

**MERCOFRIO 2016 - 10º CONGRESSO INTERNACIONAL DE
AR CONDICIONADO, REFRIGERAÇÃO, AQUECIMENTO E VENTILAÇÃO**

**ANALISE DA OPERAÇÃO DE DROP-IN DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO PELA METODOLOGIA
DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E FUNÇÃO DESEJABILIDADE**

Victor Hugo Panato - vpanato@ufu.br

Marcus Almeida Queiroz - engmarcusalmeida@hotmail.com

Luis Manoel Paiva Souza - luismanoel_tap@hotmail.com

Arthur Heleno Pontes Antunes - arthur.antunes@ufu.br

Enio Pedone Bandarra Filho - bandarra@ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, www.ufu.br

F6 - Materiais e Refrigerantes

Resumo. O Objetivo desse estudo é avaliar os ganhos em um processo de drop-in de um refrigerante em um sistema básico de refrigeração usando a Metodologia de Superfície de Resposta para otimização. Um planejamento Composto Central e uma análise de variância também são utilizados no trabalho. Adicionalmente, o modelo elaborado será analisado e comparado com resultados experimentais, consolidando assim vários parâmetros na busca de melhor região operacional com um número de experimentos reduzidos. A Metodologia de Superfície de Resposta é um conjunto de ferramentas estatísticas, que descreve a região de interesse por meio de pontos experimentais e uma equação polinomial. Os dados experimentais foram extraídos de uma bancada de teste comporta por um compressor recíprocante, evaporador e condensador tipo tubo-em-tubo e válvula de expansão eletrônica. R22, R290, R1270, R438A, R404A, R134a, R410 e R32 foram testados no mesmo aparato experimental. O óleo lubrificante foi trocado em alguns casos. O maior valor do coeficiente de Performance e Capacidade de Refrigeração foram investigados. Os resultados obtidos com a MSR apresentaram boa concordância com o trabalho experimental (R^2 excedeu 0,8) que indica, boa representação das variáveis de saída do sistema de refrigeração. As ferramentas de otimização foram aplicadas para identificar áreas de máximo, permitindo melhor comparação dos resultados obtidos pelos diferentes refrigerantes.

Palavras-chave: Drop-in, R22, Otimização, Superfície de Resposta, Função Desejabilidade

1. INTRODUÇÃO

A substituição dos fluidos refrigerantes que prejudicam a camada de ozônio por opções com ODP (Ozone Depletion Potential) nulo teve como marco o Protocolo de Montreal (1987). Desde então, muitos trabalhos vem sendo desenvolvidos em busca de fluidos alternativos aos CFC (Clorofluorcarbonetos) e HCFC (Hidrofluorcarbonetos).

Com o desenvolvimento dos estudos, várias opções foram avaliadas, entre elas os HFC (Hidrofluorcarbonetos), fluidos que não possui o elemento cloro e não impacta a camada de ozônio, porém, em sua grande maioria, possuem alto impacto no efeito estufa. Os HC (Hidrocarbonetos), um dos primeiros fluidos refrigerantes utilizados, ainda no século XIX, voltaram a ser analisados como alternativa pois não impactam na camada de ozônio e possuem baixa contribuição para o efeito estufa (baixo GWP - Global Warming Potential). Contra esses fluidos, existe a preocupação na sua utilização devido sua alta inflamabilidade.

Além de novos fluidos e novas tecnologias para os equipamentos futuros, a pesquisa para redução do impacto ambiental possui uma frente de trabalho que analisa a condição do legado, equipamentos existentes, em plena operação e vida útil. Para esse grupo, o *drop-in* e o *retrofit* são possibilidades para manter suas condições operacionais, com impacto ambiental reduzido, e quando possível, melhorando a eficiência energética e capacidade de refrigeração. O *drop-in* é uma simples substituição do fluido refrigerante enquanto o *retrofit* é um processo de atualização dos equipamentos pela substituição ou reforma de seus componentes.

Devido a diversidade de equipamentos instalados e seus diferentes comportamentos, muitos estudos experimentais vem sendo desenvolvido com operações de reaproveitamento do equipamento existente.

Devido ao custo e dificuldades de realizar esses experimentos, somado ao desenvolvimento computacional, impulsionaram a utilização de ferramentas de simulação e otimização para a área. Trabalhando em conjunto com o planejamento estatístico, esse conjunto tem sido utilizado no desenvolvimento novos trabalhos nesse campo. De forma geral, podemos dizer que essas ferramentas possibilitam ganhos com tempo, disponibilidade e custos para execução de experimentos e com pessoal técnico (Kincl et. al., 2005).

A seguir será apresentada uma análise, utilizando o planejamento de experimentos com a metodologia de superfície de resposta e função de desejabilidade para determinar os pontos de ótimo operacionais de cada fluido, para determinação do

melhor fluido alternativo ao R22. Os dados experimentais foram coletados de uma bancada experimental com compressor recíprocante. Uma validação do trabalho também é discutida no decorrer do texto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A utilização de ferramentas estatísticas colabora nos trabalhos experimentais de diversas formas: Definição de limites, regiões de melhor comportamento, melhores conjuntos, etc.

