

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**MARIANA SIMIÃO BRASIL DE OLIVEIRA**

**PROCEDIMENTO GUIA PARA O PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL SOB A  
PERSPECTIVA DOS PRINCÍPIOS BÁSICOS DE EXPERIMENTAÇÃO**

**NATAL**

**2021**

**MARIANA SIMIÃO BRASIL DE OLIVEIRA**

**PROCEDIMENTO GUIA PARA O PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL SOB A  
PERSPECTIVA DOS PRINCÍPIOS BÁSICOS DE EXPERIMENTAÇÃO**

Projeto de dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

**Orientadora:** Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Carla Almeida Vivacqua

**NATAL**

**2021**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**MARIANA SIMIÃO BRASIL DE OLIVEIRA**

**PROCEDIMENTO GUIA PARA O PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL SOB A**  
**PERSPECTIVA DOS PRINCÍPIOS BÁSICOS DE EXPERIMENTAÇÃO**

**DEZEMBRO/2021**

Assinatura da autora: \_\_\_\_\_

**APROVADO POR:**

\_\_\_\_\_  
Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Carla Almeida Vivacqua – Orientadora/Presidente

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Mário Orestes Aguirre Gonzalés – Examinador Interno ao Programa

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. André Luis Calado Araújo – Examinador Externo ao Programa

**Reitor da Universidade Federal do Rio Grande do Norte**

Profº Dr. José Daniel Diniz Melo

**Diretor do Centro de Tecnologia**

Prof. Dr. Luiz Alessandro Pinheiro Câmara de Queiroz

**Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção**

Profª. Drª. Mariana Rodrigues de Almeida

**Orientação**

Profª. Drª. Carla Almeida Vivacqua

*Ao meu inesquecível e amado avô paterno,  
Raimundo Odimar, a pessoa mais amorosa  
que já conheci, a quem amo  
incondicionalmente e quem me ensinou que  
verdadeira a felicidade reside nas coisas  
mais simples da vida.*

OLIVEIRA, Mariana Simião Brasil de. **Desenvolvimento de um procedimento guia para o Planejamento Experimental sob a perspectiva dos Princípios Básicos de Experimentação**. Fls. 58. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PEP). Universidade Federal Rural do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal/RN, 2021.

## RESUMO

Considerando os elevados níveis de competitividade enfrentados pelas organizações, a área de planejamento e análises de experimentos ganha notório destaque, pois consiste em uma técnica estatística fundamental com diversas contribuições, como, por exemplo, no processo de desenvolvimento de novos produtos, no aumento de eficiência de processos, na redução da variabilidade e dos custos envolvidos, além de considerável ganho em tempo de análise dos dados. Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver um procedimento para guiar o planejamento e a análise de um experimento. Para isso, foram utilizados os principais conceitos acerca dessa área de estudo assim como o entendimento dos princípios básicos de experimentação (aleatorização, replicação e blocagem). O presente estudo busca contribuir para a literatura de três formas. Primeiro, com o desenvolvimento do guia para estudos na área de planejamento experimental para auxiliar pesquisadores que tenham ou não experiência com a experimentação. Segundo, esse estudo busca difundir a importância de experimentos planejados para diferentes áreas de estudo, tendo em vista que o planejamento experimental auxilia na redução de custos, na otimização de tempo e de recursos. E terceiro, com uma revisão sistemática da literatura a fim de verificar os estudos que utilizaram o planejamento experimental e que buscaram, mesmo de forma inicial, desenvolver diretrizes e recomendações aos pesquisadores que forem fazer uso dessa ferramenta.

**Palavras-chave:** *DoE*; experimentação; guia para planejamentos experimentais.

OLIVEIRA, Mariana Simião Brasil de. **Desenvolvimento de um procedimento guia para o Planejamento Experimental sob a perspectiva dos Princípios Básicos de Experimentação**. Fls. 58. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PEP). Universidade Federal Rural do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal/RN, 2021.

### **ABSTRACT**

Considering the high levels of competitiveness faced by organizations, the area of planning and analysis of experiments gain notable prominence, as it consists of a fundamental statistical technique with several contributions, such as, for example, in the process of developing new products, in increasing process efficiency, in reducing the variability and costs involved, in addition to considerable gains in data analysis time. This work aims to develop a procedure to guide the planning and analysis of an experiment. For this, the main concepts about this area of study were used, as well as the understanding of the basic principles of experimentation (randomization, replication and blocking). This study seeks to contribute to the literature in three ways. First, with the development of a guide for studies in the area of experimental planning to help researchers who have or do not have experience with experimentation. Second, this study seeks to disseminate the importance of planned experiments for different areas of study, considering that experimental planning helps in reducing costs, optimizing time and resources. And third, with a systematic review of the literature in order to verify the studies that used experimental planning and that sought, even initially, to develop guidelines and recommendations for researchers who will make use of this tool.

**Keywords:** DoE; experimentation; guide to experimental planning.

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 – Definições dos principais termos relacionados à experimentação.....	12
Figura 2 – Guia para o Planejamento Experimental.....	54

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Definições dos principais termos relacionados à experimentação .....	20
Tabela 2 - Diretrizes para o planejamento e análises de experimentos .....	28
Tabela 3 - Diretrizes para o planejamento experimental .....	31
Tabela 4 - Utilização de fatores de dois níveis para formular fator de três níveis .....	36
Tabela 5 - Utilização de fatores de dois níveis para formular fator de quatro níveis .....	37
Tabela 6 – Detalhamento dos métodos do trabalho .....	44
Tabela 7 – Artigos selecionados para a sistematização .....	46
Tabela 8 - Locais de publicação dos artigos selecionados .....	48
Tabela 9 - Tipos de planos experimentais empregados pelos artigos selecionados .....	49
Tabela 10- Principais considerações acerca da seleção do plano experimental .....	51

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>6</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>8</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>9</b>
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1 Contextualização e Problemática .....	12
1.2 Justificativa e Relevância .....	15
1.3 Objetivos da pesquisa .....	16
1.3.1 Objetivo Geral .....	16
1.3.2 Objetivos Específicos .....	16
1.4 Estrutura de apresentação do trabalho .....	17
<b>CAPÍTULO 2 – PLANEJAMENTO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS (DoE).....</b>	<b>18</b>
2.1 Breve histórico .....	18
2.2 Definições.....	20
2.3 Classificação de fatores .....	21
2.4 Princípios Básicos de Experimentação.....	23
2.4.1 Aleatorização.....	23
2.4.2 Replicação .....	24
2.4.3 Blocagem.....	24
2.5 Diretrizes para o Planejamento Experimental.....	25
2.6 Tipos de Planejamentos Experimentais.....	29
2.6.1 Experimentos com um Único Fator.....	29
2.6.2 Planejamento Fatorial <b>2k</b> .....	30
2.6.3 Planejamento Fatorial Fracionado <b>2k</b> .....	32
2.6.4 Planejamento Fatorial <b>3k</b> .....	33
2.6.5 Planejamento Fatorial Fracionado <b>3k</b> .....	34
2.6.6 Planejamento Fatorial com Níveis Mistos ou Assimétricos.....	35
2.6.7 Experimentos com Fatores Aleatórios .....	37
2.6.8 Planejamento com Restrição na Aleatorização (Parcelas Subdivididas, Faixas e Variantes) .....	38
2.6.9 Planejamento Hierárquico ( <i>Nested</i> ).....	42

<b>CAPÍTULO 3 – MÉTODO DE PESQUISA .....</b>	<b>44</b>
3.1 Desenvolvimento do procedimento guia para o planejamento experimentAL .....	44
3.2 REVISÃO DE LITERATURA .....	45
<b>CAPÍTULO 4 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>48</b>
4.1 Análise sistemática de TRABALHOS RELATIVOS A GUIAS PARA O PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	48
4.2 PROCEDIMENTO GUIA PARA O PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	51
<b>CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>55</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>57</b>

## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

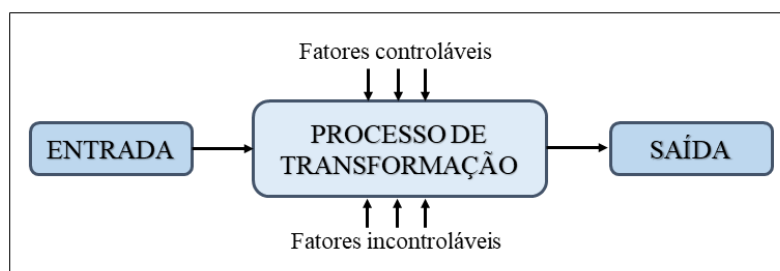
O presente capítulo contextualiza os temas abordados no trabalho e contém os critérios que sustentam e embasam o estudo, como o problema, a justificativa, a relevância e contribuições do trabalho, os objetivos da pesquisa, assim como a estrutura em que o estudo foi desenvolvido.

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E PROBLEMÁTICA

Considerando o mercado cada vez mais competitivo, empresas de todos os segmentos da indústria têm trabalhado para melhorar a eficiência de seus processos na busca de aproveitar oportunidades emergentes. Além disso, essas pressões globais por uma maior competitividade têm feito com que as empresas encontrem maneiras de conhecer melhor as necessidades dos seus clientes, reduzir os custos e, ao mesmo tempo, aumentar a produtividade. Qualquer variabilidade no desempenho dos processos afeta diretamente a lucratividade das empresas. Portanto, com a crescente complexidade dos processos de fabricação, a redução do nível de variabilidade é o principal foco para a produção sem falhas (JONES; NACHTSHEIM, 2009).

As novas demandas do mercado impulsionam as organizações a usarem abordagens e técnicas eficientes. Assim, destaca-se o planejamento experimental (*DoE*) como uma das ferramentas mais utilizadas para desenvolver e otimizar a eficiência de processos e qualidade de produtos em diversos setores de atividade como, por exemplo, nas indústrias aeronáutica, farmacêutica, automotiva, química e biomédica (COSTA, 2019a).

Pesquisadores realizam experimentos em praticamente todos os campos de pesquisa, geralmente para descobrir algo sobre um determinado processo ou sistema. É possível definir o planejamento e análise de experimentos como a busca por determinar e analisar, por meio de testes, as mudanças que ocorrem nas variáveis de saída ou nas respostas de um processo (*outputs*), quando mudanças deliberadas são produzidas nas variáveis de entrada do processo (*inputs*). O processo ou sistema de transformação é representado por combinações diferentes de máquinas, métodos, pessoas e diversos outros recursos que transformam insumos em produtos acabados, com características ou parâmetros específicos, conforme a Figura 1 (MONTGOMERY, 2013).



Fonte: Montgomery (2013).

Para Montgomery (2013) a experimentação desempenha um papel importante na comercialização de tecnologia e nas atividades de realização de produtos, que consiste no design e formulação de novos produtos, desenvolvimento de processos de fabricação e aprimoramento de processos. Em muitos casos, o objetivo é desenvolver um processo robusto, isto é, um processo afetado minimamente por fontes externas de variabilidade. Existem muitas aplicações de planejamento de experimentos na indústria não transformadora ou não desenvolvidora de produtos, assim como em engenharias, marketing, serviços e operações de negócios gerais.

Conforme Costa; Pires; Ribeiro (2006) em um plano experimental devem ser considerados com igual atenção os detalhes estatísticos e não estatísticos, ambos fatores críticos para o sucesso do estudo. Além disso, consideram-se três fases em um plano experimental, quais sejam planejamento, condução e análise, que devem ser desenvolvidas para buscar eficiência do estudo experimental. Em primeiro lugar, a falta de planejamento pode levar a falhas no experimento; por isso, a gestão de aspectos organizacionais como responsabilidade das pessoas envolvidas, abordagens empregadas e identificação de oportunidades e aspectos técnicos, como definição de objetivos, identificação das variáveis e seleção do plano experimental essencial são pontos fundamentais para a fase de planejamento.

A segunda fase consiste na condução e consiste na realização do experimento e inclui coleta de dados e monitoramento de experimentos. Especialmente em ambientes industriais, a validade das conclusões depende essencialmente dos resultados obtidos. Assim, é importante assegurar continuamente que os recursos materiais e humanos sejam adequadamente alocados e que os experimentos sejam desenvolvidos de acordo com o planejamento. Quaisquer desvios de experimentos e ocorrências incomuns devem ser registrados e analisados.

A terceira fase é de análise do experimento. Wu; Hamada (2009) explicam que existem dois aspectos presentes em qualquer problema experimental: o planejamento do

experimento e a análise estatística dos dados. Esses dois aspectos estão intimamente relacionados, pois o método de análise depende diretamente do tipo de planejamento empregado. As técnicas de planejamento e análise de experimentos são empregadas na melhoria de características de qualidade de produtos ou de processos de produção, na redução do número de testes e na otimização do uso de recursos (MONTGOMERY, 2013).

A análise depende diretamente da adequada execução das fases anteriores e exige habilidade e técnica para aplicar e interpretar os resultados, pois deve identificar os fatores que influenciam o valor médio e a variabilidade da variável resposta (COSTA; PIRES; RIBEIRO, 2006). Com a utilização do planejamento experimental, desenvolve-se o delineamento experimental, objetivando definir como os dados, e em que quantidades e condições, devem ser coletados. Conforme Costa; Pires; Ribeiro (2006) em um plano experimental devem ser considerados com igual atenção os detalhes estatísticos e não estatísticos, ambos fatores críticos para o sucesso do estudo. Além disso, consideram-se três fases em um plano experimental, quais sejam planejamento, condução e análise, que devem ser desenvolvidas para buscar eficiência do estudo experimental. Em primeiro lugar, a falta de planejamento pode levar a falhas no experimento; por isso, a gestão de aspectos organizacionais como responsabilidade das pessoas envolvidas, abordagens empregadas e identificação de oportunidades e aspectos técnicos, como definição de objetivos, identificação das variáveis e seleção do plano experimental essencial são pontos fundamentais para a fase de planejamento.

