100
400	100	103,45
500	80	112,97

Fonte: Própria.

Para a vazão de 200 m³/h o valor mais baixo de eficiência foi obtido, o que pode ser atribuído a mudanças nas condições de fluxo devido a obstruções ou formações de bolhas, que também são

explicadas como consequências do fenômeno de cavitação, descrito anteriormente. (DUNLOG, 2021; COELHO, 2006)

Os experimentos para vazão de 400 e 500 m³/h apresentaram valores numéricos de eficiência que ultrapassam os 100%. LORDEIRO (2006) apresenta as implicações do método numérico utilizado para os cálculos. Considerando o cálculo de integrais e sua relação numérica com a área abaixo da curva de dessorção, um estreito pico de dessorção torna difícil a determinação exata da área abaixo dele. Portanto, há valores de incerteza associados aos cálculos de massa de oxigênio dessorvido, que se refletem nos valores obtidos de eficiência.

Conforme apresentado na Tabela 6, ambos os experimentos obtiveram valores de eficiência satisfatórios, uma vez que a eficiência de dessorção normalmente apresenta valores variando entre 80 a 100 %. (NEVES et al., 2019; LORDEIRO et al., 2006)

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no estudo da avaliação de eficiência do processo de geração de nitrogênio através do ar comprimido por meio do mecanismo PSA mostram que a planta de geração de nitrogênio utilizada opera com boas taxas de adsorção e dessorção, o que se mostra em conformidade com os dados informados pelo fabricante e literaturas semelhantes.

Através dos experimentos e planejamento adotado foi possível obter as curvas de ruptura para o processo de adsorção frente a diferentes vazões de operação. Deste modo, foi possível inferir para a Planta de geração de Nitrogênio PSA JPN-150 que o processo de adsorção ocorrido em coluna de leito fixo apresentou menores tempos de ruptura e exaustão da coluna conforme maiores vazões de alimentação do sistema.

Observou-se também que as curvas de ruptura que apresentaram comportamentos mais semelhantes ao comportamento previsto pela literatura correspondem aos experimentos que estão em torno da vazão de operação descrita pelo fabricante de 365 m³/h.

O cálculo das eficiências de adsorção e dessorção por meio do método de integração numérica permitiu uma representação matemática sobre as condições da planta analisada. De modo que se pode inferir que as condições de alimentação, operação e dimensionamento dos equipamentos do projeto satisfazem as propostas feitas pelo fabricante.

A melhor eficiência de adsorção foi de 97,49 %, obtida conforme experimento no qual a vazão de alimentação condiz com a vazão de operação proposta pelo fabricante (365 m³/h). A melhor eficiência de dessorção obtida foi de 100% nas vazões de 300 e 365 m³/h.

Para o cálculo de eficiência da dessorção, o método de integração numérica apresenta suas dificuldades em apresentar um valor confiável, uma vez que o estreito pico de dessorção torna difícil a determinação exata da área abaixo de sua curva, refletindo na obtenção de valores de eficiência acima de 100%.

Observadas as eficiências de adsorção e dessorção, foi possível inferir que o equipamento opera em estado ótimo na mesma vazão estabelecida pelo fabricante (365 m³/h) uma vez que esta apresentou eficiência de adsorção de 97,49% e eficiência de dessorção de 100 %.

Como alternativa, observou-se que elevando a vazão de operação para 400 m³/h os valores de eficiência ainda se apresentam aceitáveis, uma vez que a eficiência na adsorção foi de 94,62 % e na dessorção apresentou valor de 103,45 %. Assim, esta vazão pode ser utilizada no equipamento

sem grandes perdas de eficiência, com o benefício de reduzir o tempo de operação da coluna, que atinge sua exaustão mais rápido.

Portanto, os resultados obtidos permitem concluir que no estudo do processo de geração de nitrogênio através da adsorção do ar comprimido utilizando a tecnologia PSA, por meio da utilização do equipamento PSA JPN- 150 foi possível a obtenção de nitrogênio em excelentes taxas de pureza e operação com altos percentuais de adsorção e dessorção, o que reflete no tempo de vida útil do equipamento, promove a qualidade do produto final desejado e justifica assim, os custos com aquisição do equipamento pela indústria.

