

1 Introdução

Na indústria moderna há uma contínua busca da otimização dos níveis de produção e da melhoria da qualidade dos produtos, sendo também primordiais as ações de redução de desperdícios e de tempo de desenvolvimento de um produto.

Dentre as técnicas disponíveis para a melhoria da produtividade e da qualidade, o Projeto de Experimentos ou *Design of Experiments (DOE)* é potencialmente útil nos estágios de desenvolvimento de novos produtos e para melhoria de produtos e processos existentes. Essa metodologia de trabalho é fortemente apoiada em conceitos estatísticos, a qual é destinada a otimizar o planejamento, a execução e a análise de um experimento.

Esses conceitos estatísticos são úteis na identificação de fatores de produção, denominados de variáveis independentes, que influenciam alguma característica de qualidade de um processo ou um produto, a qual é chamada de variável de resposta.

Modelos matemáticos são utilizados para medir a influência das variáveis independentes sobre a variável de resposta, definindo-se uma relação entre elas. Com esses modelos, pode-se estabelecer a combinação ótima dos níveis das variáveis independentes, tendo em vista a obtenção de um valor desejado da resposta, podendo corresponder a um valor máximo, um valor mínimo ou um valor “alvo”. Para construir esses modelos são realizados experimentos, com os quais são observadas as respostas em função dos níveis pré-estabelecidos das variáveis independentes.

Um tipo particular de experimentos é o que envolve mistura de vários componentes. Em tais experimentos, a soma das proporções dos componentes é igual a 1. O Exemplo 2 (Seção 3.1) consiste o estudo de um misto químico utilizado para retardar a ignição de um motor foguete. Inicialmente, o experimento foi realizado em laboratório, o qual está detalhado em Dal Bello (2005) e a síntese está em Vieira & Dal Bello (2006) e Dal Bello & Vieira (2010).

Seguindo uma evolução natural do desenvolvimento do misto químico, foram implementadas algumas melhorias no processo de produção, visando torná-lo cada vez mais reprodutível. O misto químico em estudo, atualmente em fase de produção industrial, é composto pela mistura de três componentes e no processo produtivo são consideradas duas variáveis de processo, conforme o Exemplo 3 (Seção 4.4). Esta etapa do desenvolvimento está descrita em Dal Bello & Vieira (a ser publicado).

O objetivo do estudo é investigar as proporções dos componentes da mistura e os níveis das variáveis de processo que colocam o valor esperado do tempo de retardo (resposta) o mais próximo possível do valor “alvo” e, ao mesmo tempo, minimizam o tamanho do intervalo de previsão de uma futura resposta. Foi ajustado um modelo de regressão linear com respostas normais. Com o modelo desenvolvido foram determinadas as proporções ótimas dos componentes da mistura e os níveis ótimos das variáveis de processo. Para a seleção do modelo foi utilizada uma metodologia de duas etapas. Na primeira etapa foi utilizado o método *backward* para a seleção de um modelo base. Na segunda etapa foi utilizado um critério de informação para a seleção do modelo proposto. Esta metodologia de seleção de modelos em Experimentos Mistura-Processo provou ser eficiente no caso estudado.

Esta tese consiste, portanto, na reunião das técnicas estatísticas necessárias ao planejamento e análise de experimentos com mistura com ou sem variáveis de processo, bem como na apresentação da evolução da pesquisa de seleção de modelos com relevantes conclusões parciais e, principalmente, na apresentação e detalhamento da metodologia de seleção de modelos em Experimentos Mistura-Processo, que utiliza a combinação de um método de seleção de modelo passo-a-passo e de um critério baseado na Teoria da Informação.

1.1. Justificativa do Trabalho

No desenvolvimento de um produto, geralmente, os parâmetros são definidos com base em experiências passadas ou vão sendo determinados e aprimorados à medida que novos lotes são produzidos. Outras vezes, são consideradas percepções intuitivas. Entretanto, essa estratégia pode continuar por

muito tempo sem que haja garantia de sucesso ou se houver algum resultado satisfatório, não será possível saber se há uma outra solução melhor.

Nesse contexto, as metodologias adotadas em Projeto de Experimentos se apresentam como uma ferramenta eficiente na otimização de produtos e processos, proporcionando a redução do tempo de desenvolvimento e um maior detalhamento das informações, visando a otimização e minimização da variabilidade dos resultados.

Mais especificamente, a metodologia de seleção de modelos em Experimentos Mistura-Processo justifica o trabalho na medida em que ela visa contornar o problema de multicolinearidade, que é bastante comum em Experimentos com Mistura. A multicolinearidade pode tornar instáveis e bastante inflados os estimadores dos coeficientes do modelo. Com isso, certos termos do modelo podem não ser significativos na presença de alguns termos e ser significativos na presença de outros termos. Neste contexto, a seleção tradicional passo-a-passo pode ocasionar seleção arbitrária de variáveis que pertencem ao modelo.

1.2. Objetivos do Trabalho

1.2.1. Objetivo Principal

O objetivo principal deste trabalho é apresentar e detalhar uma metodologia de seleção de modelos em Experimentos Mistura-Processo, que utiliza a combinação de um método de seleção de modelo passo-a-passo e de um critério baseado na Teoria da Informação.

1.2.2. Objetivos Intermediários

Os objetivos intermediários consistem na realização de uma síntese das técnicas estatísticas necessárias ao planejamento e análise de experimentos

envolvendo misturas com ou sem a inclusão de variáveis de processo. Tais conceitos serão úteis no planejamento e na análise do experimento do misto de retardo, que foi utilizado na pesquisa de seleção de modelos em Experimentos Mistura-Processo.

