



SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DO FLUIDO REFRIGERANTE R-410A UTILIZANDO UM MISTURADOR ESTÁTICO

¹ Vítor Marcelo de Queiróz (USS) – viktor.queiroz1402@gmail.com; ² Cristiane de Souza Siqueira Pereira (USS) – crispereirauss@gmail.com; ³ Marisa Fernandes Mendes (UFRRJ) – marisamf@ufrj.br; ⁴ Miguel Rascado Fraguas Neto (USS) – coord.engquim@uss.br; ⁵ Luiz Felipe Caramez Berteges (USS) – luizberteges@gmail.com.

Resumo: O gás refrigerante R-410A é produzido a partir da mistura dos gases refrigerantes: difluorometano e pentafluoroetano. Devido às exigências do protocolo de Montreal, o gás R-410A chegou ao mercado em substituição ao clorodifluorometano. Considerando as propriedades dos fluidos refrigerantes, é sempre um desafio para as indústrias a produção destes fluidos. Diante deste contexto, avaliou-se o uso de um misturador estático para fabricação do R-410 através de simulação computacional utilizando o simulador de processos ProSimPlus. Os resultados permitiram concluir que a inserção do misturador garante as especificações do produto dentro das normas estabelecidas pela empresa fabricante deste fluido.

Palavras-Chaves: difluormetano; pentafluoretano; HCFC.

SIMULATION OF THE PROCESS OF PRODUCTION OF R-410A REFRIGERANT FLUID USING A STATIC MIXER

Abstract: The refrigerant gas R-410A is produced from the mixture of the refrigerant gases: difluoromethane and pentafluoroethane. Due to the requirements of the Montreal protocol, R-410A gas has been placed on the market to replace chlorodifluoromethane. Considering the properties of the refrigerants, it is always a challenge for the industries to produce these fluids. Considering this context, the use of a static mixer to manufacture the R-410 was evaluated through computer simulation using the ProSimPlus process simulator. The results allowed concluding that the mixer insertion guarantees the specifications of the product within the standards established by the manufacturer of this fluid.

Keywords: difluoromethane; pentafluoroethane; HCFC.



1. INTRODUÇÃO

De acordo com a *American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers* (ASHRAE) o gás refrigerante denominado comercialmente como R-410A é produzido a partir da mistura dos gases refrigerantes: difluorometano CH_2F_2 (nome comercial: R-32) e pentafluoroetano CHF_2CF_3 (nome comercial: R-125). Embora seja uma mistura de fluidos, o R-410A assume propriedades físico-químicas de um novo produto [1].

Devido às exigências do protocolo de Montreal, o R-410A chegou ao mercado em substituição ao clorodifluorometano (nome comercial: R-22), um gás muito utilizado em sistemas de refrigeração comercial e residencial, e em bombas de calor com deslocamento positivo [2].

O R410A é considerado ecológico por não possuir substâncias à base de cloro que são prejudiciais à saúde e ao meio ambiente, causando danos à camada de ozônio.

O difluorometano (R-32) é considerado um gás extremamente inflamável e quimicamente estável. O pentafluoroetano (R-125) é conhecido como agente extintor de incêndio em instalações industriais e não é considerado inflamável nas condições ambientes de pressão e temperatura. A Tabela 1 apresenta as propriedades físico-químicas destes fluidos.

Tabela 1: Propriedades físico-químicas dos gases

Produto	Ponto de Ebulição (°C)	Pressão de Vapor (bar)	Densidade (g/cm ³)	Peso Molecular (g/mol)	Temperatura crítica (K)	Pressão crítica (bar)
R-32	-52	16,9	0,96	52,0	351,3	57,8
R-125	-49	13,8	1,19	120,0	339,1	36,2
R-410A	-51,6	16,5	1,06	72,6	345,2	49,2

Fonte: [3-6]

Considerando as propriedades dos fluidos refrigerantes, é sempre um desafio para a indústria a realização dessa mistura de forma homogênea e que atenda a especificação do produto. Usualmente são utilizados tanques e bombas de recirculação de produto para realizar a homogeneização do produto.