O planejamento experimental (Designed Experiments) foi apresentado por Box and Wilson (1951). Permite a análise de alterações em variáveis controláveis e seus impactos no resultado do experimentos (Montgomery & Runger, 2003).

A escolha do tipo de amostragem é importante pois define o número de ensaios que serão executados. A correta seleção pode reduzir o número de experimentos requeridos (Özbayoglu & Atalay, 2000). Segundo Neto et. al. (2001), o Experimento Composto Central é um modelo de segunda ordem composto por:

- Pontos fatoriais (vértices) com coordenadas $x_i = \pm 1$, para todos os $i = 1, 2, \dots, k$, onde k é o número de fatores;
- Pontos de estrela (axiais) que permite a estimativa dos efeitos quadráticos e efeitos de curvatura ($\alpha > 1$);
- Ponto central, utilizado para identificação do erro puro (falta de ajuste).

A Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) é um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas, usado para representar (visualizar) modelos e analisar problemas de engenharia (Aslan & Cebeci, 2007). A RSM pode ser utilizada para selecionar o ponto ou região ótima de uma variável independente ou mesmo, os maiores efeitos (Bezerra et. al., 2008).

Aslan (2008) utilizou a RSM para estabelecer uma relação entre três variáveis de um MGS (Multi-gravity Separator) e determinar o ponto de operação ótimo.

A equação utilizada para preparação das superfícies é apresentada na Eq. 1:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \sum_{i > j}^k \sum_j^k b_{ij} X_i X_j + e \quad (1)$$

onde:

X_i : são os fatores independentes;

b_0 : é o ponto de intersecção do eixo x;

b_i : é o coeficiente de primeira ordem do modelo;

b_{ii} : é o coeficiente de segunda ordem do fator;

b_{ij} : é o coeficiente linear do modelo para a interação dos fatores i e j;

k : é o número de fatores analisados e otimizados

e : é o erro experimental.

Dharma et al. (2016) utilizou a RSM para otimizar o processo de produção de biodiesel. Com um planejamento experimental do tipo Box-Behnken, eles obtiveram bons ajustes das curvas (pela análise do R^2 e $\bar{R}^2$) e identificaram os parâmetros operacionais ótimos.

Para verificação do ajuste, teste de importância dos fatores e qualidade do modelo, utilizou a ANOVA (Ferreira et. al., 2007a). A falta de ajuste do modelo foi avaliado com 95% de confiabilidade. O coeficiente de determinação (R^2) e o coeficiente de determinação ajustado ($\bar{R}^2$) são verificados para análise da proporção representada pelo modelo. Quanto maior o valor do coeficiente de determinação, mais preciso é o modelo (Liu & Zhang, 2016).

Dentre as possibilidades de otimização, diversos algoritmos e metodologias tem sido utilizado tanto na pesquisa quanto na indústria. Como o objetivo é analisar o sistema composto, a análise deve ser realizada combinando o modelo que representa cada parâmetro, conhecida como técnica de otimização de multivariáveis.

As técnicas de otimização ajudam a entender e maximizar os efeitos provenientes da interação entre os parâmetros, indicando a região de interesse (Ferreira et. al., 2007b).

Costa and Lourenço (2014) avaliaram 4 diferentes critérios de otimização de problemas com multiresposta. Eles observaram que o Global Criterion-Based (GC) apresentou os melhores resultados para respostas em conflito. Eles também testaram os métodos de média geométrica (DGM), Média Aritimética (DAM) e Lexicographic Weighted Tchebycheff (LWT Criterion).

Rodrigues et al. (2015) investigou os métodos de CP (Compromise Programming) e GP (Goal Programming) comparando com o método da função Desirability. Eles identificaram que o método de GP pode ficar preso aos pontos de ótimo locais, mesmo assim, apresentou resultados superiores aos encontrados pelo método de Derringer and Suich (1980).

No caso onde se dispõe das superfícies de respostas, a sobreposição das mesmas (overlapped) é uma alternativa aceitável (Sivertsen, Bjerke, Almoy, Segtnan, & Naes, 2007). A localização da região de melhor resultado será realizada por análise visual. Esse método tem limitação quanto a aplicação de restrição, como no caso da temperatura de evaporação (T_{EV}) e capacidade de refrigeração (Q_{EV}) para este trabalho. Outro ponto sobre a sobreposição de superfície de resposta é que a análise visual torna-se mais difícil quando o objetivo por parâmetros são opostos (Maximizar e Minimizar duas características). Nesse caso, deve-se utilizar outro método que otimize por meio do tratamento dos modelos desenvolvido.

A função de Desejabilidade, sugerida por Derringer e Suich e depois modificada por Derringer (1994), é um método que combina as equações (modelos) em uma única equação, utilizando pesos para cada variável. Eles sugeriram funções individuais que podem assumir valores entre 0, for a completely undesirable response and 1, fully desired response (Dalvand et. al., 2014).

