

Aplicação do Desenho de Experiências a um Ciclo de Refrigeração

Nuno Ricardo Costa

E-mail: nuno.costa@estsetubal.ips.pt

Instituto Politécnico de Setúbal – Escola Superior de Tecnologia de Setúbal
UNIDEMI/DEMI, Faculdade de Ciências e Tecnologia-Universidade Nova de Lisboa

João Garcia

E-mail: joao.garcia@estsetubal.ips.pt

Instituto Politécnico de Setúbal – Escola Superior de Tecnologia de Setúbal

Resumo:

Os ciclos de refrigeração são utilizados numa vasta diversidade de equipamentos domésticos e industriais (residenciais e não residenciais) e a sua eficiência depende de várias variáveis. Para avaliar a influência das variáveis de controlo selecionadas na eficiência de um ciclo de refrigeração por compressão foram realizadas experiências estatisticamente planeadas. Uma função polinomial foi usada para caracterizar a eficiência do ciclo e identificados os valores para as variáveis que permitem obter a maior eficiência possível. Os resultados dão a necessária confiança para que a abordagem ilustrada seja aplicada no design e melhoria do funcionamento de ciclos de refrigeração.

Palavras-chave: ANOVA, Condensação, COP, Evaporação, Termodinâmica.

Abstract:

Refrigeration cycles are used in a large diversity of industrial and domestic (residential and non-residential) equipments and their efficiency depend on several variables. To better understanding of how controllable variables impact on a compression refrigeration cycle efficiency, statistically designed experiments were conducted. A quadratic polynomial model was fitted to the Coefficient of Performance and variable settings that maximize the cycle efficiency identified. Results give confidence to use the illustrated approach for refrigeration cycle design and operation improvement purposes.

Keywords: ANOVA, Condensation, COP, Evaporation, Thermodynamic.

1. Introdução

Sem uma caracterização adequada dos processos e dos produtos não será possível afirmar com toda a confiança quais serão as variáveis de entrada (fatores de controlo) que têm um efeito significativo na variável que se pretende melhorar ou otimizar, denominada variável de saída (variável dependente ou resposta). Fazer alterações no valor de um único fator de controlo, mantendo os restantes fixos, com o objetivo de melhorar ou otimizar uma determinada resposta é uma prática muito utilizada, embora fortemente desencorajada. Esta abordagem apenas trará vantagens em condições excecionais (Frey e Wang, 2006), pelo que é recomendável utilizar uma abordagem sustentada em técnicas (estatística e matematicamente validadas) que, de forma inequívoca, têm demonstrado ser de extrema utilidade.

O desenho e a análise de experiências estatisticamente fundamentadas são uma abordagem eficaz e com uma utilização crescente em estudos desenvolvidos num contexto académico e industrial nas mais variadas áreas da engenharia, por exemplo, na Mecânica, nos Materiais, na Química, e na Biotecnologia. Motores de avião (Tappeta et al., 1999), estruturas para bicicletas (Jeang et al., 2008), máquinas elétricas (Gijo e Scaria, 2012), polímeros (Ilbay e Çelik, 2009), produtos farmacêuticos (Lopes et al., 2012), dispositivos médicos e processos tecnológicos (Dixon et al., 2006; Steinberg e Bursztyn, 2010; Vlachogiannis, 2003) são apenas alguns exemplos de produtos que têm sido concebidos e desenvolvidos com base no denominado Desenho de Experiências – Metodologia da Superfície de Respostas (DoE-RSM).

Aplicações do DoE-RSM em ciclos termodinâmicos, especialmente em ciclos de refrigeração, não foram encontradas na literatura nacional nem internacional, pelo que esta abordagem é ilustrada neste artigo. O ciclo de refrigeração de um andar de compressão (que se designará por CR) é usado numa grande diversidade de equipamentos domésticos e industriais (residenciais e não-residenciais) e tem sido bastante investigado de um ponto de vista termodinâmico (Anand et al., 2013; Rasmussen, 2012; Rasmussen e Shenoy, 2012; Tassou et al., 2010; Koelet, 1992), nomeadamente devido às restrições de utilização de alguns fluidos frigorigéneos por questões ambientais e à necessidade de melhorar a eficiência energética dos equipamentos (Bansal et al., 2012; Palm, 2008).

O objetivo do presente estudo foi o de maximizar a eficiência do CR, avaliando o impacto das variações de temperatura e do caudal mássico de água no evaporador e no condensador, uma vez que ciclos com elevada eficiência são caracterizados por um menor consumo de energia e um melhor efeito frigorífico.