Os misturadores estáticos são um arranjo de elementos de mistura instalados em um tubo ou duto, que possuem baixos índices de manutenção periódicas e investimento. Eles funcionam sem peças móveis e são usados para obter mistura e dispersão específicas em processos contínuos. A mistura de líquidos e/ou gases miscíveis é obtida tanto pela divisão contínua quanto pela transposição radial do fluxo. A Figura 1 ilustra o misturador estático em um processo [13].

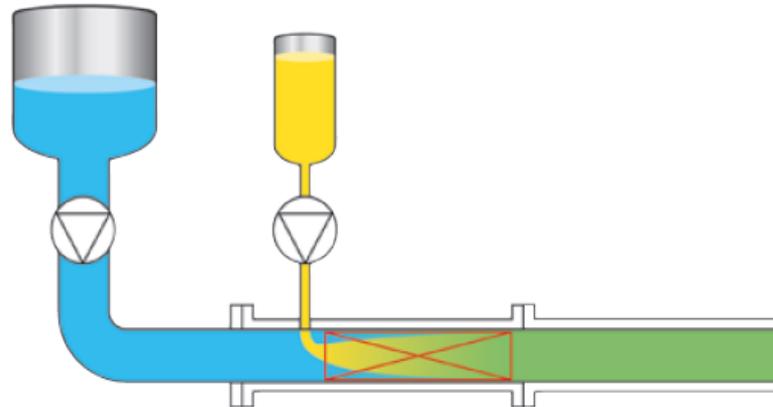


Figura 1 – Misturador estático em um processo

O fluxograma proposto no presente trabalho pode ser uma alternativa a dispensar tais equipamentos após o produto passar pelo misturador estático, podendo ser acondicionado até mesmo em sua embalagem final, o que irá proporcionar uma planta de baixo custo de implementação e manutenção, sendo estas as grandes vantagens do processo. Em contrapartida, é necessário que as vazões de entrada no misturador dos produtos sejam devidamente controladas e as frações sejam respeitadas para não desbalancear a mistura, esse controle pode exigir um investimento a mais no processo sendo a desvantagem do processo.

Em frente as dúvidas a utilização dos melhores processos é sempre um paradigma apresentar algo novo para o mercado, então este deve vir cercado de estudos e resultados consistentes para que a melhor decisão seja tomada na indústria visando otimizar o processo deixando-o mais produtivo e mais econômico.

A simulação de processos apresenta-se como uma ferramenta útil e amplamente utilizada para a previsão e desempenho de cenários ideais para sistemas de produção de fluidos refrigerantes. Mogaji [7] avaliou o comportamento de diferentes fluidos refrigerantes alternativos aos CFCs e HCFCs, utilizando a simulação computacional através de modelos fluidinâmicos. Uma revisão mais detalhada sobre a história da simulação para sistemas de refrigeração por compressão a vapor foi publicada por Ding [8].

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o uso de um misturador estático para mistura destes fluidos utilizando o simulador de processos ProsimPlus.

2. MATERIAL E MÉTODOS



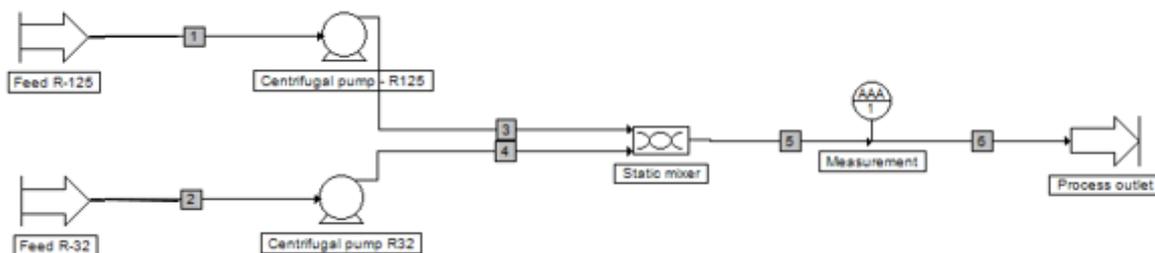
A simulação do processo foi realizada através do software de simulação ProSimPlus®. O simulador possui uma biblioteca ampla de modelos termodinâmicos, operações unitárias, e substâncias químicas. O modelo termodinâmico escolhido na base de dados do simulador foi o modelo para gases de Benedict-Webb-Rubbin utilizando a regra de mistura generalizada de Starling [9-11].