A segunda fase consiste na condução e consiste na realização do experimento e inclui coleta de dados e monitoramento de experimentos. Especialmente em ambientes industriais, a validade das conclusões depende essencialmente dos resultados obtidos. Assim, é importante assegurar continuamente que os recursos materiais e humanos sejam adequadamente alocados e que os experimentos sejam desenvolvidos de acordo com o planejamento. Quaisquer desvios de experimentos e ocorrências incomuns devem ser registrados e analisados.

A terceira fase é de análise do experimento. Wu; Hamada (2009) explicam que existem dois aspectos presentes em qualquer problema experimental: o planejamento do experimento e a análise estatística dos dados. Esses dois aspectos estão intimamente relacionados, pois o método de análise depende diretamente do tipo de planejamento empregado. As técnicas de planejamento e análise de experimentos são empregadas na melhoria de características de qualidade de produtos ou de processos de produção, na redução do número de testes e na otimização do uso de recursos (MONTGOMERY, 2013).

A análise depende diretamente da adequada execução das fases anteriores e exige habilidade e técnica para aplicar e interpretar os resultados, pois deve identificar os fatores que influenciam o valor médio e a variabilidade da variável resposta (COSTA; PIRES; RIBEIRO, 2006)er coletados durante um determinado experimento, buscando a maior precisão estatística possível na resposta e o menor custo. O plano experimental pode representar desde uma mudança relativamente pequena, pode envolver um conjunto complexo de mudanças ou pode ser parte de um processo de decisão de alto risco (MOEN; NOLAN; PROVOST, 1999).

Portanto, é possível verificar que o planejamento de experimentos consiste em uma forma para o alcance de diferenciais competitivos como, por exemplo, inovação, flexibilidade e rapidez, além de possibilitar o atendimento às necessidades dos consumidores. Mediante o exposto, o presente estudo busca responder ao seguinte problema de pesquisa: **Como utilizar a experimentação para planejar e analisar experimentos de forma eficiente?**

## 1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

O planejamento experimental é uma ferramenta essencial no desenvolvimento de novos processos e no aprimoramento de processos em utilização. Um planejamento adequado permite, além do aprimoramento de processos, a redução da variabilidade de resultados, a redução de tempos de análise e dos custos envolvidos. No que se refere ao projeto de produtos, o planejamento experimental permite a avaliação e comparação de configurações (projetos) distintas, avaliação do uso de materiais diversos, a escolha de parâmetros de projeto adequados a uma ampla faixa de utilização do produto e à otimização de seu desempenho.

Um estudo realizado por Silva et al., (2012) revelou que, nas empresas brasileiras, o planejamento experimental é um tema ainda pouco difundido e praticado e que, apesar dos avanços metodológicos para aumento de desempenho operacional e administrativo em gestão e na qualidade, existem inúmeras deficiências técnicas relacionadas a processos de desenvolvimento de produtos e a processos de fabricação. As causas dessas deficiências referem-se à falta de conhecimento de técnicas estatísticas por parte de gestores e engenheiros das empresas no momento da utilização de ferramentas estatísticas e da qualidade.

Quando as informações dos experimentos são analisadas estatisticamente, é possível garantir que o produto será projetado com robustez considerando a variabilidade que decorre do próprio processo de produção e do ambiente do pesquisador. Além disso, a análise estatística é importante porque uma diferença mínima entre as especificações técnicas de um produto ou nos níveis de ajustagem dos fatores de controle de um processo de fabricação pode significar um maior número de defeitos e, conseqüentemente, na existência de perdas econômicas (KUEHL, 2000).

Dessa forma, a presente pesquisa se justifica por conta da grande importância do tema e busca contribuir para a literatura de três formas. Primeiro, com o desenvolvimento do guia para estudos na área de planejamento experimental para auxiliar pesquisadores que tenham ou não experiência com a experimentação. Segundo, esse estudo busca difundir a importância de experimentos planejados para diferentes áreas de estudo, tendo em vista que o planejamento experimental auxilia na redução de custos, na otimização de tempo e de recursos. E terceiro, com uma revisão sistemática da literatura a fim de verificar os estudos que utilizaram o planejamento experimental e que buscaram, mesmo de forma inicial, desenvolver diretrizes e recomendações aos pesquisadores que forem fazer uso dessa ferramenta.

### 1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

#### 1.3.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral desenvolver um procedimento para guiar o planejamento e a análise de um experimento.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver a revisão de literatura na área de planejamento experimental e a sistematização dos trabalhos.
- Ilustrar como o planejamento experimental pode fornecer informações relevantes para a tomada de decisão.
- Detalhar o funcionamento do guia para o planejamento experimental.

#### 1.4 ESTRUTURA DE APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

A presente pesquisa está estruturada em seis capítulos, o primeiro capítulo consiste em uma introdução já apresentada, a qual é composta por uma contextualização do setor, o problema de pesquisa, a justificativa, a relevância e contribuições do trabalho e, por fim, os objetivos do trabalho que respondem ao problema.

O Capítulo 2 contém a base teórica a respeito do Planejamento e Análise de Experimentos, incluindo um breve histórico da ferramenta, as principais definições, os princípios básicos de experimentação, as diretrizes para o planejamento experimental e os tipos de planos experimentais.

O Capítulo 3 é composto pelo método de pesquisa utilizado no trabalho para alcançar os objetivos expostos e pela revisão da literatura.

O Capítulo 4 apresenta os resultados encontrados ao longo da presente pesquisa e a sistematização de artigos que desenvolveram as primeiras recomendações e diretrizes com a finalidade de guiar os usuários da área da experimentação.

O Capítulo 5 contém as considerações finais do presente estudo.

## **CAPÍTULO 2 – PLANEJAMENTO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS (DoE)**

O presente capítulo apresenta o Planejamento e Análise de Experimentos a partir de certos aspectos imprescindíveis para a familiarização com a técnica. Nesta seção, os seguintes tópicos são abordados: um breve histórico e conceituação de planejamento e análise de experimentos, definições relacionadas à técnica, princípios básicos, etapas para conduzir a realização dos experimentos e tipos de planejamentos experimentais existentes. Por fim, desenvolveu-se a sistematização de trabalhos quanto ao emprego do Planejamento e Análise de Experimentos na área de Engenharia Ambiental.

### **2.1 BREVE HISTÓRICO**

A história da ferramenta de Planejamento e Análise de Experimentos (do inglês, *design of experiments, DoE*) pode ser descrita por meio de quatro fases. A primeira fase remonta aos anos 1920 e início de 1930, com os estudos de Ronald A. Fisher. Fisher atuava na Estação Experimental Agrícola de Rothamsted, na Inglaterra, e era responsável por análises estatísticas de dados. Reconhecendo que a geração de dados em experimentos possuía falhas que dificultavam a análise desses dados nos sistemas agrícolas, desenvolveu os *insights* que levaram ao surgimento dos três princípios básicos do planejamento de experimentos: aleatorização, replicação e blocagem. Além disso, introduziu o pensamento estatístico e os princípios nas investigações experimentais, incluindo o conceito de experimento fatorial e a análise de variância (MONTGOMERY, 2013).

A segunda fase tem início por volta de 1930, com as aplicações envolvendo experimentos na indústria, a partir do desenvolvimento da metodologia de superfície de resposta (MSR), proposta por Box; Wilson (1951). Os autores exploraram o fato de que muitos experimentos industriais são fundamentalmente diferentes dos agrícolas de duas formas: primeiro, a variável de resposta pode ser observada imediatamente (imediatismo), e segundo, o experimentador pode rapidamente coletar informações importantes de uma pequena amostra para usar no planejamento do próximo experimento (sequencialidade).

Ainda durante essa fase, Kiefer; Wolfowitz (1959) iniciaram trabalhos em planos experimentais ótimos, nos quais propuseram uma abordagem formal para selecionar um design baseado em específicos critérios ótimos. Tal abordagem não obteve muitas

aplicações por conta da ausência de ferramentas computacionais na época. No entanto, grandes avanços nesse campo de aplicação ocorreram nas últimas décadas.

A terceira fase está relacionada ao crescimento do interesse da indústria ocidental na melhoria da qualidade no final dos anos 70. Tem grande destaque na expansão do uso do planejamento experimental os estudos de Genichi Taguchi, denominados planejamento de parâmetro robusto e que visam: tornar o processo insensível a fatores ambientais ou outros fatores que são difíceis de controlar; tornar os produtos insensíveis à variação transmitida dos componentes; e encontrar níveis das variáveis do processo que forcem a média a um valor desejado enquanto reduz simultaneamente a variabilidade em torno desse valor (MONTGOMERY, 2013).

Os métodos de Taguchi envolviam projetos fatoriais altamente fracionados, além de matrizes ortogonais, juntamente com alguns novos métodos estatísticos para resolver esses problemas. O resultado dessa metodologia gerou discussão e controvérsias, e parte dessa controvérsia se deu porque foi defendida inicialmente no Ocidente, principalmente por empreendedores, e a ciência estatística subjacente não foi adequadamente revisada por pares. Ao final da década de 1980, os resultados da revisão por pares indicaram que, embora os conceitos e objetivos da engenharia de Taguchi fossem bem fundamentados, havia problemas substanciais com essa estratégia experimental e métodos de análise de dados (MONTGOMERY, 2013).

Todavia, os métodos de Taguchi também trouxeram muitos resultados positivos, com destaque para quatro principais, de acordo com Montgomery (2013). Primeiro, o planejamento de experimentos passou a ser amplamente utilizado na indústria, incluindo a manufatura automotiva e aeroespacial, produtos eletrônicos e semicondutores, assim como em diversas outras que fizeram uso da técnica.

Segundo, a quarta fase do planejamento experimental iniciou. Essa fase incluiu um maior interesse no planejamento estatístico por pesquisadores e o desenvolvimento de abordagens novas e úteis para problemas experimentais no mundo da indústria, incluindo alternativas aos métodos técnicos de Taguchi que permitem que seus conceitos de engenharia sejam levados à prática de forma eficiente e eficaz (MONTGOMERY, 2013).

Terceiro, os softwares computacionais para construção e avaliação de planejamentos melhoraram consideravelmente por conta de novos recursos e aumento de capacidade. Quarto, a educação formal na área de planejamento de experimentos se tornou parte de muitos programas de engenharia nas universidades, nos níveis de graduação e pós-graduação. A integração bem-sucedida de boas práticas de projeto experimental em

engenharia e ciência é um fator-chave para a futura competitividade industrial (MONTGOMERY, 2013).

Aplicações de design experimentais têm crescido muito além das origens agrícolas. Nos últimos anos, houve uma considerável utilização do design de experimentos em diferentes áreas, incluindo o setor de serviços de negócios, serviços financeiros, operações governamentais e muitos setores empresariais sem fins lucrativos (WU; HAMADA, 2009).

O trabalho de De França; Travassos (2016) enfatiza a importância do planejamento experimental na área de simulação computacional, e citam as vantagens atribuídas à simulação como, por exemplo, a possibilidade de replicar experimentos, o controle de variáveis de interesse e a realização de estudos de menor risco quando comparado ao risco envolvido na execução de experimentos *in vivo* ou *in vitro*.

## 2.2 DEFINIÇÕES

Para uma melhor compreensão acerca do planejamento e análise de experimentos, se faz necessário conhecer os principais conceitos relacionados a este tema. A Tabela 1 apresenta os principais termos e seus respectivos significados, segundo os autores Moen; Nolan; Provost (1999), Wu; Hamada (2009) e Montgomery (2013).

Tabela 1 - Definições dos principais termos relacionados à experimentação

<b>Termo</b>	<b>Definição</b>
Variável resposta	Também denominada de variável dependente, é a variável observada ou mensurada em um experimento. A variável resposta é o resultado de um experimento e, frequentemente, é uma característica de qualidade ou uma medida de desempenho de um produto ou processo. Nos experimentos, podem existir uma ou mais variáveis de resposta que são importantes de se avaliar durante a execução do experimento.
Fator	É a variável que é propositalmente alterada de forma controlada em um experimento, a fim de observar o seu impacto sobre a variável resposta, e pode ser denominada variável independente ou variável causal. O fator pode ser tanto quantitativo como qualitativo.
Variáveis de fundo	Também denominada variável de bloqueio, é uma variável que pode afetar potencialmente a variável resposta em um experimento, mas que não é de interesse como um fator. O objetivo do estudo irá diferenciar fatores de variáveis de fundo. Essas variáveis podem ser controladas durante o estudo

mantendo a variável constante, ou pelo uso de blocos, ou medindo as variáveis de fundo e contabilizando o efeito na análise dos dados.

Variáveis de ruído	Trata-se de uma variável desconhecida, que pode afetar a variável resposta em um experimento, mas que os pesquisadores não podem controlar. Uma variável de ruído é uma variável de fundo que não é conhecida no momento em que o experimento é planejado. O impacto das variáveis de perturbação pode ser minimizado através da aleatorização.
Blocos	São grupos de unidades experimentais, tratadas de forma similar em um experimento. É esperado que a variação da variável resposta no interior do bloco seja menor que a variação de experimento como um todo.
Níveis	Representam os valores ou configurações específicas de um fator quantitativo ou opções específicas de um fator qualitativo incluídos em um experimento. São as condições de operação dos fatores de controle investigados nos experimentos. Os níveis de um fator selecionado para estudo no experimento podem ser fixados em valores específicos de interesse, ou podem consistir de uma seleção aleatória de valores possíveis.
Efeito	É a mudança em uma variável resposta que ocorre devido à alteração de um fator ou variável de ruído. Pode ser classificado em efeito principal, que é a diferença média observada na resposta quando se muda o nível do fator de controle investigado, e em efeito de interação, que é quando o efeito de um fator na variável resposta depende do nível de outro fator.
Tratamento	É o elemento cujo efeito se quer mensurar ou comparar em um experimento, por meio da combinação dos níveis dos fatores.
Unidade experimental	É a menor divisão de material em um experimento, que recebe a aplicação de um tratamento e reflete o efeito de cada tratamento nela aplicado.
Unidade observacional	É a unidade em que as observações ou medições são realizadas, ou seja, é quem fornece a resposta.
Matriz do planejamento	Trata-se do plano formal construído para conduzir os experimentos, no qual se incluem os fatores de controle, os níveis e tratamentos do experimento.

Fonte: Moen; Nolan; Provost (1999), Wu; Hamada (2009) e Montgomery (2013).