A combinação das funções individuais dá origem a Desejabilidade Global. Essa deve ser maximizada / minimizada para a obtenção do ponto de interesse, otimizando de uma única vez todas as respostas. A função de desejabilidade inclui 3 tipos diferentes de resposta (Costa et. al., 2012):

1. Nominal - the - best (NTB): Espera-se que o valor da resposta estimada alcance um valor alvo particular;
2. Smaller - the - best (STB): Espera-se que o valor da resposta estimada seja menor que um limite superior;
3. Larger - the - best (LTB): Espera-se que o valor da resposta estimada seja maior que um limite inferior

As Equações de Desejabilidade individuais (d_i) são apresentadas nas Eq. 2, 3 e 4 (Bezerra et. al., 2008; Bukzem et. al., 2016).

$$d_i = \begin{cases} 0 & \text{if } y < L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^s & \text{if } L \leq y \leq T \\ 1 & \text{if } y > T \end{cases} \quad (2)$$

Onde L é o menor valor aceitável e T é o valor desejado. y é a variável dependente que se quer maximizar (LTB) e s é o peso desse parâmetro.

$$d_i = \begin{cases} 1 & \text{if } y > T \\ \left(\frac{U-y}{U-T}\right)^t & \text{if } T \leq y \leq U \\ 0 & \text{if } y < T \end{cases} \quad (3)$$

Onde U é o maior valor aceitável. Neste caso, se busca minimizar (STB) a resposta. t é o peso.

Outra possibilidade é quando se busca por um valor intermediário. Neste caso, o valor de T deve ser maior que o valor mínimo (L) e menor que o valor máximo (U). Neste caso função Desejabilidade é dada por:

$$d_i = \begin{cases} 0 & \text{if } y < L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^s & \text{if } L \leq y \leq T \\ \left(\frac{U-y}{U-T}\right)^t & \text{if } T \leq y \leq U \\ 1 & \text{if } y > U \end{cases} \quad (4)$$

Desta forma, definidas as funções de desejabilidade individuais, a função Global é escrita pela média aritmética das funções individuais

$$D = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_n)^{1/n} \quad (5)$$

onde n é o número de respostas individuais que se pretende otimizar.

Uma característica pertinente da função de desejabilidade é que ela se anula quando qualquer uma das respostas está fora da região de interesse, devido ao uso da média geométrica.

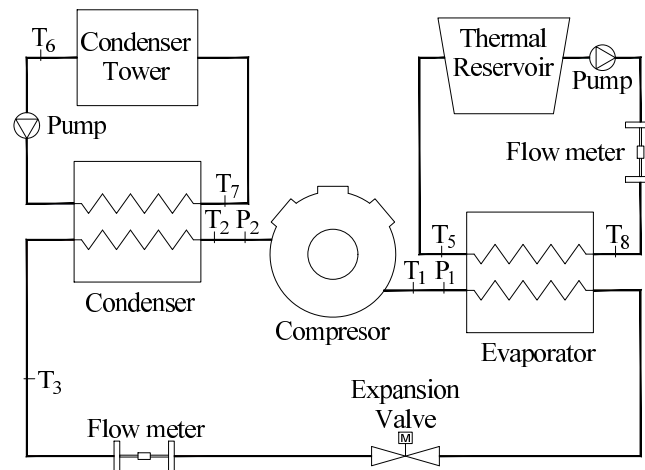


Figure 1: Desenho esquemático da bancada experimental

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O processo de dropin foi realizado em uma bancada experimental no Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia (LEST nano) da Universidade Federal de Uberlândia. O sistema de refrigeração em análise é constituído por um compressor alternativo, válvula de expansão eletrônica e dois trocadores de calor tubo em tubo e foi construído para análise de fluidos refrigerantes alternativos. Os dados dos equipamentos são detalhados na Tab. 1. A modulação da velocidade de operação do compressor é realizada com o auxílio de um inversor de frequência. Outros equipamentos auxiliares como banco de carga para simulação da carga térmica, torre de arrefecimento, bombas, etc. são utilizados para o funcionamento mas não detalhados nesse texto. A Fig. 1 apresenta um desenho esquemático da bancada experimental. O cálculo da incerteza de medição foi realizado por meio de software, considerando os valor individual de incerteza de cada instrumento.

Os fluidos refrigerantes experimentados nessa bancada são apresentados na Tab. 2, juntamente com as massa utilizada (carga de refrigerante) e os limites operacionais.

