

**Universidade Estadual de Maringá**  
**Centro de Tecnologia**  
**Departamento de Engenharia de Produção**

**Aplicação da Técnica de Planejamento de Experimentos no  
Processo de Tratamento Térmico do Fio de Garrafas PET**

*Ageu de Araújo Machado*

**Maringá - Paraná**  
**Brasil**

Universidade Estadual de Maringá  
Centro de Tecnologia  
Departamento de Engenharia de Produção

**Aplicação da Técnica de Planejamento de Experimentos no  
Processo de Tratamento Térmico do Fio de Garrafas PET**

**Ageu de Araújo Machado**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia de Produção, do Centro de Tecnologia, da Universidade Estadual de Maringá.  
Orientador (a): Prof<sup>o</sup>. Edwin Vladimir Cardoza Galdamez

**Maringá - Paraná**  
2016

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por estar comigo em cada momento desta jornada, e tornado este momento muito maior e melhor do que havia imaginado. A Ti sou eternamente grato

Agradeço aos meus pais Adelina e Aristides e meus irmãos Felipe, Sara e Elizeu por me apoiarem em todo os momentos desta caminhada. Agradeço também a minha tia Alice e família por fazer parte da minha vida. Não tenho palavras para agradecer vocês.

Aos amigos que fiz em Maringá: Matheus, Evelyn, Tuany, Felipe e André que estiveram juntos comigo dividindo os momentos da faculdade, e também ao grupo *Stemos* e as turmas 31 de 2011/2015 e 2012/2016 que fez parte do meu dia a dia, nestes últimos anos.

Aos membros do GPEQ – Grupo de Pesquisa em Engenharia da Qualidade: Evelyn, Juliana, Gustavo, Carlos e Salete e os professores orientadores Edwin e Syntia, pelo conhecimento compartilhado e o grande aprendizado de trabalhar com vocês.

Ao meu orientador Dr. Prof. Edwin por partilhar comigo seu conhecimento desde o primeiro ano de faculdade e também pelas conversas e orientações relevantes.

Agradeço a empresa Nova Atitude e a equipe de colaboradores por dispor o tempo em realizar os projetos de estudo. E também a equipe da BSBIOS onde foi realizado o estágio e ter contribuído grandemente na aquisição de conhecimento e experiência.

Às pessoas que conheci e de alguma forma contribuíram com este momento, a todos fica o meu muito obrigado!

## RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso apresenta um estudo da aplicação das técnicas estatísticas de planejamento de experimento para análise dos parâmetros de operação de um forno industrial no processo de tratamento térmico de fios de garrafas de Polietileno Tereftalato (PET). O foco do estudo está em avaliar novas formas de operação do forno que a empresa utiliza no processo de transformação. Para isto foi realizada uma revisão de literatura sobre qualidade e planejamento de experimento em processo de transformação, conduzida por método bibliométrico, que auxiliou no entendimento e compreensão do tema. Com a conceituação da técnica formada e o processo produtivo da empresa entendido por todos os envolvidos no experimento, preocupou-se inicialmente em levantar quais eram as variáveis ou fatores que apresentavam interferência no desempenho do forno industrial. Com a determinação dos principais fatores de influência, utilizou o experimento fatorial 2k completo para 3 fatores de controle para analisar o comportamento destas variáveis e suas relações na variável de resposta determinada para o processo estudado. Os resultados apresentados neste trabalho fornecem a empresa um maior conhecimento sobre a operação do equipamento assim como identifica oportunidades de melhorias no processo produtivo. As técnicas estatísticas de qualidade aplicadas no processo, nem sempre são acessíveis as empresas de pequeno porte, e a elaboração deste trabalho torna-se uma oportunidade para colaborar com o desenvolvimento deste sistema organizacional, que apesar de simples, contribuem para o crescimento econômico do país.

**Palavras chaves:** Planejamento de Experimento; Tratamento Térmico; Polietileno Tereftalato (PET).

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>iii</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>iv</b>
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE QUADROS.....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTAS DE TABELAS.....</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>xi</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1 Justificativa do projeto.....	13
1.2 Delimitação do Problema .....	14
1.3 Objetivos.....	15
1.3.1 Objetivo Geral .....	15
1.3.2 Objetivo específico .....	15
1.4 Método de pesquisa .....	15
1.5 Estrutura do Trabalho .....	17
<b>2 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA .....</b>	<b>18</b>
2.1 Visão geral.....	18
2.2 Elaboração da Revisão Bibliométrica.....	18
2.3 Seleção do Portfólio Bibliográfico .....	19
2.3.1 Definição das Palavras-Chave:.....	20
2.3.2 Definição da Base de Dados;.....	20
2.3.3 Busca dos Artigos .....	20
2.3.4 Filtragem do Banco de Artigos Brutos .....	21
2.4 Análise Bibliométrica .....	22
2.4.1 Análise bibliométrica dos trabalhos selecionados .....	22
2.4.2 Classificação dos trabalhos conforme relevância acadêmica .....	24
2.5 Considerações do Capítulo .....	27
<b>3 TÉCNICAS DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS .....</b>	<b>28</b>
3.1 Abordagens iniciais ao Planejamento de Experimentos.....	29
3.2 Aplicabilidade do Planejamento de Experimentos .....	33
3.3 Princípios Básicos de um Planejamento de Experimentos .....	34
3.4 Diretrizes para o Planejamento de Experimentos.....	35
3.5 Técnicas de Planejamento de Experimentos .....	36

3.5.1	Planejamento Fatorial .....	36
3.5.2	Planejamento Fatorial com Dois Fatores .....	37
3.5.3	Planejamento Fatorial $2^k$ .....	41
3.5.4	Planejamento Fatorial Fracionário $2^{k-p}$ .....	44
3.6	Indicadores de Desempenho .....	45
<b>4</b>	<b>EXPERIMENTO INDUSTRIAL .....</b>	<b>47</b>
4.1	Empresa estudada .....	47
4.2	Processo produtivo .....	47
4.2.1	Desenrolar dos fios na tela .....	49
4.2.2	Tratamento térmico .....	50
4.3	Objeto de estudo .....	51
4.4	Planejamento do experimento .....	54
4.4.1	Estudo e seleção dos fatores de controle .....	54
4.4.2	Parâmetros do processo .....	58
4.4.3	Influência dos fatores de controle sobre a qualidade do produto .....	59
4.4.4	Determinação das variáveis de respostas .....	62
4.5	Execução do Planejamento Experimental .....	63
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DE RESULTADOS .....</b>	<b>66</b>
5.1	Análise de Resultados para Deformação .....	67
5.2	Análise de resultados para Flexibilidade .....	69
5.3	Análise Geral do Experimento .....	70
5.4	Mensuração do desempenho do Planejamento de Experimentos .....	74
5.5	Avaliação do Produto Final .....	75
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>77</b>
6.1	Contribuições .....	77
6.2	Limitações do trabalho .....	78
6.3	Trabalhos Futuros .....	78
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>79</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>82</b>
	APÊNDICE A .....	82
	APÊNDICE B .....	89
	APÊNDICE C .....	90

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Metodologia da Pesquisa.....	16
Figura 2 – Etapas da metodologia ProKnow-C aplicada ao trabalho.....	18
Figura 3 - Seleção do Banco de Dados.....	19
Figura 4 - Número de trabalhos selecionados referente aos últimos 15 anos.....	23
Figura 5 - Diagrama de Pareto do banco de artigos final .....	23
Figura 6 - Composição dos trabalhos .....	24
Figura 7 - Quantidade de trabalhos por Journal (Revista).....	25
Figura 8 - Classificação dos Journals (Revista) pelos critérios do portal da Qualis .....	26
Figura 9 - Países de publicação dos trabalhos exceto de revista .....	26
Figura 10 – Gráfico da quantidade de artigos por universidade identificada.....	27
Figura 11 - Abordagens ativas e passivas da qualidade .....	29
Figura 12 - Variáveis atuantes no objeto de estudo.....	30
Figura 13 - Vassoura que compõe o portfólio de produção e comercialização da empresa.....	48
Figura 14 - Fluxograma do processo produtivo da empresa Nova Atitude.....	48
Figura 15 - Procedimento de desenrolar fio .....	49
Figura 16 - Tela de ferro utilizada para o tratamento térmico.....	49
Figura 17 – Sequência do processo tratamento térmicos dos fios.....	50
Figura 18 - Modo de operação da tela .....	51
Figura 19 - Desenho do forno responsável pelo tratamento término do fio de PET .....	52
Figura 20 - Esquema da pedra refratária do forno.....	53
Figura 21 - Modificações na estrutura interna do forno .....	53
Figura 22 - Diagrama de Causa e Efeito da baixa eficiência do forno.....	55
Figura 23 - Massa da matéria prima total por tipo de tela.....	56
Figura 24 - Quantidade de tela total por tipo de tela .....	56
Figura 25 - Histograma da massa de fios nas telas separada por turnos .....	57

Figura 26 - Processo adotado para realizar a experimentação.....	58
Figura 27 - Exemplo de fios que excederam no processo de cristalização .....	61
Figura 28 - Distribuição de temperatura em tela com baixa quantidade de fios .....	61
Figura 29 - Distribuição de temperatura em tela com alta quantidade de fios .....	62
Figura 30 - Escala numérica dos atributos de qualidade .....	62
Figura 31 - Gráfico normal dos efeitos padronizados – deformação .....	68
Figura 32 - Gráfico de probabilidade normal versus resíduos – deformação.....	68
Figura 33 - Gráfico normal dos efeitos – flexibilidade .....	70
Figura 34 - gráfico de probabilidade normal versus resíduos – flexibilidade .....	70
Figura 35 - Gráficos de interação para Flexibilidade (a) e Deformação (b).....	71
Figura 36 - Gráficos de efeitos principais para Flexibilidade (a) e Deformação (b).....	71
Figura 37 - Gráficos de contorno para as respostas em função dos fatores.....	73



**LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Combinação de um planejamento  $2^2$  ..... 37

Quadro 2 – Combinação de um planejamento  $2^3$  ..... 42

**LISTAS DE TABELAS**

Tabela 1 - Informações de busca e a relação do retorno da pesquisa .....	21
Tabela 2 - Arranjo geral de um experimento fatorial de 2 fatores .....	38
Tabela 3 - Análise de variância para Planejamento Fatorial $2^2$ .....	39
Tabela 4 - Matriz de planejamento para um experimento $2^3$ .....	42
Tabela 5 - Tabela de ANOVA para experimento fatorial $2^k$ .....	43
Tabela 6 - Principais atributos e significados da medição de desempenho .....	46
Tabela 7 - Dimensionamento do forno utilizado na indústria .....	52
Tabela 8 - Fatores de Controle e seus respectivos níveis .....	58
Tabela 9 - Matriz de planejamentos e dados do experimento .....	63
Tabela 10 - Resultados do experimento .....	66
Tabela 11 - Estimativa de efeitos e coeficiente na deformação .....	67
Tabela 12 – Análise de variância (ANOVA) - deformação .....	67
Tabela 13 - Estimativa de efeitos e coeficientes na Flexibilidade.....	69
Tabela 14 - Análise de variância (ANOVA) - Flexibilidade.....	69
Tabela 15 - Otimização das respostas.....	72
Tabela 16 - Parametrização do processo de tratamento térmico .....	74
Tabela 17 - Mensuração de Desempenho do Planejamento .....	75
Tabela 18 - Avaliação do Produto Final.....	76

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

SP	Sistema de Produção
PET	Poli(etileno) Tereftalato
DoE	Design of Experiment
ANOVA	Análise de Variância
SS	<i>Sum of Square</i>
SQ	Soma dos Quadrados
QM	Quadrados Médios
DEP	Departamento de Engenharia de Produção
UEM	Universidade Estadual de Maringá
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
kW	<i>Kilo Watts</i>

## 1 INTRODUÇÃO

O desempenho de uma empresa pode ser influenciado por fatores sociais, econômicos, humanos, tecnológicos, ambientais e outros. Todos os comportamentos internos e externos são cruciais para o desempenho de uma organização e o sucesso diante do mercado. As ações tomadas são importantes, caso as organizações não estejam estruturadas para as suas consequências, a cadeia de negócio pode sofrer um impacto significativo.

