

# A IMPORTÂNCIA DO ENSINO DA FERRAMENTA DE PLANEJAMENTO FATORIAL PARA ESTUDANTES DE ENGENHARIA

Maria Carolina Burgos Costa – mcarol@ufrnet.br

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia de Materiais

Campus Universitário Lagoa Nova - Caixa Postal: 1524

CEP – 59072-970 – Rio Grande do Norte

Cláudio Romero Rodrigues de Almeida – cacau@ufrnet.br

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia de Materiais

Campus Universitário Lagoa Nova - Caixa Postal: 1524

CEP – 59072-970 – Rio Grande do Norte

**Resumo:** *Nos cursos de engenharia, várias disciplinas evoluem com o progresso da tecnologia, fazendo com que seja necessária uma adaptação constante por parte dos professores, bem como uma predisposição a uma contínua reciclagem. A necessidade crescente da otimização de produtos e processos, minimizando custos e tempo, maximizando rendimento, produtividade e qualidade de produtos, dentre outros objetivos, tem levado profissionais de diferentes formações a buscarem técnicas de planejamento de experimentos. Este trabalho tem como objetivo divulgar a importância da ferramenta de planejamento fatorial para os cursos de engenharia.*

**Palavras-chave:** *Planejamento de experimentos, Otimização de processos, Engenharia*

## 1 INTRODUÇÃO

A metodologia do planejamento fatorial, associada à análise de superfícies de respostas, é uma ferramenta fundamentada na teoria estatística, que fornece informações seguras sobre o processo, minimizando o empirismo que envolve técnicas de tentativa e erro (BOX *et al.*, 1978). No entanto, para que o uso dessa metodologia atinja os objetivos desejados, é necessário haver uma integração entre o processo, a estatística e o bom senso, tanto da equipe responsável pela montagem dos experimentos, quanto da equipe responsável pela análise estatística e estratégica dos resultados. A utilização direta de softwares ‘amigáveis’, sem o prévio conhecimento dos fundamentos da metodologia, pode constituir um grande risco e levar o usuário a interpretações perigosamente equivocadas.

É fato bem conhecido que o desenvolvimento de um novo produto e/ou processo é, em geral, dependente de um grande número de variáveis. O planejamento consciente dos experimentos que devem ser realizados para determinar, e mesmo quantificar, a influência das variáveis sobre as respostas desejadas, é indispensável para que resultados confiáveis sejam obtidos e para que análises estatísticas consistentes possam ser realizadas. Nesse contexto, considere-se que desenvolver produtos e processos através de procedimentos de tentativa e erro, conforme registros do início do século passado, foram, de fato, importantes naquele momento. A forte competitividade, a difusão da tecnologia, bem como a competência e a responsabilidade dos pesquisadores atuais inviabiliza tais procedimentos. Tais idéias são

aplicáveis à otimização de produtos que já estão no mercado e à sua adequação à preferência do consumidor.

Além disso, quantificar o efeito das variáveis do processo através das técnicas do planejamento experimental, com o objetivo de obter informações sobre a robustez ou não das respostas desejadas, é de fundamental importância para a área de implementação de controle de processos. Assim, por exemplo, quando num processo a temperatura é um dos fatores a ser controlado, a quantificação da faixa de temperatura na qual o processo se mantém estável, é essencial para a definição da estratégia de controle: se a resposta for robusta, ou seja, se o processo se mantém estável numa faixa razoável de temperatura, então a implantação de um controlador convencional do tipo PID é suficiente, mais econômica e atinge o objetivo. Caso contrário, se qualquer alteração da temperatura desestabiliza o processo, um controlador avançado adaptativo se faz necessário.

Outro ponto importante é a otimização do rendimento de processos, de formulações que conduzam à maior aceitação global do produto, bem como do custo, da produtividade, da cor desejada, da pureza na recuperação de uma enzima, maior extração de um produto e assim por diante.