### 2.3 CLASSIFICAÇÃO DE FATORES

No estudo de planejamento e análise de experimentos, é de fundamental importância compreender como os fatores podem ser classificados. Os fatores podem ser

classificados segundo dois grupos. O primeiro grupo classifica-os em fixos ou aleatórios e o segundo grupo em cruzados ou hierárquicos, conforme os autores Gomez e Gomez (1984), Moen; Nolan; Provost (1999), Wu; Hamada (2009) e Montgomery (2013).

Para o primeiro grupo, existem dois tipos de fatores: fatores fixos e fatores aleatórios. A escolha do tipo de fator a ser adotado dependerá do contexto do problema em estudo, das questões de interesse e da coleta de dados. De acordo com Montgomery (2013), os fatores fixos são fatores cujos níveis são especificados pelo pesquisador. Nesse caso, as interpretações são restringidas apenas ao conjunto de dados em análise, ou seja, as conclusões serão limitadas somente para as situações em que os fatores possuem exatamente aqueles níveis específicos que foram utilizados no delineamento experimental. A principal implicação disso é que as inferências estatísticas feitas sobre esses fatores estão restritas aos níveis específicos estudados.

Em algumas situações experimentais, os níveis dos fatores são escolhidos aleatoriamente a partir de uma população maior de níveis possíveis. Este é o caso dos fatores aleatórios, nos quais o pesquisador deseja tirar conclusões sobre toda a população de níveis, e não apenas para os níveis que foram adotados no planejamento experimental. Os fatores aleatórios ocorrem regularmente em experimentos fatoriais, assim como também em outros tipos de experimentos (KUEHL, 2000).

A análise dos dados é diferente, dependendo se o fator é tratado como fixo ou aleatório. Conseqüentemente, as inferências podem estar incorretas se o fator for classificado de forma inadequada. Erros na classificação são mais prováveis de ocorrer quando há mais de um fator no estudo (MONTGOMERY, 2013).

O segundo grupo classifica os fatores em cruzados ou hierárquicos. Conforme Wu; Hamada (2009) os estudos multifatoriais podem envolver combinações de tratamento em que alguns são cruzados com outros fatores e alguns que estão hierarquizados em outros fatores. Sobre fatores cruzados, nesse caso há pelo menos dois fatores que são cruzados, ou seja, cada categoria de um fator coexiste no plano com cada categoria do outro fator. Portanto, cada nível de um fator ocorre em combinação com cada nível do outro fator.

Por outro lado, dois fatores são hierárquicos quando os níveis de um dos fatores são semelhantes, mas não são idênticos, e cada nível está combinado com diferentes níveis do segundo fator. Ou seja, os níveis de um fator são hierarquicamente subordinados ou aninhados aos níveis de outro fator. Nesse tipo de planejamento, dois ou mais fatores não são completamente cruzados, pois o delineamento não inclui cada combinação possível dos

níveis dos fatores. Em vez disso, um ou mais fatores são hierárquicos dentro dos níveis de outro fator. Por exemplo, quando níveis de um fator *B* só ocorrem em determinados níveis de um fator *A*, este possui uma maior hierarquia e determina quais os possíveis níveis de *B* (MONTGOMERY, 2013).

## 2.4 PRINCÍPIOS BÁSICOS DE EXPERIMENTAÇÃO

Para que um experimento seja realizado de forma eficiente, deve-se empregar uma abordagem científica para planejar tal experimento. Assim, existem dois aspectos presentes em qualquer problema experimental: o planejamento do experimento e a análise estatística dos dados. Esses dois aspectos estão intimamente relacionados, pois o método de análise depende diretamente do tipo de planejamento empregado. Dessa forma, é preciso ter conhecimento dos três princípios básicos que norteiam a execução dos experimentos, que são: aleatorização, replicação e blocagem.

### 2.4.1 Aleatorização

A aleatorização, também denominada randomização, é um processo estatístico no qual tanto a alocação do material utilizado no experimento quanto à ordem dos ensaios a serem executados são determinados de maneira aleatória. Os métodos estatísticos requerem que as observações (ou erros) sejam variáveis aleatórias distribuídas independentemente. Uma das exigências do uso da metodologia estatística para o planejamento experimental e para a análise dos resultados é que as variáveis estudadas e os erros experimentais observados apresentem um caráter aleatório, o que é conseguido pelo emprego desta técnica (WU; HAMADA, 2009).

Caso não seja empregada a aleatorização, podem ocorrer maiores efeitos de “ruídos” (fatores externos) que podem impactar nos dados. Os estudos de Fisher demonstraram que a aleatorização física permite conduzir o teste de hipótese sem necessitar fazer outras suposições a respeito da forma da distribuição estatística e que um experimento não aleatorizado pode fornecer estimativas tendenciosas dos efeitos dos fatores e da variância do erro experimental, o que levaria a conclusões equivocadas a respeito do experimento. Portanto, é uma forma de tornar a designação tratamento-unidade experimental imparcial, como também de tentar balancear a ação do erro aleatório entre as unidades experimentais, buscando atenuar ou equilibrar o efeito das fontes de variação que possam afetar a resposta. Além disso, programas computacionais são muito utilizados em

experimentos na seleção e construção de planos experimentais, e muitas vezes executam os experimentos de forma aleatorizada. Essa ordem aleatória é gerada por meio de um gerador de números aleatórios (BOX; HUNTER; HUNTER, 2005).

Em algumas situações, a aleatorização do experimento se torna difícil por conta de determinados aspectos. Por exemplo, em um processo químico, a temperatura pode ser uma variável muito difícil de alterar enquanto alteram-se outros fatores. Nesse exemplo, realizar a aleatorização completa seria complicado, pois iria demandar tempo e custo (MONTGOMERY, 2013).

### **2.4.2 Replicação**

O princípio da replicação está atrelado a uma repetição independente de cada combinação de fatores e possui duas propriedades principais, conforme Montgomery (2013). A primeira é que a replicação permite a obter uma estimativa do erro experimental. A estimativa desse erro é básica para verificar se as diferenças observadas nos dados são estatisticamente significativas. A segunda é que se a média da amostra é usada para estimar a verdadeira resposta média para um dos níveis do experimento, então isso permitirá obter uma estimativa mais precisa desse parâmetro. Quanto maior o número de réplicas, menor será a variância da estimativa dos efeitos dos fatores e mais fácil será detectar diferenças entre eles (WU; HAMADA, 2009).

Conforme Montgomery (2013) a técnica de replicação consiste em realizar os tratamentos dos testes mais de uma vez, geralmente em unidades experimentais diferentes, e envolve a aleatorização do delineamento. Replicar garante uma maior influência dos fatores na variável resposta, pois, como as unidades experimentais são diferentes a cada medida, a influência da unidade experimental no resultado do experimento diminui. Se cada tratamento for realizado duas ou mais vezes, isso implica dizer que o experimento foi replicado. Com o emprego dessa técnica, o pesquisador terá um custo maior com material experimental, mas obterá um maior volume de informações a respeito da variação natural do sistema.

### **2.4.3 Blocagem**

A técnica de blocagem é utilizada para melhorar a precisão com que comparações entre os fatores de interesse são feitas. É uma técnica extremamente importante, utilizada

industrialmente que tem o objetivo de aumentar a precisão de um experimento, e consiste em reduzir ou eliminar a variabilidade produzida pelos fatores perturbadores (controláveis ou não controláveis), isto é, fatores que podem influenciar a resposta experimental, mas nos quais não há interesse direto. Esta técnica permite criar um experimento (grupos ou unidades experimentais balanceadas) mais homogêneo e aumentar a precisão das respostas que são analisadas (MONTGOMERY, 2013).

Um bloco pode ser entendido como uma porção do material experimental que tem como característica o fato de ser mais homogêneo que o conjunto completo analisado. O uso de blocos envolve comparações entre as condições de interesse na experimentação dentro de cada bloco. Na análise com blocos, a aleatorização é restringida à sequência de ensaios interna dos blocos e não ao conjunto total de ensaios (KUEHL, 2000).

## 2.5 DIRETRIZES PARA O PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para que seja empregada uma abordagem estatística no planejamento e análise de experimentos, se torna necessário que todos os envolvidos no experimento tenham uma visão clara do que está sendo estudado, como os dados serão coletados e como os dados serão analisados. Portanto, Montgomery (2013) recomenda uma série de diretrizes a serem seguidas no planejamento experimental.

1. *Reconhecimento e definição do problema:* refere-se à necessidade de desenvolver ideias sobre o objetivo do experimento. Geralmente, é importante solicitar informações de entrada para todos os setores relacionados ao estudo como, por exemplo, engenharia, qualidade, manufatura, marketing, manutenção etc. Também é importante preparar uma lista de problemas específicos a serem abordados no experimento, pois uma definição clara do problema contribui substancialmente para um melhor entendimento dos fenômenos que estão sendo estudados e para encontrar soluções para o problema. Além disso, é preciso ter clareza do conjunto de objetivos do experimento, pois há várias razões para executar experimentos e cada tipo de experimento fornecerá sua própria lista de questões específicas que precisam ser abordadas. Algumas dessas razões para executar experimentos incluem: triagem de fator (determinar quais fatores têm maior influência na variável resposta), otimização (encontrar a configuração de níveis para os fatores que resulta em valores desejáveis para a resposta), confirmação (verificar que o sistema se comporta de forma consistente com alguma teoria ou experimento

anterior), descoberta (determinar o que ocorreu quando se explorou o uso de novos materiais, ou de novos fatores ou uma nova configuração de fatores) e robustez (selecionar fatores possíveis de controlar para minimizar a variabilidade transmitida na resposta de fatores difíceis de controlar).

2. *Seleção da variável resposta:* no processo de seleção da variável resposta, o pesquisador deve se certificar de que a variável fornecerá informações úteis sobre o processo em estudo. Geralmente, a média ou o desvio padrão da característica medida será a variável resposta. Respostas múltiplas não são incomuns, então o pesquisador precisa decidir como cada resposta será medida e abordar questões relacionadas à, por exemplo, como será que qualquer sistema de medição será configurado e como essa configuração será mantida durante o experimento. Também é importante identificar questões relacionadas à definição das respostas de interesse e como essas respostas são mensuradas antes de se conduzir o experimento. Em alguns casos, o planejamento de experimentos também é empregado para estudar e melhorar o desempenho de sistemas de medição.
  
3. *Escolha de fatores e dos níveis:* processo de escolha dos fatores para estudar no experimento, considerando-se os fatores que podem influenciar o desempenho de um processo ou sistema. Os fatores, ainda, podem ser mantidos constantes durante o experimento, ou podem sofrer variações de seus níveis. Uma vez que os fatores tenham sido selecionados, é preciso escolher as faixas nas quais esses fatores serão variados e os níveis específicos nos quais as execuções serão feitas. Também se deve pensar em como esses fatores devem ser controlados com os valores desejados e como eles devem ser medidos. O experimentador também terá que decidir sobre uma região de interesse para cada variável (ou seja, o intervalo em que cada fator será variado) e quantos níveis de cada variável usar. O conhecimento do processo é necessário para isso. Este conhecimento do processo é geralmente uma combinação de experiência prática e compreensão teórica. É importante investigar todos os fatores que podem ser importantes e não serem excessivamente influenciados por experiências anteriores, particularmente quando estamos nos estágios iniciais de experimentação ou quando o processo não é muito maduro. Quando o objetivo do experimento é a triagem de fatores ou a caracterização do processo, geralmente é

melhor manter baixo o número de níveis de fatores. Geralmente, dois níveis funcionam muito bem em estudos de triagem de fatores.

4. *Escolha do tipo de plano experimental*: considerando que os passos anteriores foram feitos corretamente, este passo envolve a escolha do tipo de plano experimental que será utilizado, e envolverá a definição do tamanho da amostra (número de réplicas), a seleção de uma ordem de execução adequada para os ensaios experimentais e se haverá uso de restrições de blocos ou de aleatorização. Existem também vários pacotes de software estatísticos interativos que suportam esta fase do planejamento experimental. O pesquisador pode inserir informações sobre o número de fatores, níveis e intervalos, e esses programas apresentarão uma seleção de planos para consideração. A seleção de planos também envolve pensar e selecionar um modelo experimental empírico para descrever os resultados. O modelo é apenas uma relação quantitativa (equação) entre a resposta e os fatores importantes do projeto. Ao selecionar o plano, é importante manter os objetivos experimentais em mente. Em muitos experimentos de engenharia, sabe-se desde o início que alguns dos níveis dos fatores resultarão em valores diferentes para a resposta. Conseqüentemente, o interesse está em identificar quais fatores causam essa diferença e estimar a magnitude da mudança de resposta.
5. *Execução do experimento*: ao executar o experimento, é vital monitorar o processo cuidadosamente para garantir que tudo esteja sendo feito conforme o planejado. Erros ocorridos no procedimento experimental nesta fase geralmente comprometem a validade experimental. Antes de conduzir o experimento, algumas execuções de teste são úteis, pois fornecem informações sobre a consistência do material experimental, uma verificação do sistema de medição, uma ideia aproximada do erro experimental e uma chance de praticar a técnica experimental geral. Além disso, também oferece uma oportunidade para revisar as decisões tomadas nas etapas de 1 a 4, se necessário.
6. *Análise estatística dos dados*: os métodos estatísticos devem ser utilizados para analisar os dados de modo que se obtenham resultados e conclusões objetivos e não intuitivos. Existem muitos pacotes de software que foram projetados para auxiliar na análise de dados, e muitos dos programas usados no passo 4 (seleção do plano

experimental) fornecem uma interface direta para a análise estatística. Muitas vezes, descobrimos que métodos gráficos simples desempenham um papel importante na análise e interpretação de dados. Geralmente, também é muito útil apresentar os resultados de muitos experimentos em termos de um modelo empírico, isto é, uma equação derivada dos dados que expressam a relação entre a resposta e os fatores de planejamento importantes. Análises residuais e verificação de adequação de modelos também são importantes técnicas de análise. Vale lembrar que os métodos estatísticos não podem provar que um fator (ou fatores) tem um efeito particular. Eles apenas fornecem diretrizes quanto à confiabilidade e validade dos resultados. Quando aplicados corretamente, os métodos estatísticos não permitem que nada seja provado experimentalmente, mas permitem medir o erro provável em uma conclusão ou anexar um nível de confiança a uma afirmação.