6 PERSPECTIVAS

Durante a elaboração do presente trabalho, foi despertado o interesse em relação aos fatores que possam contribuir para estudos futuros. Devido às limitações de se utilizar um equipamento pertencente à indústria, o único parâmetro que pôde ser estudado foi a variação da vazão de alimentação. Conforme a literatura enuncia, há outros parâmetros que também podem ser estudados para melhor avaliar a eficiência do processo de adsorção e dessorção, sendo estes:

- Avaliar a eficiência de adsorção e dessorção frente a alteração de pH do meio, utilizando diferentes adsorventes e em diferentes temperaturas de operação.
- Avaliar a influência dos parâmetros listados por meio do planejamento fatorial, analisando a eficiência como variável de resposta para os processos de adsorção e dessorção;
- Realizar a análise de impacto ambiental com relação à operação do equipamento;
- Verificar alternativas para reutilização do oxigênio gasoso descartado;
- Analisar os requisitos de segurança envolvidos na operação da planta.

REFERÊNCIAS

- ALVES, L. G. L. **REFRIGERAÇÃO E CLIMATIZAÇÃO: a importância da qualidade do ar nos ambientes condicionados**. Rio de Janeiro: Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, Marinha do Brasil, 2014.
- ARAUJO, E. P. **Apostila de ar condicionado e Exaustão**. Brasília: Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, 2011.
- BARBARINI, F. L. **Membranas de Peneira Molecular de Carbono obtidas pela pirólise de Poli(imidas) ramificadas**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2010.
- BENEFICIOS da geração de Nitrogênio com membrana de fibra oca. **PARKER**, 2017. Disponível em: <<http://blog.parker.com/br/beneficios-da-geracao-de-nitrogenio-com-membrana-de-fibra-oca>>. Acesso em: 24 de jun. de 2021.
- BONILLA, A.; MENDOZA, D.; REYNEL, H.. **Adsorption Processes for Water Treatment and Purification**. Switzerland: Springer International Publishing, 2017.
- BORBA, C. E. **Modelagem da remoção de metais pesados em coluna de adsorção de leito fixo**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2006.
- CAPOBIANCO, G. **Desenvolvimento de peneiras moleculares de carbono a partir de recursos de biomassa renováveis**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2005.
- CERQUEIRA, G. R.; ARAUJO JUNIOR, P. E. A influência do nitrogênio em aços inoxidáveis austeníticos com aplicação em próteses ortopédicas. **XVII Seminário Estudantil de Produção Acadêmica**, v. 19, n. 1, 07 jun. 2018.
- COELHO, R. W. **Análise do Fenômeno de Cavitação em Bomba Centrífuga**. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista, 2006.
- COMO as empresas têm inovado levando em conta a sustentabilidade?. **EOS Organização e Sistemas**. Disponível em: <<https://www.eosconsultores.com.br/inovacao-e-sustentabilidade/>>. Acesso em: 24 de jun. de 2021.
- COMO produzir Gás Nitrogênio?. **HB AR-COMPRESSO**, 2021. Disponível em: <<https://www.hb-arcomprimido.com/gerador-de-gas-nitrogenio/>>. Acesso em: 15 de jun. de 2021.

COMO usa nitrogênio em ar-condicionado?. **Web ar condicionado**, 2020. Disponível em: <<https://www.webarcondicionado.com.br/como-usar-nitrogenio-em-ar-condicionado>>. Acesso em: 17 de jun. de 2021.

DIEHL, R. C.; ALMEIDA, A. Globalização e Relações de consumo: As faces de um estado Contemporâneo. **10ª Jornada de Pesquisa e 9ª Jornada de Extensão do Curso de Direito**. 2018.

DUARTE, D. C. N. **Remoção de diclofenac de águas residuais por processo híbrido de adsorção/ nanofiltração**. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2019.

FIGUEIREDO, R. S. **Estudo da adsorção de manganês em batelada e coluna de leito fixo utilizando zeólita sintética**. Ouro Preto: Rede Temática em Engenharia de Materiais, 2014.

FREITAS, D. A. **Avaliação ambiental do processo produtivo de aparelhos de ar-condicionado utilizando a ferramenta análise do ciclo de vida (ACV)**. Manaus: Universidade Federal do Amazonas, 2013.

GARG, D. R.; AUSIKAITIS, J. . Molecular Sieve Dehydration Cycle for High Water Content Streams. **Chem Eng Prog**, p. 75–89, 1983.

GASGEN2: Geração de nitrogênio on-site traz vantagens. **PARKER**, 2017. Disponível em: <http://blog.parker.com/br/gasgen2%3A-geracao-de-nitrogenio-on-site-traz-vantagens>>. Acesso em: 17 de jun. de 2021.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport process and unit operations**. 3. Ed. New Jersey: Prentice Hall International, 1993.