As leituras foram realizadas em condição de regime permanente. Os limites operacionais foram utilizados para elaboração do planejamento composto central, realizado com auxílio de software estatístico. A cada conjuntos de testes (com um fluido refrigerante), uma operação de dropin foi executada, onde, após a retirada do fluido refrigerante, uma operação de vácuo foi realizada até $400 \mu\text{mHg}$ e posteriormente, um novo fluido foi introduzido. Foi utilizado o óleo mineral para os fluidos R22, R290, R1270 e R438A. Durante a substituição do R438A pelo R404A, foi realizada a troca do óleo lubrificante por um polioéster, compatível com os fluidos ainda por testar (R404A, R134a, R410A e R32). Para cada fluido refrigerante, foram realizados 13 experimentos, sendo 5 no ponto central, para identificação do erro experimental.

A bancada experimental operou sempre com os fatores ajustados conforme planejamento (A_{VEE} e F_{CP}). O Reservatório térmico tem a função de trocar calor com o fluido refrigerante. A temperatura de entrada de água no evaporador (T_8) e vazão mássica foram definidas e mantidas em 20°C e $0,35 \text{ kg/s}$, respectivamente, para todos os ensaios. Os outros parâmetros foram coletados quando se alcançou o regime permanente. Um medidor de vazão Coriolis foi utilizado para medição da vazão mássica do fluido refrigerante. A capacidade de refrigeração foi calculada usando a vazão mássica e a entalpia do refrigerante na entrada e saída do evaporador, de acordo com a 1ª lei da termodinâmica.

Após a execução dos testes, foram realizados os tratamentos estatísticos dos resultados. O teste de hipótese (ANOVA), revelou os termos representativos para cada fluido refrigerante. A Fig. 2 apresenta o resultado da análise do modelo matemático do COP (Coeficiente de Performance), para o fluido de referência R22. Pode-se observar que o valor de

Table 1: Principais equipamentos utilizados na bancada experimental

Equipamento	Categoria	Modelo	Capacidade Nominal [kW]
Compressor	alternativo	Octagon 2DC – 3.2	7,6
Condensador	tube in tube		26,2
Evaporador	tube in tube		17,5
Válvula de Expansão	Eletrônica	$E^2V18BRB00$	

Table 2: Fluidos refrigerantes em análise e limites operacionais: Frequência de operação do compressor (F_{CP}) e Grau de abertura da válvula de expansão eletrônica (A_{VEE})

Fluido	Carga [kg]	F_{CP} [Hz]			A_{VEE} [%]		
		Inferior	Central	Superior	Inferior	Central	Superior
R22	3,2	40	50	60	50	70	90
R290	1,5	40	50	60	50	70	90
R1270	1,5	40	50	60	50	70	90
R438A	3,0	40	50	60	50	70	90
R404A	2,4	40	50	60	50	70	90
R134a	3,2	40	50	60	45	55	65
R410A	3,0	35	40	45	35	45	55
R32	1,9	35	40	45	35	45	55

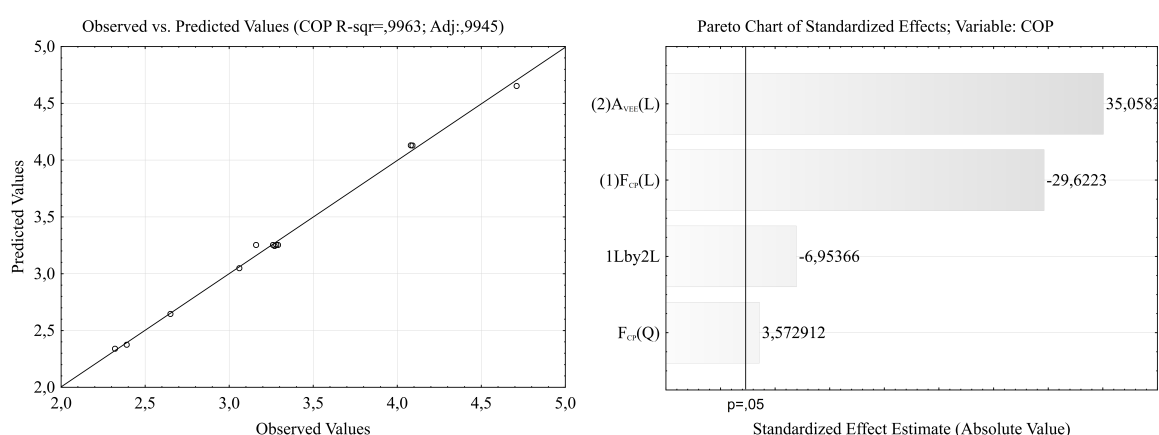


Figure 2: Resultado da análise de variância (ANOVA) para o parâmetro COP - Fluido: R22

coeficiente de determinação ajustado ($\bar{R}^2$) é maior que 0,80 ($\bar{R}^2 = 0,9945$), valor que indica bom ajuste do experimento ao modelo matemático. Todos os valores de ($\bar{R}^2$) analisados, atingiram resultados superiores a 0,80.

