

Desenho e Análise de Experiências – Diretrizes, Falsos argumentos e Erros

Nuno Ricardo Pais 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

Resumo:

Vários argumentos têm sido apresentados para justificar a utilização esporádica ou a não utilização do Desenho e Análise de Experiências. Entre os argumentos mais frequentes incluem-se a não aplicabilidade, a inutilidade e/ou a dificuldade em utilizar. Erros ao nível das atividades operacionais e na execução das experiências são também comuns e desencorajam a utilização ou a utilização mais frequente desta ferramenta. Neste artigo desmistificam-se os referidos argumentos, apresentam-se as diretrizes para uma implementação bem-sucedida do Desenho e Análise de Experiências e faz-se referência aos erros que são vulgarmente cometidos na sua utilização.

Palavras-chave: Barreiras, Custo, Formação, Qualidade, Robustez, Variância.

Abstract:

Design of Experiments has been rarely used and various flaws have been put forward to justify its uselessness. The worthlessness, unpracticality, and non-applicability are the most common arguments to justify it. Errors at the operational level, namely in planning and conducting the experiments, are also strong reasons to discourage and hinder a more frequent use of this tool. So as to stimulate the successful use of Design of Experiments in academic and industrial setting, guidelines are provided and common mistakes highlighted.

Keywords: Barriers, Cost, Guidelines, Quality, Robustness, Training, Variance

1.Introdução

No contexto de grande competitividade em que hoje se faz negócio, a necessidade de obter informação para um conhecimento sustentado e mais profundo sobre o produto e o processo associada à complexidade que lhes está inerente exige necessariamente o recurso à

experimentação. Para o efeito, é fundamental que sejam utilizadas técnicas devidamente testadas e validadas que permitam alcançar os objetivos estabelecidos em menos tempo, com menos custo e mais eficácia.

A tradicional abordagem que se encontra na prática, quer ao nível industrial, quer mesmo ao nível académico/científico, que é a de ir alterando o valor de uma variável (parâmetro do processo/produto) de cada vez, mantendo as restantes constantes, é uma abordagem não estruturada e por isso mais dispendiosa em termos de custo e tempo, nomeadamente quando o número de variáveis é elevado. Além disto, só por sorte permitirá alcançar o objetivo pretendido ou o melhor resultado que seria possível obter em muitos dos casos que se poderão encontrar na realidade.

Não é difícil encontrar na literatura técnicas devidamente testadas e validadas que se adaptam às mais diversas características dos fenómenos e das variáveis em estudo, bem como ao tipo de informação que se pretende obter num estudo experimental. O Desenho e Análise de Experiências (Design of Experiments - DoE) é um exemplo dessas técnicas. Esta é particularmente adequada e verdadeiramente recomendável para estudos experimentais que envolvam várias variáveis e se pretende determinar com um número mínimo de experiências qual o valor que essas variáveis devem assumir de modo a garantir o melhor valor da resposta (característica ou parâmetro que se está a avaliar/medir, também denominada por variável de entrada) em termos de localização e dispersão relativamente a um valor objetivo.

Apesar de serem inúmeros os casos de estudo que documentam o vasto campo de aplicação e os benefícios resultantes da aplicação desta técnica, a sua aplicação nas empresas em Portugal ainda não tem a relevância que deveria ter. Infelizmente, nas pequenas e médias portuguesas com sistemas da qualidade certificados não existem recursos com a competência adequada para selecionar as ferramentas/técnicas mais adequadas para maximizar a eficiência do processo/produto, e que o DoE nem sequer faz parte das dez ferramentas/técnicas mais utilizadas [1]. No mesmo sentido apontava a opinião de Saraiva [2], ao considerar que o panorama de utilização de ferramentas e metodologias da qualidade (das mais simples às mais elaboradas) em Portugal era especialmente confrangedor.

Estudos nacionais e internacionais têm evidenciado que o DoE não está suficientemente disseminado nas empresas [3-6]. Apenas uma pequena minoria dos quadros das empresas (Engenheiros, Gestores, etc.) conhece a metodologia e as vantagens que lhe estão associadas. Para além do desconhecimento absoluto, o que por si só é muito grave, os argumentos mais

frequentes que têm sido apresentados para justificar a não utilização do DoE são os seguintes: i) a escassez ou inexistência de recursos humanos e tecnológicos; ii) a realização de experiências é inviável por questões técnicas e/ou económicas; iii) a não aplicabilidade em determinado tipo de problema, processo e/ou produto; iv) A inutilidade ou não necessidade de aplicação da técnica; v) Incapacidade para definir as experiências a realizar e analisar os resultados dessas experiências. Infelizmente, todos estes argumentos evidenciam um claro desconhecimento daquilo que é o DoE e das suas vantagens. Por conseguinte, este trabalho tem como principal objetivo desmontar estes e outros argumentos e contribuir para a divulgação do DoE, incentivando a sua utilização no desenvolvimento e na melhoria de produtos e processos num contexto industrial e académico. Para o efeito, este artigo está estruturado em três partes: na primeira parte (secção 2) deste trabalho apresentam-se as barreiras à implementação do DoE e a desmistificação dos respetivos argumentos; na segunda parte (secção 3) são apresentadas as diretrizes para uma utilização bem-sucedida do DoE; por fim (secção 4), apresentam-se os erros mais comuns ao nível operacional e da execução que são cometidos quando se utiliza o DoE.

2. Parte I – Barreiras e Desmistificação dos Argumentos que Justificam a Não-utilização do DoE

Antecipar e gerir as barreiras à implementação do Desenho e Análise de Experiências (DoE) é uma forma eficaz de disseminar esta poderosa ferramenta de suporte à conceção, desenvolvimento e melhoria dos processos e dos produtos nas organizações. São muitos os trabalhos publicados onde se confirma que a aplicação do DoE permite obter progressos sólidos e direcionados, em oposição aos resultados esporádicos e não sustentados que resultam de práticas assentes no conhecimento empírico. Mesmo assim, o DoE continua a ser muito pouco utilizado. Para justificar isto, para além do absoluto desconhecimento desta ferramenta, continuam a ser apresentados argumentos que não fazem ou deixaram de fazer sentido.

Para promover e incentivar a aplicação do DoE num contexto industrial e académico, nesta segunda parte do artigo são apresentados e discutida a validade dos argumentos que mais frequentemente têm servido para justificar a não-utilização desta ferramenta.