GENIER, F. S.; COSTA, A. S.; COSTA JUNIOR, E. F. CICLOS DE REFRIGERAÇÃO: Conceitos e Estudos de eficiência. **Enciclopédia BIOSFERA**, Goiânia, v.9, n. 16, p. 2878- 2893, mai./ jun. 2013.

GERAÇÃO de nitrogênio com a tecnologia de Adsorção por Variação de Pressão (PSA). **Atlas Copco**, c2021. Disponível em: <<https://www.atlascopco.com/pt-br/compressors/wiki/compressed-air-articles/what-is-nitrogen>>. Acesso em: 03 de jun. de 2021.

GERADOR de Nitrogênio NitroMax. **METALPLAN**, c2021. Disponível em: <<https://metalplan.com.br/produtos/geradores-de-nitrogenio/>>. Acesso em: 15 de jun. de 2021.

GERADORES de Nitrogênio. **JOTAFLEX**, c2021. Disponível em: <https://www.jotaflex.com.br/geradores-nitrogenio>. Acesso em: 17 de jun. de 2021.

JANUS & PERGUER. **Memorial Descritivo de Implementação para Gerador PSA JPN-150**. Engetank Industria Mecânica Eirelli: Colombo, 2016.

JANUS; PERGHER. **Boletim Técnico: Gerador de Nitrogênio JPN**, 2020. Disponível em: <<https://januspergher.com.br/wp-content/uploads/2020/05/Gerador-de-Nitrog%C3%AAnio-JPN-2020.pdf>>. Acesso em: 25 de jun. de 2021.

KELLER, E. G. Adsorption: Building Upon a Solid Foundation. **Chem Eng Prog**, p. 67- 75, 1995.

KHAJURIA, H. **Model-based Design, Operation and Control of Pressure Swing Adsorption Systems**. United Kingdom: Imperial College London, 2011.

LORDEIRO, P.; HERRERO, R.; VICENTE, Sastre de. Batch desorption studies and multiple sorption–regeneration cycles in a fixed-bed column for Cd(II) elimination by protonated *Sargassum muticum*. **Journal of Hazardous Materials**, v. 9, n. 22, 9 mai. 2006.

LUVIZOTTO, D. M. **Transformações do nitrogênio e diversidade de *Planctomycetes* e sedimentos de mangueais**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2013.

MADEIRA, A. C. DA F. **Avaliação da tecnologia de adsorção “PSA” para remoção de nitrogênio do gás natural**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

MATOS, R. S. **Refrigeração**. Paraná: Universidade Federal do Paraná. Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC153/Apostila/Apostila%20Refrigera%E7%E3o.pdf>>. Acesso em: 15 de jun. de 2021.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Programa Brasileiro de eliminação dos HCFCs-PBH: treinamento e capacitação para boas práticas em sistemas de ar condicionado do tipo Split**. Brasília: MMA, 2015.

MOTA, M. F B. **Implantação de um sistema de Destilação Atmosférica de petróleos NO LABPETRO-UFES e estudos quimiométricos de frações**. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 2008.

NASCIMENTO, R. F.; LIMA, A.; VIDAL, C.; MELO, D.; RAULINO, G. **Adsorção: Aspectos teóricos e Aplicações ambientais**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014.

NEVES, C. F.; SCHVARTZMAN, M. A.; JORDÃO, E. **Instalação automatizada para separação e purificação de gases por PSA**. Belo Horizonte: Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, CNEN, 1999.

NEVES, C., STAUDT, J., SANTOS, G., SCHNEIDER, L., MODENES, A. Otimização da Eficiência de uma Coluna de Leito Fixo para Adsorção do Corante Reativo Azul 5G pela Escama de Peixe. **2º Congresso Sul- Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade**, 2019.

NITROGENIO Industrial: conheça as principais formas de obtenção e aplicações. **Atlas Copco**, 2019. Disponível em: <<https://eficienciaenergetica.atlascopco.com.br/nitrogenio-industrial-principais-formas-de-obtencao-e-aplicacoes/>>. Acesso em: 24 de jun. de 2021.

NITROGENIO. **INFOSOLDA**, 2013. Disponível em: <<https://infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/fundamentos/112-nitrogenio>>. Acesso em: 24 de jun. de 2021.

