



Desenho e análise de experiências na gestão da manutenção

PRINCÍPIOS ESTRUTURAIS.

Filipe Didelet Pereira, Nuno Costa
Departamento de Engenharia Mecânica
Instituto Politécnico de Setúbal-ESTSetúbal

RESUMO

O desenho estatístico de experiências e a análise dos respetivos resultados é uma ferramenta amplamente testada e validada em diversos contextos, e que deve fazer parte do portefólio de ferramentas usadas no âmbito da Gestão da Manutenção. Porém, a utilização desta ferramenta só será proveitosa se os princípios que lhe estão inerentes forem devidamente compreendidos e integrados nas práticas experimentais. Neste trabalho é feita uma apresentação dos princípios do denominado Desenho de Experiências para garantir aplicações bem-sucedidas desta ferramenta na melhoria da fiabilidade de produtos e de processos/equipamentos.

INTRODUÇÃO

Experimentar faz parte da natureza humana e é uma prática corrente na indústria e na academia. Porém, seja para definir ou assegurar a conformidade de características funcionais do processo/equipamento/produto, seja para melhorar a sua fiabilidade e/ou a sua disponibilidade, a prática experimental ainda é assente, fundamentalmente, na abordagem da tentativa-erro.

Costa e Pereira [1] argumentam que o desenho estatístico de experiências e a análise dos respetivos resultados, aqui designado por DoE - *Design of Experiments*, devem fazer parte do portefólio de ferramentas passíveis de serem usadas no âmbito da Gestão da Manutenção. Esta opinião é suportada no facto de o DoE estar a ser alvo de uma atenção crescente no âmbito da melhoria da fiabilidade de produtos e de processos/equipamentos. Exemplos de um conjunto mais vasto de trabalhos que podem ser encontrados nas bases de dados académicas *WoS* e *Scopus* e que dão uma ideia da diversidade de aplicações do DoE são os seguintes:

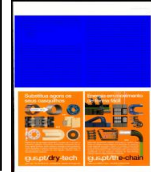
- a) maximização da robustez e do desempenho de projéteis usados em lança-granadas [2];
- b) melhoria da fiabilidade de circuitos integrados [3];
- c) maximização do tempo de vida de capacitadores [4];
- d) minimização das falhas por rutura de tubagens submetidas a pressão hidrostática externa [5];
- e) maximização da resistência à fadiga do asfalto [6];
- f) minimização das falhas por rutura de acopladores para carruagens ferroviárias [7];
- g) melhoria da fiabilidade do mecanismo de fecho da porta do trem de aterragem de uma aeronave [8];
- h) maximização do tempo de vida da polia num compressor de ar condicionado para automóveis [9];
- i) melhoria da fiabilidade do equipamento de fabrico de embalagens de alumínio para a indústria das bebidas [10];
- j) redefinição da estratégia de manutenção preventiva para rodas de uma locomotiva [11];

- k) otimização simultânea do volume e do tempo de vida de um dispositivo mecânico [12];
- l) maximização do tempo de vida de brocas com ponta de diamante [13];
- m) otimização simultânea da média e da variância do tempo de resistência à fadiga da cabine de um camião [14].

O DoE é muito mais eficiente para recolher informação, compreender e intervir sobre o processo/equipamento/produto do que a tentativa-erro mas, infelizmente, ainda não está suficientemente disseminado ou não é conhecido entre aqueles que são responsáveis pelas atividades de conceção, desenvolvimento, manutenção e melhoria. O DoE é uma ferramenta devidamente testada e validada que se adapta às mais diversas características dos fenómenos e das variáveis em estudo, bem como ao tipo de informação que se pretende obter de um estudo experimental. Independentemente do âmbito ou das áreas de atividade em que o DoE seja aplicado, esta ferramenta é particularmente adequada e verdadeiramente recomendável quando existem muitas variáveis que influenciam uma determinada característica do processo/equipamento/produto e se pretende determinar, com um número mínimo de experiências (envolvendo a menor quantidade de recursos e no mínimo tempo possível), quais são as variáveis que têm um efeito significativo na resposta (caraterística do processo/equipamento/produto que se pretende melhorar ou otimizar). Com esta informação disponível, a fase seguinte poderá ser a realização de experiências para estabelecer a relação (definir um modelo/função) entre as variáveis e a(s) resposta(s) de interesse e proceder à otimização dessa(s) resposta(s). Importa reforçar que a aplicação do DoE não se limita à identificação das variáveis, e dos respetivos valores, que permitem melhorar a fiabilidade do processo/equipamento e/ou produto. A melhoria da *performance*, por exemplo em termos de disponibilidade e robustez, pode também estar na base de um estudo onde se utilize o DoE. O que deve ser feito, quando justificado economicamente, para evitar ou atrasar a ocorrência de uma determinada falha no processo/equipamento/produto ou para aumentar o intervalo de tempo entre operações de manutenção preventiva, é um conjunto de perguntas exemplificativas a que se pode procurar responder em tempo útil e com o mínimo uso de recursos através do DoE.