Os produtos R-125 e R-32 normalmente chega a empresa em carros-tanques fabricados previamente para armazenamento e transporte destes fluidos, sendo estes fluidos correspondentes a alimentação do processo. Estes carros-tanques são conectados em bombas centrífugas e os dois produtos são bombeados para o misturador estático. Após a homogeneização, a mistura é avaliada e analisada se atende aos critérios de qualidade. O fluido R-410A produzido é armazenado em um carro tranque. Para construção do fluxograma do processo, foram considerados os seguintes equipamentos e seus respectivos objetivos:

- 1) Bomba centrífuga (*centrifugal pump*): manter a vazão constante e sem variações de fluxo;
- 2) Misturador Estático (*static mixer*): misturar os fluxos dos fluidos refrigerantes e com saída de um produto;
- 3) Unidade de Bloco (*measurement*): a unidade de bloco *measurement* é conectada ao fluxo de saída de material para medir a concentração da mistura [12].

A Figura 1 ilustra o fluxograma do processo elaborado no software ProSimPlus®.

Figura 2 - Fluxograma do processo de produção do gás refrigerante R-410A



3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os fluxos de entrada para o misturador estático gerados na Entrada do processo com a simulação.

Tabela 2: Fluxos de Entrada de líquido-vapor obtidos na simulação na produção do R-410A



Fluxos de Entrada Líquido / Vapor				
Fluxos Entrada	R-32		R-125	
	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor
Feed para Bombas	100%	0%	100%	0%
<i>Peso molecular (g/mol)</i>	52,0234	-	120,021	-
Bombas para Misturador Estático	97,79%	2,21%	100%	0%
<i>Peso molecular (g/mol)</i>	52,0234	52,0234	120,021	-

A Tabela 3 apresenta os fluxos de saída do misturador gerados na Entrada do processo com a simulação.

Tabela 3: Fluxos de Saída de líquido-vapor obtidos na simulação na produção do R-410A

Fluxos de Saída Líquido / Vapor		
Fluxos Saída	R-410A	
	Líquido	Vapor
Misturador Estático para Unidade <i>Measurement</i>	94,55%	5,45%
<i>Peso molecular (g/mol)</i>	72,5848	
Unidade <i>Measurement</i> para a Saída do Processo	94,55%	5,45%
<i>Peso molecular (g/mol)</i>	72,5848	

Os resultados dos fluxos obtidos com a simulação evidenciaram a produção do gás R-410A utilizando o misturador proposto. De acordo com os dados obtidos para o fluido R-32 observa-se que durante a transferência do fluido pela bomba o mesmo altera seu estado físico de líquido para gás em aproximadamente 2,2 %, enquanto o R-125 não apresentou mudanças nesta etapa do processo. Por se tratar de fluidos que estão sob pressão é esperado este comportamento. O R-32 possui pressão de vapor maior que a do R-125 e tende a se volatilizar primeiro. Este resultado foi considerado satisfatório.

A Tabela 4 apresenta os dados obtidos na simulação para produção do R-410A em comparação aos limites estabelecidos pela *ASHRAE*. Os resultados permitem concluir que o produto se encontra dentro das especificações estabelecidas na fase líquida.



Tabela 4 – Concentração do R-410A nas fases Líquida e Vapor.

Concentração do R-410A					
	Produto	Componentes		Especificação ASHRAE	
Fase Líquida	R-410A	R-32	R-125	R-32	R-125
	94,55330%	49,66340%	50,33660%	48,5% - 50,5%	49,5% - 51,5%
Fase Vapor	R-410A	R-32	R-125		
	5,44671%	56,14350%	43,85650%		

Em primeiro lugar sempre deve-se avaliar se o produto na fase líquida atende a especificação ASHRAE para ser comercializado. Porém pode-se verificar a homogeneidade do produto entre as fases líquida e vapor devido o R-32 ser mais volátil.