A qualidade da metodologia pode ser avaliada por uma comparação com os resultados experimentais. Utilizou-se testes realizados por Antunes (Antunes, A. H. P., 2015) na mesma bancada experimental, onde foram selecionados pontos de máximo Q_{EV} (Frequência de operação do compressor igual a 45 e 65 Hz) e pontos extraídos pela função de Desejabilidade para essa mesma frequência. Os resultados também foram organizados pelas temperaturas de evaporação de -5, -10 e -15°C.

Aproximadamente 56% dos pontos estimados estão dentro do intervalo de incerteza da medição. Parte dos pontos fora desta região, deve-se ao fato da função de desejabilidade não ter trabalhado com a temperatura alvo exata, acrescentando com isso um erro no cálculo pela função de otimização. 5 medições (aproximadamente 10%) precisam ser reavaliadas pois apresentaram valores com erro maior de 10%, o que podem ser acarretados por diversas causas. A Fig. 3 apresenta uma comparação entre as relações dos pontos experimentais e calculados com a função de desejabilidade para $T_{EV} = -15^\circ\text{C}$.

A seguir, podemos utilizar a função da desejabilidade em outros pontos. De posse dos modelos elaborados, busca-se por meio da equação de desejabilidade, a melhor condição de operação (ponto ótimo operacional), para temperaturas de evaporação específicas, maximizando o COP e Q_{EV} . O fluido R22 foi utilizado como referência para comparação, assim, definiu-se três temperaturas de evaporação para análise: -5°C, -10°C e -15°C. Para esses valores, obteve-se o ponto ótimo operacional, maximizando a função de desejabilidade com pesos iguais para essas duas variáveis. A definição de pesos em problemas de multivariáveis é sempre uma decisão crítica, pois é particular do tomador de decisão (Costa et al., 2012) e leva em conta a aplicação e necessidade de cada caso. A Fig. 4 mostra o comportamento da função de desejabilidade e os valores maximizados encontrados para o R22 com $T_{EV} = -10^\circ\text{C}$.

Pode-se observar que os pontos selecionados não indicam o máximo COP, nem o máximo Q_{EV} . O Objetivo desta etapa é identificar o melhor conjunto para o fluido R22, que será utilizado como referência para as comparações subsequentes.

A próxima etapa é realizar a otimização para os fluidos alternativos, na busca dos pontos com as mesmas condições (T_{EV} e

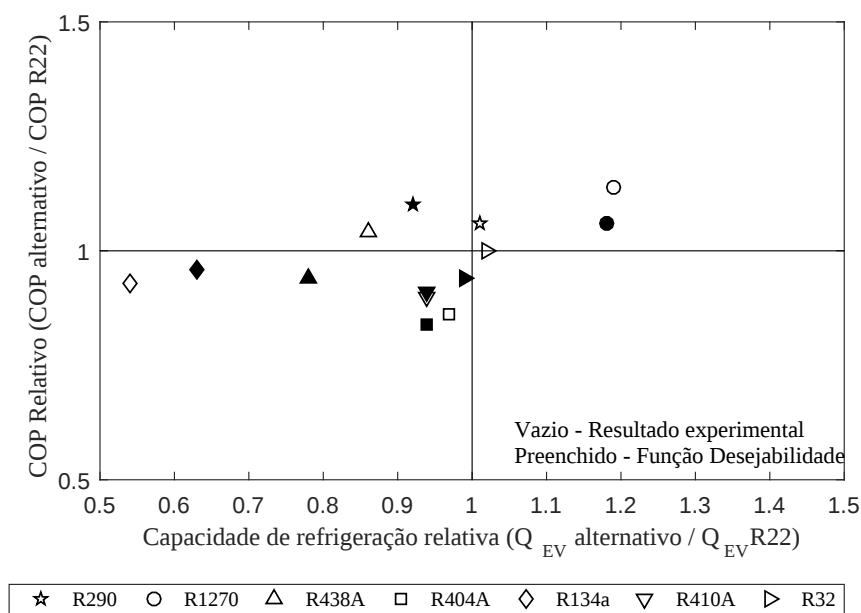


Figure 3: Comparação dos resultados experimentais e otimizados pela função desejabilidade. Máximo Q_{EV} para $T_{EV} = -15^{\circ}\text{C}$.

Q_{EV}) para identificação do melhor COP, que servirá para comparar os fluidos alternativos aos resultados do R22. A Tab. 3 apresenta o valor encontrado para todos os fluidos analisados.

É importante ressaltar que, para os fluidos alternativos, o ponto apresentado na Tab. 3 não é o ponto ótimo operacional, como definido para o R22, que maximiza a função desejabilidade (máximo conjunto COP e Q_{EV}). A restrição da capacidade de refrigeração implica em uma nova função desejabilidade, que resulta em aumento ou redução do COP mas busca o melhor ponto (maior COP) para um específico Q_{EV} .

Desta forma, podemos recriar a Fig. 3, agora não mais para a máxima capacidade, e sim para uma capacidade específica, tornando a análise flexível para qualquer ponto de interesse. Na Fig. 5, selecionamos, como descrito anteriormente, $Q_{EV} = 9 \text{ kW}$ e $T_{EV} = -5^{\circ}\text{C}$ e plotamos a comparação. Pode-se observar que a variação no eixo das abscissas é pequeno pois se refere a capacidade de refrigeração, a qual foi restringida durante a utilização da função desejabilidade.