A realização de melhorias internas ou em casos mais avançados aplicar uma reengenharia organizacional, não são trabalhos fáceis de executar. Contudo são cada vez mais necessários, para manter uma empresa competitiva no mercado. Quando a empresa se encarrega de disponibilizar um responsável para observar com um olhar crítico suas atividades operacionais, administrativas, comerciais, financeira e outras áreas de atuação dependendo do ramo do negócio, podem ser identificados diversos pontos de melhorias além de gerar oportunidades de operar os processos de forma efetiva.

Fernandes e Godinho (2010) destacam importantes definições de um sistema de produção (SP) eficaz, eficiente e efetivo que pode ser estendido para as outras áreas de uma empresa. Segundo a visão dos autores um SP é eficaz, quando é capaz de atingir os objetivos proposto; eficiente quando usa os recursos disponíveis da melhor forma possível e um SP é efetivo quando apresenta a combinação entre eficácia e eficiência de forma simultânea.

As empresas têm um grande desafio a encarar, trabalhar com a definição de eficiência e eficácia em seus processos de negócio com o foco de otimizar os consumos dos recursos. Para manter ou melhorar a qualidade do produto, técnicas podem ser utilizadas para identificar desperdícios e otimizar os recursos internos, sem grandes investimentos financeiros. Contudo se torna importante a disponibilização por parte da empresa de um profissional que tenha a capacidade de identificar pontos de ação e encontrar ferramentas e técnicas para obter e interpretar os resultados e em seguida aplicar um plano de ação.

Direcionando o foco para o processo produtivo e para empresa de transformação, como indústria por exemplo, na maioria dos casos, a formação do produto dentro de uma linha de produção ocorre por auxílio de equipamentos. Estes equipamentos podem ser projetados para atender o processo ou adquiridos para compor a estrutura da empresa. As máquinas e também os procedimentos estão sujeitados a diversas alterações, na qual podem atuar de forma direta ou indiretamente no resultado da operação final, e saber o modo que cada equipamento opera

ou o procedimento é realizado, é muito importante para o controle de qualidade do processo produtivo.

Diante do contexto, as técnicas de Planejamento de Experimento podem atuar como uma chave para problemas internos ou em outros casos, encontrar novas formas de obter o produto com a qualidade estabelecida, diante de uma nova análise da forma que o processo é operado.

O Planejamento de Experimentos é uma ferramenta estatística, na qual são realizados experimentos com base nas alterações de entrada de um determinado processo e analisado os efeitos na saída, e os resultados desta análise leva a melhoria do produto ou do processo (MACH & BARTO, 2010; AL-GHANDI, 2013; ANGRISANI *et al* 2011 e MONTGOMERY, 2013).

De acordo com Mach & Barto (2010) as técnicas de planejamento de experimentos são usadas no desenvolvimento ou na solução de problemas do processo, para melhorar o desempenho do processo. E neste trabalho está estruturado o estudo e aplicação desta técnica para levantar oportunidade de mudança no processo produtivo, com foco em aumentar a eficiência de operação.

## **1.1 Justificativa do projeto**

O processo de tratamento térmico da empresa é caracterizado pela adaptação de um forno industrial para o processo produtivo. Como consequência a forma de operação do equipamento apresenta a possibilidade de ser utilizado de forma mais eficiente. Nesta etapa de transição da qualidade, que a empresa determina, para o produto final, o processo produtivo tem uma oportunidade de otimização na forma de operação.

Diante de estudos anteriores, conforme o trabalho realizado por Curce (2015) pode-se perceber que o equipamento utilizado para a atividade de tratamento térmico caracterizava-se como um ponto crítico do processo produtivo, e técnicas com abordagens empíricas com base em técnicas estatísticas, é uma oportunidade que a empresa possui de melhorar a execução de suas atividades sem grandes investimentos para a qualidade do produto final.

O planejamento de experimento é uma técnica estatística que permite melhorar a qualidade de um produto ou processo. De acordo com Pontes *et al* (2011), as técnicas de planejamento de experimento têm apresentado um crescimento na utilização devido a abrangência dos estudos que envolvem o planejamento de experimento, como avaliação de

todas as variáveis do processo, determinando ao mesmo tempo, os fatores que exercem um efeito significativo sobre a resposta final.

Carpinetti (2000) ressalta que o planejamento de experimento permite identificar as razões de variações de resposta ou variável da saída de um processo em estudo. Roy (2001) enfatiza que todo tipo de indústria pode utilizar as técnicas do DoE (*Design of Experiment*) ou Planejamento de Experimento, tanto nos processos quanto nos produtos, possibilitando realizar estudos de otimização altamente rentáveis.

Diante do cenário produtivo da empresa e dos ganhos que a execução do planejamento de experimento pode proporcionar, a utilização desta técnica no equipamento de tratamento térmico da empresa será capaz de mostrar novos arranjos de operação de produção dentro da estrutura já existente e manter o conceito de qualidade que a empresa aplica aos seus produtos.

## **1.2 Delimitação do Problema**

O presente trabalho é parte de um projeto de pesquisa da universidade em parceria com uma empresa privada. Com bases nos estudos anteriores, identificou-se que a atividade de tratamento térmico dos fios tem problemas de qualidade na produção, ou seja, atua como gargalo produtivo na fabricação de vassouras, produzidas a partir de fios de Garrafas PET (Poli(etileno) Tereftalato ou Politereftalato de Etileno).

No processo de tratamento térmico observou que os parâmetros de operação do forno, não apresentava níveis de operação padronizados. Isto quer dizer que as atividades não possuíam critérios de parada e não apresentavam uma relação com a combinação dos parâmetros de operação.

Além da execução das atividades não padronizadas, outro ponto levantado é o próprio instrumento de tratamento térmico, um forno industrial com operação voltada para panificadoras, ou seja, o forno foi adaptado para atender o processo. Com base no estudo e análise do processo produtivo da empresa, o tratamento térmico foi identificado como ponto crítico. Assim os estudos foram realizados sobre o instrumento de trabalho que realiza esta operação, no caso o forno industrial.

Diante do contexto levantado, o planejamento de experimento poderá auxiliar a realizar um estudo da interação dos fatores e determinar como devem ser estabelecidos a melhor

combinação dos parâmetros de operação do forno, atendendo os critérios de qualidade da empresa.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo Geral**

Descrever a aplicação e o processo de implementação das técnicas de planejamento e análise de experimentos industriais no controle do processo de tratamento térmico em uma empresa de vassouras e levantar as faixas de operação dos parâmetros do forno industrial que realiza este tratamento.

#### **1.3.2 Objetivo específico**

O Objetivo geral pode se desdobrar nos seguintes objetivos específicos:

- Estudar e compreender as técnicas de planejamento e análise de experimentos;
- Identificar os parâmetros de controle de processo de secagem (forno) que mais ocasionam problemas de qualidade aos produtos (fio);
- Determinar os melhores valores de ajustagem dos parâmetros de controle para minimizar os problemas de qualidade.
- 

### **1.4 Método de pesquisa**

Os critérios utilizados para classificar uma pesquisa são definidos a partir dos objetivos gerais traçados na pesquisa, podendo ser exploratória, descritiva e/ou explicativa (GIL, 2002). Entre estes três estudos, o que melhor classifica este trabalho é a explicativa, que segundo o autor esta pesquisa tem como objetivo identificar os fatores que contribuem ou influenciam na ocorrência de um fenômeno. Quando estas pesquisas são realizadas nas ciências naturais, requerem o uso de métodos experimentais e nas ciências sociais o uso de métodos observacionais (PRODANOV & FREITAS, 2013).

A pesquisa apresenta uma natureza aplicada porque gera conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de problemas específicos, além de envolver verdades e interesses locais (PRODANOV & FREITAS, 2013 e GERHARDT & SILVEIRA, 2009).

Quanto a abordagem do problema a pesquisa é classificada como quantitativa devido a transformação desta subjetividade em algo quantificável, por meios de técnicas estatísticas (PRODANOV & FREITAS, 2013 e GERHARDT & SILVEIRA, 2009).

A primeira etapa da pesquisa foi conduzida com o método bibliométrico, que segundo Glänzel (2003) consiste na aplicação de métodos matemáticos e estatísticos no levantamento de livros e outros meios de comunicação, como monografias, teses, e artigos por exemplo. Lacerda, Ensslin & Ensslin (2012) complementa ainda que as técnicas bibliométrica permitem mensurar, interpretar e avaliar os resultados obtidos por uma abordagem quantitativa da disseminação científica.

Todas as etapas presentes na condução do experimento estão representadas na Figura 1, que traz a forma que os estudos foram conduzidos dentro das classificações da pesquisa realizadas anteriormente. Este modelo trata-se de uma adaptação da metodologia utilizada por Galdaméz (2002) e nos conceitos de Montgomery (2013). Indicadores de Desempenho foram utilizados juntamente com as técnicas de planejamento para mensurar ganhos e perdas do processo nas possíveis alterações realizadas por intermédio do planejamento de experimento.