Para quantificar o grau de homogeneidade nas fases líquida e vapor foi realizado o cálculo do coeficiente de variação, alcançando o valor de (0,0866) 8,66% para o R-32 e o valor de (0,0973) 9,73% para o R-125, que apresenta um valor médio de (0,09195) 9,2%, o que mostra que no processo de mistura sendo repetidamente amostrado, terá uma concentração que se desvie menos de 10% do valor médio. Este valor foi alcançado utilizando o cálculo abaixo: [14]

$$CoV = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2}$$

x_i = Medida da concentração (líquido e vapor),

\bar{x} = Média das concentrações e

n = número de amostragens.

Este grau de homogeneidade pode ser menor alterando as condições do processo.

4. CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos concluiu-se que o misturador proposto pode ser utilizado na fabricação do R-410A. As variáveis analisadas estão de acordo com os resultados obtidos na planta atual de processo, o que deixará a planta mais enxuta e com custos de operação mais baixos dispensando equipamentos de alto investimento como tanques e bombas de recirculação, porém ainda deve ser verificado o controle das vazões do produto, que pode ser através de automação. O estudo da simulação de processo permitiu concluir que os softwares comerciais desenvolvidos para simulação facilitam a modelagem do sistema, e permitem prever melhorias otimizando



os processos industriais.

5. REFERÊNCIAS

¹ STANDARD, ASHRAE. Designation and safety classification of refrigerants. **Ansi/Ashrae Standard**, p. 34-2007, 2008.

² PBH - **Programa Brasileiro de Eliminação de HCFCs**, Disponível em: http://www.protocolodemontreal.org.br/site/images/publicacoes/programa_brasileiro_eliminacao_hcfc/1619.pdf, acessado em 11/04/2018.

³ CHASE JR, Malcom W.; TABLES, NIST-JANAF Thermochemical. Data reported in NIST standard reference database 69, June 2005 release: NIST Chemistry WebBook. **J. Phys. Chem. Ref. Data, Monograph**, v. 9, p. 1-1951, 1998.

⁴ LÜDDECKE, T. O.; MAGEE, J. W. Molar heat capacity at constant volume of difluoromethane (R32) and pentafluoroethane (R125) from the triple-point temperature to 345 K at pressures to 35 MPa. **International journal of thermophysics**, v. 17, n. 4, p. 823-849, 1996.

⁵ Chemours. **THERMODYNAMIC PROPERTIES OF R-410A**, Disponível em: https://www.chemours.com/Refrigerants/en_US/products/literature.html

⁶ Chemours. **THERMODYNAMIC PROPERTIES OF HFC-125 REFRIGERANT**, Disponível em: https://www.chemours.com/Refrigerants/en_US/products/literature.html

⁷ MOGAJI, T. **Simulation and comparison of the performance of refrigerant fluids in single stage vapour compression refrigeration system**. Br. J. Appl. Sci. Technol, v. 8, n. 6, p. 583-594, 2015.

⁸ DING, Guo-liang. **Recent developments in simulation techniques for vapour-compression refrigeration systems**. **International Journal of Refrigeration**, v. 30, n. 7, p. 1119-1133, 2007.

⁹ ABOUL-FOTOUH, K. H. Use of a generalized modified BWR equation of state for halogenated hydrocarbon saturated thermodynamic properties. In: **Proceedings of the Oklahoma Academy of Science**. 1978. p. 77-80.



¹⁰ WEI-MIN, Y. U. A. N. Modified Benedict-Webb-Rubin-Starling Equation of State [J]. **Petroleum Engineering Construction**, v. 6, p. 004, 2012.

¹¹ STARLING, K.E., 1973, **Fluid Thermodynamic Properties for Light Petroleum Systems**, Gulf Publishing Company, Houston, Texas.

¹² PROSIMPLUS (2017). **ProSimPlus Library** (Standard version + rate base option). Disponível em: <<http://www.prosim.net/bibliotheque/File/Brochures/Unit-Operations-ProSimPlus-Library-3-5-11.pdf>>

¹³ Sulzer - **Mixing and Reaction Technology**, Pace Setting Technology. Disponível em: https://www.sulzer.com/-/media/files/products/static-mixers/mixing_and_reaction_technology_e_23270640.ashx

¹⁴ SONIA MARIA BARROS BARBOSA CORREA, **Probabilidade e estatística** 2^a ed. - Belo Horizonte PUC Minas Virtual, 2003