2.1 Implementação do DoE - Barreiras

A lacuna entre o desenvolvimento teórico e a aplicação na prática das ferramentas (técnicas, metodologias, ...) que podem ser usadas na conceção, desenvolvimento e melhoria do desempenho de processos e produtos é, atualmente, bastante significativa. Este desvio está a aumentar, o que um ponto de vista académico pode ser natural, de um ponto de vista prático parece evidenciar uma falta de comunicação entre académicos e não-académicos, dificuldade no acesso aos trabalhos académicos publicados e/ou que os académicos não estão a ter em conta os obstáculos que os “experimentadores” (engenheiros e outros profissionais envolvidos em estudos experimentais) enfrentam para entender e implementar as ferramentas mais eficientes e eficazes. Além disto, existem evidências que os experimentadores usam algumas técnicas estatísticas sem estarem completamente confiantes do que fizeram e consideram que o conhecimento teórico dos pressupostos e limitações das técnicas que usam é irrelevante ou desnecessário [7]. De acordo com o estudo destes autores, o DoE está entre as que são menos utilizadas. Este facto não é novo, tendo já sido realizados trabalhos para o compreender. Um exemplo é o trabalho realizado por Martin et al. [8], os quais identificaram na literatura três tipos de bloqueio à utilização do DoE:

i) **Organizacional**, onde se incluem:

- *Resistência à mudança (Barreira 1 - B1):*
- *Baixo comprometimento dos gestores (Barreira 2 – B2)*
- *Recursos insuficientes (Barreira 3 – B3)*
- *Dificuldade de trabalhar em equipa (Barreira 4 – B4)*
- *Preconceitos sobre a Estatística (Barreira 5 – B5)*

ii) **Técnico**, onde se incluem

- *Software “estatístico” é pouco útil e de difícil utilização (Barreira 6 -B6)*
- *Jargão (estatístico) usado na literatura (Barreira 7 – B7)*
- *Falta de metodologias para orientar os utilizadores (Barreira 8 – B8)*
- *Más experiências anteriores (Barreira 9 – B9)*
- *Desenvolvimentos teóricos insuficientes para resolver problemas reais (Barreira 10 - B10)*

- *Complexidade dos métodos e modelos matemáticos/estatísticos (Barreira 11 - B11)*

iii) **Educacional**, onde se incluem:

- *Dificuldade de acesso a documentação (Barreira 12 - B12)*

- *Conhecimentos de estatística são pouco abrangentes (Barreira 13 – B13)*

- *DOE não é ensinado (aos engenheiros) no ensino superior (Barreira 14 – B14)*

- *DOE não é adequadamente ensinado (Barreira 15 – B15)*

- *Consultores não têm as competências necessárias (Barreira 16 – B16)*

A denominação atribuída aos tipos de bloqueio e as barreiras incluídas dentro de cada um deles podem ser discutíveis e não está no âmbito deste artigo tecer considerações sobre isto. De qualquer maneira, na opinião do autor, muitas das barreiras organizacionais só se justificam (existem) por desconhecimento ou conhecimento insuficiente e enviesado do que é o DoE, ou seja, do que entendemos denominar por razões educacionais. Por exemplo, a resistência à mudança (B1) e o baixo comprometimentos dos gestores (B2) só têm sustentação racional quando devidas a razões educacionais. O mesmo raciocínio pode ser feito relativamente às barreiras B3 e B4, porque ninguém com poder de decisão numa organização deixará de redefinir a alocação de recursos e criar condições para que se trabalhe em equipa quando tenha consciência, ou lhe seja apresentado por escrito (se fundamentado), o retorno esperado com a utilização do DoE.

2.2 Desmistificação de Argumentos

Os resultados do estudo realizado com o objetivo de perceber porque é que o DoE era pouco utilizado na Europa mostram que a opinião de académicos, consultores e profissionais (engenheiros, estatísticos, matemáticos e outros quadros técnicos utilizadores do DoE) de variados setores de atividade é similar [9]: *A utilização do DoE é dificultada, principalmente, pelas barreiras B1, B2, B13 e B14, ou seja, por aquilo que consideramos ser razões Educacionais*. De facto, os argumentos que mais vulgarmente são apresentados para justificar a não utilização do DoE, nomeadamente, a inutilidade ou a não necessidade de aplicação desta ferramenta, a não aplicabilidade a determinado tipo processo ou produto, e a incapacidade para definir as experiências e analisar os seus resultados têm paralelismo direto com as barreiras

mais “votadas” no referido estudo (B2, B13, B1 e B14, respetivamente), as quais são corroboradas em vários trabalhos posteriormente publicados.

Para que o DoE se torne numa ferramenta frequentemente utilizada num contexto académico e industrial é necessário, antes de mais, que seja conhecida. Ninguém saberá para que serve, que vantagens e limitações tem ou incentivará a utilização de uma ferramenta que não conhece ou que apenas ouviu falar. Por conseguinte, a integração do DoE na estrutura curricular em cursos superiores, nomeadamente nas áreas de engenharia e gestão, e nos programas de formação de outras entidades é de primordial importância para que esta ferramenta chegue ao maior número possível de destinatários e os motive a usá-la. Importa realçar que o ensino do DoE não se deve limitar às questões estatísticas (seleção do desenho ou dos métodos de análise) e à mecanização dos procedimentos de cálculo, ainda que se usem como exemplos casos de estudo reais. Esta má prática poderá (ou estará a) originar diversos tipos de barreiras à utilização do DoE que não serão apenas do tipo educacional. A mecanização dos procedimentos de cálculo, atualmente, já não faz sentido e, tal como se sabe e é referido no capítulo seguinte, muitos dos estudos onde se aplica o DoE falham por falta de planeamento. O planeamento das atividades requeridas para utilizar o DoE nem sempre vem descrito com todo o pormenor na literatura e por isso poderá ser mais difícil de transmitir/ensinar por quem nunca esteve envolvido na resolução de problemas com esta ferramenta. Quanto aos procedimentos de cálculo, estes podem ser (facilmente) efetuados com recurso a um dos softwares que são comercializados para o efeito. Os softwares são hoje mais fáceis de utilizar e emitem alertas ou sugestões ao utilizador sobre como proceder em algumas situações, para além das empresas que os comercializam disponibilizarem apoio técnico. Isto não quer dizer que o software substitui ou compensa a falta de conhecimentos do utilizador sobre o DoE. O software facilitará em muito o desenho e a análise do resultado das experiências mas o utilizador tem de saber o que quer fazer e como o fazer no software que adotar. Como é óbvio, as questões relacionadas com o planeamento de um estudo e, por exemplo, a definição dos níveis das variáveis não são resolvidas com o software.