PRINCÍPIOS ESTRUTURAIS

Utilizar o DoE tem mais de ciência do que de arte (empirismo), pelo que os princípios em que se fundamenta não podem ser ignorados por quem pretende usar esta ferramenta. Os princípios não são apenas conceitos teóricos (estatísticos) porque, na verdade, ao serem considerados, têm um impacto significativo nos resultados das experiências e nas conclusões que daí se poderão retirar. Efetivamente, a violação



de qualquer um dos princípios do DoE comprometerá a exatidão dos resultados das experiências e/ou a validade das conclusões deles retiradas [15-16]. Por conseguinte, a sua apresentação é prioritária e um ponto de partida para os que devem ou querem conhecer e utilizar esta ferramenta.

O DoE é suportado em 3 princípios:

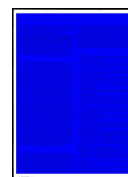
- 1) Aleatorização,
- 2) Blocagem,
- 3) Replicação.

ALEATORIZAÇÃO

Aleatorizar significa realizar as experiências (estatisticamente) desenhadas por uma ordem diferente daquela que é a denominada ordem padrão (teórica). Esta prática é uma salvaguarda contra a influência de fontes de variação desconhecidas e incontroláveis (ruído), assegura a qualidade dos dados recolhidos e torna a sua análise mais fácil (menos sofisticada). A não-aleatorização das experiências desenhadas é uma prática corrente [17-18] mas verdadeiramente desaconselhável. Contudo, existem situações onde as restrições à aleatorização das experiências são incontornáveis por questões técnicas/económicas e/ou de tempo. Por exemplo, alterar o valor da temperatura de uma experiência para outra em determinados equipamentos industriais, tais como fornos ou caldeiras, é um procedimento impraticável por uma questão de tempo e custo (perda de energia). Assim, sempre que exista um ou mais fatores que imponham restrições na aleatorização das experiências, a opção deverá ser por um desenho *Split-plot* em detrimento de um desenho completamente aleatorizado. Detalhes sobre desenhos *Split-plots* são apresentados em [19].

BLOCAGEM

Para além de variáveis desconhecidas e incontroláveis, é possível que a resposta possa ser consideravelmente afetada por variáveis conhecidas e controláveis mas cujo efeito na resposta não é do interesse do investigador estimar. Exemplos deste tipo de variáveis (fontes de variabilidade) são a temperatura ambiente e a humidade, lotes de matéria-prima, pessoas, máquinas e/ou períodos de tempo (manhã, tarde, dias, ...). Uma forma de eliminar o efeito destas fontes de variação na resposta é realizar as experiências em blocos (grupos), de modo a que a variabilidade em cada bloco (resultante da realização das experiências com um determinado lote de matéria-prima ou por uma determinada pessoa, como exemplos) seja mais homogênea do que no conjunto total das experiências desenhadas (onde seria usada, aleatoriamente, matéria-prima de lotes diferentes ou selecionadas aleatoriamente pessoas para executar as experiências). A vantagem de realizar as experiências em blocos é tanto maior quanto menor for a variação dentro dos blocos e maior for a diferença da variação entre os blocos. Quando assim é, o efeito de cada fator considerado no estudo e o erro experimental (variabilidade natural do processo) são estimados com uma incerteza menor, o que é bom (desejável). Note-se que o valor da diferença na variabilidade dos blocos não tem implicações na estimativa do efeito dos fatores, porque este valor será eliminado do erro experimental e, assim, a estimativa do efeito de cada fator considerado no estudo não será enviesada. Porém, e porque não é possível saber, antecipadamente e com segurança absoluta, se a diferença da variação entre os blocos vai ser muito maior do que a variação dentro de cada bloco, ou, por outras palavras, se a variabilidade provocada por uma determinada variável é suficientemente alta para que se tivesse justificado a sua blocagem, é aceitável realizar as experiências em



ARTIGO CIENTÍFICO

DESENHO E ANÁLISE DE EXPERIÊNCIAS NA GESTÃO DA MANUTENÇÃO – PRINCÍPIOS ESTRUTURAIS

blocos e assumir que as estimativas dos fatores podem sofrer algum enviesamento. Detalhes sobre como acomodar mais do que uma fonte de variabilidade num estudo experimental e analisar os respetivos resultados são apresentados em [20, Capítulo 4].