Este trabalho apresenta os principais aspectos relacionados com a importância da implementação da disciplina de planejamento de experimentos e otimização de processos nos cursos de engenharia. Para tal, são abordadas as principais vantagens do uso da técnica, e uma comparação entre as metodologias: *estudo de uma variável por vez* e *planejamento fatorial*. Uma revisão bibliográfica utilizando os livros **Como Fazer experimentos** (BARROS NETO *et al*, 2003) e **Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos** (RODRIGUES & IEMMA, 2007) foi realizada, sendo mostrados aqui aspectos importantes e alguns exemplos didáticos apresentados nestes livros.

## 2 A DISCIPLINA DE PLANEJAMENTO FATORIAL

### 2.1 Modelos empíricos

Quando se trata de modelar dados resultantes de experimentos ou observações, é importante fazer a distinção entre modelos empíricos e modelos mecânicos. Essa diferença será esclarecida através de dois exemplos práticos.

Imagine-se que um astrônomo queira calcular a hora em que vai ocorrer o próximo eclipse da Lua. Como se sabe, os fatos acumulados ao longo de séculos de observação e especulação levaram, no final do século XVII, a uma teoria que explica perfeitamente os fenômenos astronômicos não-relativísticos: a mecânica newtoniana. A partir das leis de Newton é possível deduzir o comportamento dos corpos celestes como uma consequência inevitável das suas interações gravitacionais. Este é um modelo mecânico: com ele é possível prever as trajetórias dos astros porque sabe-se as causas que as provocam, isto é, o mecanismo por trás de seu comportamento é conhecido. O astrônomo só precisa aplicar a mecânica newtoniana às suas observações e fazer as deduções necessárias. Ele não tem, aliás, de ficar restrito ao sistema solar: as leis de Newton aplicam-se universalmente. Em outras palavras, a mecânica newtoniana é também um modelo global.

Agora considere uma situação bem diferente e mais próxima de nós. Um químico é encarregado de projetar uma fábrica piloto numa determinada reação recém-desenvolvida em bancada. Ele sabe que o comportamento dessa reação pode ser influenciado por muitos fatores: as quantidades iniciais dos reagentes, o pH do meio, o tempo de reação, a carga de catalisador, a velocidade com que os reagentes são introduzidos no reator, a presença ou ausência de luz, e assim por diante. Mesmo que exista um modelo cinético para a reação em questão, dificilmente ele poderá levar em conta a influência de todos esses fatores, além de

outros mais que costumam aparecer quando se muda da escala de laboratório para a escala piloto. Numa fábrica em larga escala, então, que é normalmente o objetivo de longo prazo, a situação é ainda mais complexa. Surgem elementos imponderáveis, como o nível de impurezas da matéria-prima, a flutuação de fatores ambientais (umidade, por exemplo), a estabilidade do processo como um todo, e até mesmo o próprio envelhecimento do equipamento. Trata-se de uma situação muito complicada, para a qual é difícil ser otimista quanto à possibilidade de se descobrir um modelo mecanístico tão abrangente e eficaz como a mecânica newtoniana. Num caso destes, o pesquisador deve recorrer forçosamente a modelos empíricos, isto é, modelos que procuram apenas descrever com base na evidência experimental, o comportamento do processo estudado. Isto é totalmente diferente de tentar explicar a partir de umas poucas leis o que está se passando, que é o que procura fazer um modelo mecanístico. Mesmo conseguir descrever, dito assim sem nenhuma adjetivação, pode ser em muitos casos uma tarefa ambiciosa demais. Na modelagem empírica já nos damos por satisfeitos se somos capazes de descrever o processo estudado na região experimental investigada. Isto quer dizer que modelos empíricos são também modelos locais. Sua utilização para fazer previsões para situações desconhecidas corre por conta e risco do usuário.

Pode-se dizer que o curso de Planejamento Fatorial ensina as técnicas mais empregadas para o desenvolvimento de modelos empíricos.

## 2.2 Planejamento e Otimização de Experimentos

A essência de um bom planejamento consiste em projetar um experimento de forma que ele seja capaz de fornecer exatamente o tipo de informação que procuramos. Para isso é necessário saber, em primeiro lugar, o que é mesmo que se deseja procurar. Mais uma vez, parece óbvio, mas não é bem assim. Pode-se mesmo dizer que um bom experimentador é, antes de tudo, uma pessoa que sabe o que quer. Dependendo do que ele queira, algumas técnicas serão mais vantajosas, enquanto outras serão simplesmente inócuas. Se você quer tornar-se um bom planejador, portanto, comece perguntando a si mesmo: O que eu gostaria de ficar sabendo quando o experimento tiver terminado?