Conhecimentos básicos de matemática e estatística (ensino secundário completo, frequência do ensino superior ou licenciatura nas áreas da gestão, engenharia, economia, etc.) é uma condição suficiente para se poder adquirir os conhecimentos e as competências requeridas para utilizar o DoE em muitos dos problemas ou estudos que podem ser desenvolvidos num contexto industrial ou académico. O paralelismo que será possível encontrar entre o estudo que se poderá querer realizar e os inúmeros trabalhos que têm sido publicados em artigos técnico-científicos

ou que são encontrados nos livros onde esta ferramenta é adequadamente apresentada e ilustrada, alguns deles disponíveis na World Wide Web a custo zero, propiciará a confiança adicional que poderá ser necessária para usar esta ferramenta.

Ao contrário do muitas vezes se argumenta, o DoE não é para estatísticos. Esta ferramenta pode e deve ser utilizada por todos aqueles que estão envolvidos na concepção, desenvolvimento e melhoria dos processos e dos produtos. Os métodos que estes profissionais têm aplicado à grande maioria dos problemas que estão descritos na literatura (envolvendo equipes de trabalho que incluem sempre ou são exclusivamente compostas por engenheiros e outros quadros técnicos) e que são passíveis de serem formulados num contexto acadêmico e industrial, não são difíceis de compreender e a sua utilização ficará muito facilitada se for efetuada num suporte informático (software). Até porque, tal como é recomendado por muitos autores, o desenho e a análise de resultados das experiências devem manter-se tão simples quanto possível. De qualquer maneira, é importante realçar que o DoE não é uma varinha mágica que se aplica em qualquer contexto e que resolve todos os problemas das empresas. Esta ferramenta é particularmente adequada e verdadeiramente recomendável para estudos experimentais que envolvam várias variáveis e se pretende compreender a relação entre as variáveis de entrada e a resposta, e assim conseguir determinar o valor que essas variáveis devem assumir para ser obtido o melhor valor da resposta em termos de localização e dispersão. Neste pressuposto, não são os muitos anos de experiência profissional que tornarão o DoE inútil e desnecessário. Esta ferramenta não serve para confirmar o que já se sabe, como por vezes também se argumenta. Quando assim é, o problema e a justificação do estudo seriam questionáveis, o objetivo não estaria bem definido ou a formulação do estudo não terá sido a mais adequada. O que não se pode esperar com a utilização desta ferramenta é resolver os problemas instantaneamente. Para serem obtidos os resultados desejados devem ser tidas em consideração todas as diretrizes apresentadas na Parte II deste artigo e é preciso ter presente que o DoE tem inerente, por natureza, uma abordagem sequencial que pode incluir 3 fases (Triagem ou Screening, Modelação e Otimização). Além disto, pode ser necessário adicionar experiências às que foram previamente realizadas ou refazer algumas dessas experiências, seja porque os resultados obtidos não permitem tirar conclusões e/ou porque o nível(eis) de um ou mais fatores devem ser alterados, o que é particularmente válido nas fases de Triagem e Modelação. Note-se que para cada uma das 3 fases existem conjuntos (matrizes) de experiências e técnicas de análise mais apropriados, não se podendo ignorar em qualquer das fases os princípios básicos do DoE, nomeadamente a Aleatoriedade e Replicação das experiências e a Blocagem de variáveis. Isto

não deve ser motivo de preocupação porque é fácil de ensinar e aprender. No pressuposto que é possível criar uma equipa multidisciplinar para formular adequadamente o problema, estabelecer os níveis para as variáveis e definir a resposta, o que é difícil reduzir e impossível de eliminar são os encargos associados aos recursos (humanos, técnicos e materiais) que precisam de ser afetos ao estudo experimental. Experimentar tem custos e isto tem sido um argumento recorrente para justificar a não-utilização do DoE. Para evitar este argumento, ou para que este deixe de fazer sentido, devem ser estimados os ganhos de tempo, de qualidade e financeiros, ou outros, que poderão ser obtidos com a realização do estudo experimental. O balanço entre ganhos e custos estimados deverá estar na base das justificações para realizar o estudo, sendo um elemento crítico para que a gestão aos vários níveis se comprometa com a sua realização e disponibilize os recursos considerados necessários para o efeito. Ainda assim, é possível que existam equipamentos e produtos que pela sua complexidade técnica, dificuldade e custo de operação ou fabrico, bem como por questões de segurança sejam elementos inibidores ou impeditivos da realização de experiências. Nestes casos, a alternativa será recorrer às denominadas experiências simuladas (computer experiments), embora o desenho e os métodos de análise dos resultados destas experiências possam ser mais sofisticados. O recurso a apoio externo (empresas de prestação de serviços ou centros de investigação universitários) pode ser uma opção, devendo a decisão ser tomada com base numa análise de custo-benefício.

3. Parte II – Diretrizes para uma Utilização Bem-sucedida do DoE

Com base na experiência e conhecimentos do autor sobre o DoE, as diretrizes que a seguir se apresentam foram agrupadas em quatro fases: Planeamento – Condução – Análise – Intervenção (ver figura). Estas foram definidas de modo a constituírem um ciclo de fases interdependentes que sustentem a melhoria contínua do processo e do produto com base no DoE.

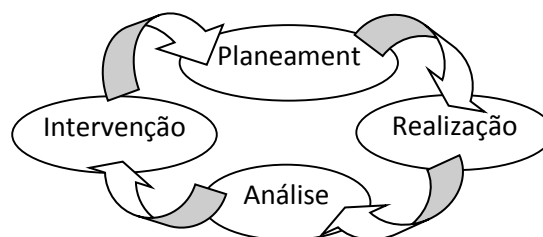


Fig. 1- Fases no DoE

3.1 Planeamento

É sabido que os estudos experimentais podem não produzir os resultados esperados devido à falta de conhecimentos técnicos ou ao uso incorreto das técnicas estatísticas, mas também devido a um planeamento menos bem delineado. Para ultrapassar este problema, as atividades de planeamento são estruturadas em dois grupos: 1) Atividades Estratégicas; 2) Atividades Operacionais.