Com a análise da função desejabilidade, podemos observar o comportamento das variáveis dependentes em função dos fatores testados (Grau de abertura da válvula de expansão eletrônica e frequência de operação do compressor).

Table 3: Resultados dos testes otimizados pela função desejabilidade

Fluido	$T_{EV} = -5^{\circ}\text{C}$			$T_{EV} = -10^{\circ}\text{C}$			$T_{EV} = -15^{\circ}\text{C}$		
	$T_{EV}[^{\circ}\text{C}]$	COP	$Q_{EV}[\text{kW}]$	$T_{EV}[^{\circ}\text{C}]$	COP	$Q_{EV}[\text{kW}]$	$T_{EV}[^{\circ}\text{C}]$	COP	$Q_{EV}[\text{kW}]$
R22	-5,06	3,43	9,00	-9,93	3,02	7,63	-14,97	2,58	6,74
R290	-4,87	3,39	9,45	-10,03	3,06	7,38	-14,89	2,78	6,27
R1270	-5,16	4,01	9,34	-9,95	3,76	7,28	-14,78	3,05	6,97
R438A	-4,87	2,82	8,54	-9,80	2,75	6,89	-14,99	2,54	5,25
R404A	-4,95	2,56	6,84	-10,00	2,26	7,14	-14,90	2,16	6,58
R134a	-5,04	2,59	6,34	-10,00	2,48	5,52			
R410A	-5,08	2,78	8,87	-9,94	2,46	7,36	-14,89	2,20	6,45
R32	-5,14	2,95	9,05	-10,17	2,66	7,40	-14,94	2,43	6,49