Como exemplo, pode-se imaginar um eixo que descreva o progresso de uma investigação experimental, desde uma situação de praticamente nenhuma informação até a construção de um (hipotético) modelo mecanístico global. Inicialmente, numa situação de pouca informação, sequer se sabe quais são as variáveis mais importantes para o sistema em estudo. Nosso conhecimento talvez se limite a uma pequena experiência prática ou a alguma informação bibliográfica. Nessas condições, a primeira coisa a fazer é realizar uma triagem e descartar as variáveis não significativas, para não perder mais tempo e dinheiro com elas no laboratório. O uso de planejamentos fatoriais fracionários é uma maneira de alcançar esse objetivo. Os planejamentos fracionários são extremamente econômicos e podem ser usados para estudar dezenas de fatores de uma só vez.

Tendo selecionado os fatores importantes, o próximo passo seria avaliar quantitativamente sua influência sobre a resposta de interesse, bem como as possíveis interações de uns fatores com os outros. Para fazer isso com o mínimo de experimentos, podem-se empregar planejamentos fatoriais completos. Ultrapassando esta etapa e desejando obter uma descrição mais detalhada, isto é, obter modelos mais sofisticados, pode-se empregar a modelagem por mínimos quadrados.

Às vezes o objetivo principal é otimizar um sistema, isto é, maximizar ou minimizar algum tipo de resposta. Pode ocorrer que ao mesmo tempo também seja necessário satisfazer determinados critérios. Por exemplo: produzir a máxima quantidade de um determinado produto, ao menor custo possível, e sem fugir das especificações. Nessa situação uma técnica conveniente é a metodologia de superfícies de resposta (RSM).

Construir modelos empíricos não basta. É necessário também avaliar se eles são realmente adequados ao sistema que se deseja descrever. Só então tem cabimento procurar extrair conclusões desses modelos. Um modelo mal ajustado faz parte da ficção científica, não da ciência.

Como dito anteriormente, é impossível fazer uma avaliação da qualidade do ajuste de um modelo sem recorrer a alguns conceitos básicos de estatística. Isto não significa, porém, que você tenha de se tornar um especialista em estatística para poder se valer das técnicas apresentadas neste curso. Algumas noções baseadas na famosa distribuição normal são suficientes, sendo muito importantes para a compreensão e a avaliação dos métodos de planejamento e análise que serão apresentados.

### 2.3 Vantagens do uso do Planejamento Fatorial

Algumas vantagens do uso da ferramenta de Planejamento Fatorial são citadas a seguir:

- ✓ Reduz o número de experiências ou repetições e melhora a qualidade da informação obtida através dos resultados. Isto significa uma sensível diminuição do trabalho e, conseqüentemente, do tempo e do custo final.
- ✓ Os fatores são analisados simultaneamente. Assim, pode-se verificar e quantificar efeitos sinérgicos e antagônicos entre os fatores de interesse.
- ✓ É possível otimizar mais de uma resposta ao mesmo tempo. Esta é uma das grandes vantagens do planejamento fatorial.
- ✓ Permite calcular e avaliar o erro experimental. Isto é fundamental para que possamos especificar o nível de confiança estatística com o qual poderemos estimar a reprodutibilidade do resultado desejado.
- ✓ Depende mais da competência do profissional em sua área de atuação que de seus conhecimentos em estatística. Em outras palavras, com uma base mínima necessária de estatística, um pesquisador consciente poderá desenvolver seus planejamentos com sucesso.

Um alerta sobre os sistemas estatísticos ‘amigáveis’ é lançado aqui. Através destes sistemas, os resultados são obtidos por simples toques no teclado. Excelentes, para profissionais conscientes, são verdadeiras ‘caixas pretas’ e chegam a ser catastróficos para aqueles mais afoitos.