Para descrever o trabalho realizado, este documento foi estruturado da seguinte forma: Na Seção 2 é apresentada a instalação experimental, o princípio do CR e o coeficiente de performance; a matriz de experiências, os resultados e a sua análise são apresentados nas Seções 3 e 4, respetivamente; as conclusões são feitas na Seção 5.

2. Ciclo de Refrigeração – Instalação experimental

O ciclo de refrigeração de um andar de compressão (R632/25019) utilizado neste estudo é uma unidade didática produzida pela “P.A. Hilton Ltd” (ver Figura 1). Inclui um compressor hermético (EMBRACO Asprea NEK6214Z com uma Potência de 0,5 HP), um condensador constituído por um cilindro de vidro de paredes espessas com placas de topo em latão maquinado e uma serpentina em tubo de cobre no interior (através do qual se escoa a água de aquecimento – água quente), um evaporador constituído por um cilindro de vidro de paredes espessas com placas de topo em latão maquinado e uma serpentina em tubo de cobre no interior (através do qual se escoa a água de arrefecimento – água fria), e uma válvula de expansão (válvula de agulha operada por boia, situada na parte inferior do condensador). O fluido frigorigéneo é o R141b e a instrumentação integrada permite medir pressões e temperaturas no condensador e no evaporador, bem como temperaturas e caudal mássico de água. Todos os instrumentos de medição foram verificados, sendo os erros e incertezas associados às leituras dos valores medidos ignorados por serem suficientemente pequenos.

Figura 1 – Ciclo de refrigeração



A descrição do CR pode ser resumida da seguinte forma:

O compressor hermético mantém uma baixa pressão no evaporador e faz com que o fluido frigorigéneo evapore a uma baixa temperatura, retirando calor (sensível) e reduzindo a temperatura da água. O vapor a baixa pressão formado no evaporador é aspirado para o compressor, onde através da compressão a sua pressão aumenta. O fluido a alta pressão é então enviado para o condensador, onde é condensado, sendo transferido calor para a água que passa no condensador (água de arrefecimento). Durante esta fase, o fluido a alta pressão acumula-se no fundo do condensador e o seu nível é controlado por uma válvula de expansão que é operada por uma boia. À medida que o fluido quente a alta pressão passa através da válvula a sua pressão diminui até à pressão de evaporação e a sua temperatura diminui para a temperatura de saturação. Ao entrar no evaporador, o fluido a baixa pressão será evaporado e aspirado para o compressor, reiniciando-se o ciclo atrás descrito.

Para controlar a temperatura na entrada do evaporador e do condensador foram construídos dois sistemas auxiliares: um para o aquecimento e outro para o arrefecimento de água. A água quente, denominada água de aquecimento, foi obtida através de um esquentador a gás, sendo depois armazenada num depósito termoacumulador (SOLCAP- 200 litros) de modo a estabilizar a temperatura em valores definidos e assim poder ser bombeada para o condensador (ver Figura 2). A denominada água de arrefecimento (água fria) foi obtida pela introdução de gelo num reservatório com água à temperatura ambiente, sendo depois bombeada para o evaporador à temperatura desejada (ver Figura 3).

Figura 2 - Sistema de aquecimento de água



Figura 3 - Sistema de arrefecimento de água

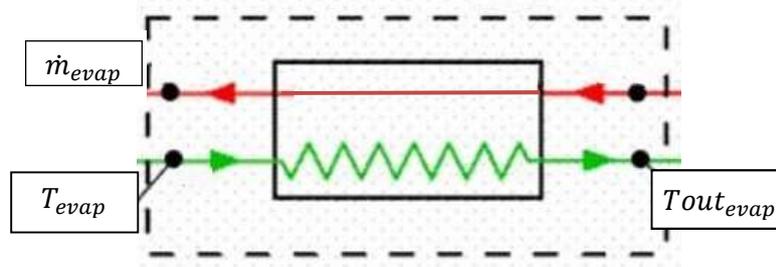
2.1. Ciclo de Refrigeração - Coeficiente de performance