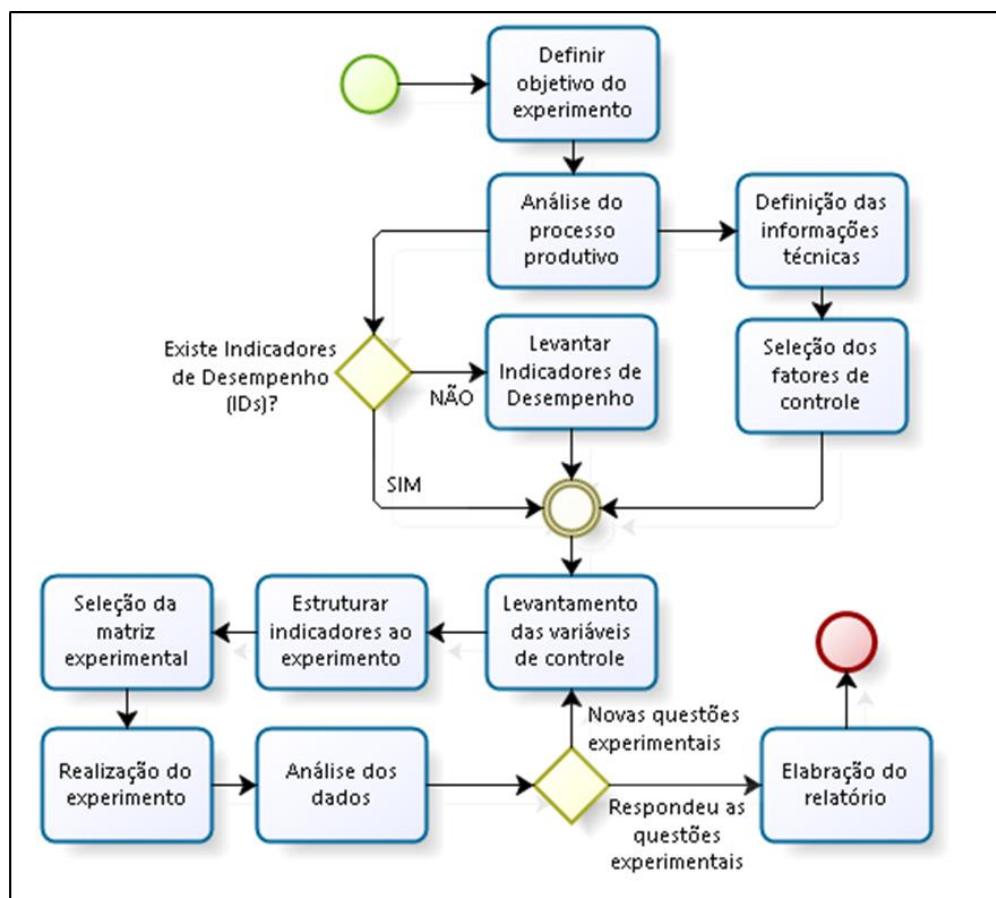


Figura 1 – Metodologia da Pesquisa  
Fonte: Adaptado GALDAMEZ (2002) e MONTGOMERY (2013).



## **1.5 Estrutura do Trabalho**

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliométrica, que serviu de apoio para a construção do referencial teórico. Nesta capítulo é apresentada uma análise qualitativa e quantitativa de uma base de dados composta por artigos, dissertações de mestrado e teses de doutorado.

No Capítulo 3 é formado uma revisão teórica sobre o planejamento de experimentos, apresentado uma abordagem conceitual e técnica. Nesta última, é descrito estre a diversas ramificações do planejamento de experimento a técnica utilizada neste trabalho.

No Capítulo 4 é apresentada a problemática, a descrição do processo produtivo e o desenvolvimento das etapas iniciais do estudo da técnica de planejamento de experimentos aplicada no forno industrial da empresa estudada.

No Capítulo 5 encontram-se os resultados do planejamento do experimento assim como a análise destes resultados.

Finalmente no Capítulo 6 é apresentada a conclusão deste trabalho, assim como o levantamento das limitações do estudo e perspectivas para trabalho futuro

## 2 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

### 2.1 Visão geral

O desenvolvimento do protocolo de pesquisa tem como objetivo realizar um levantamento de artigos científicos para criar uma base de dados para o desenvolvimento da revisão bibliométrica. O protocolo serve de suporte para a produção da revisão durante seu processo de elaboração, a partir de critérios pré-estabelecidos.

### 2.2 Elaboração da Revisão Bibliométrica

Para realizar o levantamento dos artigos necessários para a criação do banco de dados, utilizou-se o método de pesquisa *ProKnow-C*, proposto por Ensslin, Ensslin & Pinto (2013). O método é caracterizado como um processo estruturado para a seleção e análise da literatura científica, possuindo a funcionalidade de mapear o conhecimento, segundo as delimitações, percepções do tema e motivação do pesquisador, que conseqüentemente, se desdobra alinhando a relevância do conteúdo ao propósito da pesquisa (ENSSLIN, ENSSLIN & PINTO, 2013).

O Processo é composto por quatro etapas, conforme pode ser observado na Figura 2 que apresenta o fluxograma de cada etapa e suas respectivas informações obtidas, que servirá como base para a construção do protocolo: (1) - Seleção do Portfólio Bibliográfico; (2) - Análise Bibliométrica; (3) - Análise Sistemática e (4) - Definição da Pergunta da Pesquisa.

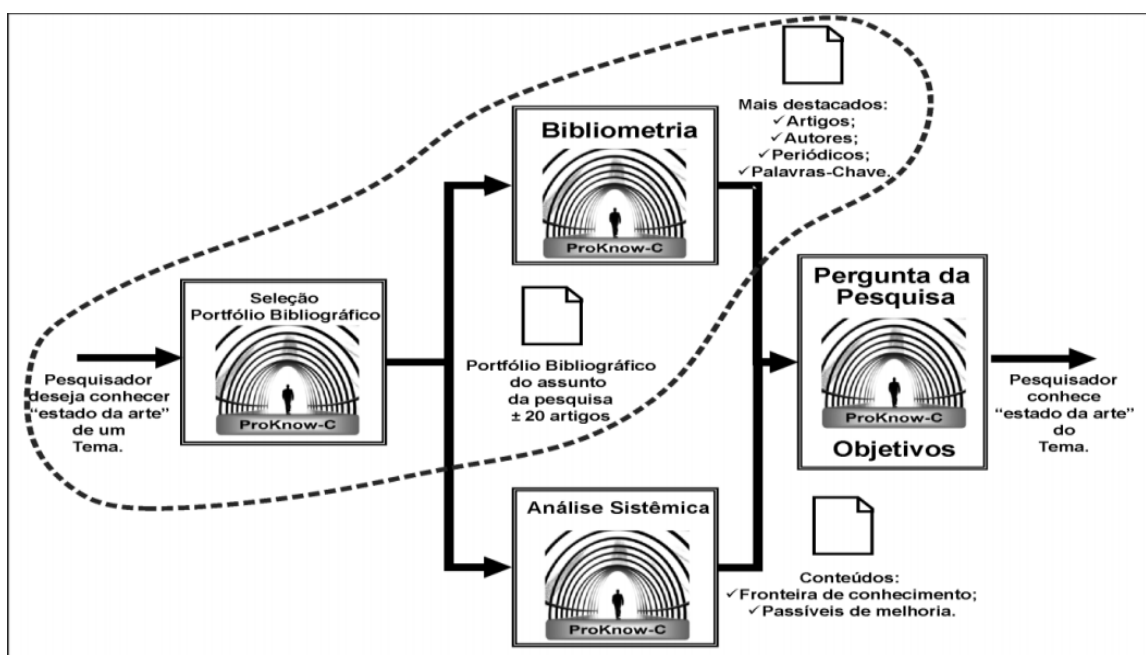


Figura 2 – Etapas da metodologia ProKnow-C aplicada ao trabalho  
Fonte: Ensslin, Ensslin & Pinto (2013)

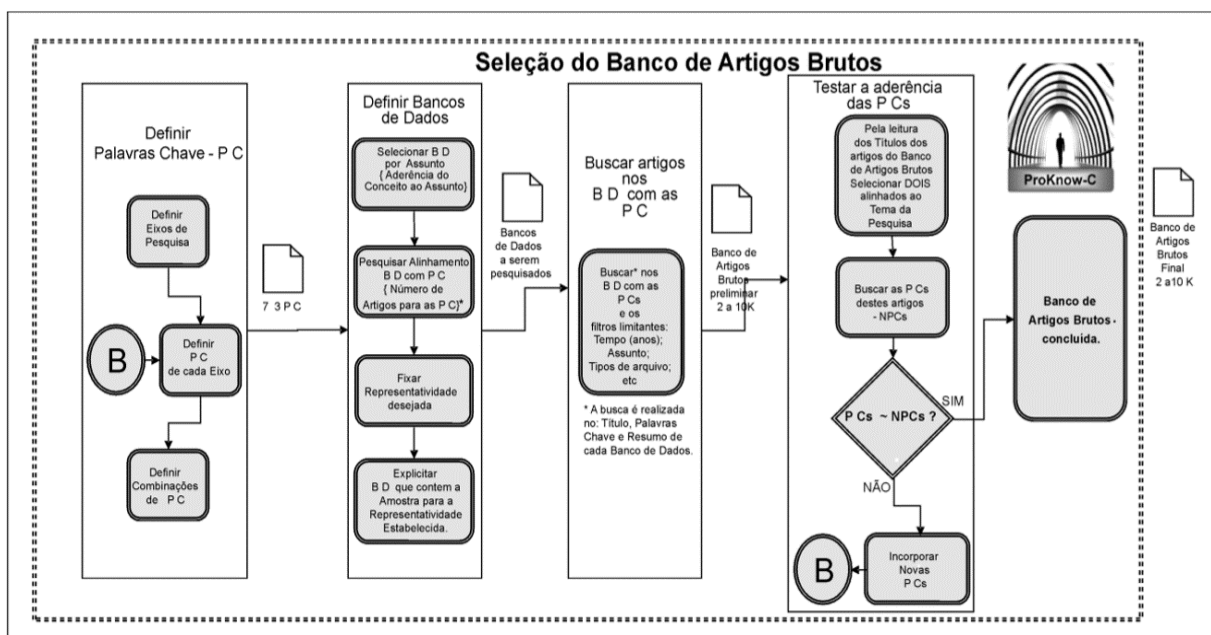
Contudo, para o presente trabalho foram aplicadas apenas as duas primeiras etapas. A análise sistêmica e a definição das perguntas da pesquisa estão presentes na revisão de literatura, que integra juntamente com a revisão teórica e matemática do planejamento de experimentos.

### 2.3 Seleção do Portfólio Bibliográfico

Na parte inicial do portfólio bibliográfico são levantados os artigos que poderão compor o referencial teórico do trabalho a ser desenvolvido de acordo com as delimitações impostas ao longo do protocolo.

Para a construção do banco de dados, fez-se necessário a definição dos eixos de pesquisa em relação ao tema. No primeiro eixo de pesquisa, relacionado a nicho de mercado, ficam as indústrias de polímeros, mais especificamente o polietileno tereftalato. O segundo eixo de pesquisa está relacionado ao tema de trabalho, Planejamento de Experimentos Fatoriais.

A Figura 3 esquematiza como é caracterizado o processo da seleção do portfólio bibliográfico, na qual apresenta uma sequência de etapas, que uma é *input* da outra, retornando no final das informações alimentadas nas bases de busca, uma base de dados, que contém os trabalhos que poderão compor a revisão, conforme métricas determinadas previamente. Nos próximos tópicos é apresentado o desenvolvimento de cada uma dessas etapas.



**Figura 3 - Seleção do Banco de Dados**  
 Fonte: Ensslin, Ensslin & Pinto (2013)

### 2.3.1 Definição das Palavras-Chave:

A definição das palavras chave são os inputs para a seleção dos artigos, a escolha de cada palavra está contida dentro do assunto que será tratado ao longo do desenvolvimento da pesquisa bibliométrica. Definindo-se as palavras chave a seguir em dois idiomas, na Língua Portuguesa e Língua Inglesa.