Em diversas situações, é muito imediato estabelecer conclusões a partir de um experimento bem planejado, empregando apenas técnicas de análise bastante elementares. Por outro lado, mesmo a análise estatística mais sofisticada não pode salvar um experimento que tenha sido mal planejado (BOX *et al.*, 1978).

## 3 COMPARAÇÃO DO USO DAS METODOLOGIAS: ESTUDO DE UMA VARIÁVEL POR VEZ VERSUS PLANEJAMENTO FATORIAL

Para ilustrar esta comparação, é dado um exemplo básico de um experimento desenvolvido em laboratório:

Considere um caso em que deseja-se aumentar a pureza de um determinado produto obtido a partir de um equipamento, no qual é possível controlar a temperatura e pressão de operação. Assim, opta-se por seguir o procedimento mais comumente utilizado para resolver este tipo de problema, chamado de análise univariável.

Primeiramente, com base em algumas experiências prévias, a temperatura é fixada em 65°C e alguns experimentos são feitos em diferentes valores de pressão. Como mostrado na Figura 1, pode-se notar que a maior pureza obtida neste conjunto de experimentos ocorre quando a pressão é de aproximadamente 14,3 atm.

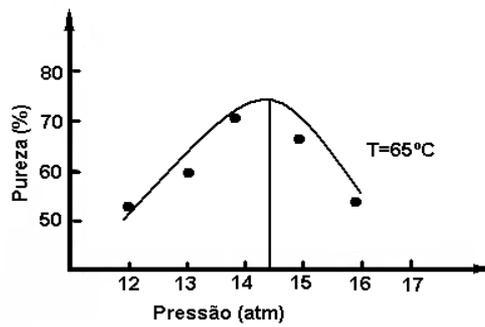


Figura 1 – Experimentos univariáveis em diferentes valores de pressão de operação.

Fixando-se agora a pressão em 14,3 atm e variando-se a temperatura, pode-se observar a variação da pureza, como mostrado na Figura 2.

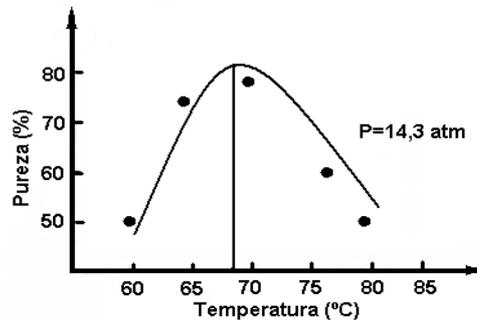


Figura 2 – Experimentos univariáveis em diferentes valores de temperatura de operação.

Desta forma, será que pode-se afirmar que as condições ótimas de operação do equipamento, que nos dá uma pureza do produto um pouco maior que 80%, foram encontradas?

Ao observar a Figura 3, pode-se perceber que as condições ótimas de operação ainda não foram encontradas.

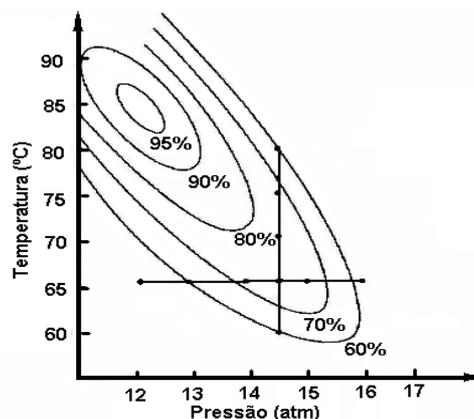


Figura 3 – Comparação entre experimentos fatoriais e a análise univariável.

Além disso, vê-se que através deste tipo de metodologia, além de não se atingir a região ótima de operação, com 10 experimentos, não obtém-se nenhum tipo de informação que indique o caminho mais adequado para a realização de novos experimentos, visando alcançar a região do ótimo. Caso a opção escolhida fosse a realização de experimentos fatoriais, seria possível obter as curvas de nível mostradas na Figura 3 com um número de 11 experimentos, como será visto mais adiante.

Assim, com este exemplo didático, pode-se observar que com um número praticamente igual de experimentos, existe uma enorme diferença entre as duas metodologias, em termos de informações sobre o sistema estudado.