7. *Conclusões e recomendações:* Uma vez que os dados foram analisados, o pesquisador deve tirar conclusões práticas sobre os resultados e recomendar um plano de ação. Os métodos gráficos são frequentemente úteis nesta fase, particularmente na etapa de apresentação dos resultados. São utilizados testes de confirmação para validar as conclusões do experimento. Ao longo de todo este processo, é importante ter em mente que a experimentação é uma parte importante do processo de aprendizagem, no qual são formuladas hipóteses sobre um sistema, depois são realizados experimentos para investigar essas hipóteses e, com base nos resultados, são formuladas novas hipóteses, e assim por diante. Isso sugere que a experimentação é uma ferramenta iterativa. Finalmente, é importante reconhecer que todos os experimentos são experimentos planejados. A questão importante é se foram bem projetados ou não. Um planejamento experimental adequado geralmente levará a um experimento bem-sucedido. Quando ocorrem falhas ao se fazer tal planejamento, frequentemente isso leva a desperdício de tempo, de dinheiro e de outros recursos e a resultados insatisfatórios.

A Tabela 2 contém os passos descritos anteriormente de forma resumida. Vale ressaltar que os passos 2 e 3, geralmente, são executados simultaneamente ou em ordem contrária.

Tabela 2 - Diretrizes para o planejamento e análises de experimentos

#	Etapas
1	Reconhecimento e definição do problema
2	Seleção da variável resposta
3	Escolha dos fatores e dos níveis
4	Escolha do tipo de plano experimental
5	Execução do experimento
6	Análise estatística dos dados
7	Conclusões e recomendações

Fonte: Montgomery (2013).

## 2.6 TIPOS DE PLANEJAMENTOS EXPERIMENTAIS

Os experimentos industriais devem ser planejamentos a partir da escolha de um plano experimental específico. Essa escolha corresponde à quarta diretriz do roteiro apresentado no tópico 2.5. O objetivo dessa etapa é garantir que as informações obtidas sejam confiáveis e que os recursos disponíveis (equipamentos, pessoal, materiais, informações) sejam utilizados de forma ótima. Nesta fase do planejamento experimental, há alguns tipos de planos experimentais disponíveis para serem utilizados, os quais serão descrito a seguir.

### 2.6.1 Experimentos com um Único Fator

Os experimentos com um único fator são os experimentos em que há apenas um fator de interesse. Esse tipo de plano experimental constitui a base teórica para os experimentos com mais de um fator, apresentados nos próximos subtópicos.

Em experimentos com um único fator, uma ou mais variáveis de resposta são medidas ou observadas para diferentes níveis do fator. Quanto aos níveis do fator, estes podem ser tanto qualitativos quanto quantitativos. Uma replicação do experimento requer que o fator seja testado uma vez em cada nível. Replicações adicionais podem ser realizadas para satisfazer outras propriedades de um experimento. Cada nível do fator é atribuído a uma unidade experimental por um processo aleatório, e o raciocínio de como o fator e os níveis são definidos é uma parte importante de um bom experimento (MOEN; NOLAN; PROVOST, 1999).

Um experimento com um único fator possui dois níveis: o anterior e o posterior à mudança. O rigor do teste é aumentado pela replicação (remover a mudança quantas vezes for necessário até que determinado grau adequado de confiança seja obtido). Testar uma mudança é um caso especial de experimentos com um fator (MONTGOMERY, 2013).

Em um estudo analítico envolvendo apenas um fator, as variáveis de fundo devem ser sempre consideradas. No padrão experimental mais simples, as variáveis de fundo que são importantes são medidas ou mantidas constantes. Nos projetos em blocos, as variáveis de fundo são manipuladas agrupando as unidades experimentais em blocos. Os projetos em blocos importantes para experimentos de fator único são: o projeto de comparação pareada, os projetos de blocos aleatórios e o projeto de bloco incompleto balanceado. Nos projetos envolvendo blocos, os níveis de fator são atribuídos às unidades experimentais dentro de cada bloco (MONTGOMERY, 2013).

### 2.6.2 Planejamento Fatorial $2^k$

Planos fatoriais são amplamente adotados em experimentos que envolvem diversos fatores cujo propósito é estudar o efeito conjunto dos fatores na resposta, além de que formam a base para outros tipos de planos experimentais de considerável valor prático. O mais importante dos casos especiais é o de  $k$  fatores, no qual cada fator possui apenas dois níveis. Esses níveis podem ser quantitativos (valores de temperatura, pressão, tempo etc.) ou qualitativos (duas máquinas, presença ou ausência de um fator etc.). Uma réplica completa de tal plano requer  $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$  observações e é denominado planejamento fatorial  $2^k$  (MONTGOMERY, 2013).

Para realizar o experimento, Wu; Hamada (2009) sugerem que uma matriz de planejamento deve ser usada para exibir o plano experimental em termos dos níveis reais dos fatores; ao invés de usar  $-$  e  $+$  para níveis, a matriz usa valores reais para os níveis. A matriz de planejamento evita qualquer confusão ou incompreensão sobre quais são os fatores experimentais e em que níveis eles devem ser definidos para cada execução experimental. Os autores também explicam que a aleatorização reduz os efeitos indesejáveis de outras variáveis que não estão na matriz de planejamento, além de eliminar níveis de confundimento cancelando os efeitos da variável oculta. Uma variável é chamada de variável oculta se seu valor muda durante o curso do experimento e tem um efeito significativo sobre a resposta, mas não é identificado pelo experimentador como sendo potencialmente importante e, portanto, não é incluída na matriz de planejamento. Exemplos de variáveis ocultas são umidade e temperatura, que podem sofrer alterações ao longo do dia.

O planejamento fatorial  $2^k$  é particularmente útil nos estágios iniciais do trabalho experimental, momento em que muitos fatores provavelmente serão investigados. Além

disso, fornece o menor número de execuções com os quais os fatores podem ser estudados em um planejamento fatorial completo. Conseqüentemente, esses projetos são amplamente utilizados em experimentos de triagem de fatores. Como existem apenas dois níveis para cada fator, assume-se que a resposta é aproximadamente linear ao longo do intervalo dos níveis de fatores escolhidos, suposição razoável em inúmeros casos (WU; HAMADA, 2009).

Conforme Box; Hunter; Hunter (2005) os experimentos fatoriais de dois níveis são de especial importância, pois: exigem relativamente poucas execuções por fator estudado; a interpretação das observações produzidas pelos planos pode ser feita em grande parte usando-se o senso comum, a aritmética elementar e a computação gráfica; quando os fatores são quantitativos, embora incapazes de explorar completamente uma região ampla no espaço de fator, frequentemente determinam uma direção promissora para experimentação adicional; os projetos podem ser aumentados adequadamente quando é necessária uma exploração local mais completa, processo chamado de montagem sequencial; por fim, constituem a base para os experimentos fatoriais fracionados de dois níveis, nos quais é realiza-se apenas uma parte cuidadosamente escolhida do planejamento fatorial completo. Esse assunto é discutido no próximo subtópico.

Quanto à análise estatística, segundo Montgomery (2013) a abordagem empregada para o planejamento fatorial  $2^k$  está descrita na Tabela 3. Utiliza-se normalmente *software* computacional no processo de análise.

Tabela 3 - Diretrizes para o planejamento experimental

<b>Procedimento de análise para o Planejamento Fatorial <math>2^k</math></b>
1. Estimar os efeitos do fator
2. Formular modelo inicial
a) Se o plano possui réplica, ajustar modelo completo;
b) Se não houver replicação, formular modelo;
3. Realizar testes estatísticos
4. Aperfeiçoar modelo
5. Analisar resíduos
6. Interpretar resultados

Fonte: Montgomery (2013).

O primeiro passo é estimar os efeitos dos fatores e examinar seus sinais e magnitudes. Isso fornece ao pesquisador informações preliminares sobre quais fatores e interações podem ser importantes e em quais direções esses fatores devem ser ajustados

para obter a melhor resposta. Sobre o passo 2, na formulação do modelo inicial para o experimento, geralmente escolhe-se o modelo completo, ou seja, todos os principais efeitos e interações, desde que pelo menos um dos pontos do projeto tenha sido replicado. No passo 3 utiliza-se a análise de variância para testar formalmente a significância dos efeitos principais e da interação. O passo 4, que consiste em aperfeiçoar o modelo, consiste em remover quaisquer variáveis não significativas do modelo completo. O passo 5 é a análise de resíduos realizada para verificar a adequação às premissas do modelo. Em alguns casos, o aperfeiçoamento do modelo ocorrerá após a análise residual, nos casos em que o modelo é inadequado ou se as suposições estão sendo violadas. O passo final geralmente consiste em análise gráfica, como, por exemplo, gráficos de efeito principal, de interação, de superfície de resposta e gráficos de contorno (MONTGOMERY, 2013).

### **2.6.3 Planejamento Fatorial Fracionado $2^k$**

Os experimentos fatoriais fracionários estão entre os tipos de projetos mais amplamente utilizados no planejamento de produtos e processos, na melhoria de processos e na experimentação industrial. É possível observar que, em um experimento fatorial do tipo  $2^k$ , à medida que o número de fatores ( $k$ ) aumenta o número de execuções necessárias para uma replicação completa do projeto rapidamente supera os recursos da maioria dos pesquisadores (GOMEZ; GOMEZ, 1984).

Wu; Hamada (2009) corroboram com esse pensamento afirmando que os experimentos fatoriais completos são raramente empregados na prática para grandes valores de  $k$  e, por razões econômicas, os experimentos fatoriais fracionados são comumente utilizados.

Montgomery (2013) exemplifica esse assunto considerando que uma réplica completa do projeto  $2^6$  requer 64 execuções. Nesse caso, somente 6 dos 63 graus de liberdade correspondem aos efeitos principais e apenas 15 graus de liberdade correspondem a interações de dois fatores. Além disso, apenas 21 graus de liberdade associados a efeitos que provavelmente serão de grande interesse e os 42 graus de liberdade restantes estão associados a interações de três ou mais fatores. Se o experimentador entender que certas interações de alta ordem são insignificantes, informações sobre os principais efeitos e interações de baixa ordem podem ser obtidas executando apenas uma fração do experimento fatorial completo.

Uma das principais aplicações de planejamento fatorial fracionário consiste nos experimentos de triagem (*screening experiments*), que são experimentos nos quais muitos fatores são considerados e o objetivo é identificar fatores que possuem efeitos significativos na resposta. Os experimentos de triagem são geralmente realizados nos estágios iniciais de um projeto quando muitos dos fatores inicialmente considerados provavelmente têm pouco ou nenhum efeito sobre a resposta. Os fatores identificados como importantes são então investigados mais detalhadamente em experimentos subsequentes (WU; HAMADA, 2009).

Montgomery (2013) afirma que o uso bem-sucedido de experimentos fatoriais fracionários é baseado em três ideias-chave:

1. O princípio da escassez de efeitos: quando existem várias variáveis, o sistema ou processo provavelmente será impulsionado principalmente por alguns dos efeitos principais e por interações de baixa ordem.

2. A propriedade de projeção: os experimentos fatoriais fracionários podem ser empregados em projetos mais robustos no subconjunto de fatores significativos.

3. Experimentação sequencial: é possível combinar as execuções de dois (ou mais) fatoriais fracionários para construir sequencialmente um plano experimental maior para estimar os efeitos dos fatores e as interações de interesse.

#### 2.6.4 Planejamento Fatorial $3^k$

Nos experimentos em dois níveis tratados anteriormente, observou-se que estes exigem um menor número de execuções e são mais econômicos de conduzir. Assim, algumas considerações práticas tornam interessante estudar fatores com mais de dois níveis, neste caso, os experimentos fatoriais com três níveis.

A estrutura matemática e a análise de dados para os projetos de três níveis decorrem dos projetos de dois níveis. A distinção principal entre os dois modelos refere-se ao fato de que fator de três níveis tem dois graus de liberdade e que existem dois sistemas de parametrização dos efeitos de interação em projetos de três níveis, o sistema de componentes ortogonais e o sistema linear quadrático (WU; HAMADA, 2009).

Adicionalmente, o planejamento fatorial  $3^k$  estuda todas as  $3 \times 3 \times \dots \times 3 = 3^k$  combinações de  $k$  fatores, no qual cada fator possui três níveis (WU; HAMADA, 2009). Montgomery (2013) considera que o projeto fatorial  $3^k$  é um arranjo fatorial com  $k$  fatores, cada um em três níveis (nível baixo, intermediário e alto). Várias notações diferentes

podem ser usadas para representar esses níveis de fatores. Uma possibilidade é representar os níveis dos fatores pelos dígitos 0 (baixo), 1 (intermediário) e 2 (alto). No sistema de projetos  $3^k$ , quando os fatores são quantitativos, a notação dos níveis em baixo, intermediário e alto são configuradas como  $-1, 0$  e  $+1$ , respectivamente, que facilita o ajuste de um modelo de regressão relacionando a resposta aos níveis dos fatores.

Conforme Wu; Hamada (2009) em experimentos de dois níveis, somente efeitos lineares podem ser estudados para fatores quantitativos, e comparações entre dois níveis do fator podem ser feitas para fatores qualitativos. Para muitas situações práticas, fatores de três níveis precisam ser considerados por três razões principais:

1. Um fator quantitativo como, por exemplo, temperatura, pode afetar a resposta, e somente duas configurações de temperatura impede uma análise da relação curvilínea entre resposta e temperatura. Logo, três ou mais configurações são necessárias para detectar o efeito de curvatura.

2. Um fator qualitativo pode ter vários níveis, como três tipos de máquinas para fabricação de uma peça ou três fornecedores de um mesmo componente. Se as três máquinas são usadas na produção atual, então todas devem ser comparadas no estudo. Ao contrário do que ocorre numa situação quantitativa, a resposta em um nível do fator qualitativo não pode ser usada para inferir sobre a resposta em outro nível. Assim, não se podem comparar três tipos de máquinas com base no estudo de apenas dois tipos de máquinas. Além disso, seria mais demorado e caro primeiro estudar apenas dois tipos de máquinas em um experimento de dois níveis e depois adicionar o terceiro tipo em um experimento de acompanhamento.