No âmbito das atividades estratégicas incluem-se:

- **O comprometimento da gestão de topo:** A necessidade de melhorar e mudar são muitas vezes interpretadas como uma crítica ao trabalho já feito, o que poderá suscitar em alguns colaboradores, nomeadamente nos Quadros superiores e intermédios) um sentimento de perda de autoridade e de falta de competência. É da responsabilidade da gestão de topo criar um ambiente que estimule a cultura da melhoria contínua e da mudança, demonstrando envolvimento e comprometimento com a disponibilização de meios técnicos e humanos para a implementação do DoE e outras técnicas de melhoria da qualidade dos processos e/ou produtos.

- **A criação da equipa de trabalho:** práticas de gestão modernas suportam-se em equipas multidisciplinares. A melhoria contínua dos processos e produtos é mais facilmente conseguida por grupos de trabalho que integrem elementos das várias áreas organizacionais e façam uso de técnicas de análise e resolução de problemas reconhecidamente eficientes. Importa salientar que as técnicas estatísticas, e em particular o DoE, devem ser utilizadas em conjunto com o conhecimento científico e não como um substituto do conhecimento acumulado pelas equipas de trabalho.

- **A identificação de oportunidades:** a cultura do incentivo à inovação e participação de pessoas, que é da responsabilidade da gestão de topo, traduzir-se-á na identificação de oportunidades para melhorar os processos e os produtos. Naturalmente que as propostas de melhoria ou de trabalho devem estar alinhadas com os objetivos da organização e as vantagens que delas poderão resultar serem quantificadas em termos monetários, pois assim é mais fácil seleccionar o problema a resolver e assegurar o comprometimento de toda a estrutura organizacional e os recursos necessários.

No âmbito das atividades operacionais incluem-se:

- **A definição de objetivos:** a equipa deve compreender a natureza e extensão do problema que se pretende resolver para estabelecer adequadamente o objetivo do estudo. O objetivo condicionará todas as atividades subsequentes e por isso deve ser específico, facilmente

mensurável e alcançável, de modo a que sirva de orientação e motivação para obter a melhoria desejada.

No âmbito das atividades operacionais incluem-se:

- **A identificação de variáveis:** um processo pode ser visto como uma caixa negra, no qual variáveis controláveis e incontroláveis – variáveis de entrada - combinam-se para produzir um output sobre o qual se definirá a variável a medir/observar – variável de saída. A correta identificação de variáveis controláveis e incontroláveis (fatores) e dos seus níveis (valores mínimo e máximo em que serão testados), as possíveis interações entre fatores controláveis, bem como uma definição apropriada da variável de saída (resposta) são questões críticas para ser atingido o objetivo do estudo. Isto merece uma atenção muito especial da equipa de trabalho. Nenhum problema será resolvido se todas as variáveis que o influenciem não tiverem sido identificadas, os seus valores adequadamente definidos e a resposta for apropriada ao problema e respetivo objetivo. Respostas devidamente fundamentadas, quantificáveis numa escala contínua e alinhadas com os objetivos do estudo fornecerão informações valiosas para a melhoria dos processos e dos produtos sempre que todas as necessárias variáveis de entrada sejam consideradas no estudo. Importa também ter presente que os processos e os produtos são, por natureza, multidimensionais. Isto significa que melhorar uma resposta não pode conduzir à degradação de outra(s) igualmente relevante(s).

- **A definição do sistema(s) de medição:** especial atenção deve ser dada à recolha de dados, porque a simples recolha pode não permitir obter a informação desejada da análise dos dados. As conclusões de um estudo experimental estão diretamente dependentes da qualidade dos dados recolhidos. Por conseguinte, a definição do sistema(s) de medição, incluindo os recursos humanos, equipamentos e métodos de medição, é um aspeto fundamental em estudos experimentais. É importante garantir que estão identificados os equipamentos adequados para efetuar as medições necessárias (nos fatores controláveis e resposta), que os equipamentos estão devidamente calibrados e que os operadores estão habilitados a usá-los. Uma prévia avaliação do sistema de medição, nomeadamente da sua repetibilidade e reprodutibilidade, é recomendável (deve também ser assegurada).

- **A seleção do desenho experimental:** Os fatores, eventuais interações entre os fatores e a resposta identificados para resolver um problema, além de constrangimentos financeiros e de tempo, são elementos determinantes na seleção do desenho experimental (matriz de experiências). Em termos genéricos, num estágio inicial de um estudo experimental,

usualmente designada por Screening, o número de fatores envolvidos pode ser grande e, por conseguinte, o objetivo será o de identificar os fatores com maior impacto na resposta. Nos estágios seguintes o objetivo será o de modelar e otimizar a resposta com base nos fatores significativos previamente identificados. Isto significa que, para uma mesma resposta, a matriz de experiências em cada uma das fases do estudo experimental terá características diferentes. Independentemente do conhecimento que se tem sobre o problema (do produto e do processo) e do tipo de informação que se pretende obter, selecionar uma matriz de experiências inadequada comprometerá as conclusões do estudo e a obtenção do objetivo definido. Efetivamente, nenhum método de análise pode salvar um mau desenho de experiências. Pelo contrário, se as experiências forem adequadamente desenhadas, informação útil pode ser obtida com técnicas de análise menos sofisticadas. O sucesso de um trabalho de investigação não está diretamente associado à complexidade da matriz de experiências e das técnicas de análise usadas. Uma linha de orientação no desenho e análise de experiências é a simplicidade. Abordagens simples para resolver problemas são sempre desejáveis, e recomendam-se. No entanto, é importante salientar que problemas de complexidade elevada também exigirão abordagens de resolução dos problemas mais sofisticadas.

