

EXPERIMENTEM! ... em MENOS TEMPO, com MENOS CUSTO e MAIS EFICÁCIA

Parte I – Caso de estudo

Nuno Ricardo Costa^{1,2}, João Garcia¹

Instituto Politécnico de Setúbal - ESTSetúbal, Campus do IPS, Estefanilha, 2910-761 Setúbal

UNIDEMI, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, 2829-516 Caparica

nuno.costa@estsetubal.ips.pt

Resumo

As diretrizes para uma implementação bem-sucedida do Desenho e Análise de Experiências delineadas no artigo anterior são ilustradas num caso de estudo cujo objetivo é o de modelar e maximizar o desempenho (COP) de um ciclo de refrigeração com um andar de compressão.

Introdução

Quando se decide realizar um estudo experimental e utilizar o Desenho e Análise de Experiências (DoE) é natural que todos os esforços sejam desenvolvidos para que o objetivo definido seja alcançado. Porém, nem sempre o objetivo é alcançado. Mesmo assim, os casos sem sucesso não deixam de ser fontes valiosas de ensinamentos e por isso devem também ser dados a conhecer. Estes trabalhos serão muito úteis se deles for possível obter respostas detalhadas a questões pertinentes, nas quais se incluem as seguintes: o que é que aconteceu para que o DoE não tenha produzido os resultados esperados? Que razões foram identificadas para justificar as falhas ocorridas? Quais foram as consequências das falhas? Como é que as falhas cometidas poderiam ter sido evitadas ou minimizadas?

Estudos bem-sucedidos nem sempre evidenciam as razões do seu sucesso. De fato, muitos estudos não dão a devida ênfase às atividades realizadas na fase planeamento, conforme foi delineado no artigo anterior (1). Mesmo quando é feita referência a essas atividades, elas são frequentemente secundarizadas a favor dos resultados (relevantes) que foram alcançados, ficando omissos detalhes relativos às atividades de planeamento que seriam úteis para os leitores.

Neste artigo apresenta-se um caso de estudo desenvolvido com base nas diretrizes para uma implementação bem-sucedida do DoE delineadas no artigo anterior. Desta forma evidencia-se a aplicabilidade das diretrizes propostas e incentiva-se a sua utilização em estudos experimentais. Este exemplo pretende ser um incentivo ao desenvolvimento e melhoria de processos industriais e/ou de produtos com base no DoE, além de servir para promover e disseminar esta técnica nas atividades de ensino e de investigação.

Caso de estudo

Ciclos de refrigeração estão integrados em vários tipos de equipamentos e instalações de climatização que são utilizados em vários contextos, por exemplo, na indústria alimentar para refrigeração e conservação de produtos e na indústria farmacêutica para manter medicamentos

⁽¹⁾ Costa, N. (2016). Parte I – Diretrizes para uma aplicação bem-sucedida do DoE, APQ, Revista nº 1-2 de 2016.

a baixa temperatura. Dada a importância que alguns desses equipamentos assumem na vida das empresas e das pessoas e, em particular, devido às restrições na utilização de alguns fluidos frigorigéneos por questões ambientais bem como à necessidade de melhorar a eficiência energética dos equipamentos, os ciclos de refrigeração têm sido bastante investigados de um ponto de vista termodinâmico. No entanto, aplicações do DoE em ciclos de refrigeração não foram encontradas na literatura. Por conseguinte, entendeu-se que faria todo o sentido aplicar o DoE com o objetivo de maximizar a eficiência de um ciclo de refrigeração com um andar de compressão (que se designará por CR), o qual é usado numa grande diversidade de equipamentos domésticos e industriais (residenciais e não-residenciais), na medida em que ciclos com elevada eficiência são caracterizados por um menor consumo de energia e um melhor efeito frigorífico.

i) Caracterização e Avaliação da Performance do Ciclo de Refrigeração

O ciclo de refrigeração de um andar de compressão (R632/25019) utilizado neste estudo está incorporado numa unidade didática existente no laboratório de Termodinâmica da Escola Superior de Tecnologia de Setúbal (ver Figura 1). Esta unidade inclui um compressor hermético, 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 escoia 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 escoia 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.



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 de modo a estabilizar a temperatura em valores definidos e assim poder ser bombeada para o condensador. A 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 planeada.