Português: (“Planejamento de Experimentos” ou “Delineamento de Experimentos”) e (“Fatoriais Fracionados  $2^{k-p}$ ” ou “Polímeros” ou “Análise de Variância” ou “Eficiência de Processo”).

Inglês: (“Design of Experiment”) and (“Fractional Factorial  $2^{k-p}$ ” or “Polymers” or “Analyses of Variance” or “Process efficiency”).

### 2.3.2 Definição da Base de Dados;

Com os eixos de pesquisa e palavras chave definidas, o presente trabalho realizou o levantamento das bases de dados que serão utilizadas. No processo de busca de artigos, considerou-se os seguintes base de dados: *Engineering Village*, *Emerald*, *Scielo*, *IEEE Xplore*, Domínio Público, ENEGEP e SIMPEP.

A partir das palavras chaves, e montagem das combinações das palavras, às *strings*, inicia-se o processo de busca nas bases de dados mencionados acima. Quanto as restrições de pesquisa consideraram-se artigos com publicação depois do ano de 2000, em língua inglesa e portuguesa, download disponível e com publicação completa.

### 2.3.3 Busca dos Artigos

Com as palavras chave definidas e juntamente com as *strings* de busca formadas, que se adaptou a cada base de dados, realizou-se a busca pelo material, na qual cada base de dados retornou uma quantidade específica de artigos.

Na etapa de busca de artigos, pode-se obter uma relação entre os dados de entradas nas bases de dados e o retorno que a busca obteve, conforme Tabela 1 que apresenta as fontes de busca, as *strings* aplicadas na busca por trabalhos, números de trabalho bruto retornados e períodos que foram coletados os artigos, teses e dissertações.

Tabela 1 - Informações de busca e a relação do retorno da pesquisa

Fonte	Strings de busca Construídas	Número de Trabalhos Brutos Retornados	Data da Pesquisa
<b>Engineering Village</b>	“Design of Experiment” or “Process efficiency” and “Fractional Factorial”; “Design of Experiment” and “Analyses of Variance” e “Design of Experiment and Polymers”	1634	19/05/2015 a 20/05/2015
<b>Emerald</b>	“Design of Experiment” or “Process efficiency” and “Fractional Factorial”; “Design of Experiment” and “Analyses of Variance” e “Design of Experiment and Polymers”	191	18/05/2015 a 20/05/2015
<b>Scielo</b>	“Design of Experiment” or “Process efficiency” and “Fractional Factorial”; “Design of Experiment” and “Analyses of Variance” e “Design of Experiment and Polymers”	4	21/05/2015
<b>IEEE Xplore</b>	“Design of Experiment” or “Process efficiency” and “Fractional Factorial”; “Design of Experiment” and “Analyses of Variance” e “Design of Experiment and Polymers”	92	21/05/2015
<b>ENEGEP</b>	“Planejamento de Experimentos”	34	25/05/2015
<b>SIMPEP</b>	“Planejamento de Experimentos”	6	02/06/2015
<b>Domínio Público</b>	“Planejamento de Experimentos”	9	26/05/2015

Fonte: Autor, 2016.

### 2.3.4 Filtragem do Banco de Artigos Brutos

Na etapa de filtragem do banco de dados, a fim de definir quais os trabalhos seriam incluídos no banco de dados que estava sendo formado, definiu-se uma sequência de etapas para realizar a filtragem dos trabalhos que seriam de interesse para compor a revisão bibliométrica.

Após a inserção das *strings* de busca, cada base de dados trouxe uma quantidade, as vezes grande de trabalhos. A fim de refinar os trabalhos para os propósitos do projeto, a utilização de filtros tornou-se necessária para selecionar os que seriam de maiores interesses e descartar aqueles que poderiam não ser de interesse à pesquisa e também para limitar a quantidade. Assim dos 1969 trabalhos brutos levantados anteriormente, foi possível excluir 1824 e deixar o banco de dados com 145 artigos, dissertações e teses. Tais filtros são referentes a própria base de artigos, que apresente esta ferramenta como direcionador para as pesquisas.

A próxima etapa seria refinar o banco de dados para compor a revisão bibliográfica. Nesta etapa, aplicou-se um método mais específico para verificar qual trabalho poderia realmente contribuir com o desenvolvimento da revisão, realizando uma leitura completa do

resumo e uma breve análise do corpo do texto. O objetivo é reduzir o banco de dados e manter trabalhos que podem contribuir para a revisão.

Para o gerenciamento bibliográfico foi utilizado o *software Mendeley*. Antes, porém, o pesquisador identificou se apresentava algum trabalho repetido, e os mesmos foram excluídos do banco de dados, deixando apenas uma versão. Assim, excluiu-se 6 artigos, reduzindo o banco de dados para 139 trabalhos

Os critérios listados a seguir foram os utilizados para avaliar o banco de dados formado pelos 139 trabalhos:

- Artigos que não estejam em português ou inglês;
- Publicações não científicas;
- Estudos que não contribuem com a pesquisa;
- Artigos incompletos ou indisponíveis para leitura na íntegra;
- Publicações realizadas antes do ano 2000.

Assim, o banco de dados ficou composto por 49 trabalhos, entre artigos, publicações, dissertações de mestrado e teses de doutorado. Com o banco de dados formado foi realizada a leitura dos trabalhos e realizada uma interpretação para formar a revisão bibliométrica. O APÊNDICE A, apresenta a listagem dos 49 trabalhos.

## **2.4 Análise Bibliométrica**

Com o banco de dados final formado que contém os trabalhos após o término da primeira etapa do modelo *ProKnow-C* totalizando uma quantidade de 49 trabalhos, realizou-se em seguida a análise bibliométrica do portfólio de artigos selecionado para o desenvolvimento do referencial teórico, composto por duas etapas em caráter qualitativo e quantitativo, sendo:

1. Análise bibliométrica dos artigos selecionados
2. Classificação dos artigos conforme relevância acadêmica

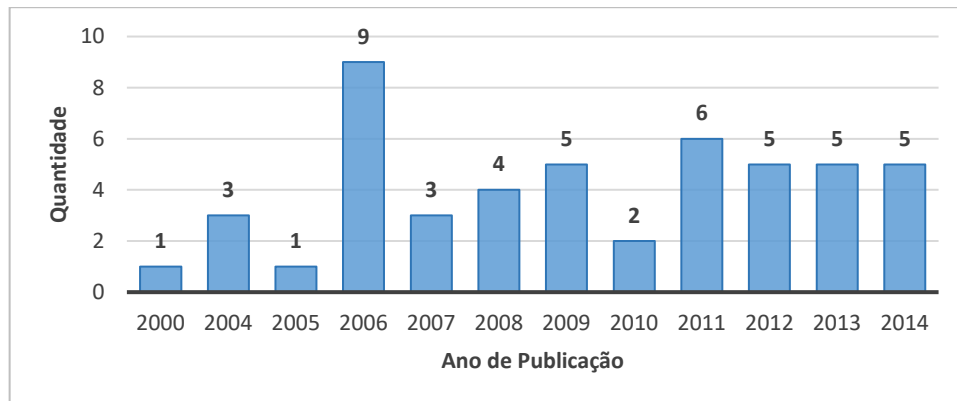
### **2.4.1 Análise bibliométrica dos trabalhos selecionados**

Na análise bibliométrica dos trabalhos selecionados, foram analisados três aspectos em relação ao banco que compõem os trabalhos levantados.

O primeiro aspecto é a relação de trabalhos conforme idioma, pré-estabelecidos anteriormente. A base de dados após a definição do portfólio bibliográfico apresentou uma

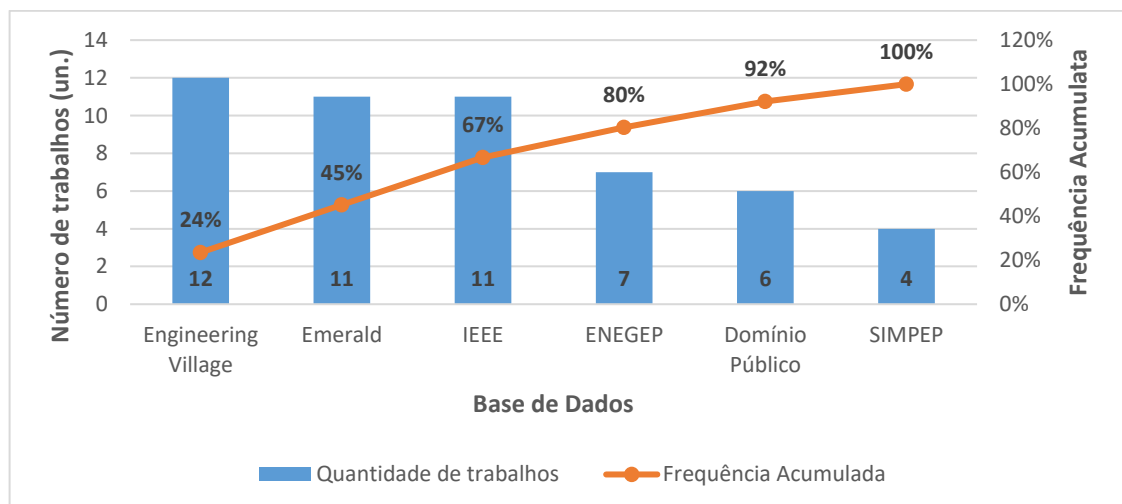
composição de trabalhos maior em relação a língua estrangeira do que a nacional, em que 65% dos trabalhos são de língua inglesa e os outros 35% é de língua portuguesa.

O segundo aspecto analisado é a distribuição do banco de dados final pelos anos de publicação. Através da Figura 4, que mostra esta distribuição graficamente, nota-se que a maior contribuição para este banco de dados está representada nos últimos 15 anos (2000 - 2015), com uma quantidade maior de trabalho.



**Figura 4 - Número de trabalhos selecionados referente aos últimos 15 anos**  
Fonte: Autor, 2016.

O terceiro aspecto é uma análise da quantidade de trabalhos que cada base retornou através de um Gráfico de Pareto do banco de dados final. Conforme Figura 5, nota-se que os trabalhos apresentam uma distribuição mais uniforme, destacando as bases de dados: *Engineering Village*, *Emerald*, *IEEE Xplore* e *ENGEP*.