-A Replicação de experiências: réplicas de uma experiência são repetições dessa experiência nas condições pré-estabelecidas, e não leituras repetidas do resultado dessa experiência. A variação entre réplicas permite obter uma estimativa do erro experimental, enquanto a variação entre repetições (leituras repetidas do resultado da mesma experiência) permitirá obter uma estimativa do erro de medição, que é apenas uma componente do erro experimental. Restrições financeiras e/ou temporais são, em geral, limitadoras do número de experiências que seria desejável realizar e do número de vezes que cada experiência deveria ou seria conveniente realizar. De qualquer maneira, devem ser efetuadas algumas réplicas de cada uma das experiências planeadas. Quanto maior for o número de réplicas mais correta será a estimativa do erro experimental e dos efeitos dos fatores que afetam o valor médio e a dispersão da resposta, e por isso mais fiáveis serão as conclusões obtidas da análise dos dados. Contudo, o número de réplicas não deve ser elevado, por um lado, para que não torne o custo e o tempo da experimentação desproporcionados relativamente aos benefícios que daí advêm e, por outro lado, porque as diferenças obtidas no valor do erro experimental podem ser mínimas, ou seja, sem significado estatístico e por isso não advir daí qualquer benefício. Na prática, é comum serem realizadas 3 a 5 réplicas, embora existam métodos para calcular o número de réplicas mais adequado para cada caso. Esta prática é útil porque permite estimar o efeito dos fatores

que afetam a variabilidade da resposta (efeitos de dispersão), o que tem sido ignorado em muitos estudos experimentais. Identificar estes fatores é tão importante quanto a identificação dos efeitos de localização (fatores que afetam o valor médio da resposta). De fato, a variabilidade é uma importante causa dos altos custos de fabrico e da baixa performance dos processos e dos produtos, pelo que muitas empresas estão a desencadear esforços para conseguir reduzi-la.

- **A Aleatoriedade e Blocagem de variáveis:** estes são dois princípios básicos num estudo experimental que têm implicações diretas na seleção da matriz de experiências e na análise dos resultados dessas experiências. Para minimizar o efeito de fontes de variação desconhecidas e incontroláveis, que devem ser tanto quanto possível reduzidas antes de se iniciar o estudo experimental, as experiências devem ser realizadas sem qualquer ordem ou prioridade (aleatoriamente). Porém, devido a questões técnicas e/ou económicas, por vezes, é conveniente dar prioridade a experiências em que o nível de um fator se mantém constante. Por exemplo, fazer experiências em que a temperatura de um forno tem de alternar entre valores muito distintos é moroso e economicamente inconveniente. Neste caso, seria conveniente fazer as experiências devidas com o forno à temperatura mais baixa e depois realizar as restantes experiências com o forno à temperatura mais alta. Muitos outros exemplos poderiam ser apresentados para realçar que o que se está a fazer é realizar as experiências em blocos (em grupos mais homogêneos). Isto deve também ser feito quando existam fatores controláveis que provoquem uma variação excessiva no valor da resposta mas que não é do interesse do investigador estimar o seu efeito nessa resposta. Lotes de matéria-prima, pessoas, máquinas, momentos e locais de realização das experiências são exemplos de fatores que, vulgarmente, levam a que as experiências devam ser realizadas em blocos. Desta forma, a precisão nos resultados das experiências é melhor e as estimativas do efeito dos fatores controláveis mais corretas. Importa sublinhar que realizar as experiências em blocos continua a exigir que dentro de cada bloco (dia de trabalho, operador A, lote nº1 da matéria-prima, etc.) as experiências sejam realizadas aleatoriamente. A aleatoriedade na realização das experiências é fundamental para evitar qualquer tipo de enviesamento nos resultados das experiências e invalidar os pressupostos subjacentes à aplicação de algumas técnicas de análise de dados.

- **A criação de Documentos/Impressos:** erros em procedimentos experimentais afetam a validade dos resultados e o sucesso da investigação. É de primordial importância descrever o que deve ser feito, porque é que tem de ser feito, quando deve ser feito, quem o vai fazer e como o deve fazer. Por conseguinte, a documentação detalhada das responsabilidades e das tarefas a executar no âmbito de um estudo experimental são essenciais para o sucesso desse estudo e

particularmente úteis em estudos experimentais complexos. Toda a documentação, incluindo os impressos para o registo de dados, deve ser fácil de usar, compreensível e evitar erros de interpretação ou registo.

3.2 Condução

A realização das experiências e a recolha de dados não são, em geral, atividades problemáticas. De qualquer maneira, os estudos podem envolver diversos equipamentos e pessoas que tenham de executar tarefas que nunca tenham feito, sendo por isso muito importante (recomendável) realizar algumas experiências preliminares (de teste) de modo a validar a adequação das atividades propostas. Desta forma será possível, por exemplo, assegurar que as folhas de registo de dados são adequadas, que todos os equipamentos estão aptos a ser usados, que os recursos humanos e materiais estão disponíveis e que todos os fatores podem ser testados nos níveis estabelecidos. Com isto evitam-se perdas de tempo e custos desnecessários, que são especialmente inadmissíveis quando os estudos são realizados em ambiente industrial. Na eventualidade de ocorrerem quaisquer ocorrências e desvios ao que estava planeado, deve-se proceder ao seu registo e análise.

3.3 Análise

Se as experiências não foram corretamente definidas em função do objetivo do estudo e adequadamente realizadas, os resultados não permitirão tirar conclusões fiáveis mesmo quando se apliquem os métodos de análise mais sofisticados. A seleção do método de análise depende das experiências que foram realizadas e do modo como elas foram realizadas. Ainda que as tarefas de desenho das experiências e análise dos resultados esteja grandemente facilitada com a utilização de vários programas comerciais desenvolvidos para o efeito, isto não significa que todos os estudos experimentais serão bem-sucedidos. Os programas de análise de dados fazem num pequeníssimo intervalo de tempo o que utilizador queria fazer. Ainda que alguns programas possam apresentar alertas e/ou guiar os utilizadores na execução das atividades pretendidas e facilitar a interpretação dos dados, é desejável que o utilizador tenha conhecimentos teóricos para fundamentar as opções que tomar durante a utilização do programa e tenha espírito crítico sobre os resultados das análises computacionais.

3.4 Intervenção

As conclusões retiradas da análise dos dados permitirão decidir que alterações serão feitas nos parâmetros do processo ou do produto, identificar as razões pelas quais o estudo deve ser

reformulado ou definir um conjunto de experiências adicionais para atingir o objetivo estabelecido. São imensos os trabalhos que mostram as vantagens decorrentes da utilização do DoE nas mais diversas áreas do conhecimento e setores de atividade. No entanto, nem todos os estudos experimentais têm um “fim feliz”. Ainda assim, existe sempre algum tipo de retorno, benefício ou conhecimentos que advêm destes estudos, tal como é confirmado na literatura por vários autores.