Ciclos de refrigeração são utilizados, por exemplo, na indústria alimentar para refrigeração e conservação de produtos, na indústria farmacêutica para manter medicamentos a baixa temperatura, em edifícios domésticos e públicos, bem como em instalações de climatização, para manter a temperatura nos valores mais adequados. Dada a importância que alguns destes equipamentos assumem na vida das empresas e das pessoas a sua eficiência deve ser avaliada. Para o efeito é necessário conhecer as potências frigorífica e elétrica. A potência elétrica é a taxa de consumo de energia elétrica por unidade de tempo que é fornecida ao CR (compressor), tendo neste estudo sido medida com um analisador Chauvin Arnoux (Qualistar plus CA 8335), que se mostra na Figura 1. A potência frigorífica é uma medida quantidade de calor que pode ser retirado nos equipamentos de refrigeração (produção de frio), podendo ser calculada através da primeira lei da termodinâmica para sistemas estacionários. Assim, tendo como pressuposto que as perdas de calor no evaporador são desprezáveis e que o processo é estacionário, no CR a energia recebida pelo fluido frigorigéneo no evaporador é igual à energia transferida (libertada) pela água para este fluido. Através de balanços energéticos e mássicos ao evaporador, tomando como referência a região delimitada pela linha a tracejado que se mostra na Figura 4, a potência frigorífica (\dot{Q}_{evap}) pode ser calculada da seguinte forma:

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{evap} C_{p\acute{a}gua} (T_{out_{evap}} - T_{evap}) \quad (1)$$

onde \dot{m}_{evap} é o caudal mássico de água no evaporador (expresso em quilogramas por segundo - kg/s), $Cp_{água}$ é o calor específico da água a pressão constante, cujo valor é, aproximadamente, igual a 4,18 kJ/kgK, T_{evap} representa o valor da temperatura da água à entrada do evaporador (expresso em graus centígrados - °C) e $T_{out_{evap}}$ representa o valor da temperatura da água à saída do evaporador (°C).

Figura 4 – Evaporador: Volume de controlo



A razão entre as potências frigorífica (\dot{Q}_{evap} , expressa em Watts) e elétrica (\dot{W}_{elect} - consumo de energia elétrica por unidade de tempo, também expressa em Watts) é uma métrica habitualmente utilizada para avaliar a eficiência de ciclos de refrigeração que existem em frigoríficos e congeladores domésticos, câmaras frigoríficas industriais e equipamentos de climatização (Dabas et al., 2011; Dincer, 2004; Mackensen, 2002; Pfister, 2004). Esta métrica é denominada Coeficiente de Performance (COP) e é definida por

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{W}_{elect}} \quad (2)$$

De acordo com a Equação (2), quanto maior for o valor COP melhor será a eficiência do ciclo, o que pode ser conseguido através da redução do consumo de energia elétrica e/ou do aumento da potência frigorífica (Dincer, 2004). Os valores do COP para ciclos de refrigeração por compressão utilizados na refrigeração doméstica e industrial podem variar entre 1 e 3 (Bjork, 2012). Para pequenos ciclos como o da unidade didática utilizada neste estudo, o valor COP esperado é igual ou ligeiramente superior a 1. Unidades como a que se apresenta na Figura 1 são concebidas com fins didáticos e demonstrativos, pelo que os seus componentes não têm as melhores características técnicas. Por exemplo, o evaporador e o condensador são feitos em vidro, tendo uma baixa capacidade de transmitir calor, e a potência do compressor é inferior às dos compressores usadas nos equipamentos com fins domésticos e industriais.

Como consequência, os valores da potência de refrigeração e a performance do ciclo não são muito altos, sendo expectáveis valores iguais ou ligeiramente superiores a 1.

3. Desenho de Experiências

Desenhar e realizar experiências não são tarefas simples, ainda que vários autores tenham publicado artigos com linhas de orientação para todos aqueles que tenham de realizar estas atividades (Bisgaard, 1999; Coleman e Montgomery, 1993; Costa et al., 2006; Freeman et al., 2013; Simpson et al., 2013; Tanco et al., 2009a). Uma cuidadosa gestão de aspetos técnicos (estatísticos) e não-técnicos (gestão & operacionais) é determinante para o sucesso em estudos experimentais. Por exemplo, a seleção ou desenho de uma matriz de experiências é uma atividade crítica, porque o resultado de um estudo poderá ficar comprometido se não for realizado o conjunto de experiências mais adequado. Sobre este assunto em particular, e de modo a minimizar perdas de tempo e maximizar os recursos envolvidos no processo experimental, Tanco et al. (2009b) apresentam uma lista de pontos-chave e recomendações para uma correta seleção ou definição da denominada matriz de experiências e ilustram a sua utilidade com casos de estudo da literatura.