A eficiência do CR, e dos ciclos de refrigeração em geral, é determinada através do Coeficiente de Performance (COP). Este é definido por

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{W}_{elect}} \quad (1)$$

onde \dot{Q}_{evap} (expressa em Watts) representa a potência frigorífica e \dot{W}_{elect} representa a potência elétrica (consumo de energia elétrica por unidade de tempo, também expressa em Watts). A potência frigorífica é uma medida quantidade de calor que pode ser retirado nos equipamentos de 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 frigorígeno no evaporador é igual à energia transferida (libertada) pela água para este fluido. Através de balanços energéticos e mássicos ao evaporador, a potência frigorífica (\dot{Q}_{evap}) pode ser calculada da seguinte forma:

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{evap} C_{p\acute{a}gua} (T_{out_{evap}} - T_{evap}) \quad (2)$$

onde \dot{m}_{evap} é o caudal mássico de água no evaporador (expresso em quilogramas por segundo - kg/s), $C_{p\acute{a}gua}$ 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).

O valor do COP para ciclos de refrigeração por compressão utilizados na refrigeração doméstica e industrial podem variar entre 1 e 3, sendo tanto melhor quanto maior for o seu valor. Para pequenos ciclos como o da unidade didática utilizada neste estudo, e para o tipo de componentes que o compõem, o valor COP esperado deverá ser ligeiramente superior a 1.

Perante a definição do objetivo do trabalho, e enquadrada a problemática a estudar, a resolução do caso de estudo foi feita seguindo as diretrizes descritas no artigo anterior, conforme a seguir se descreve:

- Planeamento

- **Comprometimento da gestão de topo** – Na certeza que o estudo também constituiria um elemento de promoção e valorização da instituição onde iria ser realizado, foi pedida autorização ao Diretor da Escola Superior de Tecnologia de Setúbal e ao professor responsável pelas instalações laboratoriais onde estavam os equipamentos necessários (laboratório de termodinâmica). Ambos incentivaram a equipa de trabalho a realizar o estudo, disponibilizando as instalações e os equipamentos solicitados na condição de que não fosse perturbado o normal funcionamento das aulas naquele laboratório.

- **Criação da equipa de trabalho** – A equipa multidisciplinar incluiu um professor com conhecimentos e experiência no DoE, um professor especialista em refrigeração e o engenheiro responsável pela gestão e apoio às atividades realizadas nas referidas instalações laboratoriais.
- **Identificação de oportunidades** – As relações profissionais entre os membros que constituíam a equipa tinham já propiciado algumas reuniões onde se discutiu a viabilidade de um estudo onde se aplicaria o DoE usando equipamentos existentes no laboratório de termodinâmica. Recentemente, a equipa reconheceu que estavam reunidas as condições para esse estudo experimental ser realizado, tendo decidido aplicar o DoE ao ciclo de refrigeração existente neste laboratório. A equipa entendeu que esta seria uma forma de divulgar o DoE num contexto académico e que teria um acolhimento favorável quando fosse submetido para apresentação numa conferência ou para publicação numa revista científica dada a inexistência de trabalhos semelhantes.
- **Definição de objetivos** – de acordo com o que atrás foi exposto, a equipa de trabalho definiu como objetivo do estudo a modelação e maximização do COP.
- **Identificação de variáveis** – A equipa de trabalho identificou 4 variáveis independentes (fatores de controlo) que eram passíveis de serem controladas na unidade didática utilizada neste estudo: 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}). Os valores máximo, central e mínimo para cada uma destas variáveis são mostrados no Quadro 1 e foram estabelecidos de modo a simular condições de operação tão próximas quanto possível das condições reais de utilização deste tipo de CR. A variável dependente ou resposta definida foi o COP.
 - **Sistema de medição** – A unidade didática (CR) tinha alguns instrumentos de medição integrados que permitiam medir as pressões e temperaturas no condensador e no evaporador, bem como as temperaturas e caudal mássico da água no evaporador e no condensador. Todos estes instrumentos de medição e os que estavam associados aos sistemas auxiliares de aquecimento e de arrefecimento de água foram verificados para garantir a fiabilidade dos valores medidos. Dada a experiência e qualificação dos membros da equipa de trabalho, em particular do engenheiro responsável pela realização das experiências, a avaliação do sistema de medição em termos da sua repetibilidade e reprodutibilidade foi considerada desnecessária.
 - **Desenho experimental** – Ainda que não existissem constrangimentos financeiros e de tempo para a realização deste estudo, a eficiência foi uma preocupação tida em consideração pela equipa de trabalho na realização das atividades. Assim, com as variáveis identificadas e tendo-se como objetivo modelar e otimizar a resposta (COP), decidiu-se utilizar uma matriz fatorial composta com pontos axiais e centrais (um *Face-Centered Design*), tal como se mostra no

Quadro 1. Esta matriz é útil quando a região delimitada pelos níveis dos fatores representa as denominadas regiões de interesse e operação, permitindo neste estudo estimar adequadamente os efeitos lineares e quadráticos que serão usados para modelar o COP.