3. Se  $x_0$  é a configuração atual de um produto ou processo, como a dimensão de uma peça, é comum estudar  $x_0$  e duas configurações em torno de  $x_0$ , pois isto é particularmente adequado se o objetivo é melhorar o desempenho do produto/processo mudando  $x_0$ , no qual uma configuração menor ou maior poderia realizar esse potencial. Seria menos demorado considerar tanto configurações altas quanto baixas em um único experimento.

### **2.6.5 Planejamento Fatorial Fracionado $3^k$**

Assim como ocorre no planejamento fatorial fracionado de dois níveis, a principal justificativo do uso do planejamento fatorial de três níveis é conseguir economia no tamanho do experimento. Por exemplo, considere o projeto fatorial  $3^4$ , que consiste em um

total de 81 execuções. Dos 80 graus de liberdade no projeto, 48 (ou seja, 24 componentes, cada um com 2 graus de liberdade) são para estimar interações de três e quatro fatores. De acordo com o princípio da hierarquia de efeitos, essas interações são difíceis de interpretar e geralmente insignificantes. A menos que o experimento não seja caro, não é econômico usar um design  $3^4$ , pois, geralmente, é mais eficiente usar um terço ou uma nona fração do plano  $3^4$  (WU; HAMADA, 2009).

Para Montgomery (2013) o conceito de replicação fracionária pode ser estendido para os experimentos fatorial  $3^k$ . Como uma replicação completa de um projeto  $3^k$  pode exigir um número grande de execuções, mesmo para valores moderados de  $k$ , então a replicação fracionária surge como uma aplicação de grande interesse, principalmente para valores grandes de  $k$ .

O procedimento para construir um planejamento fatorial fracionário de  $3^{k-p}$  é selecionar  $p$  componentes de interação e usar esses efeitos para particionar as combinações de tratamento de  $3^k$  em blocos de  $3^p$ . Cada bloco é então um planejamento fatorial fracionário de  $3^{k-p}$ . Além disso, também é possível gerar as execuções definindo um planejamento fatorial fracionário de  $3^{k-p}$  primeiramente anotando as combinações de tratamento de um planejamento fatorial completo de  $3^{k-p}$  e, em seguida, introduzindo os fatores  $p$  adicionais, comparando-os aos componentes de interação (MONTGOMERY, 2013).

Entretanto, de acordo com Montgomery (2013), se  $k$  é moderadamente grande ( $k > 4$ ) o tamanho do plano fatorial  $3^k$  levará a maioria dos experimentadores a considerar frações razoavelmente pequenas, e esses projetos têm relacionamentos de confundimento que envolvem o confundimento parcial de componentes de interação de dois graus de liberdade. Isso, por sua vez, resulta em um planejamento que pode ser difícil ou até impossível para realizar interpretações se as interações não forem insignificantes. Além disso, o uso do plano  $3^k$  é frequentemente sugerido quando o efeito de curvatura está presente.

### **2.6.6 Planejamento Fatorial com Níveis Mistos ou Assimétricos**

Os experimentos fatorial e fatorial fracionado de dois níveis são técnicas relevantes para a experimentação industrial de produtos e para o desenvolvimento de processos, solução de problemas e melhoria contínua. Em contrapartida, os experimentos de três níveis são menos úteis porque os projetos são relativamente grandes, mesmo para

um número pequeno de fatores, e a maioria dos projetos fracionados tem relações de confundimento complexas que exigiriam suposições muito restritivas em relação às interações (MONTGOMERY, 2013).

Porém, segundo Montgomery (2013) existem algumas situações em que é necessário incluir um fator (ou alguns fatores) com mais de dois níveis. Isso geralmente ocorre quando há fatores quantitativos e qualitativos no experimento, e o fator qualitativo tem, por exemplo, três níveis. Se todos os fatores forem quantitativos, então projetos de dois níveis com pontos centrais devem ser empregados.

Nesta seção, o objetivo é explicar dois tipos de planejamentos fatoriais mistos: o planejamento experimental com fatores de dois e três níveis e o de dois e quatro níveis.

Conforme Wu; Hamada (2009) com relação aos experimentos fatoriais mistos com fatores de dois e de três níveis, se estes experimentos são fatoriais completos, a construção e análise desses projetos não apresentam grande desafio. No entanto, o interesse nesses projetos pode ocorrer quando um planejamento fatorial fracionário está sendo feito. Se todos os fatores forem quantitativos, as frações de nível misto geralmente são alternativas ruins a um fatorial fracionário de  $2^{k-p}$  com pontos centrais. Geralmente, quando esses projetos são considerados, o experimentador tem uma combinação de fatores qualitativos e quantitativos, com os fatores qualitativos assumindo três níveis. O complexo confundimento que é observado no projeto  $3^{k-p}$  com fatores qualitativos é transmitido em grande parte no sistema fracionário de nível misto. Assim, projetos fracionários de nível misto com todos os fatores qualitativos ou uma combinação de fatores qualitativos e quantitativos devem ser usados com cautela.

É possível observar na Tabela 4 que fatores de dois e três níveis podem ser derivados da tabela de sinais de mais e menos para o plano fatorial  $2^k$ . Montgomery (2013) explica esse procedimento com um exemplo no qual são consideradas duas variáveis,  $B$  e  $C$  em dois níveis e  $X$  em três níveis, e também uma tabela de sinais de mais e menos para o projeto normal de oito execuções, com os níveis de  $X$  sendo representados por  $x_1$ ,  $x_2$ , e  $x_3$ .

Tabela 4 - Utilização de fatores de dois níveis para formular fator de três níveis

Fatores de dois níveis		Fator de três níveis
$B$	$C$	$X$
-	-	$x_1$
+	-	$x_2$
-	+	$x_3$
+	+	$x_4$

Fonte: Montgomery (2013).

Essa tabela mostra como os padrões de sinais para  $B$  e  $C$  podem ser combinados para formar os níveis do fator de três níveis. Agora o fator  $X$  tem dois graus de liberdade e, se o fator é quantitativo, pode ser particionado em um componente linear e um componente quadrático, no qual cada componente possui um grau de liberdade.

Com relação aos experimentos fatoriais mistos de dois e quatro níveis, percebe-se que é simples acomodar um fator de quatro níveis em um plano experimental de  $2^k$ . O procedimento para fazer isso envolve o uso de dois fatores de dois níveis para representar o fator de quatro níveis (MONTGOMERY, 2013).

Montgomery (2013) ilustra esse caso supondo que  $A$  seja um fator de quatro níveis com os níveis  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  e  $a_4$ . A Tabela 5 mostra, no lado esquerdo, os sinais de mais e de menos das colunas  $P$  e  $Q$  (pseudo fatores de dois níveis), e o lado direito mostra como esses quatro padrões de sinais corresponderiam aos quatro níveis do fator  $A$  (fator de quatro níveis). Os efeitos representados pelas colunas  $P$  e  $Q$  e a interação  $PQ$  são mutuamente ortogonais e correspondem ao efeito  $A$  de três graus de liberdade. Esse método de construção de um fator de quatro níveis a partir de dois fatores de dois níveis é chamado de método de substituição.

Tabela 5 - Utilização de fatores de dois níveis para formular fator de quatro níveis

Fatores de dois níveis		Fator de quatro níveis
$P$	$Q$	$A$
-	-	$a_1$
+	-	$a_2$
-	+	$a_3$
+	+	$a_4$

Fonte: Montgomery (2013).

### 2.6.7 Experimentos com Fatores Aleatórios

Nas seções anteriores, discutiu-se a respeito de planejamentos experimentais que consideram fatores fixos, que são fatores cujos níveis são especificados pelo pesquisador. Esta seção apresenta os experimentos com fatores aleatórios, que são fatores cujos níveis são escolhidos aleatoriamente a partir de uma população maior de níveis possíveis. Nesse caso, o pesquisador deseja tirar conclusões sobre toda a população de níveis.

Em algumas situações experimentais, os níveis dos fatores são escolhidos aleatoriamente a partir de uma população maior de níveis possíveis, e o pesquisador deseja tirar conclusões sobre toda a população de níveis, não apenas aqueles que foram usados no delineamento experimental. Os fatores aleatórios também ocorrem regularmente em experimentos fatoriais, bem como em outros tipos de experimentos (MONTGOMERY, 2013).

Além disso, em muitos experimentos envolvendo fatores aleatórios, de acordo com Montgomery (2013), o interesse centra-se tanto na estimativa dos componentes de variância quanto no teste de hipóteses. Os componentes de variância podem ser estimados pelo método de análise de variância, ou seja, equacionando os quadrados médios observados nas linhas da análise da tabela de variância com seus valores esperados e resolvendo para os componentes de variância. Por exemplo, se  $a$  níveis de um fator foram selecionados de uma população de níveis, como os níveis usados no experimento foram selecionados ao acaso, inferências podem ser feitas sobre a população de níveis do fator. Geralmente, considera-se também que a população de níveis é grande o suficiente para ser considerada infinita.

Segundo Kuehl (2000) uma parte importante de qualquer problema de projeto experimental é conduzir a análise de variância, que envolve determinar a soma dos quadrados de cada componente no modelo e o número de graus de liberdade associados a cada soma de quadrados. Então, para construir estatísticas de teste apropriadas, os quadrados médios esperados devem ser determinados.

Em planejamentos complexos, particularmente aqueles envolvendo modelos aleatórios ou mistos, é frequentemente útil ter um procedimento formal para este processo. Então, examinando os quadrados médios esperados, pode-se utilizar a estatística apropriada para testar hipóteses sobre qualquer parâmetro do modelo. A estatística de teste é uma razão de quadrados médios selecionada de forma que o valor esperado da média quadrática do numerador difere do valor esperado da média quadrática do denominador apenas pelo componente de variância ou pelo fator fixo em que há interesse (KUEHL, 2000).

#### **2.6.8 Planejamento com Restrição na Aleatorização (Parcelas Subdivididas, Faixas e Variantes)**

O planejamento experimental em parcelas subdivididas, também conhecido por Planejamento *Split-Plot*, é um tipo de plano experimental adequado para casos em que existem fatores de difícil mudança e restrições que impedem o uso de aleatorização completa (JONES; NACHTSHEIM, 2009). Experimentos com parcelas subdivididas foram, inicialmente, desenvolvidos por Fisher (1925) e sua importância na indústria tem sido há muito reconhecida.

Box; Jones (1992) corroboram com esse pensamento, e afirmam que os experimentos em parcelas subdivididas são particularmente utilizados quando um ou mais fatores são o que denominam fatores de classificação. Esses fatores são incluídos no experimento para verificar se modificam o comportamento de outros fatores ou indicar como operam. Além disso, segundo Jones; Nachtsheim (2009) presume-se que os efeitos principais desses fatores não são de grande interesse, pois são incluídos no experimento principalmente para examinar uma possível interação com os outros fatores.

É possível definir um experimento em parcelas subdivididas como um experimento em blocos, no qual os próprios blocos servem como unidades experimentais para um subconjunto dos fatores. Assim, existem dois níveis de unidades experimentais: os blocos, que são chamados de parcelas inteiras, e as unidades experimentais localizadas dentro dos blocos, chamadas de parcelas subdivididas (BOX; JONES, 1992).

Os fatores que apresentam restrições para a troca rápida de níveis são denominados fatores difíceis de mudar (*hard to change*). Tratamentos que possuem em comum um mesmo fator difícil de mudar podem estar agrupados em uma parcela (*whole-plot*). Na identificação de uma parcela, primeiramente identificam-se diferentes tratamentos que estão sob a influência do mesmo nível do fator que possui difícil mudança. Dentro de uma parcela, há diferentes unidades experimentais com diferentes tratamentos sendo testadas, que são as subparcelas (*sub-plot*), menores unidades experimentais possíveis (WU; HAMADA, 2009).

Como exemplo, Montgomery (2013) sugere um fabricante de papel que está interessado em três métodos diferentes de preparação de polpa (os métodos diferem na quantidade de fibra curta na mistura de polpa) e quatro diferentes temperaturas de cozimento da polpa. O fabricante deseja estudar o efeito desses dois fatores na resistência à tração do papel. Cada réplica de um experimento fatorial requer 12 observações, e o experimentador decidiu realizar três repetições, totalizando 36 execuções.

Continuando o exemplo, certa quantidade de polpa é produzida por um dos três métodos em estudo, que é dividida em quatro amostras e cada amostra é tratada por uma

das quatro temperaturas. Depois disso, um segundo lote de polpa é feito usando um dos três métodos. Este segundo lote também é dividido em quatro amostras que são testadas nas quatro temperaturas. O processo é então repetido até que todas as três réplicas (36 execuções) da experiência sejam obtidas. Inicialmente, esse experimento pode ser considerado como um experimento fatorial com três níveis de método de preparação (fator *A*) e quatro níveis de temperatura (fator *B*). Se este for o caso, a ordem de experimentação dentro de cada réplica deve ser completamente aleatória. Ou seja, deve-se selecionar aleatoriamente uma combinação de tratamento (um método de preparação e uma temperatura) e obter uma observação. Dessa forma, é preciso selecionar aleatoriamente novamente outra combinação de tratamento e obter uma segunda observação, e assim por diante, até que todas as 36 observações tenham sido obtidas.

No entanto, a coleta de dados realizada pelo experimentador não ocorreu dessa maneira. Ele preparou certo volume de polpa e obteve observações para todas as quatro temperaturas a partir desse lote. Devido à economia necessária para a preparação do lote e do tamanho do lote, essa é a única maneira possível de executar esse experimento. Um experimento fatorial completamente aleatório exigiria 36 lotes de polpa, situação economicamente inviável. Assim, o projeto em parcelas subdivididas requer apenas 9 lotes no total, e resultou em eficiência experimental (MONTGOMERY, 2013).