Para explorar a relação entre o COP (variável dependente ou resposta) e as quatro variáveis independentes (fatores de controlo) passíveis de serem controladas na unidade didática utilizada neste estudo, que é sabido terem um impacto relevante na eficiência do RC, nomeadamente a temperatura da água à entrada do condensador (T_{cond}), a temperatura da água à entrada do evaporador (T_{evap}), o caudal mássico de água no evaporador (\dot{m}_{evap}) e no condensador (\dot{m}_{cond}), foi selecionada uma matriz composta (um *Face-Centered Design*). Esta matriz é constituída por um fatorial completo com fatores a dois níveis (constituído por $2^4 = 16$ experiências que resultam de todas as combinações possíveis dos dois níveis ou valores atribuídos aos 4 fatores selecionados), 8 pontos axiais e 4 pontos centrais, o que permite estimar adequadamente os efeitos lineares e quadráticos que podem ser usados para modelar o COP, dado que, neste estudo, a região delimitada pelos níveis dos fatores representa as denominadas regiões de interesse e operação. Os quatro pontos centrais são suficientes para avaliar a não-linearidade da superfície de formada pelo conjunto dos possíveis valores da resposta. Com base na experiência e conhecimento dos autores, em experiências de teste, e de modo a simular condições de operação tão próximas quanto possível das condições reais de utilização do CR são apresentados no Quadro 1 os níveis e os respetivos valores atribuídos aos fatores de controlo. A matriz de experiências é apresentada no Quadro 2. Informações

técnicas detalhadas sobre a matriz utilizada e outros tipos de matrizes podem ser encontradas em livros de referência sobre DoE-RSM, de que são exemplos os seguintes: Box et al. (2005); Myers et al. (2009); Khuri e Mukhopadhyay (2010).

Quadro 1 - Valores das Variáveis

Nível	Valor Codificado	T_{cond} (°C)	\dot{m}_{cond} (g/s)	T_{evap} (°C)	\dot{m}_{evap} (g/s)
Máximo	1	35	30	24	30
Ponto central	0	30	20	17	20
Mínimo	-1	25	10	9	10

Quadro 2- Matriz de Experiências e Resultados

Experiências	T_{cond} (°C)	\dot{m}_{cond} (g/s)	T_{evap} (°C)	\dot{m}_{evap} (g/s)	COP	W_{elect} (W)
1	25	10	9	10	0,5482	183
2	25	10	9	30	0,6778	185
3	25	10	24	10	0,9038	185
4	25	10	24	30	1,3412	187
5	25	30	9	10	0,5618	186
6	25	30	9	30	0,6706	187
7	25	30	24	10	0,9541	184
8	25	30	24	30	1,2135	186
9	35	10	9	10	0,5471	191
10	35	10	9	30	0,7184	192
11	35	10	24	10	1,1270	204
12	35	10	24	30	1,1082	215
13	35	30	9	10	0,4815	191
14	35	30	9	30	0,6464	194
15	35	30	24	10	1,1053	208
16	35	30	24	30	1,2422	212
17	25	20	17	20	0,9388	187
18	35	20	17	20	0,9289	198
19	30	10	17	20	0,8633	184
20	30	30	17	20	1,0105	182
21	30	20	9	20	0,4619	181
22	30	20	24	20	0,8894	188
23	30	20	17	10	0,8663	193
24	30	20	17	30	0,9003	195
25	30	20	17	20	0,9192	191
26	30	20	17	20	0,9137	183
27	30	20	17	20	0,9187	182
28	30	20	17	20	0,9731	189

4. Análise de dados e Resultados

As experiências planeadas foram realizadas no laboratório de Termodinâmica do Instituto Politécnico de Setúbal – Escola Superior de Tecnologia de Setúbal, de modo completamente aleatório, sendo os respetivos resultados apresentados no Quadro 2. Com base na análise dos

dados, nomeadamente através da Análise da Variância (ANOVA), foi construída uma função de segunda ordem para modelar o COP. Os coeficientes de regressão estimados são apresentados no Quadro 3. O modelo do COP, após serem ignorados (incorporados no termo do erro da ANOVA) alguns termos estatisticamente não significativos é o seguinte:

$$\hat{\mu} = 0,8767 + 0,2539x_3 + 0,0791x_4 + 0,0745x_1^2 + 0,0776x_2^2 - 0,1675x_3^2 - 0,0305x_1x_4$$

onde x_i ($i = 1, \dots, 4$) representa a i -th variável independente (fator de controlo) e assume valores entre -1 e 1 ($-1 \leq x_i \leq 1$).