Fontes de variação conhecidas, mas que não são controláveis, denominadas covariáveis, são também passíveis de ser integradas num estudo experimental. O seu efeito na resposta é indesejável, pelo que se não forem adequadamente integradas no estudo as conclusões deste serão enviesadas. A temperatura, a humidade e itens (peças e/ou materiais caracterizados por alguma medida qualitativa, tais como a espessura, a dimensão, o peso, entre outros) são passíveis de serem consideradas covariáveis. A teoria e os métodos de análise dos resultados neste tipo de estudo são apresentados em [20, Capítulo 15.3].

REPLICAÇÃO

Tempo e custo são as principais razões utilizadas para não replicar as experiências desenhadas, embora esteja suficientemente documentado que esta prática é um impedimento à obtenção de conclusões fiáveis num estudo experimental. Os benefícios expectáveis com a replicação das experiências são (quase) sempre incomparavelmente superiores aos inconvenientes. Porém, não se deve confundir réplicas com leituras repetidas do resultado de uma experiência. Replicar uma experiência significa combinar os mesmos valores das variáveis controláveis em instantes diferentes, mantendo, tanto quanto possível, todas as restantes condições inalteráveis, para assim obter uma estimativa mais fiável do erro experimental e do efeito dos fatores (bem como das respetivas interações entre fatores). Porém, o número de réplicas deve traduzir um equilíbrio entre os custos da realização das experiências e os benefícios resultantes de mais e melhor informação. Em termos práticos, o número de réplicas não deve ser pequeno, levando a que efeitos negligenciáveis sejam, erradamente, declarados estatisticamente significativos, nem deve ser demasiado elevado sem que daí resulte a identificação de mais efeitos com efeito relevante ainda (estatisticamente significativo) na resposta. Na fase inicial de um estudo experimental, denominada de *Screening*, onde o objetivo é separar os fatores (e interações de dois fatores) com efeito significativo na resposta com base num pequeno número de experiências, a prática consiste em realizar cada experiência desenhada (com base num desenho fatorial fracionado) apenas uma vez. Nas fases seguintes, de caracterização e otimização, são realizadas réplicas das experiências. O que é mais usual na fase de caracterização, na qual se pretendem identificar os efeitos significativos e o melhor valor para os respetivos fatores, é serem realizadas 5 réplicas de cada uma das experiências desenhadas (com base em desenhos fatoriais completos ou fracionados). Com isto é possível obter estimativas mais adequadas do valor médio da resposta, da variação em torno desse valor médio e do erro experimental. Na fase de otimização de um estudo experimental, o que é recomendado é a realização de três a cinco réplicas do ponto central do desenho utilizado, sendo os mais frequentes o Desenho Composto Central e o Desenho Box-Behnken, o que permite estabelecer uma relação (modelos de regressão) de 2.^a ordem entre as variáveis e a resposta ou respostas e proceder à sua otimização.

COMENTÁRIOS FINAIS

O sucesso ou insucesso de um estudo experimental está diretamente relacionado com a forma como se gere a variabilidade que lhe está inerente ou, mais concretamente, como são recolhidos os dados que permitem estimar o erro experimental e o efeito dos fatores. Por conseguinte, nenhum dos princípios estruturais do DoE pode ser menos-prezado e, muito menos, ignorado. Aleatorizar e replicar as experiências desenhadas, e quando necessário proceder à blocagem de variáveis, são práticas determinantes para que se consiga conceber e melhorar

processos/equipamentos/produtos, nomeadamente a sua *performance* em termos de disponibilidade e fiabilidade (qualidade, robustez, ...).