4. Parte III – Erros no Desenho e Análise de Experiências

A prática que é correntemente usada para tentar melhorar uma determinada característica da qualidade de um processo ou produto (resposta) é baseada na tentativa-erro, ou seja, para cada uma das variáveis que afetam a resposta testam-se diferentes valores e escolhe-se aquele que produzir o melhor valor nessa resposta, estando as restantes variáveis sempre na mesma posição ou valor. Este ciclo repete-se até que todas as variáveis tenham sido testadas. Porém, está cientificamente provado que a tentativa-erro só é frutuosa em condições muito excepcionais [10]. A abordagem mais eficiente e eficaz para compreender a relação entre as variáveis de entrada e a resposta tem por base um conjunto de experiências estatisticamente desenhadas e métodos de análise dos resultados cientificamente validados, ou seja, suporta-se no Desenho e Análise de Experiências (DoE – Design of Experiments). Esta ferramenta está a ter uma utilização crescente em várias áreas da engenharia, nomeadamente, na Mecânica, nos Materiais, na Química e na Biotecnologia, mas não só. Motores de avião, estruturas para bicicletas, máquinas elétricas, polímeros, produtos farmacêuticos, dispositivos médicos e processos tecnológicos são apenas exemplos do que tem sido concebido e desenvolvido com o DoE.

Aplicações menos bem-sucedidas do DoE também existirão mas raramente são publicadas [11]. Embora devam ser interpretadas como verdadeiras fontes de aprendizagem, na prática, as aplicações menos bem-sucedidas são uma das razões que desencorajam uma utilização mais frequente ou justificam a não-utilização do DoE. As razões para que os objetivos desejados não sejam alcançados poderão ser várias e originadas por falhas no planeamento (estratégico e operacional) do estudo e/ou na sua execução. Os erros mais comuns ao nível operacional e da execução que são cometidos quando se utiliza o DoE são os seguintes:

- **Querer resolver problemas (extremamente) complicados:** existem problemas que pela complexidade técnica e tecnológica inerente, exigem recursos (humanos, técnicos, e materiais) com qualidades e características diferenciadas que podem ser difíceis de reunir, gerir e utilizar. Por exemplo, realizar experiências estatisticamente fundamentadas com o propósito de

minimizar o depósito de partículas numa caldeira de recuperação de lixívia negra será, muito provavelmente, uma tarefa mal sucedida ou impossível de realizar em contexto industrial por razões técnicas e económicas associadas à operação deste equipamento e das suas implicações no processo produtivo.

É importante escolher um problema relevante para a empresa, desafiante para a equipa de trabalho e ilustrativo do potencial da ferramenta para todos os colaboradores mas é preciso ter sempre presente que o estudo tem de produzir resultados úteis para a empresa.

- **Objetivos mal definidos:** assumir que se pretende reduzir o desperdício em 20% ou diminuir o tempo de fabrico de um produto em 15% não é a melhor forma de expressar os resultados esperados com a realização de um estudo experimental. Para que seja mais fácil assegurar o envolvimento e a disponibilização dos recursos necessários por parte da gestão, estime os ganhos que poderão ser obtidos com a aplicação do DoE e expresse-os em unidades monetárias (euros, €).

- **Equipamentos de medição inoperacionais ou descalibrados:** não se pode melhorar nada que não se consiga medir com a necessária exatidão. As características metrológicas dos equipamentos de medição têm de ser compatíveis com as especificações (intervalo de variação, ordem de grandeza, ...) da variável(eis) que se pretende medir para que possam ser utilizados. Problemas (de calibração e de capacidade) nos sistemas de medição são (muito) vulgares e invalidam todas as medições com eles obtidos, pelo que têm de ser corrigidos antes de se começarem a realizar as experiências desenhadas. Antes de se iniciar o estudo é conveniente garantir que todos os sistemas de medição estão disponíveis e em condições de serem utilizados.

- **Matéria-prima insuficiente:** quando se assume que a matéria-prima não é uma variável que afete a resposta em estudo é necessário garantir que é armazenada a quantidade suficiente para realizar todas as experiências planeadas. Se assim não for é conveniente realizar as experiências em blocos, ou seja, existirão experiências que devem ser realizadas com o lote de matéria-prima A e outras com o lote de matéria-prima B. Note-se que dentro de cada bloco não poderão existir algumas experiências feitas com o lote de matéria-prima A e as restantes com o lote de matéria-prima B. Além disto, entre as possibilidades de não realizar as experiências em blocos e com isso poder originar um valor do erro experimental suficientemente elevado que impossibilite a deteção dos fatores e/ou interações cujo efeito afeta significativamente a resposta, ou considerar que as experiências são realizadas em blocos e com isso poder originar uma redução da

sensibilidade na análise estatística dos dados, ou seja, não aumentar a eficiência do planejamento, a opção deverá ser por esta última.

- A matriz de experiências selecionada não é adequada: A seleção da matriz é uma atividade crítica que poderá comprometer as conclusões do estudo e a obtenção do objetivo definido. Dada a grande variedade de matrizes existentes, não é invulgar alguns experimentadores serem induzidos em erro e selecionarem uma matriz inadequada. Todos os detalhes e linhas de orientação para a seleção de uma matriz são apresentados em [12], pelo que a sua leitura é recomendada (verdadeiramente desejável). De qualquer maneira, no contexto do trabalho que aqui se apresenta é pertinente, ainda que de forma sumária, realçar alguns aspetos relevantes para evitar erros que são mais frequentes.

Os dois tipos de matriz que têm sido mais utilizados são a fatorial fracionada (FFD- fractional factorial design) e a compósito central (CCD- central composite design). Matrizes fatoriais fracionadas são muito populares e apropriadas para a fase de triagem ou screening de um estudo, onde o objetivo é separar os fatores com um efeito (estatisticamente) significativo na resposta daqueles cujo efeito é negligenciável. Nesta fase, o método de análise de resultados mais utilizado é o Gráfico de Probabilidade Normal. Porém, Costa et al. [13] recomendam que o referido método seja complementado com outros, conforme delineado na estratégia que propuseram para a análise de dados obtidos com matrizes fatoriais fracionadas. Independentemente do método de análise utilizado, é importante não esquecer que quando se entende ser apropriado testar (k) fatores com dois níveis (correspondentes a um valor mínimo e máximo), o que acontece frequentemente na prática, sendo a matriz representada por 2^k , é conveniente que o número de experiências a realizar não seja muito pequeno para que seja possível estimar o efeito na resposta de cada um dos fatores e das interações entre dois fatores de forma isolada, nem muito grande para que se evite desperdiçar recursos (desnecessariamente). Na Tabela I representam-se a cor verde as matrizes apropriadas e as mais convenientes, sendo estas últimas mais utilizadas quando o tempo e o custo da experimentação não são elementos críticos. Nalguns casos pode até ser possível realizar todas as experiências possíveis (células a cor azul). Quando os recursos forem verdadeiramente escassos e/ou o custo da experimentação excessivamente elevado pode ser necessário recorrer às matrizes correspondentes às células a vermelho, embora a utilização deste tipo de matriz deva ser feita apenas em último caso (evitada). De qualquer maneira, é sempre possível definir um conjunto de experiências adicionais para se passar a ter uma matriz mais apropriada ou conveniente (representadas nas células a cor verde clara e escura, respetivamente) e obter dados mais úteis.