Quadro 3 - Coeficientes de Regressão Estimados

$$R^2 = 0,941; R_{ajustado}^2 = 0,877$$

Termo	Coeficiente.	Erro	$t_{(13)}$	p
Mean/Interc.	0,8751	0,0285	30,696	0,000
x1 T_{cond}	0,0052	0,0194	0,267	0,794
x1² $T_{cond} \times T_{cond}$	0,0691	0,0512	1,350	0,200
x2 \dot{m}_{cond}	0,0028	0,0194	0,142	0,889
x2² $\dot{m}_{cond} \times \dot{m}_{cond}$	0,0722	0,0512	1,409	0,182
x3 T_{evap}	0,2539	0,0194	13,097	0,000
x3² $T_{evap} \times T_{evap}$	-0,1729	0,0515	-3,360	0,005
x4 \dot{m}_{evap}	0,0790	0,0194	4,073	0,001
x4² $\dot{m}_{evap} \times \dot{m}_{evap}$	0,0186	0,0512	0,363	0,722
x1x2 $T_{cond} \times \dot{m}_{cond}$	0,0028	0,0206	0,138	0,892
x1x3 $T_{cond} \times T_{evap}$	0,0146	0,0206	0,710	0,490
x1x4 $T_{cond} \times \dot{m}_{evap}$	-0,0301	0,0206	-1,461	0,168
x2x3 $\dot{m}_{cond} \times T_{evap}$	0,0110	0,0206	0,534	0,602
x2x4 $\dot{m}_{cond} \times \dot{m}_{evap}$	-0,0031	0,0206	-0,151	0,883
x3x4 $T_{evap} \times \dot{m}_{evap}$	0,0145	0,0206	0,705	0,493

Figura 5 - Gráfico de Probabilidade Normal

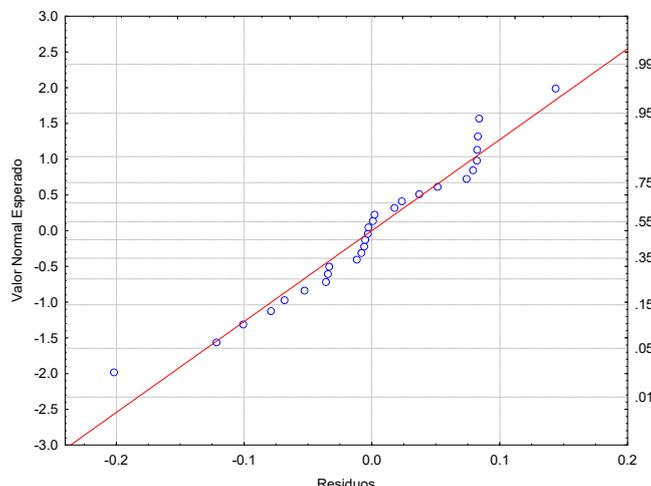
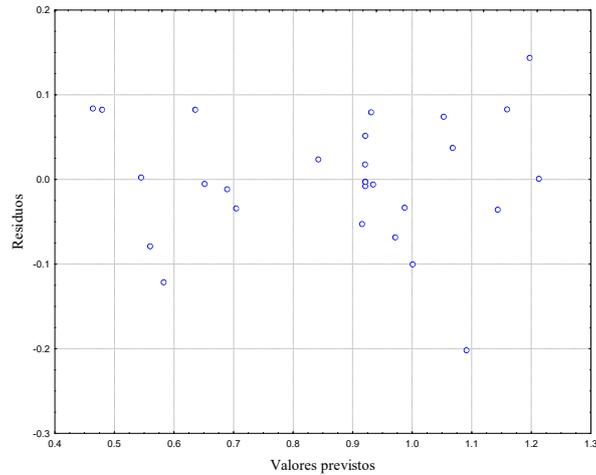
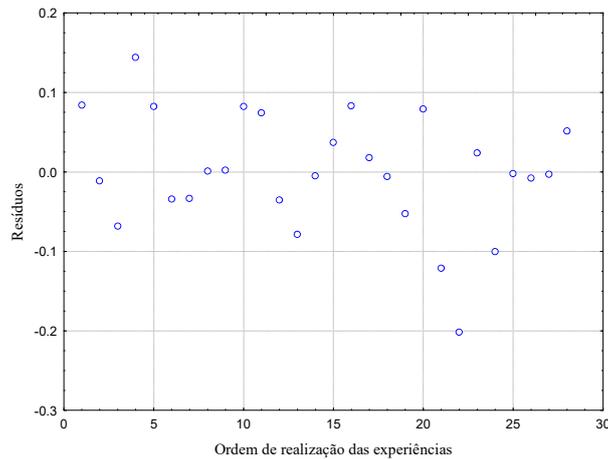