Supondo um novo exemplo, no qual deseja-se avaliar a influência de algumas variáveis como temperatura, quantidade de catalisador e concentração de um determinado reagente sobre o rendimento de uma reação química. Assim, deseja-se descobrir como a resposta depende dos fatores, ou ainda, como os fatores atuam sobre o nosso sistema, produzindo uma determinada resposta. Percebe-se, dessa forma, que nosso sistema funciona como uma função desconhecida que liga os fatores (variáveis de entrada) às respostas (variáveis de saída). A Figura 4 mostra esquematicamente o nosso problema:

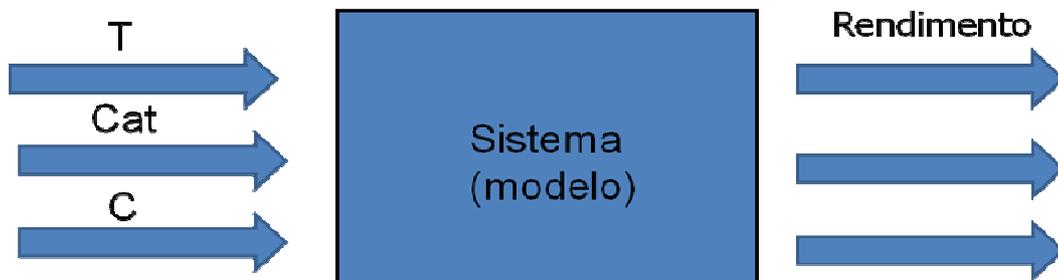


Figura 4 – Representação do problema.

Neste contexto, com um número reduzido de experimentos, as técnicas discutidas neste curso possibilitarão descobrir essa função – modelo empírico – (ou uma aproximação dela), o que poderá fornecer informações preciosas sobre a natureza do sistema em estudo, e assim, será possível escolher, em cada caso, as melhores condições de operação para a maximização do rendimento da reação.

A escolha dos níveis dos fatores é de extrema importância, uma vez que uma má escolha destes níveis iniciais pode acarretar em um número maior de experimentos necessários para otimizar nosso sistema. Quando possível, esta escolha deve ser feita com base ou em ensaios exploratórios ou em conhecimentos prévios do sistema.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ferramenta de planejamento fatorial pode ser utilizada para diversos fins nas áreas de engenharia, levando à busca de soluções para determinados problemas através da realização de um planejamento experimental, que dará como resultado as possíveis condições ótimas de um produto/processo. Aplicando as técnicas estatísticas apropriadas, é possível resolver problemas experimentais de forma mais eficiente. No entanto, é necessário saber utilizar bem as técnicas, não só na análise dos resultados experimentais, mas principalmente no próprio planejamento dos experimentos, antes de fazer qualquer medição.

**Agradecimentos**

Aos professores Roy Edward Bruns e Maria Isabel Rodrigues, pelos ensinamentos transmitidos relacionados à utilização da ferramenta de Planejamento Fatorial.

**5 REFERÊNCIAS / CITAÇÕES**

BARROS NETO, Benício; SCARMINIO, Ieda Spacino; BRUNS, Roy Edward. **Como Fazer experimentos**. 2. ed. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2003. 401 p.

BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G. e HUNTER, J. S. **Statistics for experimenters: an introduction to design, data analysis and model building**. New York, Wiley, 1978.

RODRIGUES, Maria Isabel; IEMMA, Antonio Francisco. **Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos**. 2. ed. Campinas, SP: Editora Casa do Pão, 2007. 325 p.

**THE IMPORTANCE OF THE FACTORIAL DESIGN TOOL FOR ENGINEERING STUDENTS**

***Abstract:** Many disciplines of engineering courses are evolving with advances in technology, thus, it's necessary an adaptation, as well as, a predisposition of engineering professors to pick up a continuous recycling. Products and processes optimization and decreasing costs and time, are very important to increase efficiency, productivity and quality of products, among other objectives. Nowadays, professionals from different areas are using design experimental tools and this paper aims to show the importance of this tool for engineering courses.*

***Key-words:** Experimental design, Processes Optimization, Engineering.*