Se assim não for é possível que não se tirem conclusões dos dados obtidos com as experiências realizadas, ou seja, não se chegue a conhecer os fatores ou interações entre fatores que verdadeiramente afetam a resposta, porque o efeito de uns fatores ou interações pode estar a mascarar/enviesar o efeito de outros.

Tabela I - Número de fatores / Número de Experiências

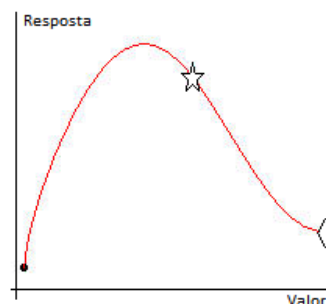
Nº Exper.	Matrizes fatoriais (2^k)														
	Nº de fatores (k)														
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
4	Todas	Evitar													
8		Todas	Apropr.	Evitar	Evitar	Evitar									
16			Todas	Conven.	Apropr.	Apropr.	Apropr.	Evitar	Evitar	Evitar	Evitar	Evitar	Evitar	Evitar	
32				Todas	Conven.	Apropr.	Apropr.	Apropr.	Apropr.	Apropr.	Apropr.	Apropr.	Apropr.	Apropr.	
64					Todas	Conven.	Conven.	Apropr.	Apropr.	Apropr.	Apropr.	Apropr.	Apropr.	Apropr.	
128						Todas	Conven.	Conven.	Conven.	Conven.	Apropr.	Apropr.	Apropr.	Apropr.	

No que respeita às matrizes do tipo compósito central, estas devem ser usadas após a fase de triagem ter sido realizada e estar perfeitamente identificada a região experimental que se pretende explorar, a qual é estabelecida pelos valores máximo e mínimo a que serão testados os fatores que afetam significativamente a resposta. Estas matrizes estão concebidas de maneira a que seja possível modelar a resposta em função dos fatores críticos. Esta modelação é feita, em geral, com base numa função polinomial do segundo grau que é obtida pelo Método dos Mínimos Quadrados, ou Mínimos Quadrados Ordinários (OLS- Ordinary Least Squares). A adequabilidade do modelo deve ser avaliada por várias métricas, e não se limitar apenas ao popular Coeficiente de Pearson (R^2). Todos os softwares de análise de dados permitem determinar o valor do R^2 ajustado, do R^2 previsto, do Erro Quadrático Médio (MSE) e a falta de ajustamento (Lack-of-Fit) do modelo, entre outras métricas. Note-se que o valor do R^2 não é suficientemente fiável. Na prática são usualmente considerados os valores do R^2 ajustado e do MSE em detrimento do R^2 (para detalhes sobre este assunto sugere-se, como exemplo, a referência [14]). O que também não é conveniente (vantajoso) utilizar são matrizes compósito central com um número de fatores igual ou superior a 6, exceto no caso em que a fase de triagem assim o confirmar.

- **A ordem de realização das experiências não é aleatória:** garantir a aleatoriedade na ordem de execução das experiências exige, em geral, mais tempo para executar as experiências e, eventualmente, mais custos. Em certos casos pode ser conveniente (por questões de tempo e custo) manter fixo o valor de um ou mais fatores, por exemplo, a temperatura de um forno, um determinado tipo de máquina ou operador, para testar os restantes fatores aos diferentes níveis. Isto é muito vulgar de ocorrer na prática e é muitas vezes ignorado durante a análise dos dados. Restrições na aleatorização das experiências desenhadas dão origem às denominadas matrizes

Split-plot e fazem com que o método de análise dos dados seja diferente daquele que se utiliza quando se analisam dados obtidos de uma matriz fatorial ou composto central. Nunca se pode esquecer que nenhum método de análise pode, efetivamente, ser a solução para obter informação válida de dados recolhidos com um desenho de experiências inadequado.

- **Os níveis dos fatores são mal estabelecidos:** O gráfico apresentado é um exemplo do que poderá acontecer se os níveis de um fator não forem os mais adequados: o efeito na resposta pode ser mínimo e o fator não ser considerado crítico (importante ou estatisticamente significativo) quando testado nos valores correspondentes ao ponto e ao losângulo. A decisão seria diferente se o fator fosse testado aos níveis (nos valores) correspondentes ao ponto e à estrela, ou nos valores correspondentes à estrela e ao losângulo. Isto significa que afastar excessivamente os valores a que um ou mais fatores são testados pode enviesar as decisões relativas ao efeito desses fatores e das suas interações com outros fatores. O que também é frequente acontecer é o intervalo de variação dos valores atribuídos a um ou mais fatores ser muito pequeno e a decisão ser semelhante à situação anterior, ou seja, um ou mais fatores e/ou interações desse fator(es) não serem considerados importantes ou estatisticamente significativos.



Não menos vulgar é constatar-se que existem experiências inexecutáveis quando se pretende testar um dos níveis de algum fator depois de algumas experiências já terem sido realizadas. Isto origina um desperdício de recursos, pelo que se recomenda a realização de experiências de ensaio para validar os valores atribuídos aos fatores. Neste sentido, é conveniente ser realizada, por exemplo, a experiência em que os fatores são testados no valor mais baixo e a experiência em os fatores são testados no valor mais elevado.

- **Os pressupostos da Análise da Variância (ANOVA) não são validados:** para se tomarem decisões sobre a significância estatística dos efeitos dos fatores e interações com base na ANOVA é necessário validar os pressupostos que lhe estão subjacentes. Isto pode ser feito através da análise dos resíduos (erros experimentais), verificando-se se estes seguem uma distribuição normal, têm média zero; têm variância constante e são independentes. Todos os softwares de análise de dados permitem fazer esta verificação muito facilmente, pelo que não existem razões para que esta não ser feita. Note-se que a violação de algum dos pressupostos invalida (teoricamente) qualquer decisão que possa ser tomada com base nos resultados da ANOVA. Procedimentos que podem ser desencadeados para ultrapassar este problema são a

identificação e eliminação de valores aberrantes (outliers) nos resultados das experiências e a transformação dos resultados, por exemplo, para uma base logarítmica.