**Figura 5 - Diagrama de Pareto do banco de artigos final**  
Fonte: Autor, 2016.

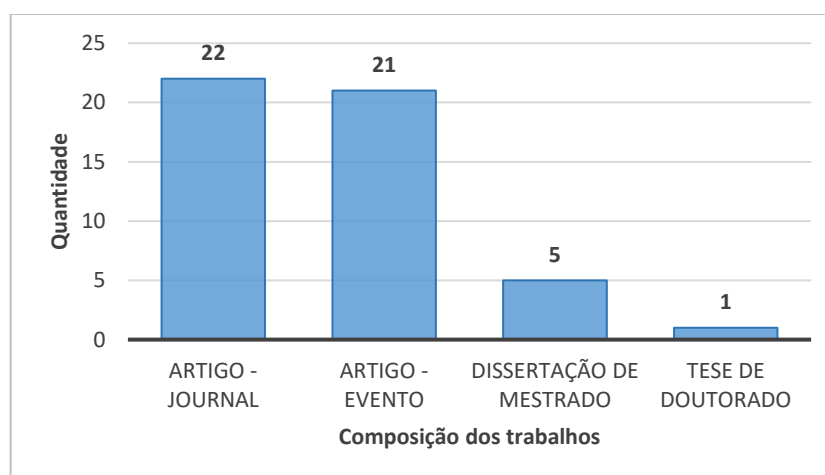
No tópico a seguir é realizada uma análise dos trabalhos quanto a sua relevância acadêmica.

## 2.4.2 Classificação dos trabalhos conforme relevância acadêmica

A classificação dos trabalhos conforme relevância acadêmica é continuação da análise anterior, contudo adotando uma análise mais incisiva sobre os trabalhos que compõe o banco de dados final. Nesta fase na revisão bibliométrica objetiva-se expandir as características deste banco, para apresentar uma imagem desta composição de trabalhos.

O primeiro aspecto estudado neste tópico foi quanto a frequência de autores no banco de dados final gerado. Quanto aos autores principais de cada trabalho, apenas dois nomes tiveram mais de uma publicação, sendo BESSERIS, G. J. com 3 trabalhos e SANTOS, S. N. com 2 trabalhos. O autor BARTO, S. apresenta um trabalho como autor principal e um outro como coautor. Quanto aos demais coautores não foi constatado nenhum com mais de um trabalho.

Estudando o tipo de trabalho retornado do processo de formação de banco de dados final, pode-se classificar em quatro categorias, conforme Figura 6, que mostra que os trabalhos com maior frequência foram do tipo de artigo, destacando para os publicados em *Journals* ou revistas e artigos publicados em eventos que apresentam uma quantidade considerada equilibrada. Dissertações de mestrado e teses de doutorado obteve uma menor participação nesta distribuição.

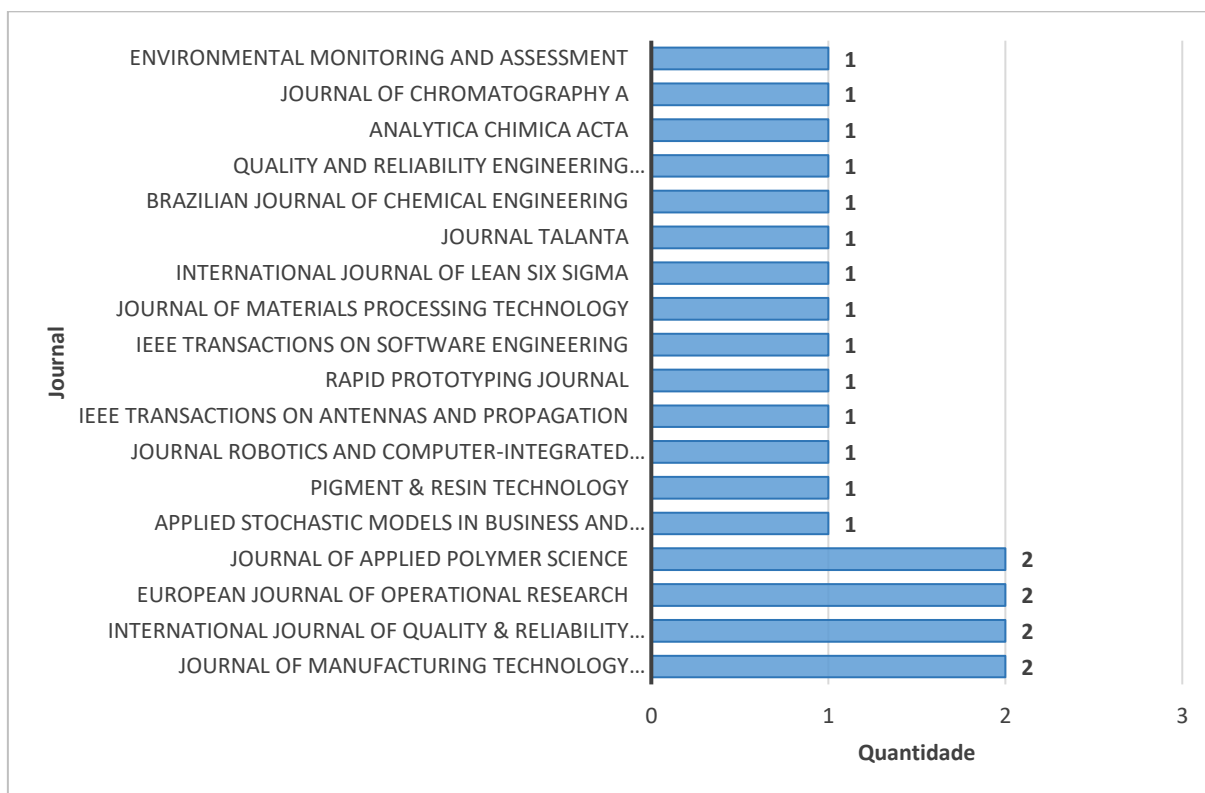


**Figura 6 - Composição dos trabalhos**  
Fonte: Autor, 2016.

A seguir é apresentado uma análise dos trabalhos classificados na Figura 6, adotando alguns critérios que é explicado ao longo da descrição a seguir. Com o objetivo de mostrar a origem e a frequência da revista ou *Journal* que cada artigo foi extraído, o pesquisador elaborou a Figura 7 que apresenta estas bases de dados e quantidade que cada uma forneceu para o banco



de dados. Percebe-se que houve poucas repetições de trabalhos por revista, contribuindo para um banco de dados mais diversificado.

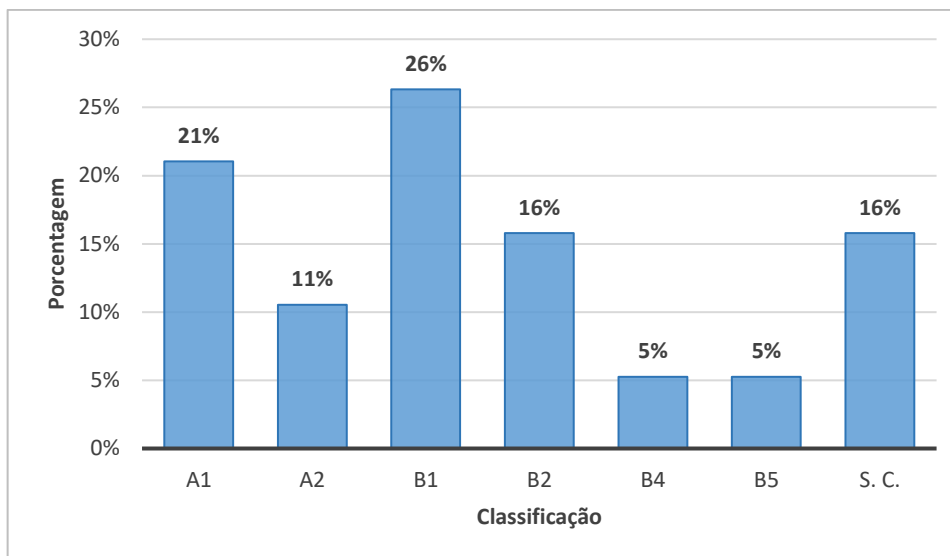


**Figura 7 - Quantidade de trabalhos por *Journal* (Revista)**

Fonte: Autor, 2016.

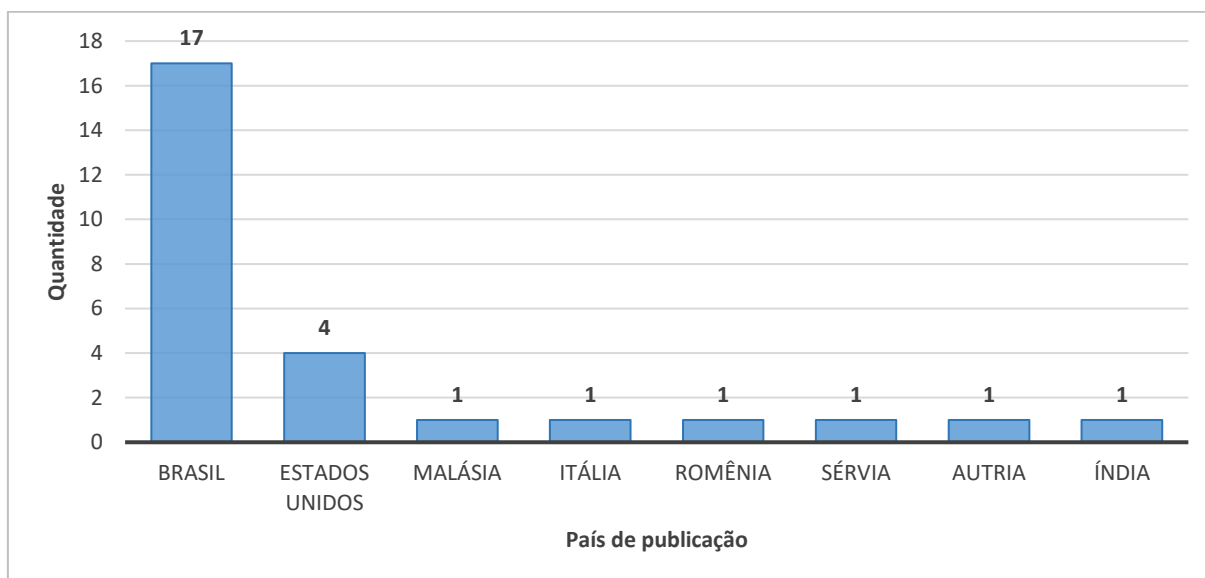
Com uma breve análise de cada *Journal*, o pesquisador realizou uma classificação destas revistas seguindo os critérios de classificação de revistas e periódicos da Qualis CAPES no portal da Plataforma Sucupira, na qual foi inserido cada revista pelo próprio nome ou ISSN e analisando o retorno. Como critério, o pesquisador adotou a classificação para a área de estudo do curso de formação do autor, no caso Engenharias III (Engenharia Mecânica, Engenharia de Produção, Engenharia Aeroespacial e Engenharia Naval e Oceânica), contudo em alguns casos, determinadas revistas apresentavam classificação para Engenharias II (Engenharia Química, Engenharia Nuclear, Engenharia de Materiais, Engenharia Metalúrgica e Engenharia de Minas) e para classificação em Ciência da Computação. Nestes casos adotou esta outra classificação.

A Figura 8, apresenta esta classificação dentro dos conceitos que é atribuído para cada *Journal* ou Revista, seguindo os critérios do portal da CAPES. Analisando a figura, percebe-se que a quantidade de artigos com conceitos altos é considerável, no caso de revista com conceito A1, A2, B1 e B2, o que mostra que a contribuição destes trabalhos para o desenvolvimento da revisão de literatura, pode-se afirmar que foi relevante, já que estes quatro índices representam aproximadamente 74% da base de artigos retirados de revistas.