No planejamento em parcelas subdivididas, existem algumas variações dentro dessa forma de planejamento experimental. A primeira variação é o planejamento em parcelas subdivididas com mais de dois fatores. Neste caso, as parcelas ou subparcelas conterão dois ou mais fatores. Para demonstrar esse assunto, Montgomery (2013) sugere um experimento realizado em um forno para produzir um óxido em uma pastilha de silício. As variáveis de resposta de interesse são a espessura da camada de óxido e a uniformidade da camada. Existem quatro fatores de projeto: temperatura (*A*), fluxo de gás (*B*), tempo (*C*) e posição da pastilha no forno (*D*). O experimentador planeja executar um planejamento fatorial  $2^4$  com duas repetições (32 execuções). Neste exemplo, os fatores *A* e *B* (temperatura e fluxo de gás) são difíceis de mudar, enquanto *C* e *D* (tempo e posição da pastilha) são fáceis de mudar.

Experimentos fatoriais com três ou mais fatores em uma estrutura de parcelas subdivididas tendem a serem experimentos bastante grandes. Paralelamente, a estrutura de parcelas subdivididas facilita em muitas ocasiões a realização de um experimento maior. Por exemplo, no exemplo do forno de óxido, os pesquisadores só têm que mudar os fatores de difícil mudança (*A* e *B*) oito vezes, então talvez um experimento de 32 execuções não

seja impossível. Além disso, à medida que o número de fatores no experimento cresce, o experimentador pode considerar o uso de um experimento fatorial fracionário no cenário de parcelas subdivididas (MONTGOMERY, 2013).

Uma segunda variação dos projetos em parcelas subdivididas são os projetos experimentais em parcelas sub-subdivididas ou *Split-Split-Plot*. Esse caso é aplicado a situações nas quais há dois níveis de restrições de aleatorização (MONTGOMERY, 2013). A análise estatística do delineamento em *Split-Split-Plot* é semelhante à de uma única réplica de um fatorial de quatro fatores, com o número de graus de liberdade para cada teste determinado de maneira usual. O planejamento em parcelas sub-subdivididas é semelhante a o planejamento em parcelas subdivididas, exceto que as subparcelas são divididas em sub-subparcelas, e um terceiro fator de interesse é aplicado às sub-subparcelas (AMBROŻY-DERĘGOWSKA; MEJZA; MEJZA, 2014).

Além disso, nos experimentos em parcelas sub-subdivididas, assume-se que o material experimental pode ser dividido em  $b$  blocos. Cada bloco pode ser dividido em  $s$  parcelas. Em seguida, cada parcela é dividida em  $t$  subparcelas e cada subparcela pode ser dividida em  $w$  sub-subparcelas. Nesse esquema, as parcelas correspondem aos níveis do fator  $A$  (tratamentos da parcela), as subparcelas correspondem aos níveis do fator  $B$  (tratamentos das subparcelas) e as sub-subparcelas estão acomodadas nos níveis do fator  $C$  (tratamentos das sub-subparcelas) (AMBROŻY-DERĘGOWSKA; MEJZA; MEJZA, 2014).

Esse tipo de planejamento experimental possui duas características importantes: existem três tamanhos de parcela correspondentes aos três fatores, a maior parcela (parcela principal) para o fator principal da parcela, a parcela intermediária (subparcela) para o fator de subparcela, e a parcela menor (sub-subparcela) para o fator de sub-subparcela; e existem três níveis de precisão, com o fator de parcela principal recebendo o menor grau de precisão e o fator de sub-subparcela recebendo o mais alto grau de precisão (GOMEZ; GOMEZ, 1984).

A terceira variação é o planejamento em parcelas subdivididas em faixas, ou *Strip-Split-Plot*, que tem uma extensa aplicação na área de ciências agrárias, mas encontra uso ocasional na experimentação industrial. No caso mais simples, têm-se dois fatores,  $A$  e  $B$ . O fator  $A$  é aplicado a parcelas inteiras, assim como no projeto padrão de parcelas subdivididas, e o fator  $B$  é aplicado às faixas, que são apenas mais um conjunto de parcelas inteiras, ortogonais às parcelas inteiras originais usadas para o fator  $A$  (MONTGOMERY, 2013).

Nesse tipo de planejamento, a parcela de interseção é dividida em subparcelas para acomodar um terceiro fator. Além disso, é caracterizado principalmente por dois aspectos: há quatro tamanhos de parcelas (a faixa horizontal, a faixa vertical, a parcela de interseção e a subparcela) e existem quatro níveis de precisão com os quais os efeitos dos diferentes fatores são medidos, com nível mais alto correspondendo ao fator de subparcela e suas interações com outros fatores (GOMEZ; GOMEZ, 1984).

### **2.6.9 Planejamento Hierárquico (*Nested*)**

Os experimentos hierárquicos ou aninhados são caracterizados por, em diversos casos, apresentarem restrições impeditivas de realizar cruzamentos entre todos os níveis de um fator com todos os níveis de um segundo fator. Em outras palavras, para certos experimentos multivariados, os níveis dos fatores (por exemplo, fator *B*) são semelhantes, mas não são idênticos para diferentes níveis de outro fator (por exemplo, *A*). Esse planejamento hierárquico possui níveis de fator *B* aninhados sob os níveis do fator *A* (MONTGOMERY, 2013).

Montgomery (2013) ilustra esse assunto com o exemplo de uma empresa que compra sua matéria-prima de três fornecedores diferentes. A empresa deseja determinar se a pureza da matéria-prima é a mesma para cada fornecedor. Existem quatro lotes de matéria-prima disponíveis de cada fornecedor, e três determinações de pureza devem ser retiradas de cada lote. Esse é um exemplo de um projeto de dois estágios aninhados, com lotes aninhados em fornecedores.

Este exemplo não é de um planejamento fatorial, pois se fosse esse o caso, o lote 1 sempre se referiria ao mesmo lote, o lote 2 sempre se referiria ao mesmo lote e assim por diante, e este não é o caso, pois os lotes de cada fornecedor são exclusivos daquele fornecedor em particular. Ou seja, o lote 1 do fornecedor 1 não tem conexão com o lote 1 de nenhum outro fornecedor, o lote 2 do fornecedor 1 não tem conexão com o lote 2 de nenhum outro fornecedor, e assim por diante (MONTGOMERY, 2013).

Além disso, Montgomery (2013) argumenta que há um problema em potencial na aplicação de planejamentos hierárquicos, pois, às vezes, para obter um número razoável de graus de liberdade no nível mais alto, têm-se muitos graus de liberdade em estágios mais baixos. Como ilustração desse tema, o autor investiga diferenças potenciais na análise química entre diferentes lotes de material, com o plano de selecionar cinco amostras por lote, com cada amostra sendo medida duas vezes. Para estimar a variância para lotes, então

10 lotes não seriam uma escolha não razoável, pois resultaria em 9 graus de liberdade para lotes, 40 graus de liberdade para amostras e 50 graus de liberdade para medições. Uma maneira de evitar isso é usar um tipo específico de planejamento hierárquico não balanceado chamado de planejamento aninhado escalonado.

## CAPÍTULO 3 – MÉTODO DE PESQUISA

Neste capítulo são apresentados os métodos para o desenvolvimento da pesquisa, que foi subdividida em duas seções para o seu desenvolvimento: (1) desenvolvimento de um procedimento para guiar o planejamento e a análise de experimentos; (2) análise sistemática. A Tabela 6 detalha os tópicos abordados.

Tabela 6 – Detalhamento dos métodos do trabalho

Seções	Características
Desenvolvimento de um procedimento para o planejamento experimental	Desenho de um guia para o planejamento e a análise de experimentos
Revisão de literatura	Sistematização de trabalhos que utilizaram o planejamento experimental e que desenvolveram diretrizes básicas para auxiliar no uso dessa ferramenta

Fonte: Elaboração própria (2021).

### 3.1 DESENVOLVIMENTO DO PROCEDIMENTO GUIA PARA O PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Em função dos objetivos da pesquisa, este trabalho buscou desenvolver um procedimento para guiar o planejamento e a análise de experimentos. Foi identificada na literatura atual a inexistência de uma ferramenta ilustrativa que possa nortear pesquisadores na área de experimentação. Logo, essa lacuna foi explorada na presente pesquisa.

Costa; Pires; Ribeiro (2006) desenvolveram um trabalho dando ênfase a aspectos não estatísticos que são críticos para o sucesso de estudos experimentais. Os autores agruparam essas diretrizes em três fases: planejamento, condução e análise. Para eles, as fases são interdependentes e a qualquer momento pode ser necessário redefinir o que foi especificado anteriormente, refletindo a natureza sequencial iterativa dos estudos experimentais. A fase de planejamento pode apresentar falhas não só por falta de conhecimento técnico ou uso incorreto de técnicas estatísticas, mas também por falta de planejamento. Portanto, aspectos de gestão organizacional, aspectos técnicos e seleção do plano experimental devem ser planejados corretamente.

A fase de condução refere-se à realização de experimentos e inclui coleta de dados e monitoramento de experimentos. Para testar a adequação das atividades propostas, alguns experimentos preliminares (ensaios) são recomendados, pois com os testes é possível

garantir que a documentação e os formulários de coleta de dados sejam adequados e que os sistemas de aquisição de dados estejam funcionando (COSTA; PIRES; RIBEIRO, 2006).

A respeito da fase de análise, os autores defendem que uma análise bem-sucedida depende fortemente das fases anteriores. Todo projeto experimental possui um modelo de análise associado, e se os experimentos não forem definidos e conduzidos adequadamente, os resultados serão afetados mesmo aplicando métodos de análise sofisticados. A análise dos dados é fundamental e exige competências técnicas para aplicar e interpretar os resultados obtidos (COSTA; PIRES; RIBEIRO, 2006).

Dessa forma, o presente trabalho buscou desenvolver um guia ilustrativo para o planejamento experimental. Para isso, desenvolveu-se o delineamento das etapas com o objetivo de facilitar para o pesquisador a seleção dos diversos aspectos que devem ser levados em consideração no planejamento e de auxiliar no processo de tomada de decisão de pesquisadores que podem ou não ter experiência com a área de experimentação.

### 3.2 REVISÃO DE LITERATURA

Para compreender a área de estudo de experimentação fatorial na literatura acadêmica e para conhecer as diversas aplicações dessa técnica, evidenciou-se a importância de buscar em plataformas de pesquisas científicas os trabalhos que trataram do planejamento experimental e de guias para orientar os pesquisadores nos estudos referentes a esse tema a fim de construir uma sistematização detalhada desses estudos.

Para a coleta dos artigos, utilizou-se a base de dados *Scopus*. O conjunto de palavras-chave mais eficiente encontrado foi formado pelo seguinte arranjo: “*guideline for experimental design*”, “*design and analysis of experiments*”, “*design of experiments*”, “*factorial*” e “*experimental design*”. Este arranjo apresentou o maior retorno imediato, com um total de 61 trabalhos.

Fez-se a leitura inicial dos títulos e resumos e identificou-se que uma parte dos estudos, resultantes das combinações, não condizia com os fins do presente trabalho ou não ou não foi possível a obtenção de acesso. Assim, 37 artigos foram descartados e um total de 24 trabalhos que abordam, de algum modo, aspectos relativos a guias para o planejamento experimental e experimentos fatoriais, foram selecionados para a sistematização. Os artigos selecionados para o presente trabalho estão listados na Tabela 7.

Tabela 7 – Artigos selecionados para a sistematização

#	Autor/ano	Título do artigo
1	Hahn (1984)	Experimental design in the complex world
2	Box; Bisgaard; Fung (1988)	An explanation and critique of taguchi's contributions to quality engineering
3	Costa; Pires; Ribeiro (2006)	Guidelines to help practitioners of design of experiments
4	Tanco; Costa; Viles (2009)	Experimental design selection: Guidelines for practitioners
5	Mathivanan; Parthasarathy (2008)	Prediction of sink depths using nonlinear modeling of injection molding variables
6	Van De Ven et al. (2011)	A framework for efficient process development using optimal experimental designs
7	Hoef (2012)	Practical considerations for experimental designs of spatially autocorrelated data using computer intensive methods
8	Sharafi et al. (2012)	Comparison of full and fractional factorial designs in some agricultural experiments based on TAGUCHI method
9	Mitra et al. (2016)	Identification of Analytical Factors Affecting Complex Proteomics Profiles Acquired in a Factorial Design Study with Analysis of Variance: Simultaneous Component Analysis
10	De França; Travassos (2016)	Experimentation with dynamic simulation models in software engineering: planning and reporting guidelines
11	Zhang et al. (2017)	Predictive temperature modeling and experimental investigation of ultrasonic vibration-assisted pelleting of wheat straw
12	Wani; Patil (2017)	An experimental design approach for optimization of spectrophotometric method for estimation of cefixime trihydrate using ninhydrin as derivatizing reagent in bulk and pharmaceutical formulation
13	Gigovska et al. (2018)	Comprehensive Assessment of Degradation Behavior of Simvastatin by UHPLC/MS Method, Employing Experimental Design Methodology
14	Reinsch et al. (2018)	Renovation and conversion of permanent grass-clover swards to pasture or crops: Effects on annual N <sub>2</sub> O emissions in the year after ploughing
15	Kong et al. (2018)	Characterization and Modeling of Catalyst-free Carbon-Assisted Synthesis of ZnO Nanowires
16	Manasi; Anagha (2018)	An experimental design approach for optimization of modified colorimetric first-order derivative method for estimation of serralyisin in bulk and pharmaceutical formulation
17	Legendre; Coderre (2018)	The impact of altruistic attribution and brand equity in food label campaigns
18	Li; Zhao; Wang (2019)	Research on erosion-corrosion rate of 304 stainless steel in acidic slurry via experimental design method
19	Costa (2019)	Design of experiments – overcome hindrances and bad practices
20	Deshmukhet al. (2020)	Application of design of experiment based innovative approach in method development and validation of rp-hplc for estimation of azilsartan in bulk and pharmaceutical tablet dosage form
21	Nazarie; Williams (2021)	Linguistic style and gender match in funding intention towards crowdfunding project

22	Golembiovská et al. (2021)	Quality by design approach for simultaneous determination of original active pharmaceutical ingredient quinabut and its impurities by using HPLC
23	Rahman et al. (2021)	Analysis of the operating conditions of pulse electric field–assisted EHD for sodium alginate printing using design of experiment approach
24	Jankovic; Chaudhary; Goia (2021)	Designing the design of experiments (DoE) – An investigation on the influence of different factorial designs on the characterization of complex systems

Fonte: Elaboração própria (2021).