Figura 6 - Resíduos vs. Valores previstos**Figura 7 - Resíduos vs. Ordem das experiências**

O modelo tem uma boa capacidade descritiva dos dados ($R^2 = 0,934$; $R^2_{ajustado} = 0,915$) e a análise gráfica dos resíduos, mostrada nas Figuras 5-7, não evidencia qualquer violação dos pressupostos da ANOVA (os resíduos são Normalmente distribuídos, independentes, têm média igual a zero e variância constante). O modelo inclui termos (fontes de variação) lineares e quadráticas, sendo evidente que x_3 (T_{evap}) é quem mais contribui para maximizar o COP, cujo coeficiente de regressão é igual a 0,2539. Em termos práticos, quanto maior for o valor da T_{evap} melhor será a eficiência do CR (maior será o valor do COP), embora o termo quadrático da T_{evap} (x_3^2) tenha uma influência negativa no COP, uma vez que o respectivo coeficiente é inferior a zero (negativo). A interação x_1x_4 ($T_{cond} \times \dot{m}_{evap}$) é estatisticamente significativa mas o seu coeficiente é o menor de todos os coeficientes do modelo, pelo que o seu contributo para a maximização do COP é mais pequeno. Estes resultados experimentais

estão em sintonia com o conhecimento teórico sobre o CR, porque é sabido que a temperatura da água à entrada do evaporador tem um impacto significativo no COP (Kilicarslan e Mülle, 2004).

Para encontrar os valores de x_i que maximizam o COP foi utilizada a ferramenta Solver do Excel[®]. O resultado obtido foi $x_i = (-1; 1; 0,76; 1)$, ao qual corresponde um valor do COP ligeiramente superior a 1 (COP = 1,23). Este valor era esperado, tendo em consideração a instalação usada neste estudo (Bjork, 2012). A eficiência dos atuais sistemas de refrigeração é, de facto, superior e tem justificação nas características técnicas (melhor qualidade) dos componentes que integram os atuais sistemas. Embora o valor do COP da instalação utilizada seja pequeno de um ponto de vista teórico, isto não significa que a metodologia experimental e os resultados do estudo sejam menos relevantes ou tenham pouca utilidade. Pequenas instalações didáticas como a que foi utilizada não são desenhadas com propósitos de eficiência, mas sim para serem uma valiosa ferramenta na formação em níveis de ensino técnico e superior que permite observar e entender vários fenómenos que ocorrem nos componentes que integram os ciclos de refrigeração.

Para validar o valor do COP obtido pelo processo de optimização (COP = 1,23), foram realizadas duas experiências confirmatórias. As experiências realizadas e os resultados obtidos são mostrados no Quadro 4, onde é possível constatar que os valores do COP estão em concordância com os valores obtidos pelo processo de optimização. Por conseguinte, pode-se assumir que a metodologia experimental utilizada permite entender a influência dos fatores de controlo seleccionados na performance do RC, justificando a sua utilização noutros contextos.

Quadro 4 – Experiências confirmatórias

T_{cond} (°C)	\dot{m}_{cond} (g/s)	T_{evap} (°C)	\dot{m}_{evap} (g/s)	COP	\dot{W}_{elect} (W)
25	30	22,5	30	1,13	188
25	30	22,5	30	1,10	183

5. Conclusões

Experiências estatisticamente desenhadas foram realizadas e os resultados analisados com o objetivo de maximizar a eficiência de um ciclo de refrigeração por compressão, usando-se para o efeito uma instalação didática. A relação funcional entre as variáveis consideradas no estudo e o Coeficiente de Performance foi estabelecida através de um modelo de segunda

ordem, permitindo obter estimativas da eficiência do ciclo na região delimitada pelos valores atribuídos às variáveis de entrada (fatores de controlo) e assim poder contribuir para a melhoria das condições de operação e/ou conceção deste tipo de instalação. Os resultados mostram que a temperatura da água à entrada do condensador deve ser a menor possível, enquanto todas as outras variáveis devem ser colocadas num nível alto, igual ou próximo do valor máximo, de modo a que eficiência do ciclo seja a maior possível. Esta conclusão foi corroborada por experiências confirmatórias.