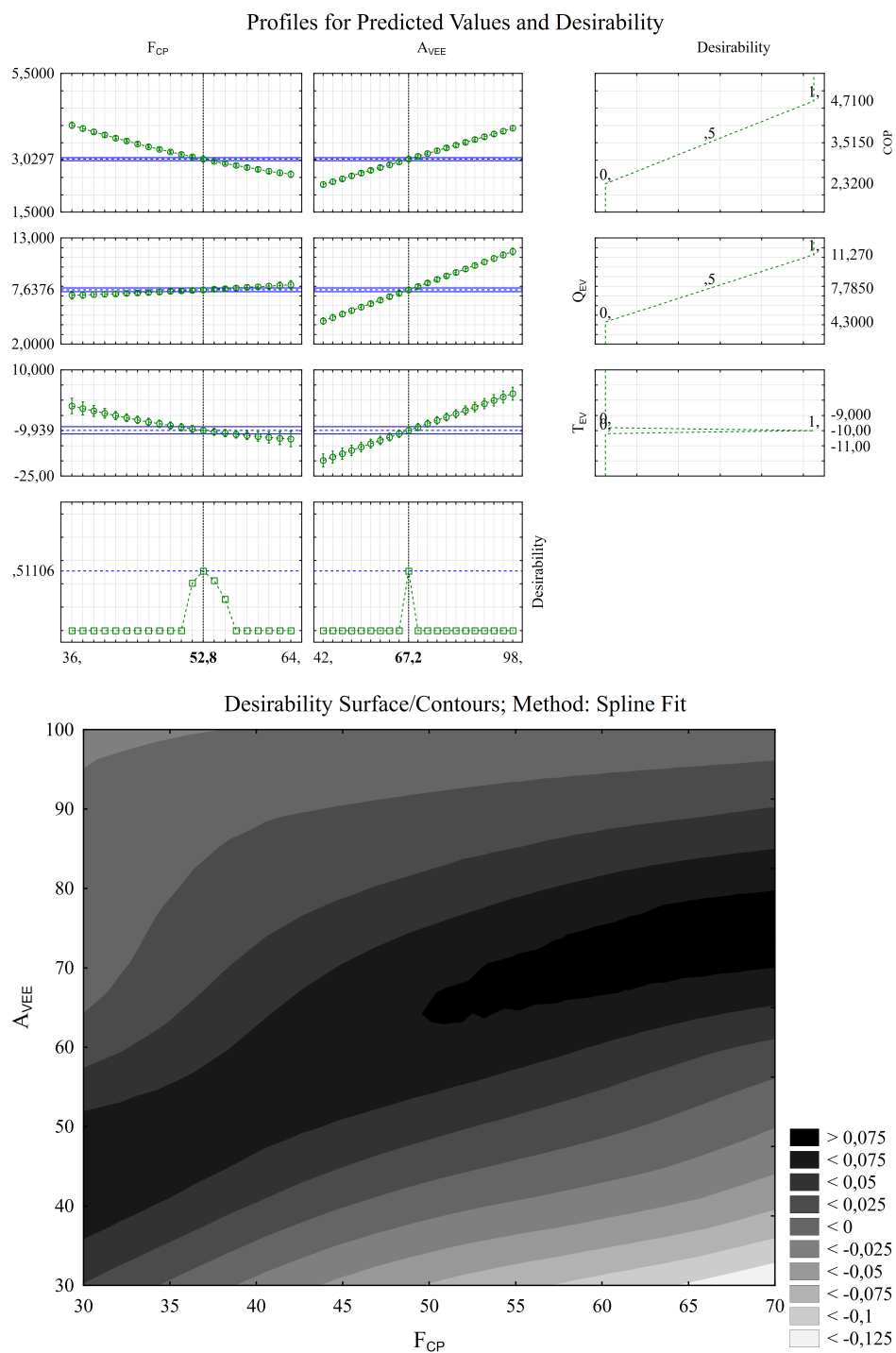


Figure 4: Otimização da função desejabilidade para o fluido R22 com $T_{EV} = -5^{\circ}C$

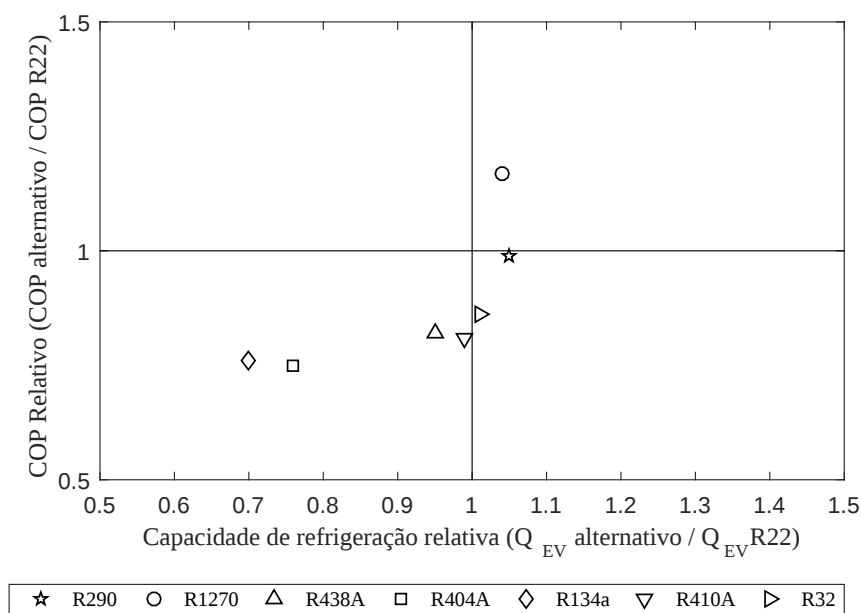


Figure 5: Comparação dos fluidos a partir dos resultados otimizados pela função desejabilidade. $Q_{EV} = 9 \text{ kW}$ e $T_{EV} = -5^\circ\text{C}$.

4. CONCLUSÃO

A função desejabilidade se apresentou bastante prática na aplicação de restrições e na identificação de pontos específicos para comparação de resultados. Também foi possível a determinação dos pontos de melhor condição operacional (máximo COP e Q_{EV}). Outros parâmetros podem ser agregados e analisados em conjunto com os observados nesse trabalho, como temperatura de condensação, grau de superaquecimento ou temperatura de descarga do fluido refrigerante. A utilização da função se justifica ainda mais quando o número de variáveis, dependente ou independentes aumenta. Apesar de um estudo preliminar, a comparação do resultados da função desejabilidade e da metodologia de superfície de resposta com os resultados experimentais nos indica uma boa convergência do resultado.

Como ferramenta para comparação de fluidos alternativos, requer uma análise para redução do desvio observado em relação aos resultados experimentais. Deve-se observar, primeiramente o rigor na sequência das atividades experimentais e coleta de dados pois erros cometidos nessa fase contribuem para erro do modelo. Além disso, o trabalho estatístico da construção das curvas deve utilizar as ferramentas adequadas. Apesar disso, a utilização da ferramenta de superfície de resposta e função desejabilidade, em contribuição ao planejamento experimental, trará uma redução de experimentos e por consequência, custo e tempo.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte dado à pesquisa pela Fundação de Amparo à Pesquisa de MG (FAPEMIG), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERENCES

- Antunes, A. H. P. (2015). *Processo de substituição de R22 em sistemas de refrigeração comerciais* (Unpublished doctoral dissertation). Universidade Federal de Uberlândia.
- Aslan, N. (2008). Application of response surface methodology and central composite rotatable design for modeling and optimization of a multi-gravity separator for chromite concentration. *Powder Technology*, 185(1), 80–86.
- Aslan, N., & Cebeci, Y. (2007). Application of Box-Behnken design and response surface methodology for modeling of some Turkish coals. *Fuel*, 86(1-2), 90–97.
- Bezerra, M. A., Santelli, R. E., Oliveira, E. P., Villar, L. S., & Escalera, L. A. (2008). Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, 76(5), 965–977.