## CAPÍTULO 4 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 ANÁLISE SISTEMÁTICA DE TRABALHOS RELATIVOS A GUIAS PARA O PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Os artigos selecionados na etapa de revisão de literatura foram sistematizados. A Tabela 8 contém a lista final dos artigos e relaciona, em ordem cronológica, o local de publicação do trabalho e seu respectivo autor.

Tabela 8 - Locais de publicação dos artigos selecionados

#	Local de publicação	Autor/ano
1	Technometrics	Hahn (1984)
2	Quality and Reliability Engineering International	Box; Bisgaard; Fung (1988)
3	The TQM Magazine	Costa; Pires; Ribeiro (2006)
4	International Journal of Productivity and Quality Management	Tanco; Costa; Viles (2009)
5	International Journal of Advanced Manufacturing Technology	Mathivanan; Parthasarathy (2008)
6	Journal of Pharmaceutical Innovation	Van De Ven et al. (2011)
7	Statistical Methodology	Hoef (2012)
8	Life Science Journal	Sharafi et al. (2012)
9	Analytical Chemistry	Mitra et al. (2016)
10	Empirical Software Engineering	De França; Travassos (2016)
11	Applied Energy	Zhang et al. (2017)
12	Journal of Saudi Chemical Society	Wani; Patil (2017)
13	International Journal of Analytical Chemistry	Gigovska et al. (2018)
14	Soil and Tillage Research	Reinsch et al. (2018)
15	Journal of Manufacturing Processes	Kong et al. (2018)
16	Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research	Manasi; Anagha (2018)
17	Journal of Product and Brand Management	Legendre; Coderre (2018)
18	Materials	Li; Zhao; Wang (2019)
19	The TQM Journal	Costa (2019)
20	Indian Journal of Pharmaceutical Education and Research	Deshmukhet al. (2020)
21	Review of International Business and Strategy	Nazarie; Williams (2021)
22	Pharmacia	Golembiovska et al. (2021)
23	International Journal of Advanced Manufacturing Technology	Rahman et al. (2021)
24	Energy and Buildings	Jankovic; Chaudhary; Goia (2021)

Fonte: Elaboração própria (2021).

Nota-se, portanto, uma heterogeneidade nos meios utilizados para publicação dos trabalhos. É possível observar que o planejamento fatorial foi empregado como técnica

estatística para diferentes aplicações. Além disso, o artigo mais antigo foi publicado por Hahn (1984) e as publicações mais recentes são os trabalhos de Nazarie; Williams (2021), Golembiovskia et al. (2021), Rahman et al. (2021) e Janvic; Chaudhary; Goia (2021).

Ainda, a Tabela 9 sistematiza, igualmente de maneira cronológica, os tipos de planos experimentais utilizados por cada aplicação.

Tabela 9 - Tipos de planos experimentais empregados pelos artigos selecionados

#	Autor/ano	Plano experimental
1	Hahn (1984)	Explicação teórica - fornece diretrizes básicas para o <i>DoE</i>
2	Box; Bisgaard; Fung (1988)	Experimentos fatoriais gerais $2^k$
3	Costa; Pires; Ribeiro (2006)	Experimento fatorial fracionado ( $2^{7-4} \times 2^{5-2}$ )
4	Tanco; Costa; Viles (2009)	Experimento fatorial $2^3$ completo
5	Mathivanan; Parthasarathy (2008)	Experimento fatorial $2^4$ completo
6	Van De Ven et al. (2011)	Experimento fatorial $3^2$ completo
7	Hoef (2012)	Experimento fatorial misto $2 \times 3$
8	Sharafi et al. (2012)	Experimento fatorial fracionado $5^3$
9	Mitra et al. (2016)	Experimento fatorial fracionado $2^2$
10	De França; Travassos (2016)	Experimento fatorial $2^3$ completo
11	Zhang et al. (2017)	Experimento fatorial $2^3$ completo com um ponto central
12	Wani; Patil (2017)	Experimento fatorial $2^4$ completo
13	Gigovska et al. (2018)	Experimento fatorial $2^4$ completo
14	Reinsch et al. (2018)	Experimento fatorial $2^9$ replicado
15	Kong et al. (2018)	Experimento fatorial $2^2$ fracionado com blocos
16	Manasi; Anagha (2018)	Experimento fatorial $2^2$ completo
17	Legendre; Coderre (2018)	Experimento fatorial $2 \times 2$ entre grupos
18	Li; Zhao; Wang (2019)	Experimento fatorial $3^2$ completo
19	Costa (2019)	Explicação teórica - orientações para reduzir obstáculos em aplicações de <i>DoE</i>
20	Deshmukhet al. (2020)	Experimento fatorial $3^3$ <i>Box-Behnken</i>
21	Nazarie; Williams (2021)	Experimento fatorial $2 \times 2$
22	Golembiovskia et al. (2021)	Experimento fatorial fracionado $2^{4-1}$
23	Rahman et al. (2021)	Experimento fatorial $3^3$ completo
24	Jankovic; Chaudhary; Goia (2021)	Experimento fatorial $3^2$ completo

Fonte: Elaboração própria (2021).

Os trabalhos de Hahn (1984), Costa; Pires; Ribeiro (2006), Tanco; Costa; Viles (2009) e Costa (2019) foram os trabalhos que tiveram preocupação em apresentar as diretrizes básicas a serem seguidas ao se desenvolver um experimento planejado. Segundo

Hanh (1984) ao se projetar um experimento, o foco não deve estar apenas em definir o número de variáveis experimentais e os níveis de cada uma. Para se planejar adequadamente um experimento, o autor explica algumas diretrizes elementares: definir, dentre outros aspectos, os objetivos e a configuração do experimento, as variáveis a serem mantidas constantes, as variáveis não controláveis, as variáveis de resposta e como serão medidas, os procedimentos para executar um teste, a complexidade prevista do relacionamento entre as variáveis experimentais e as variáveis de resposta e quaisquer interações antecipadas.

Os autores Costa; Pires; Ribeiro (2006) direcionaram seu foco na aplicação de *DoE* usando equipamentos industriais, reforçando a ideia de que aspectos não estatísticos no planejamento e na condução de experimentos são tão importantes quanto o projeto e a análise formais. Além disso, o estudo apresenta diretrizes para planejamento, condução e análise de experimentos envolvendo aspectos técnicos e organizacionais.

Segundo Tanco; Costa; Viles (2009) a escolha do projeto experimental (matriz experimental) é uma questão crítica na aplicação *DoE*, e os profissionais, especialmente os pesquisadores novatos de *DoE*, podem ter dificuldade em selecionar um plano experimental apropriado. Para os autores, não é incomum que pesquisadores novatos usem de forma equivocada os projetos de experimentos para objetivos experimentais inadequados. Adicionalmente, é provável que a seleção de um projeto experimental inadequado comprometa os resultados do experimento.

A maioria dos programas de software para *DoE* disponíveis comercialmente contém catálogos úteis de tipos de planos experimentais padrão apresentados em uma sequência lógica. Eles permitem a seleção de vários tipos de planos, o que pode confundir os profissionais e levar a uma seleção inadequada. Dessa forma, apenas aqueles que estão familiarizados e experientes com os programas de software *DoE*, e têm o conhecimento técnico necessário é quem podem escolher o design apropriado (TANCO; COSTA; VILES 2009).

Assim, Tanco; Costa; Viles (2009) elencaram as diretrizes para auxiliar na seleção do plano experimental, conforme demonstrado na Tabela 10. Os pontos 1 a 5 relacionam-se à seleção do tipo de projeto experimental. O ponto chave 6 é útil na seleção do tipo de projeto e na definição da matriz experimental, e os demais pontos (7 a 11) estabelecem a matriz experimental a ser realizada.

Tabela 10- Principais considerações acerca da seleção do plano experimental

#	Pontos-chaves a serem considerados na seleção do plano
1	Importância da fase pré-experimental
2	Declarar o propósito experimental
3	Realizar a experimentação como uma atividade sequencial
4	Considerar de recursos e orçamento
5	Considerar de restrições relacionadas ao fator
6	Utilizar de conhecimentos prévios
7	Escolher de estratégias para fatores difíceis
8	Experimentos com pontos centrais
9	Priorizar aleatorizar o experimento
10	Considerar de replicação
11	Estabelecer os valores dos níveis

Fonte: Elaboração própria (2021).

Além disso, o trabalho de Costa (2019) fornece um conjunto de recomendações para mitigar os obstáculos *DoE* e evitar erros comuns ou decisões erradas nas fases de planejamento, execução e análise de dados. A pressão para mostrar resultados rapidamente, a complexidade dos processos ou produtos e outras questões estatísticas e não estatísticas podem dificultar ou minimizar as chances de obter sucesso com o uso do *DoE*. Dessa forma, os experimentos computacionais estão se tornando substitutos cada vez mais comuns para os experimentos físicos, pois possibilitam resolver problemas complexos de maneira econômica, segura e oportuna; mas uma definição e compreensão claras dos problemas relacionados ao experimento continuarão a ser o ponto central para a realização de experimentos bem-sucedidos.

Nesse cenário, o presente trabalho identificou a oportunidade de desenvolver um guia ilustrativo que permita que o pesquisador do planejamento experimental tenha mais facilidade na escolha do tipo de plano experimental mais adequado ao seu problema.

#### 4.2 PROCEDIMENTO GUIA PARA O PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento desenvolvido para alcançar os objetivos do presente estudo consistiu em um guia desenvolvido para auxiliar o pesquisador na seleção dos diversos aspectos importantes e que devem ser considerados no planejamento experimental. Inicialmente, é necessário desenvolver a etapa de planejamento do experimento. Nessa

etapa, primeiramente procede-se ao reconhecimento e à definição do problema. Segundo Montgomery (2013) apesar desse ponto ser bastante óbvio, na prática muitas vezes não é simples perceber que existe um problema que requer experimentação, ou mesmo não é simples desenvolver uma declaração clara desse problema. Assim, é fundamental definir claramente o problema que será estudado.

Buscou-se também detalhar quais são os componentes básicos presentes em um experimento. Esses componentes são os fatores, os níveis e as respostas.

A resposta é a característica de interesse do estudo, isto é, é a variável dependente, observada ou mensurada no experimento. Na seleção da característica de interesse, o pesquisador deve se certificar de que a variável selecionada fornecerá informações úteis para o estudo. A seleção de mais de uma resposta (respostas múltiplas) não é incomum na literatura.

Na definição dos fatores, é preciso identificar quais são as variáveis que podem exercer alguma influência em relação à variável resposta. A seleção dessas variáveis consiste nos fatores do experimento, que são classificados em fixos ou aleatórios e em cruzados ou hierárquicos. Se os fatores forem selecionados pelo próprio pesquisador, então são fatores fixos. Caso contrário, são fatores aleatórios, isto é, os fatores serão determinados aleatoriamente no experimento. Além disso, é necessário planejar se os níveis de cada fator serão definidos por meio de combinação com os níveis de outro fator. Nesse caso, os fatores serão cruzados, e o tipo de planejamento fatorial que adotado nessa situação é o planejamento fatorial geral completo. Todavia, se os níveis de um fator estão aninhados aos níveis de outro fator, diz-se que esses fatores são hierárquicos, e o plano experimental utilizada nesse caso é o planejamento hierárquico. Importante destacar que as etapas de definição das respostas, fatores e níveis não seguem de forma rígida uma ordenação, pois tais etapas podem ser feitas em ordem contrária ou mesmo simultaneamente.

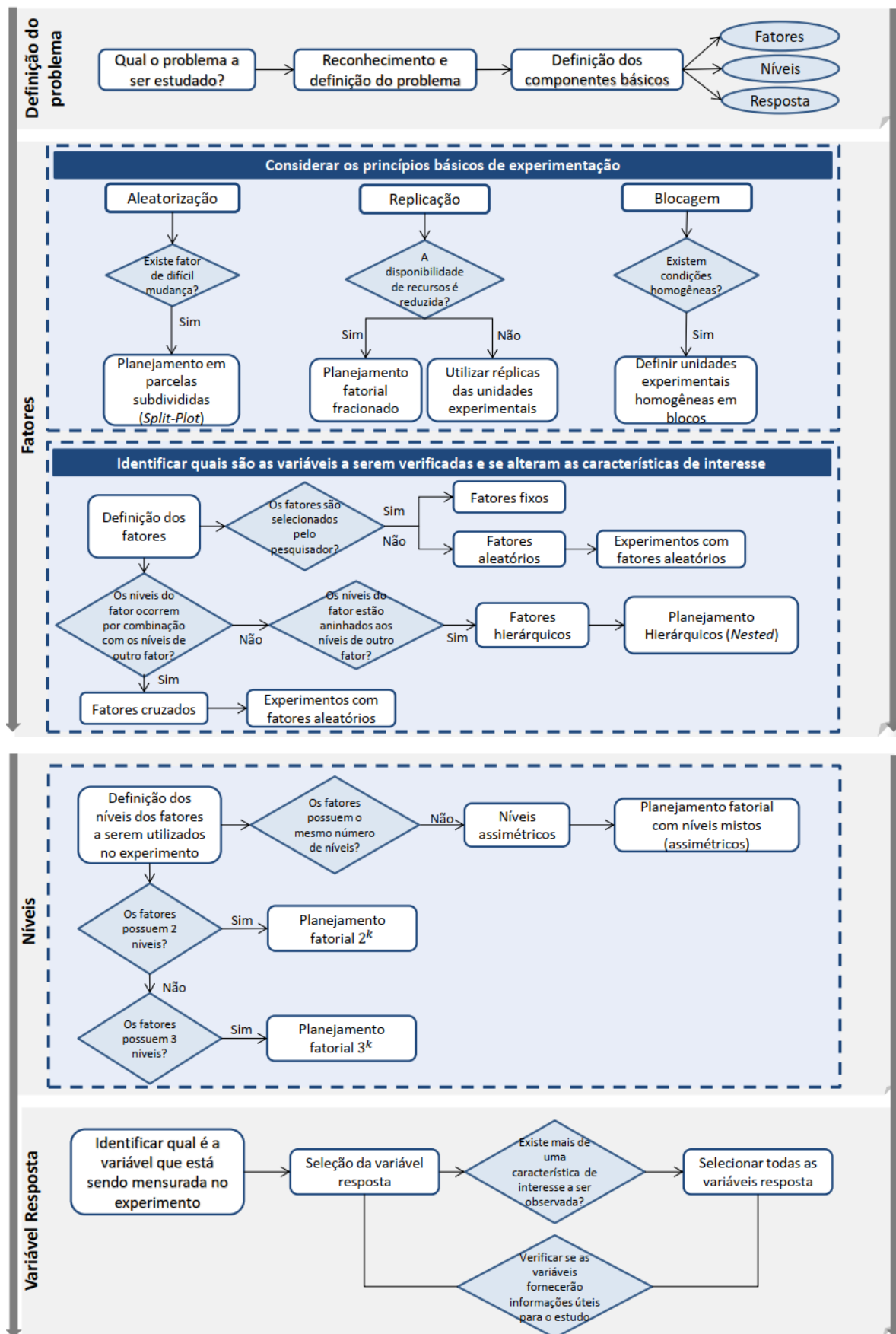
Além disso, foi fundamental também incluir no guia o detalhamento dos princípios básicos de experimentação (aleatorização, replicação e blocagem). Em relação à aleatorização, deve-se avaliar se algum fator de difícil mudança, ou seja, que seja difícil realizar a aleatorização. Para essa situação, deve-se empregar o planejamento em parcelas subdivididas, também denominado *Split-Plot*. Para a replicação, deve-se avaliar a disponibilidade de recursos para o desenvolvimento do experimento em questão. Se não há racionamento de recursos, o ideal é utilizar réplicas das unidades experimentais. Então, deve-se proceder o experimento de forma replicada. Mas se há racionamento de recursos,