- **Omissão de informação:** é possível que durante a realização das experiências ocorram situações indesejadas (não planeadas). Alterações nas condições ambientais e/ou técnicas em que as experiências devem ser realizadas, por exemplo, a alteração na ordem de realização das experiências, no valor de algum dos fatores foram incluídos no estudo e a substituição de máquinas ou pessoas. A descrição detalhada e registo de factos estranhos, indesejados e não planeados é muito importante (obrigatória), porque podem ajudar a encontrar soluções para os eliminar, ou pelo menos para os minimizar e interpretar resultados. De qualquer maneira, devem ser desencadeados todos os esforços para evitar qualquer tipo de alterações e ocorrência de eventos indesejados na medida em que estes poderão comprometer a validade do estudo e as conclusões que dele possam resultar.

É vulgar dizer-se, com alguma ironia, que a melhor altura para desenhar experiências é depois de elas terem sido realizadas. No entanto, esta é uma lógica que deve estar subjacente a qualquer estudo experimental que se quer iterativo e sequencial: formular uma hipótese, experimentar, e em função das conclusões ou informação obtidas reformular a hipótese reiniciar o ciclo. O DoE é uma ferramenta cientificamente validada que permite compreender os fenómenos em estudo e tomar decisões devidamente fundamentadas, permitindo às pessoas e às organizações abandonarem a cultura da tomada de decisão baseada na intuição.

5. Conclusão

Este artigo apresenta os tipos de bloqueio e barreiras que se têm colocado à utilização do DoE, desmistifica argumentos recorrentes para a sua pouco frequente utilização e a não utilização, diretrizes para uma utilização bem-sucedida e os erros comuns que são cometidos na utilização do DoE. Desta forma pretende ser mais um contributo para a sua promoção e um incentivo à sua utilização desta ferramenta.

Experimentar e aprender com base em experiências desenhadas e analisadas por métodos e técnicas cientificamente validadas tem provado ser e será uma estratégia frutuosa em qualquer empresa e setor de atividade. É o “conhecimento fundamentado”, e não o “conhecimento empírico”, que deverá estar na base da melhoria contínua dos processos e dos produtos. O imobilismo será sempre um impedimento à evolução no conhecimento e por isso do progresso que lhe possa estar associado. Por conseguinte, terminamos com uma mensagem de estímulo:

EXPERIMENTEM, em menos tempo, com menos custo, mais eficiência e mais eficácia; usem o Desenho e Análise de Experiências (DoE).

Referências Bibliográficas

- [1] Sousa D., Aspinwall E., Sampaio A., Rodrigues A. (2005). Performance Measures and Quality Tools in Portuguese Small and Medium Enterprises: Survey Results. *Total Quality Management*, 16: 277-307.
- [2] Saraiva, P. (2003). Manual Prático para a Certificação e Gestão da Qualidade com base nas Normas ISO9000: 2000. Unidade 3, capítulo 5, subcapítulo 2.1. Editora VERLAG.
- [3] Bergquist, B., Albing, M. (2006). Statistical methods – does anyone really use them? *Total Quality Management & Business Excellence*, 17: 961-972.
- [4] Ilzarbe, L., Alvarez, M., Viles, E., Tanco, M. (2008). Practical applications of design of experiments in the field of engineering: A bibliographical review. *Quality and Reliability Engineering International*, 24: 417-428.
- [5] Saraiva, P., d' Orey, J., Sampaio, P., Reis, M., Cardoso, C., Pinheiro, J., Tomé, L. (2010). O Futuro da Qualidade em Portugal. APQ.
- [6] Sheil, J., Hale, D. (2012). The ‘Democratisation’ of Statistics: Parastatisticians in Manufacturing. *Quality and Reliability Engineering International*, 28: 524-534.
- [7] Sheil, J., Hale, D. The “democratization” of statistics: Parastatisticians in manufacturing. *Quality and Reliability Engineering International*, 28 (2012) 524-534.
- [8] Tanco, M., Viles, E., Ilzarbe, L., Alvarez, M. Barriers faced by engineers when applying design of experiments, *The TQM Journal*, 21 (2009) 565-575.
- [9] Tanco, M., Viles, E., Álvarez, M., Ilzarbe, L. Why is not design of experiments widely used by engineers in Europe?, *Journal of Applied Statistics*, 37 (2010) 1961-1977.
- [10] Frey, D., Wang, H. (2006). Adaptive one-factor-at-a-time experimentation and expected value of improvement. *Technometrics*, 48: 418-431.
- [11] Costa, N., Pires, A., Ribeiro, C. (2006). Guidelines to help practitioners of design of experiments. *The TQM Magazine*, 18(4):386-399.
- [12] Tanco, M., Costa, N., Elisabeth, V. (2009). Experimental design selection: guidelines for practitioners. *International Journal of Productivity and Quality Management*, 4(3): 283-302.
- [13] Costa, N., Palma, J., Pereira, Z. (2013). On the selection of significant variables from unreplicated factorial designs. *International Journal of Productivity and Quality Management*, 12(2):161-184.
- [14] Goethals, P., Cho, B. (2011). Using higher precision-based response surface designs to determine the optimal process target. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56(1): 13-30.

Curriculum Vitae:

Nuno Costa é docente no Instituto Politécnico de Setúbal – Escola Superior de Tecnologia de Setúbal, no Departamento de Engenharia Mecânica, e é investigador no UNIDEMI-DEMI da FCT-UNL. Os seus trabalhos têm sido apresentados em eventos internacionais e publicados em revistas indexadas na SCI-Thomson Reuters®. Além de 4 dos seus trabalhos terem recebido prémios internacionais tem também 4 capítulos de livro publicados. A sua atividade de investigação desenvolve-se nas áreas da Gestão de Operações e da Qualidade, nomeadamente em Desenho de Experiências e Métodos de Taguchi, Controlo Estatístico do Processo e metodologia 6-Sigma.

Author Profile:

Nuno Ricardo Costa is a lecturer at the Instituto Politécnico de Setúbal – Escola Superior de Tecnologia de Setúbal (IPS-ESTSetubal) and is a researcher at UNIDEMI-DEMI 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 SCI-Thomson Reuters®. His research interests include quality and operations management.