NITROGÊNIO: O que é e onde utilizar?. **Atlas Copco**, 2019. Disponível em:<<https://www.atlascopco.com/pt-br/compressors/wiki/compressed-air-articles/what-is-nitrogen1>>. Acesso em: 17 de jun. de 2021.

O QUE É CAVITAÇÃO?. **DUNLOG**. Disponível em:< <https://www.dulong.com.br/blog/o-que-e-cavitacao/>>. Acesso em: 29 de nov. de 2021.

OPERAÇÕES com tubulações. **Ambiente gelado**. Disponível em: <<http://www.ambientegegado.com.br/artigos-tecnicos/dicas-uteis/924-operacoes-com-tubulacoes-curvas-em-tubulacoes-de-cobre-aluminio-parte-2>>. Acesso em: 15 de jun. de 2021.

PEIXOTO, E. M. A. Nitrogênio. **Química Nova na Escola**, v. 20, n. 6, p. 570-686, 12 nov. 1997.

PEIXOTO, H. R. **Modelagem da separação de dióxido de carbono em processos de pós-combustão por PSA**. Ceará: Universidade Federal do Ceará, 2015.

PENEIRA Molecular de Carbono. **GOPHIN CHEMICAL**, 2020. Disponível em: <<https://pt.gophinchem.com/carbon-molecular-sieve-p00078p1.html>>. Acesso em: 25 de jun. de 2021.

PEREIRA, A. C. et al. Managers' perceptions about the contributions of the ISO 14001 certification process to environmental accounting practices. **Revista de Contabilidade e Organizações**, v. 7, n. 17, p. 69–84, 30 jul. 2013.

RODRIGUES FILHO, G. M. **Adsorção do corante Amarelo Reativo BF-4G 200% por argila esmectita**. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.

RUTHVEN, D. M.; KNAEBEL, K. S. **Pressure Swing Adsorption**. New York: VCH Publishers, 1994.

SAIBA como fazer a solda nas tubulações de ar- condicionado de forma correta. **DAIKIN**, 2019. Disponível em: <<https://www.daikin.com.br/blog/index.php/2019/11/13/saiba-como-fazer-a-solda-nas-tubulacoes-de-ar-condicionado-de-forma-correta/>>. Acesso em: 17 de jun. de 2021.

SANTOS, A. V.; VIANA, M. M.; MEDEIROS, F. H.; MOHALLEM, N. D. S. O incrível Mundo dos Materiais Porosos- Características, Propriedades e Aplicações. **Química Nova na Escola**, São Paulo, v.38, n.1, p. 4-11, Jan. 2015.

SANTOS, L. F. **Processos Químicos Industriais I: Derivados inorgânicos do nitrogênio**. Lorena: Universidade de São Paulo, 2014.

SANTOS, T. L. Nitrogênio e suas utilizações. **Educação Pública**, v. 13, n. 30, p. 12-15, 13 ago. 2013.

SILVA NETO, H., GARCIA, H., ARAUJO, R., GARCIA, C. Adsorção em coluna de leito fixo aplicada para pré- concentração de cádmio em amostras de água. **Scientia Plena**, v. 14, n.16, 24 mai. 2018.

SILVA, A. J. C. **Eficiência do uso do Nitrogênio e desempenho agrônômico do milho em Sistema de Plantio Direto na Palha de Lucena no Trópico Úmido**. Chapadinha: Universidade Federal do Maranhão, 2016.

SILVA, A. T. **Influência da temperatura na adsorção do corante azul de metileno utilizando serragem de Pinus elliottii como um adsorvente alternativo: um modelo para o tratamento de efluentes têxteis**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

STOCKKER, J.; WHYSALL, M.; MILLER, G. **30 Years of PSA Technology for Hydrogen Purification**. Illinois: UOP LLC, 1998.

VANTAGENS do uso de gerador de nitrogênio local (produção de nitrogênio on-site na indústria cervejeira). **HBR**, 2017. Disponível em: <<https://hbr.net/ultimas-noticias/vantagens-do-uso-de-gerador-de-nitrogenio-local-producao-de-nitrogenio-on-site-na-industria-cervejeira/>>. Acesso em: 17 de jun. de 2021.

VIREIRA, R. F. **Ciclo do Nitrogênio em Sistemas Agrícolas**. Brasília: Embrapa, 2017.

YANG, R. T. **Gas Separation by Adsorption Processes**. Boston: Butterworths Publishers, 1987.