Ademais, a pesquisa de métodos de seleção de modelos em Experimentos Mistura-Processo baseados na Teoria da Informação serve de subsídio para a elaboração da metodologia proposta.

1.3. Contribuição Original da Pesquisa

Propor uma metodologia de seleção de modelos em Experimentos com Mistura com ou sem a inclusão de variáveis de processo, que utiliza a combinação de um método de seleção de modelo passo-a-passo e de um critério baseado na Teoria da Informação.

1.4. Estrutura do Trabalho

Esta tese está estruturada em sete capítulos com os conteúdos apresentados na seqüência.

No Capítulo 2 são apresentados tópicos para planejamento e análise de Experimentos com Mistura com uma aplicação real. Na Seção 2.1 são apresentados os modelos de Scheffé para Experimentos com Mistura. Na Seção 2.2 são introduzidos os modelos para Experimentos com Mistura com variável de folga. Na Seção 2.3 é apresentada uma síntese da teoria relacionada com a utilização de Pseudocomponentes. Na Seção 2.4 é introduzido o experimento gerado computacionalmente, sendo apresentada uma abordagem teórica sobre os critérios de otimização. Nesta seção é apresentado o critério D-otimização e a sugestão de Myers & Montgomery (2002) para a escolha dos pontos candidatos a pontos experimentais diante de um espaço fatorial restrito. Na Seção 2.5 é descrito o experimento de um misto químico, o qual é um Experimento com Mistura com restrições superiores e inferiores nas proporções de todos os três componentes.

No Capítulo 3 é descrito um Experimento com Mistura com respostas não-normais.

No Capítulo 4 são apresentados tópicos para planejamento e análise de Experimentos Mistura-Processo com uma aplicação real. Na Seção 4.1 é introduzido um modelo adequado para variáveis de processo. Na Seção 4.2 são descritos os diversos tipos de modelos para Experimentos Mistura-Processo. Nesta seção são apresentados os modelos provenientes de combinações aditivas, multiplicativas. Na Seção 4.3 consta a teoria relacionada com a geração de um Experimento Mistura-Processo D-ótimo. Na Seção 4.4 é descrito um experimento de um misto químico do mecanismo de retardo para ignição de um motor foguete. O misto químico consiste de uma mistura de três componentes. Além das proporções dos componentes da mistura, são consideradas duas variáveis de processo. O objetivo do estudo é investigar as proporções dos componentes da mistura e os níveis das variáveis de processo que colocam o valor esperado do tempo de retardo (resposta) o mais próximo possível do valor alvo e, ao mesmo tempo, minimizam o tamanho do intervalo de previsão de uma futura resposta.

No Capítulo 5 são introduzidos alguns métodos de seleção de modelos baseados na teoria da informação. A utilização de tais métodos constitui uma evolução da pesquisa relacionada com seleção de modelos. Foram utilizados os dados do Experimento Mistura-Processo do misto de retardo para a obtenção de conclusões a respeito de cada método de seleção de modelo analisado. Na Seção 5.1 é apresentado o critério de Akaike (AIC), o critério corrigido de Akaike (AIC_c), o critério AIC_u e o critério introduzido por Hannan & Quinn (1979), HQ_c . Na Seção 5.2 são apresentados alguns comentários a respeito de eficiência e consistência de critérios de seleção de modelos. Na Seção 5.3 são mostradas as aplicações dos critérios de informação em seleção de modelos, considerando os dados do Experimento Mistura-Processo do misto químico. Na Seção 5.4 é apresentado o critério de indiferença de AIC com aplicação no experimento do misto químico.

No Capítulo 6 é apresentada uma metodologia de seleção de modelos em Experimentos Mistura Processo. Esta metodologia possui duas etapas e está descrita em Dal Bello & Vieira (a ser publicado). Na Seção 6.1 é descrita a primeira etapa e na Seção 6.2 é descrita a segunda etapa da metodologia. Na

Seção 6.3 é apresentada a otimização da resposta. Na Seção 6.4 é apresentada uma oportunidade de melhoria da metodologia proposta.

No Capítulo 7 constam a síntese, as conclusões e as sugestões de possíveis desdobramentos futuros deste trabalho.

Softwares Utilizados

1. Design-Expert

Software comercial desenvolvido e distribuído pela empresa Stat-Ease, o qual ajusta um modelo de regressão e oferece gráficos tridimensionais para a visualização da superfície de resposta e também gráficos de contorno interativos, além de um módulo de otimização da resposta capaz de buscar o ótimo diante de inúmeras respostas.

2. Arc

Software gratuito que acompanha o livro de Cook & Weisberg (1999), podendo também ser obtido no *site* do Departamento de Estatística da Universidade de Minnesota, EUA. É excelente para a construção de gráficos para diagnóstico dos modelos.

3. S-Plus

Software comercial de uso geral, distribuído pela empresa Insightful. Dentre os softwares utilizados nesse trabalho é o único que oferece a opção de Quase-Verossimilhança.

4. Matlab

O Matlab é um ambiente de computação numérica e uma linguagem de programação de quarta geração. Desenvolvido pela empresa MathWorks, o Matlab permite manipulações de matrizes, construção de gráficos de funções e de dados, implementação de algoritmos, a criação de interfaces de usuário e interface com programas escritos em outras linguagens.