- **Replicação** - Quatro pontos centrais foram considerados suficientes para avaliar a esperada não-linearidade da superfície formada pelo conjunto dos possíveis valores da resposta.
- **Aleatoriedade e Blocagem** – Não tendo sido identificadas fontes de variação incontroláveis considerado desnecessário realizar as experiências em blocos, as experiências apresentadas no Quadro 1 foram realizadas aleatoriamente durante o período de tempo estabelecido.
- **Documentação** – Dado que a realização das experiências ficou a cargo do engenheiro que tem uma vasta experiência na utilização do CR usado neste estudo, apenas foi necessário criar um impresso em que seriam registados os resultados das potências frigoríficas e elétrica das experiências a realizar, tendo ficado acordado que quaisquer imprevistos ou experiências realizadas com valores das variáveis diferentes daqueles que foram definidos deveria também ser registado nesse impresso. De qualquer maneira, toda a equipa esteve presente na realização de algumas experiências de teste para validar o funcionamento da instalação experimental e dos equipamentos de medida a utilizar, além da adequabilidade dos níveis estabelecidos para os fatores de controlo.

- Condução

A realização das experiências e a recolha de dados decorreram conforme o planeado.

- Análise

A análise do resultado das experiências foi efetuada recorrendo-se a um software comercial de análise de dados. Com base na Análise da Variância (ANOVA) foi construída uma função polinomial de segunda ordem para modelar o COP. Após serem incorporados no termo do erro da ANOVA alguns efeitos estatisticamente não significativos, o modelo é o seguinte:

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

onde x_i representa a i -th variável independente ($i = 1, \dots, 4$) e assume valores (codificados) entre -1 e 1, sendo zero o valor central. Este modelo tem uma boa capacidade descritiva dos dados ($R_{ajustado}^2 = 0,915$ com $R^2 = 0,934$) e a análise gráfica dos resíduos (Gráfico de Probabilidade Normal, Gráfico dos Resíduos vs. Valores Previstos e o Gráfico dos Resíduos vs. Ordem das experiências) não evidencia qualquer violação dos pressupostos da ANOVA (os resíduos são Normalmente distribuídos, independentes, têm média igual a zero e a variância é constante). O modelo inclui termos lineares e quadráticos, 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} maior será o valor do COP, embora o termo quadrático da T_{evap} (x_3^2) faça diminuir o valor do COP, uma vez que o respetivo 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 o 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 relevante no COP.

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). A eficiência dos atuais sistemas de refrigeração é superior devido às características técnicas dos componentes que integram estes sistemas, as quais são muito melhores. 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. Efetivamente, a ordem de grandeza do COP obtido está de acordo com o esperado, tendo em consideração o equipamento usado neste estudo. 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.

- Intervenção

Para validar o valor do COP obtido no processo de otimização (COP = 1,23), foram realizadas duas experiências confirmatórias. As experiências realizadas e os resultados obtidos são mostrados no Quadro 2, onde é possível constatar que os valores do COP estão em concordância com os valores obtidos no processo de otimização. Isto significa que a metodologia experimental utilizada permite entender a influência dos fatores de controlo selecionados na performance do RC, justificando a sua utilização noutros contextos e tipos de equipamento.

A relação funcional entre os fatores de controlo e o Coeficiente de Performance permite obter estimativas da eficiência do ciclo na região delimitada pelos valores atribuídos aos fatores de controlo, sendo assim possível testar diferentes condições de operação neste tipo de equipamentos e escolher a mais conveniente. Em termos práticos, 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 a eficiência do ciclo seja a maior possível. De qualquer maneira, na fase de

identificação de variáveis, nomeadamente na definição da resposta, reconheceu-se que num estudo posterior deveria ser usada uma estratégia que permitisse otimizar simultaneamente a potência elétrica e a potência frigorífica. Testar outros fluídos frigoríficos e tipos de compressor deveria também ser considerado em futuros estudos.

Quadro 1- Matriz de Experiências e Resultados

Experiências	T_{cond} (°C)	\dot{m}_{cond} (g/s)	T_{evap} (°C)	\dot{m}_{evap} (g/s)	COP	\dot{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

Quadro 2- 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