deve-se adotar o planejamento fatorial fracionado. Na blocagem, avalia-se se há condições homogêneas para serem agrupadas em blocos, assim, devem-se definir as unidades experimentais homogêneas em blocos.

Os níveis são os valores que cada fator assumirá no experimento. Durante o planejamento experimental, devem-se definir quais são os níveis de cada fator. Assim, é preciso classificá-los em simétricos ou assimétricos. Se os fatores possuírem o mesmo número de níveis, diz-se que os níveis são simétricos. Para experimentos cujos fatores possuam dois níveis, utiliza-se o planejamento experimental  $2^k$ ; para experimentos cujos fatores possuam três níveis, adota-se o planejamento experimental  $3^k$ . Para experimentos nos quais os fatores não possuam o mesmo número de níveis, recomenda-se o uso de planejamentos experimentais mistos (assimétricos).

O conjunto de todas essas considerações acerca do planejamento experimental foi aplicado para desenvolver o guia para o planejamento experimental, conforme demonstrado na Figura 2. Com o auxílio do guia, busca-se contribuir para que pesquisadores de diversas áreas do conhecimento, que tenham ou não experiência com a experimentação, possam planejar experimentos de forma orientada e, assim, possam obter informações coerentes para a tomada de decisão.

Figura 2 – Guia para o Planejamento Experimental



Fonte: Elaboração própria (2021)

## CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral do presente trabalho foi desenvolver um procedimento para guiar o planejamento experimental. A necessidade do desenvolvimento de tal ferramenta surgiu por conta da grande relevância do planejamento de experimentos como uma das ferramentas mais utilizadas para o desenvolvimento e otimização de processos e qualidade de produtos para inúmeras áreas de conhecimento. Ademais, sabe-se que quando as informações de experimentos são analisadas estatisticamente, é possível garantir que a variabilidade que decorre do próprio processo de produção e do ambiente do pesquisador será considerada.

Porém, o uso adequado dessa técnica estatística exige conhecimento por parte de pesquisadores e gestores, e é com um planejamento adequado que é possível obter redução da variabilidade, processos mais aprimorados, redução do tempo de análise e de custos envolvidos durante o experimento. Nesse contexto, o guia para o planejamento experimental desenvolvido no presente estudo ganha bastante relevância, pois permite orientar os pesquisadores sobre todas as etapas iniciais que devem ser consideradas em um experimento de modo que permita que o pesquisador do planejamento experimental tenha mais facilidade na escolha do tipo de plano experimental mais adequado ao seu problema.

Para isso, buscou-se na literatura os estudos que buscaram descrever diretrizes ou recomendações com o intuito de auxiliar os pesquisadores no campo da experimentação. A partir do conjunto de informações estudadas, desenvolveu-se um guia ilustrativo, contendo o detalhamento das principais considerações a serem observadas durante um experimento, tais como definição dos componentes básicos, aplicação dos princípios básicos de experimentação e descrição das etapas a fim de tornar o guia o mais claro possível.

Além disso, a partir da compreensão da área de estudo de experimentação fatorial na literatura acadêmica construiu-se a sistematização dos trabalhos encontrados durante a pesquisa. Observou-se que a escolha do plano experimental é uma questão crítica na aplicação *DoE* e que os pesquisadores podem ter dificuldade em selecionar um plano experimental apropriado. Adicionalmente, não é incomum o uso equivocado de projetos experimentais, e a eficiência dos resultados está diretamente ligada à seleção do plano experimental. Outra dificuldade detectada consiste nas listas de planos experimentais disponíveis na maioria dos softwares para o *DoE*, que podem confundir os profissionais sem experiência com a área e levar a uma seleção inadequada.

Portanto, espera-se que o guia para o *DoE* possa apoiar pesquisadores de diversas áreas de estudo a obterem um direcionamento adequado no uso do planejamento de experimentos e também simplificar o uso da técnica para pesquisadores que não possuem expertise com a experimentação.

## REFERÊNCIAS

- AMBROŻY-DERĘGOWSKA, K.; MEJZA, I.; MEJZA, S. **On the relative efficiency of split-split-plot design to split-plot  $\times$  split-block design** *Colloquium Biometricum*. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/ec65/53f3bbd2306d061c4cbffc1f0bf40b779e63.pdf>>. Acesso em: 23 set. 2021.
- BOX, G.; BISGAARD, S.; FUNG, C. An explanation and critique of taguchi's contributions to quality engineering. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 4, n. 2, p. 123–131, abr. 1988.
- BOX, G. E. P.; HUNTER, J. S.; HUNTER, W. G. **Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery**. 2. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- BOX, G. E. P.; JONES, S. Split-Plot Designs for Robust Product Experimentation. **Journal of Applied Statistics**, v. 19, n. 1, p. 3–26, 1992.
- BOX, G. E. P.; WILSON, K. B. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. p. 270–310, 1951.
- COSTA, N. Design of experiments – overcome hindrances and bad practices. **TQM Journal**, v. 31, n. 5, p. 772–789, 27 set. 2019.
- COSTA, N. R. P.; PIRES, A. R.; RIBEIRO, C. O. Guidelines to help practitioners of design of experiments. **TQM Magazine**, v. 18, n. 4, p. 386–399, 2006.
- DE FRANÇA, B. B. N.; TRAVASSOS, G. H. Experimentation with dynamic simulation models in software engineering: planning and reporting guidelines. **Empirical Software Engineering**, v. 21, n. 3, p. 1302–1345, 2016.
- DESHMUKH, S. A. et al. Application of Design of Experiment Based Innovative Approach in Method Development and Validation of RP-HPLC for Estimation of Azilsartan in Bulk and Pharmaceutical Tablet Dosage Form. **Indian Journal of Pharmaceutical Education and Research**, v. 54, n. 3s, p. s657–s666, 1 jul. 2020.
- GIGOVSKA, M. et al. Comprehensive Assessment of Degradation Behavior of Simvastatin by UHPLC/MS Method, Employing Experimental Design Methodology. **International Journal of Analytical Chemistry**, v. 2018, 2018.
- GOLEMBIOVSKA, O. et al. Quality by design approach for simultaneous determination of original active pharmaceutical ingredient quinabut and its impurities by using HPLC. Message 1. **Pharmacia**, v. 68(1), n. 1, p. 79, 2021.
- GOMEZ, K. A.; GOMEZ, A. A. **Statistical procedures for agricultural research**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1984.
- HAHN, G. J. Experimental design in the complex world. **Technometrics**, v. 26, n. 1, p. 19–31, 1984.
- HOEF, J. M. Practical considerations for experimental designs of spatially autocorrelated data using computer intensive methods. **Statistical Methodology**, v. 9, n. 1–2, p. 172–184,

jan. 2012.

JANKOVIC, A.; CHAUDHARY, G.; GOIA, F. Designing the design of experiments (DOE) – An investigation on the influence of different factorial designs on the characterization of complex systems. **Energy and Buildings**, v. 250, p. 111298, 1 nov. 2021.

JONES, B.; NACHTSHEIM, C. J. Split-Plot Designs: What, Why, and How. **Journal of Quality Technology**, v. 41, n. 4, p. 340–361, 21 out. 2009.

KIEFER, J.; WOLFOWITZ, J. Optimum Designs in Regression Problems. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177706252>, v. 30, n. 2, p. 271–294, 1 jun. 1959.

KONG, X. et al. Characterization and Modeling of Catalyst-free Carbon-Assisted Synthesis of ZnO Nanowires. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 32, p. 438–444, 1 abr. 2018.

KUEHL, R. O. **Design of Experiments: Statistical Principles of Research Design and Analysis**. 2. ed. Belmont, California: Cengage Learning, 2000.

LEGENDRE, S.; CODERRE, F. The impact of altruistic attribution and brand equity in food label campaigns. **Journal of Product and Brand Management**, v. 27, n. 6, p. 634–646, 4 dez. 2018.

LI, P.; ZHAO, Y.; WANG, L. Research on erosion-corrosion rate of 304 stainless steel in acidic slurry via experimental design method. **Materials**, v. 12, n. 14, 1 jul. 2019.

MANASI, B. K.; ANAGHA, M. J. An experimental design approach for optimization of modified colorimetric first-order derivative method for estimation of serralyisin in bulk and pharmaceutical formulation. **Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research**, v. 11, n. 9, p. 293–300, 1 set. 2018.

MATHIVANAN, D.; PARTHASARATHY, N. S. Prediction of sink depths using nonlinear modeling of injection molding variables. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 2008 **43:7**, v. 43, n. 7, p. 654–663, 19 set. 2008.

MITRA, V. et al. Identification of Analytical Factors Affecting Complex Proteomics Profiles Acquired in a Factorial Design Study with Analysis of Variance: Simultaneous Component Analysis. **Analytical Chemistry**, v. 88, n. 8, p. 4229–4238, 3 maio 2016.

MOEN, R. D.; NOLAN, T. W.; PROVOST, L. P. **Quality Improvement Through Planned Experimentation**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1999.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 8. ed. New York: John Wiley & Sons, 2013.

NAZARIE, W. N. F. W. M.; WILLIAMS, R. **Linguistic style and gender match in funding intention towards crowdfunding project**. Disponível em: <<https://en.x-mol.com/paper/article/1407797824078688256>>. Acesso em: 16 nov. 2021.

OZBAY, N.; YARGIC, A. S. Statistical analysis of Cu(II) and Co(II) sorption by apple pulp carbon using factorial design approach. **Journal of Industrial and Engineering**

**Chemistry**, v. 57, p. 275–283, 25 jan. 2018.

RAHMAN, T. T. et al. Analysis of the operating conditions of pulse electric field–assisted EHD for sodium alginate printing using design of experiment approach. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 115, n. 7–8, p. 2037–2047, 1 ago. 2021.

RAPSOMANLKLS, S.; WEBER, J. H. Environmental Implications of Methylation of Tin(II) and Methyltin(IV) Ions in the Presence of Manganese Dioxide. **Environmental Science and Technology**, v. 19, p. 352–356, 1985.

REINSCH, T. et al. Renovation and conversion of permanent grass-clover swards to pasture or crops: Effects on annual N<sub>2</sub>O emissions in the year after ploughing. **undefined**, v. 175, p. 119–129, 1 jan. 2018.

SHARAFI, S. et al. **Comparison of full and fractional factorial designs in some agricultural experiments based on TAGUCHI method**. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/287267257\\_Comparison\\_of\\_full\\_and\\_fractional\\_factorial\\_designs\\_in\\_some\\_agricultural\\_experiments\\_based\\_on\\_TAGUCHI\\_method](https://www.researchgate.net/publication/287267257_Comparison_of_full_and_fractional_factorial_designs_in_some_agricultural_experiments_based_on_TAGUCHI_method)>. Acesso em: 15 nov. 2021.

SILVA, A. S. et al. Incorporação de resíduos de borracha em compósitos de matriz polimérica termorrígida. **Revista Materia**, v. 17, n. 4, p. 1158–1165, 2012.

TANCO, M.; COSTA, N.; VILES, E. Experimental design selection: Guidelines for practitioners. **International Journal of Productivity and Quality Management**, v. 4, n. 3, p. 283–302, 2009.

VAN DE VEN, P. et al. A framework for efficient process development using optimal experimental designs. **Journal of Pharmaceutical Innovation**, v. 6, n. 1, p. 24–31, abr. 2011.

WANI, Y. B.; PATIL, D. D. An experimental design approach for optimization of spectrophotometric method for estimation of cefixime trihydrate using ninhydrin as derivatizing reagent in bulk and pharmaceutical formulation. **Journal of Saudi Chemical Society**, v. 21, p. S101–S111, 1 jan. 2017.

WU, C. F. J.; HAMADA, M. S. **Experiments: Planning, Analysis, and Optimization**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2009.

ZHANG, Q. et al. Predictive temperature modeling and experimental investigation of ultrasonic vibration-assisted pelleting of wheat straw. **Applied Energy**, v. 205, p. 511–528, 1 nov. 2017.