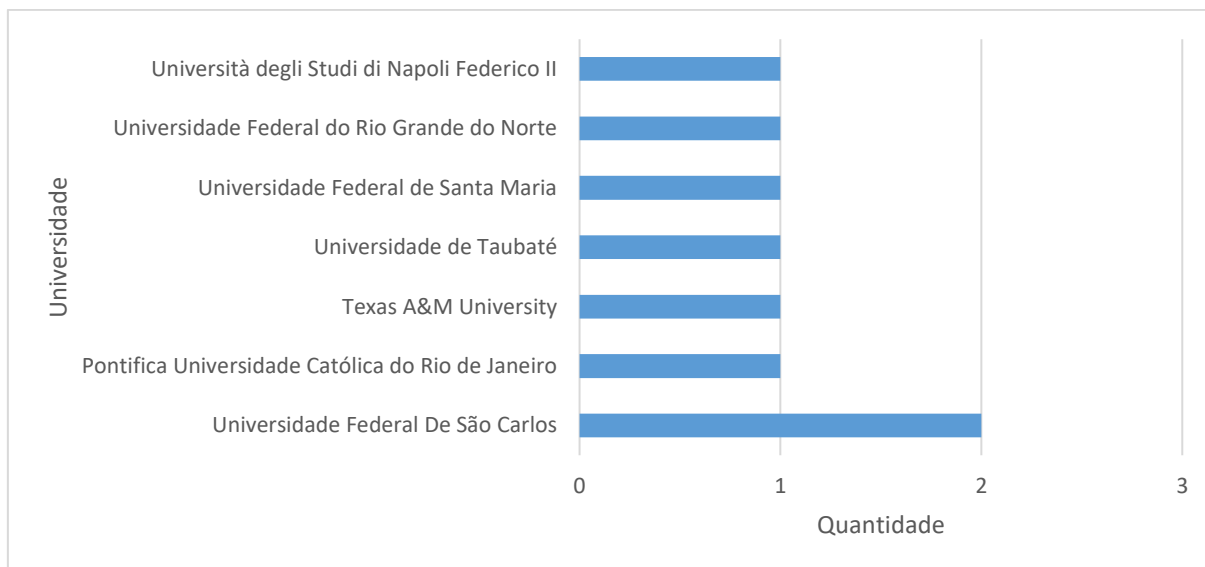
**Figura 8 - Classificação dos *Journals* (Revista) pelos critérios do portal da Qualis**  
 Fonte: Autor, 2016.

Dos trabalhos que possibilitaram a identificação do país de publicação, foi possível elaborar a Figura 9, que mostra a distribuição dos trabalhos nos países. Percebe-se que as maiores quantidades dos trabalhos são do Brasil, devido a uma quantidade significativa de trabalhos levantados em bases brasileiras o que facilitou a identificação. Contudo vale ressaltar que 65% dos trabalhos estão em língua inglesa, conforme descrito anteriormente.



**Figura 9 - Países de publicação dos trabalhos exceto de revista**  
 Fonte: Autor, 2016.

Finalizando este tópico a última análise efetuada (Figura 10) aborda a relação da quantidade de trabalhos que possibilitou a identificação da universidade que contribui com o estudo. A maior parte são universidades brasileiras devido as dissertações de mestrado e tese de doutorado presente no banco de dados.



**Figura 10 – Gráfico da quantidade de artigos por universidade identificada**  
**Fonte: Autor, 2016.**

## 2.5 Considerações do Capítulo

A análise bibliométrica contribui com o desenvolvimento das atividades de levantamento bibliográfico, devido adotar medidas sistemáticas no levanto de trabalhos acadêmicos de forma que se torne relevante na utilização posterior. Os resultados alcançados na utilização desta metodologia para formar uma base de dados bibliográfica ocorrem, portanto por meio de uma sequência de passos e considerações que são realizadas previamente.

Os resultados obtidos da aplicação desta metodologia de pesquisa refletem a qualidade dos trabalhos obtidos, principalmente os artigos publicados em revistas (*journals*) conceituadas porque apresenta uma exigência e requisitos para ser publicados. Assim, estes trabalhos apresentam confiabilidade e contribuições para desenvolvimento de novas pesquisas.

Para realização da revisão de literatura do presente trabalho, fez-se uso desta metodologia para construir a base conceitual e teórica do trabalho.

### 3 TÉCNICAS DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

A busca pela competitividade em um mercado de comportamento oscilatório, requer a procura por melhorias de qualidade dentro das atividades internas da empresa, e quando obtida pode ser vista como um meio de alcançar resultado mais palpáveis aos empreendimentos, que tem por objetivo manter neste meio SALDANHA (2008). Sinha (2011) aponta que a qualidade prestada no produto ou serviço de uma empresa é um importante determinante para o desempenho financeiro da organização.

Segundo Carpinetti (2000) o conceito de qualidade transcendeu a abordagem inicial que a princípio possuía uma visão segmentada do processo industrial, separando os produtos não aceitáveis dos aceitáveis, para uma visão na qual a qualidade é missão de todos.

Nem sempre é fácil descrever a definição de qualidade, devido a subjetividade que apresenta por todos os envolvidos no desenvolvimento de um produto, processo ou serviço. Roy (2001) aborda que o desempenho é o principal componente na qualidade de um produto ou processo.

Ainda de acordo com Roy (2001), a definição de qualidade depende amplamente da aplicação, mas deve ser definida antes que qualquer técnica experimental possa ser produzida com resultados significativos.

Para Goh (1992) o controle da qualidade do produto pode ser obtido através de duas abordagens: a passiva e a ativa, que podem ter aplicação tanto no produto quanto no processo, conforme Figura 11. Através da Figura 11 percebe-se também que a qualidade do processo é resultante ainda de melhorias levantadas com foco na qualidade do produto.

A abordagem passiva é caracterizada segundo Goh (1992) por manter o *status quo*, expressão do latim que quer dizer, manter o estado atual do meio. Dentro desta abordagem a qualidade atua na detecção e prevenção de falhas por meio de plano de inspeção por amostragem e controle estatístico do processo respectivamente.

A abordagem ativa é caracterizada segundo Goh (1992) e Mach & Barto (2010) através da otimização de desempenho, seja por meio de melhorias empíricas, utilizando planejamento de experimento estatístico ou por meio de estudos teóricos através de análises e sínteses fundamentais.



**Figura 11 - Abordagens ativas e passivas da qualidade**  
**Fonte: Adaptado, Goh (1992)**

Diante das abordagens apresentadas, o presente trabalho direciona os estudos para as melhorias empíricas por meio da utilização de técnicas de planejamento de experimento, por se tratar de progressos no foco de estudo por meio de observações do processo estudado.

A utilização de melhoria empírica pode ser aplicada tanto no produto quanto no processo. Contudo, modificações no produto inicialmente requerem para as empresas um melhor planejamento, pois podem afetar outras áreas de negócio interno e externo do meio organizacional, além da própria imagem da empresa perante seus clientes. Assim, medidas de modificações do processo, tendem a ser um meio de estudo de obter melhorias para a organização sem grande impacto na sua produção.

### 3.1 Abordagens iniciais ao Planejamento de Experimentos

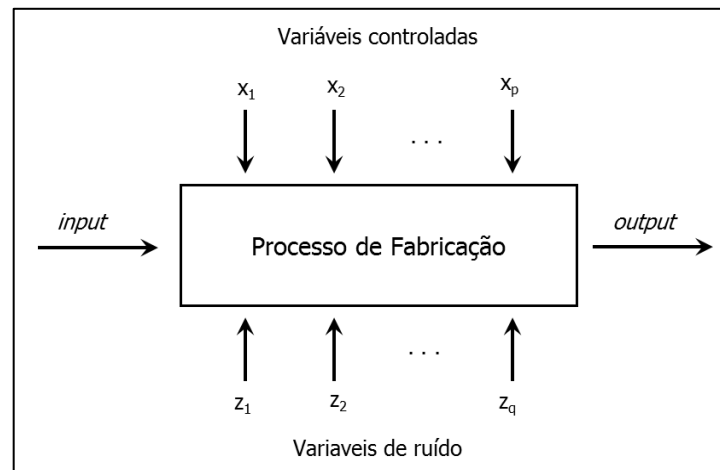
Como visto anteriormente a qualidade do produto também é definida pela qualidade do processo que é conduzido ao longo da produção. As interferências que um processo apresenta determina o desempenho produtivo da empresa, que podem ser interferências mecânicas, humana, processual, ambiental e outras. Na busca de otimização do processo produtivo, o controle destas variações ou interferências é uma chave para obter melhores resultados.

Carpinetti (2000) ressalta que dentro do processo produtivo, nas ações que destinam ao controle do processo tem-se as seguintes etapas básicas:

- Coleta de dados: por meio de instrumentos de medição, coletando e registrando o resultado do processo;
- Avaliação do processo: por meio de um estudo de capacidade e gráficos de controle;
- Diagnóstico do problema, identificação das causas dos problemas através do conhecimento do processo e análises das possíveis causas;
- Ação corretiva: eliminação dos problemas a partir da consideração e identificação das causas mais prováveis.

Contudo estas técnicas apresentam limitação na melhoria da qualidade do produto, e o uso de técnicas de Planejamento de Experimento pode alcançar um padrão de qualidade superior.

No geral, experimentos são usados para estudar a performance do processo e sistema, que pode ser representado conforme a Figura 12. O processo de fabricação é composto por um conjunto de recursos humanos, operacionais, tecnológico entre outros que operam de forma conjunta no processo de transformação de uma entrada (*input*), como materiais, em uma saída (*output*), no caso um produto (MONTGOMERY, 2013; CARPINETTI, 2000, CAMORIM, 2008 e MACH & BARTO, 2010).



**Figura 12 - Variáveis atuantes no objeto de estudo**  
 Fonte: Adaptada, Montgomery (2013)

Durante este processo de transformação uma ou mais variáveis atuam no processo produtivo, sendo algumas classificadas como controláveis ( $x_1, x_2, \dots, x_p$ ), que são aquelas que podem ser alteradas e outras classificadas como variáveis de ruídos ou incontroláveis ( $z_1, z_2, \dots$ ,

$z_q$ ), que no caso vem a ser aquelas que não tem controles durante a execução de um teste, (MONTGOMERY, 2013 e MACH & BARTO, 2010).

De acordo com Mach & Barto (2010), Muthukumar & Mohan (2004), Saldanha (2008), Staiculescu *et al* (2005) e Pontes *et al* (2011) o Planejamento de Experimento é um método estatístico e uma ferramenta de engenharia criticamente importante para melhorias da qualidade no processo de fabricação. Muthukumar & Mohan (2004) acrescenta ainda que o Planejamento de Experimentos pode ser usado para a construção e exploração de modelos e otimização de sistemas com múltiplas variáveis.

O uso apropriado das técnicas de planejamento de experimentos juntamente com outras medidas de qualidade pode conduzir a um nível de qualidade superior ao meio de estudo e aumento da confiabilidade, seja processo ou produto (DOWLATSHAHI, 2004).