Este trabalho é inovador no âmbito da Eng^a Mecânica – ramo Termodinâmica na medida que não são conhecidos estudos onde esta metodologia experimental tenha sido para melhorar a eficiência de ciclos de refrigeração. A metodologia revelou-se adequada para a conceção e definição das condições de operação de ciclos de refrigeração por compressão, pelo que os autores sugerem a sua utilização em outros tipos de ciclos de refrigeração e planeiam a sua utilização em equipamentos domésticos e industriais. A modelação e otimização simultânea das potências elétrica e de refrigeração é outra abordagem possível para maximizar a eficiência de ciclos de refrigeração. Testar outros fluídos frigorigéneos e tipos de compressor deve também ser considerado em futuros estudos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao IPS-ESTSetubal ter sido possível montar e utilizar a instalação que serviu de base a este estudo, bem como ao Eng^o. Vítor Pinho pela sua relevante contribuição na montagem da instalação e realização das experiências.

Referências Bibliográficas

- Anand, S., Gupta, A. e Tyagi, S. (2013). Simulation studies of refrigeration cycles: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **17**: 260-277.
- Bansal, P., Vinyard, E. e Abdelaziz, O. (2012). Status of not-in-kind refrigeration technologies for household space conditioning, water heating and food refrigeration. *International Journal of Sustainable Built Environment*. **1**: 85-101.
- Bisgaard, S. (1999). Quality Quandaries. *Quality Engineering*. **11**: 645-649.
- Box, G., Hunter, J. e Hunter, W. (2005). *Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery*. 2^a edição. John Wiley & Sons, New Jersey.
- Bjork, E. (2012). *Energy Efficiency Improvements in Household Refrigeration Cooling Systems*. PhD Thesis, Royal Institute of Technology, UK.
- Coleman, D. e Montgomery, D. (1993). A systematic approach to planning for a designed industrial experiment. *Technometrics*. **35**: 1-12.
- Costa, N., Pires, A. e Ribeiro, C. (2006). Guidelines to help practitioners of design of experiments. *The TQM Magazine*. **18**: 386-399.

- Dabas, J., Dodeja, A., Kumar, S. e Kasana, S. (2011). Performance Characteristics of Vapour Compression Refrigeration System Under Real Transient Conditions. *International Journal of Advancements in Technology*. **2**: 584-593.
- Dincer, I. (2004). *Refrigeration Systems and Application*. John Wiley & Sons Ltd, London.
- Dixon, D., Eatock, D., Meenan, B. e Morgan, M. (2006). Application of Design of Experiment (DOE) Techniques to Process Validation in Medical Device Manufacture. *Journal of Validation Technology*. **12**: 92-100.
- Freeman, L., Ryan, A., Kensler, J., Dickinson, R. e Vining, G. (2013). A Tutorial on the Planning of Experiments. *Quality Engineering*. **25**: 315-332.
- Frey, D. e Wang, H. (2006). Adaptive one-factor-at-a-time experimentation and expected value of improvement. *Technometrics*. **48**: 418-431.
- Gijo, E. e Scaria, J. (2012). Product design by application of Taguchi's robust engineering using computer simulation. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. **25**: 761-773.
- Ilbay, I. e Çelik, N. (2009). A statistical and experimental investigation on product design for copolymer based multichannel polyester draw textured yarns. *Journal of Textile and Apparel*. **19**: 291-298.
- Jeang, A., Liang, F. e Chung, C. (2008). Robust product development for multiple quality characteristics using computer experiments and an optimization technique. *International Journal of Production Research*. **46**: 3415-3439.
- Khuri, A. e Mukhopadhyay S. (2010). Response surface methodology. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*. **2**: 128-149.
- Kilicarslan, A. e Mülle, N. (2004). COPs of R718 in comparison with other modern refrigerants. In: First Cappadocia International Mechanical Engineering Symposium, Cappadocia, Turkey, 14-16 July.
- Koelet, P. (1992). *Industrial Refrigeration - Principles, Design and Applications*. The MacMillan Press, London.
- Lopes, S., Sarragaça, J., Prior, J. e Lopes, J. (2012). Development of an HPLC assay methodology for a desonide cream with chemometrics assisted optimization. *Analytical Letters*. **45**: 1390-1400.
- Mackensen, A., Klein, S. e Reindl, D. (2002). Characterization of Refrigeration System Compressor Performance. In: *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, Paper 567. Acedido em Julho de 2014 em <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/567>.
- Myers, R., Montgomery, D. e Anderson-Cook C. (2009). *Response Surface Methodology: process and product optimization using designed experiments*. 3ª edição. John Wiley & Sons, New Jersey.
- Palm, B. (2008). Hydrocarbons as refrigerants in small heat pump and refrigeration systems – A review. *International Journal of Refrigeration*. **31**: 552-563.
- Pfister, S. (2004). Transient Modeling of Vapor Compression Refrigeration Systems Using Measured Compressor COP. In: *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*. Paper 653. Acedido em Julho de 2014 em <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/653>.
- Rasmussen, B. e Shenoy, B. (2012). Dynamic modeling for vapor compression systems-Part II: Simulation tutorial. *HVAC&R Research*. **18**: 956-973.
- Rasmussen, B. (2012). Dynamic modeling for vapor compression systems-Part I: Literature review. *HVAC&R Research*. **18**: 934-955.
- Simpson, J., Listak, C. e Hutto, G. (2013). Guidelines for Planning and Evidence for Assessing a Well-Designed Experiment. *Quality Engineering*. **25**: 333-355.
- Steinberg, D. e Bursztyn, D. (2010). Response Surface Methodology in Biotechnology. *Quality Engineering*. **22**: 78-87.
- Tanco, M., Costa, N. e Viles, E. (2009b). Experimental design selection: guidelines for practitioners. *International Journal of Productivity and Quality Management*. **4**: 283-302.
- Tanco, M., Viles, E., Ilzarbe, L. e Alvarez, M. (2009a). Implementation of design of experiments projects in industry. *Applied Stochastic Models & Data Analysis*. **25**: 478-505.
- Tappeta, R., Nagendra, S. e Renaud, J. (1999). A multidisciplinary design optimization approach for high temperature aircraft engine components. *Structural Optimization*. **18**: 134-145.
- Tassou, S., Lewis, J., Ge, Y., Hadaway, A. e Chaer, I. (2010). A review of emerging technologies for food refrigeration applications. *Applied Thermal Engineering*. **30**: 263-276.