Para combater a descrença no DoE e incentivar a sua utilização na melhoria da qualidade (fiabilidade, disponibilidade, robustez, ...) dos processos/equipamentos e produtos, e por consequência reduzir os custos (de operação, manutenção e produção) que lhe estão inerentes, num próximo artigo serão apresentadas as más práticas que são comuns ocorrer quando se utiliza esta ferramenta e o que pode ser feito para as evitar. Nos artigos posteriores será exemplificada a utilização de métodos de análise de dados aplicáveis às diferentes fases de um estudo experimental.

REFERÊNCIAS

- [1] Costa, N., Pereira, F. (2017). Planeamento de Experiências na Gestão da Manutenção. 14.º Congresso Nacional de Manutenção, Campus da Maiêutica (ISMAI/IPMAIA), Castêlo da Maia.
- [2] Ray, D., Roberts, T. *DOE for Product and Process Optimization, Robustness, and Tolerance Design: 40mm IR Illumination Grenade*. 2017 Annual Reliability and Maintainability Symposium, IEEE.
- [3] Cheng, L., Xu, X., Yang, S., Chien, W.-T. *Employing Optimal Experimental Design to Optimize the Accelerated Life Test Plan for TDD*. 2015 Annual Reliability and Maintainability Symposium, IEEE.
- [4] Süneci, Ö. *Determination of the Effects for Capacitor Lifetime with Six Sigma DoE*. 2014 Annual Reliability and Maintainability Symposium, IEEE.
- [5] Cai, B., Liu, Y., Liu, Z., Tian, X., Ji, R., Zhang, Y. (2012). *Probabilistic analysis of composite pressure vessel for subsea blowout preventers*. *Engineering Failure Analysis* Volume 19: 97-108.
- [6] Soltani, M., Moghaddam, T., Karim, M., Baaj, H. (2015). *Analysis of fatigue properties of asphalt mixtures using response surface methodology*. *Engineering Failure Analysis*, 58: 238-248.
- [7] Chunduru, S., Kim, M., Mirman, C. (2011). *Failure analysis of railroad couplers of AAR type E*. *Engineering Failure Analysis*, 18: 374-385.
- [8] Guo, W., Cui, W., Shi, Y., Liu, J., Song, B. (2016). *Function failure and failure boundary analysis for an aircraft lock mechanism*. *Engineering Failure Analysis*, 70: 428-442.
- [9] Shim, H.-J., Kim, J.-K. (2009). *Cause of failure and optimization of a V-belt pulley considering fatigue life uncertainty in automotive applications*. *Engineering Failure Analysis*, 16: 1955-1963.
- [10] Bessieris, G. (2010). *A methodology for product reliability enhancement via saturated-unreplicated fractional factorial designs*. *Reliability Engineering & System Safety*, 95: 742-749.
- [11] Lin, J., Pulido, J., Asplund, M. (2015). *Reliability analysis for preventive maintenance based on classical and Bayesian semi-parametric degradation approaches using locomotive wheel-sets as a case study*. *Reliability Engineering & System Safety*, 134: 143-156.
- [12] Lv, S., He, Z., Vining, G. (2017). *Simultaneous optimization of quality and reliability characteristics through designed experiment*. *Quality Engineering*, 29: 344-357.
- [13] Fang, J., He, Z., Zhang, Z., He, S. (in press). *Reliability improvement of diamond drill bits using design of experiments*. *Quality Engineering*.
- [14] Fang, J., Gao, Y., Sun, G., Xu, C., Li, Q. (2015). *Multiobjective robust design optimization of fatigue life for a truck cab*. *Reliability Engineering & System Safety*, 135: 1-8.
- [15] Young, J. (1996). *Blocking, Replication, and Randomization - The Key to Effective Experimentation: A Case Study*. *Quality Engineering*, 9: 269-277.
- [16] Arvidsson, M., Gremyr, I. (2003). *Deliberate Choices of Restrictions in Complete Randomization*. *Quality and Reliability Engineering International*, 19: 87-99.
- [17] Anderson-Cook, C. (2006). *What and When to Randomize*. *Quality Progress*, March.
- [18] Vining, G. (2009). *Technical Advice: Industrial Split-Plot Experiments*. *Quality Engineering*, 22: 54-57.
- [19] Jones, B., Nachtsheim, C. (2009). *Split-Plot Designs: What, Why, and How*. *Journal of Quality Technology*, 41: 340-361.
- [20] Montgomery, D. (2013). *Design and Analysis of Experiments*, 8th Ed., Wiley.