Saldanha (2008) ressalta que o planejamento de experimentos permite identificar e estabelecer o conjunto de variáveis que tem maior influência no desempenho de um produto ou processo, permitindo ao profissional que conduz o experimento criar condições de melhorias contínuas visto que o processo se torna dinâmico as mudanças devido ser um sistema bem planejado.

Segundo Licht (2006) a atividade estatística mais importante a ser realizada na modelagem de um sistema é o planejamento dos experimentos para obtenção dos dados e necessariamente a análise destes dados. O autor ainda enfatiza que é muito importante a forma que o planejamento é conduzido, as ferramentas utilizadas para levantar os fatores e as técnicas para processamento dos resultados experimentais.

No planejamento de qualquer experimento, o primeiro passo consiste em decidir quais são os fatores e as respostas de interesse. Estes fatores devem ser controláveis pois serão as variáveis do experimento que será responsável por trazer informações para análise do comportamento do processo (LICHT, 2006).

Quando o efeito de uma variável depende do nível das outras variáveis, diz que há interação dessas variáveis (MACEDO, 2007). Ainda segundo o autor o planejamento de experimento ocorre com todas as combinações de diferentes níveis das variáveis de controle.

Staiculescu *et al* (2005) e Mach & Barto (2010) reforçam que uma das intenções do DoE é alterar de forma proposital as variáveis de entradas do sistema em estudo para que o controlador da qualidade ou responsável pelo experimento possa observar e identificar as razões das mudanças na resposta de saída. Os resultados alcançados a partir das análises das relações

destas variáveis levam à melhoria da qualidade do processo, devido a isto Mach & Barto (2010) expressa que o projeto experimental é uma ferramenta de engenharia criticamente importante para a melhoria da qualidade do processo de fabricação.

Dowlatshahi (2004) enfatiza a complexidade da utilização das técnicas de planejamento e ressalta alguns pontos importantes sobre a técnica, como: direcionamento para um objetivo específico, planejamento por pessoas que possuem conhecimento, inclusão de todas as variáveis relevantes arranjadas em um padrão que forneça um maior número de informações e em quantidade que seja suficiente para detectar efeitos importantes e eliminação das variáveis triviais.

Percebe-se, portanto, que a realização de um planejamento de experimento tem a capacidade de fornecer uma compreensão completa de todos os fatores envolvidos no processo estudado, identificar quais são os fatores ou variáveis mais significativas e quais não são e ainda como estes fatores interagem uns com os outros, e se os objetivos são realizáveis nas condições planejada (STAICULESCU *et al*, 2005).

Autores como Al-Ghandi (2013), Angrisani *et al* (2011), Badía (2011), Dowlatshahi (2004), Montgomery (2013) e Carpinetti (2000) enfatizam que o planejamento de experimento é uma poderosa técnica que tem a possibilidade de atingir diferentes objetivos, como:

- Melhoria da qualidade do produto ou processo;
- Redução da variabilidade de desempenho em torno nível-alvo de uma forma eficaz e eficiente;
- Redução do tempo de produção;
- Redução de custos gerais.

Ainda segundo Al-Ghandi (2013) e Badía (2011) esta técnica é indicada para explorar, entender e estabelecer a relação entre os parâmetros do produto ou processo e mensuração do desempenho, que pode ser estabelecido via indicadores de desempenho, conforme tópico 3.6.

Badía (2011) ressalta que quando as variáveis agem de forma aditiva (adicional, suplementar, extraordinário, complementar), o DoE permite estimar com maior precisão as características do estudo, e quando elas não agem de forma aditiva, o DoE é capaz de detectar e estimar as interações entre as variáveis e mensurar esta não aditividade.



Carpinetti (2000) enfatiza que o uso de técnicas de Planejamento de Experimento permite melhorar a qualidade de projeto do produto ou processo produtivo, através do levantamento das informações como:

- Quais variáveis do processo são mais influentes no parâmetro de resposta de interesse;
- Os níveis de ajustem das variáveis do processo influente na resposta de modo que a variabilidade do parâmetro de resposta de interesse seja mínimo;
- Os níveis de ajustagem das variáveis influentes do processo de modo que o valor do resultado seja próximo do valor nominal;
- Os níveis de ajustagem das variáveis influentes na resposta de modo que o efeito das variáveis não controláveis seja reduzido.

Licht (2006) levanta 3 circunstâncias para a escolha do planejamento de experimento como um instrumento de construção de modelos funcionais para a avaliação do comportamento de um sistema de potência. São eles:

- i. O planejamento de experimento exige um número mínimo de ensaios (simulações), para a construção de um modelo multifuncional;
- ii. Esta abordagem permite formalizar a análise estatística do modelo, incluindo a verificação de significância estatística dos coeficientes e da adequação do modelo inteiro;
- iii. Caso o modelo de maior simplicidade estiver inadequado, o planejamento de experimento permite construir modelos de maior complexidade, utilizando os resultados obtidos na primeira etapa da construção.

### **3.2 Aplicabilidade do Planejamento de Experimentos**

De acordo com Sinha (2011) a metodologia de planejamento de experimento tem alta utilidade para o desenvolvimento de um produto de qualidade, existindo muitos processos reais de interesse na qual as técnicas de planejamento são de alto valor, como na agricultura, indústria e estudos científicos. Sendo ainda segundo o autor, para estes tipos de processos, a experimentação é muitas vezes a única maneira possível de compreender os mecanismos subjacentes.

Montgomery (2013) ressalta que os métodos de planejamento de experimentos são fundamentalmente importantes nas atividades de projeto de engenharia, auxiliando na concepção de novos produtos e melhorando os já existentes. De acordo de com o autor algumas aplicações de experimentos na engenharia incluem:

1. Avaliação e comparação das configurações básicas do projeto (planejamento);
2. Avaliação de materiais alternativos;
3. Seleção dos parâmetros do planejamento para que o produto funcione bem sob uma ampla variedade de condições;
4. Determinação dos principais parâmetros de planejamento do produto que afetam o desempenho do produto;
5. Desenvolvimento de novos produtos.

Percebe-se que a utilização desta ferramenta estatística pode proporcionar grandes ganhos para que utiliza de forma correta, e devido a isto alguns princípios básicos merecem atenção no momento que estiver realizado o planejamento do experimento.

### **3.3 Princípios Básicos de um Planejamento de Experimentos**

Montgomery (2013) em seus estudos considera três os princípios básicos para a execução do planejamento de experimentos, são eles: aleatorização, replicação e bloqueamento.

1. A aleatorização é a distribuição causal da variabilidade. Tem como objetivo evitar a introdução de vício no experimento, determinar a validade da estimativa do erro experimental e do efeito de tratamento (MONTGOMERY, 2013; CARPINETTI, 2000 e SALDANHA, 2008);
2. A replicação consiste na realização de mais de um tratamento do experimento (CAMORIN, 2008; MONTGOMERY, 2013; CARPINETTI, 2000 e SALDANHA, 2008), com o objetivo de diminuir o erro e validar o erro experimental (MONTGOMERY, 2013). Carpinetti (2000) ressalta que a repetição permite estimar o erro experimental, que permite determinar se diferenças observadas nos dados são estatisticamente diferentes;
3. O bloqueamento consiste em conter e avaliar a variabilidade produzida pelos fatores que agem no experimento e também tem como objetivo, a redução do erro, ou seja, aumento da precisão das respostas analisadas (MONTGOMERY, 2013 e SALDANHA, 2008).

Estes três itens compõem uma parte muito importante no processo de execução do planejamento de experimento.

### 3.4 Diretrizes para o Planejamento de Experimentos

Montgomery (2013) e Carpinetti (2000) expõe um guia dos procedimentos para o planejamento, execução e análise do desenvolvimento do planejamento de experimentos. As etapas estão descritas a seguir são as etapas necessárias para realizar um experimento.

1. **Compreensão e planejamento do problema:** identificar o problema que requer um planejamento de experimento. Faz-se necessário um envolvimento de todos os setores da empresa, para o levantamento das informações do problema. Uma ferramenta muito importante que auxilia nesta etapa é o digrama de causa e efeito, que serve como apoio na hora de levantar todas as variáveis, seja de controle ou não, que atuam sobre o processo ou produto.
2. **Escolha dos fatores e níveis:** após definição do problema, é feita a escolha dos fatores de variação sobre o objeto de estudo, os intervalos desta variação e os níveis específicos para o experimento. O responsável pelo experimento precisa ter um conhecimento teórico e prático para as escolhas das variáveis, e também como são os ajustes e formas de controles destas variáveis.
3. **Seleção da variável de resposta:** A escolha da variável de resposta deve fornecer informações uteis para o processo estudado. É importante considerar ainda que o erro de medição seja mínimo para evitar repetições.
4. **Escolha do planejamento experimental:** Definir o tamanho da amostra, uma ordem adequada para a tomada de dados e determinar se há obstruções ou restrições de aleatorização. Com os dados definidos é escolhido um modelo de experimento que melhor se adeque ao problema definido.
5. **Realização do experimento:** no momento da realização do experimento, a principal medida a ser tomada é a de controle do planejamento, para que as atividades definidas sejam executadas conforme o planejado e evitar que erros ocorram para não invalidar o experimento.
6. **Análise dos dados:** Nesta fase podem ser usados métodos estatísticos para a análise dos dados, o que proporciona uma veracidade e validade do experimento, permitindo provar

algo experimentalmente e tornar possível a determinação da probabilidade do erro, agregando objetividade para o processo de tomada de decisão

7. **Conclusão e recomendações:** A partir da análise dos dados permite extrair conclusões práticas dos resultados e definir as ações a serem tomadas. Representações gráficas, permitem expor os dados obtidos e análise efetuada no estudo realizado.

### 3.5 Técnicas de Planejamento de Experimentos

As técnicas de planejamento de experimentos para analisar processos ou produtos são diversas. Contudo para o presente trabalho serão abordados apenas os experimentos fatoriais, por ser a técnica que envolve a aplicação em estudo de campo, devido o comportamento do processo se enquadrar neste tipo.

O planejamento de experimentos fatoriais é um método que apresenta a possibilidade de analisar todas as interações entre variáveis que influenciam no processo, sendo uma das razões para aplicar-se neste trabalho. Assim no presente trabalho não se descreve sobre outras técnicas, mas vale ressaltar que existem outras disponíveis que devem ser estudadas na hora de iniciar os trabalhos para identificar aquela que melhor se enquadra no objeto de estudo.

#### 3.5.1 Planejamento Fatorial

Segundo Macedo (2007), Staiculescu *et al* (2005) e Santos (2007) o planejamento fatorial é utilizado para estudar os efeitos de duas ou mais variáveis de influência em um sistema, em que as variáveis são avaliadas simultaneamente.

O planejamento de experimento fatorial é caracterizado por aquele que testa todas as possíveis combinações dos níveis dos fatores testados ou réplica deste experimento, (MONTGOMERY, 2010). O autor aborda ainda que uma das vantagens da utilização do planejamento fatorial é devido a fácil aplicabilidade que o modelo proporciona.