Vlachogiannis, J. (2003). Taguchi's technique: An effective method for improving X-ray medical radiographic screen performance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. **217**: 375-384.

Curriculum Vitae:

Nuno Ricardo Pais Costa é docente no Instituto Politécnico de Setúbal – Escola Superior de Tecnologia de Setúbal - Departamento de Engenharia Mecânica, e é investigador na UNIDEMI (www.unidemi.com) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Os seus trabalhos têm sido apresentados em eventos internacionais e publicados em revistas indexadas na WoS-Thomson Reuters® e na Scopus. Além de 4 dos seus trabalhos terem recebido prémios internacionais, também tem 4 capítulos de livro publicados. As suas principais áreas de investigação são a Gestão de Operações e da Qualidade, donde se destaca o Desenho de Experiências, os Métodos de Taguchi, o Controlo Estatístico do Processo e a metodologia Lean 6-Sigma.

João Nuno Pinto Miranda Garcia é docente no Instituto Politécnico de Setúbal – Escola Superior de Tecnologia de Setúbal - Departamento de Engenharia Mecânica. É reconhecido pela Ordem dos Engenheiros como Especialista em Refrigeração e tem realizado trabalhos para a ADENE na área da certificação de Sistemas da Qualidade do Ar. Garcia trabalhou durante dez anos como consultor e projetista de sistemas de refrigeração e HAVAC, além da participação em projetos nacionais e internacionais de R&D.

Authors Profiles:

Nuno Ricardo Costa is a Professor at the Instituto Politécnico de Setúbal – Escola Superior de Tecnologia de Setúbal – Mechanical Engineering Department, and is a researcher at UNIDEMI (www.unidemi.com) of Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. He has presented works in international events and has publications in journals indexed to WoS-Thomson Reuters® and Scopus. His research interests include quality and operations management, Taguchi methods, Statistical Process Control, and Lean 6S methodology.

João Nuno Pinto Miranda Garcia is a Professor at the Instituto Politécnico de Setúbal – Escola Superior de Tecnologia de Setúbal – Mechanical Engineering Department (IPS-ESTSetubal), since November 1996. He is recognized by Portuguese Engineers Council as expert in Refrigeration and has acted as expert for ADENE in Air Quality Certification Systems. Garcia worked for ten years as Refrigeration and HVAC Systems Designer and Consultant and has collaborated in various international R&D projects.