- Box, G. E. P., & Wilson, K. B. (1951). On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. *Journal of the Royal Statistical Society Series B*, 13(1), 1–45.
- Bukzem, A. L., Signini, R., dos Santos, D. M., Lião, L. M., & Ascheri, D. P. R. (2016). Optimization of carboxymethyl chitosan synthesis using response surface methodology and desirability function. *International Journal of Biological Macromolecules*, 85, 615–624.
- Costa, N., & Lourenço, J. (2014). Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems A comparative study of multiresponse optimization criteria working ability. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 138, 171–177.
- Costa, N., Lourenço, J., & Pereira, Z. L. (2012). Responses modeling and optimization criteria impact on the optimization of multiple quality characteristics. *Computers and Industrial Engineering*, 62(4), 927–935.
- Dalvand, M. J., Mohtasebi, S. S., & Rafiee, S. (2014). Optimization on drying conditions of a solar electrohydrodynamic drying system based on desirability concept. *Food Science & Nutrition*, 2, 758–767.
- Derringer, G. C. (1994). A Balancing Act: Optimizing a Product's Properties. *Quality Progress*, 27(8), 51–58.
- Derringer, G. C., & Suich, R. (1980). Simultaneous optimization of several response variables. *Journal of Quality Technology*, 12, 214–219.
- Dharma, S., Masjuki, H., Ong, H. C., Sebayang, A., Silitonga, A., Kusumo, F., & Mahlia, T. (2016). Optimization of biodiesel production process for mixed *Jatropha curcas*–*Ceiba pentandra* biodiesel using response surface methodology. *Energy Conversion and Management*, 115, 178–190.
- Ferreira, S. L. C., Bruns, R. E., da Silva, E. G. P., dos Santos, W. N. L., Quintella, C. M., David, M. J., ... Neto, B. B. (2007a). Statistical designs and response surface techniques for the optimization of chromatographic systems. *Journal of Chromatography A*, 1158(1-2), 2–14.
- Ferreira, S. L. C., Bruns, R. E., Ferreira, H. S., Matos, G. D., David, J. M., Brandão, G. C., ... dos Santos, W. N. L. (2007b). Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods. *Analytica Chimica Acta*, 597(2), 179–186.
- Kincl, M., Turk, S., & Vrečer, F. a. (2005). Application of experimental design methodology in development and optimization of drug release method. *International Journal of Pharmaceutics*, 291(1-2), 39–49.
- Liu, Y.-T., & Zhang, L. (2016). An investigation into the aspheric ultraprecision machining using the response surface methodology. *Precision Engineering*, 44(2970378), 203–210.
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2003). *Applied Statistics and Probability for Engineers* (3rd ed.). New York, NY: John Wiley & Sons, Inc.
- Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer. (1987). 1522 UNTS 3; 26 ILM 1550.
- Neto, B. d. B., Scarminio, I. S., & Bruns, R. E. (2001). *Como Fazer Experimentos*. Campinas, SP: Editora da Unicamp.
- Özbayoglu, G., & Atalay, M. U. (2000). Beneficiation of bastnaesite by a multi-gravity separator. *Journal of Alloys and Compounds*, 303-304, 520–523.
- Rodrigues, D. M., Francisco, A., Augusto, F., Marins, S., Miranda, R. D. C., & Dias, É. X. (2015). Utilização da Otimização Multiobjetivo em Problemas de Delineamento de Experimentos Com Múltiplas Respostas. In (p. 14). Guaratinguetá - SP.
- Sivertsen, E., Bjerke, F., Almoy, T., Segtnan, V., & Naes, T. (2007). Multivariate optimization by visual inspection. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 85(1), 110–118.

ANALYSIS OF DROP-IN OPERATION OF A REFRIGERATION SYSTEM BY THE RESPONSE SURFACE METHODOLOGY

Abstract The objective of this study is to evaluate the gains in a drop-in process of refrigerants in a basic refrigeration system using the Response Surface Methodology to optimization. A central composite design and analysis of variance are also used. In addition, the model will be analyzed and compared to experimental results, consolidating various parameters to get the best regions in a broad universe of options, with a reduced number of experiments. The response surface methodology is a set of statistical tool, which describes the entire region of interest through experimental specific points, by appropriate polynomial equation. The experimental results were extracted from a cooling test bench compound for a reciprocating compressor, evaporator, condenser and expansion valve. R22, R290, R1270, R438A, R404A, R134a, R410A and R32 were tested at the same experimental apparatus, the lubricating oil was replaced in some cases. The higher value of coefficient of performance and cooling capacity were investigated. The results obtained with the MSR technique showed good agreement with the experimental work, (R^2 exceeding 0.8) which indicates, good representation of the output variables of the cooling system. The tested optimization tools were able to identify areas of maximum, allowing for better comparison of results obtained by different refrigerants.

Key words: Drop-in, R22, optimization, Response Surface, Desirability Function