De acordo com Mach & Barto (2010) um planejamento fatorial pode ser realizado em duas versões: como planejamento de experimento completo e como fatorial fracionário. Estas modificações diferem no número de experimentos e na profundidade da análise. Os experimentos fatoriais fracionários precisam de um menor volume de trabalho experimental, mas as influências de alguns fatores podem ser omitidas.

De acordo com Camorim (2008) um planejamento fatorial completo só pode ser definido quando lidamos com um experimento que envolve todas as possíveis combinações entre os fatores e seus diferentes níveis, que são variados simultaneamente.

Experimentos fatoriais completos são necessários na prática quando as interações de ordem superior são provavelmente relevantes. Contudo podem não ser necessárias quando é provável que a interação de ordem superior esteja ausente ou insignificante (WANGA & COOK, 2012)

Segundo Mach & Barto (2010) os experimentos fatoriais são baseados na análise dos efeitos dos fatores. Estes efeitos, segundo o autor, são definidos como mudanças de repostas causadas por mudanças nos níveis dos fatores, sendo chamados de efeitos principais. Contudo, vale ressaltar que se um experimento, o efeito do Fator A depender do Fator B, a interação AB também deve ser examinada.

### 3.5.2 Planejamento Fatorial com Dois Fatores

Os planejamentos de experimentos fatoriais mais simples são os que apresentam apenas 2 fatores ou conjuntos de tratamentos. Existem  $a$  níveis do fator A e  $b$  níveis do fator B, arranjados em um planejamento fatorial, isto é, cada réplica do experimento contém todas as combinações de tratamento  $ab$  (MONTGOMERY, 2013 e CARPINETTI, 2000).

Camorim (2008) demonstra sua definição a partir de um exemplo, no qual um estudo que envolve 2 fatores e cada fator com 2 diferentes níveis. Assim, são necessários 4 experimentos para avaliar os efeitos desses fatores em uma determinada variável resposta, podendo existir interação entre eles. Caso a mudança de fatores mude para 3, faz-se necessário 8 experimentos para um experimento completo.

Para planejamento de experimento do nível  $2^2$ , ou seja, dois fatores de experimento (A e B) com dois níveis cada ( $A_1, A_2, B_1, B_2$ ), são necessários quatro experimentos para um planejamento completo e a combinação entre eles resulta, conforme Quadro 1:

$A_1B_1$	$A_1B_2$
$A_2B_1$	$A_2B_2$

Quadro 1 – Combinação de um planejamento  $2^2$   
Fonte: Camorim, (2008)

O caso geral de um experimento fatorial de acordo com Montgomery (2013), é dado por uma variável resposta. Neste caso, consideramos que  $y_{ijk}$  venha ser esta variável de resposta quando o fator A se encontra no  $i$ -ésimo nível ( $i = 1, 2, \dots, a$ ) e o fator B se encontra no  $j$ -ésimo nível ( $j = 1, 2, \dots, b$ ) para  $k$  réplicas ( $k = 1, 2, \dots, n$ ). A Tabela 2 apresenta de forma geral como um planejamento de dois fatores fatorial é disposto.

Tabela 2 - Arranjo geral de um experimento fatorial de 2 fatores

		Fator B			
		1	2	...	b
Fator A	1	$y_{111}, y_{112}, \dots, y_{11n}$	$y_{121}, y_{122}, \dots, y_{12n}$		$y_{1b1}, y_{1b2}, \dots, y_{1bn}$
	2	$y_{211}, y_{212}, \dots, y_{21n}$	$y_{221}, y_{222}, \dots, y_{22n}$		$y_{2b1}, y_{2b2}, \dots, y_{2bn}$
	⋮				
	a	$y_{a11}, y_{a12}, \dots, y_{a1n}$	$y_{a21}, y_{a22}, \dots, y_{a2n}$		$y_{ab1}, y_{ab2}, \dots, y_{abn}$

Fonte: Montgomery, 2013

De acordo com Montgomery (2013) as observações em um planejamento fatorial podem ser descritas por um modelo de efeitos em resposta de  $y$ , conforme Eq. (1):

$$y_{ijk} = \mu_{ij} + \epsilon_{ijk} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad \text{Eq. (1)}$$

no qual o conteúdo da  $ij$ -ésima célula é dado conforme Eq. (2):

$$\mu_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} \quad \text{Eq. (2)}$$

Sendo:

- $\mu$  = Média Global
- $\tau_i$  = Efeito do fator A
- $\beta_j$  = Efeito do fator B
- $(\tau\beta)_{ij}$  = efeito da interação dos fatores A e B;
- $\epsilon_{ijk}$  = erro experimental.

O quadro de ANOVA para um experimento com dois fatores é construído como segue na Tabela 3. De acordo com Scheffé (1959) Análise de variância (ANOVA) é uma técnica

estatística para analisar medições dependendo de vários tipos de efeitos de forma simultânea, decidir que tipos de efeitos são mais importantes e estima-los.

**Tabela 3 - Análise de variância para Planejamento Fatorial 2<sup>2</sup>**

Tabela de Análise de Variância para Planejamento Fatorial 2 <sup>2</sup>				
Atributo	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F <sub>0</sub>
Tratamento A	SS <sub>A</sub>	a - 1	$MS_A = \frac{SS_A}{a - 1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
Tratamento B	SS <sub>B</sub>	b - 1	$MS_B = \frac{SS_B}{b - 1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
Interação	SS <sub>AB</sub>	(a - 1)(b - 1)	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Erro	SS <sub>E</sub>	ab(n - 1)	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n - 1)}$	
Total	SS <sub>T</sub>	abn - 1		

Fonte: Montgomery (2013)

Existem outras técnicas além das análises da ANOVA, contudo para o presente trabalho fez-se uso desta técnica devido este tipo de análise ser satisfatória para a obtenção de resultados deste experimento.

A Soma dos Quadrados Totais, do inglês *Sum of Square Total* (SST), é expressa através da Eq. (3):

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{Y^2}{abn} \quad \text{Eq. (3)}$$

A soma dos quadrados para os principais efeitos A e B é dado através da Eq. (4) e Eq. (5) respectivamente:

$$SS_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a Y_i^2 - \frac{Y^2}{abn} \quad \text{Eq. (4)}$$

$$SS_B = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b Y_j^2 - \frac{Y^2}{abn} \quad \text{Eq. (5)}$$

no qual  $y_i$  é denotado pela soma de todas as observações do fator A, conforme Eq. (6):

$$Y_i = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad \text{Eq. (6)}$$

e  $y_j$  é denotado pela soma de todas as observações do fator B, conforme Eq. (7):

$$Y_j = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad \text{Eq. (7)}$$

e  $Y$  é denotado pela soma total de todas as observações, conforme Eq. (8):

$$Y = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad \text{Eq. (8)}$$

Ainda é conveniente calcular a soma dos quadrados da interação entre  $a$  e  $b$ , ou seja,  $SS_{AB}$ . De acordo com Montgomery (2013), a soma da interação  $SS_{AB}$  é dada pela soma dos quadrados entre todas as células  $ab$  subtraído as interações  $S_A$  e  $S_B$ , conforme Eq. (9).

$$SS_{AB} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b Y_{ij}^2 - \frac{Y^2}{abn} - SS_A - SS_B \quad \text{Eq. (9)}$$

no qual  $Y_{ij}$  é denotado pela soma das observações dentro de cada célula, conforme Eq. (10):

$$Y_{ij} = \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad \text{Eq. (10)}$$

Por fim obtém-se  $SS_E$  a partir da subtração conforme Eq. (11):

$$SS_E = SS_T - SS_{AB} - SS_A - SS_B \quad \text{Eq. (11)}$$



Contudo, um planejamento de duas variáveis em dois níveis na maior parte das vezes não satisfaz o sistema estudado, devido à grande quantidade de fatores que interferem na qualidade final do produto. Assim, o planejamento fatorial  $2^k$  apresentam uma boa solução para problemas mais complexos, em que  $k$  fatores podem ser testados em dois níveis diferentes.

### 3.5.3 Planejamento Fatorial $2^k$

De acordo com Montgomery (2013), Licht (2006) e Carpinetti (2000), o planejamento fatorial  $2^k$  é um caso no qual  $k$  fatores são utilizados em 2 níveis, obtendo  $2^k$  combinações. Assim quanto maior o número de níveis de fator, maior será o número de tratamento que consequentemente aumenta a complexidade da análise a ser efetuada.

Os dois níveis de cada um dos fatores ou variáveis representam o limite inferior e superior do intervalo no qual a variável é analisada, sendo determinados pelas variações ou tolerâncias do processo de fabricação (STAICULESCU *et al*, 2005). Os planejamentos de experimentos fatoriais são úteis na análise preliminar do sistema, quando há muitos fatores que podem afetar o sistema (STAICULESCU *et al*, 2005 e SANTOS, 2007)

De acordo com Licht (2006) o planejamento fatorial é iniciado com a especificação dos limites que cada fator deve ser estudado. No caso de utilização de planejamento de experimentos  $2^k$ , os valores dos fatores que devem ser usados para a realização dos ensaios.

Uma forma sistemática de planejar o experimento fatorial com  $k$  fatores, ou seja, um experimento  $2^k$ , pode ser descrito de acordo com Carpinetti (2000) da seguinte forma:

1. Para  $x_1$ , o sinal da coluna (1) alterna em grupos de  $2^0 = 1$ , ou seja, seguidamente: -1, +1, -1, +1, -1, +1, -1, +1, ...;
2. Para  $x_2$ , o sinal da coluna (1) alterna em grupos de  $2^1 = 2$ , ou seja, em pares: -1, -1, +1, +1, -1, -1, +1, +1, ...;
3. Para  $x_3$ , o sinal da coluna (1) alterna em grupos de  $2^2 = 4$ , ou seja, em grupos de 4: -1, -1, -1, -1, +1, +1, +1, +1;
4. Para  $x_4$ , o sinal alterna em grupos de  $2^{(4-1)} = 8$ ;
5. Para  $x_k$ , o sinal alterna em grupos de  $2^{(k-1)} = 8$ , ou seja,  $2^{(k-1)}$  vezes (-1), seguido de  $2^{(k-1)}$  vezes (+1).

O exemplo da Tabela 4 mostra a construção de um experimento  $2^3$ , ou seja, um planejamento de três fatores em dois níveis de controle. Os sinais adotados (-) e (+) das colunas representam os valores em seus níveis menores e maiores que podem ser assumidos.

**Tabela 4 - Matriz de planejamento para um experimento  $2^3$**

Teste	Efeitos de Controle			Resp.
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Y
1	-1	-1	-1	Y <sub>1</sub>
2	+1	-1	-1	Y <sub>2</sub>
3	-1	+1	-1	Y <sub>3</sub>
4	+1	+1	-1	Y <sub>4</sub>
5	-1	-1	+1	Y <sub>5</sub>
6	+1	-1	+1	Y <sub>6</sub>
7	-1	+1	+1	Y <sub>7</sub>
8	+1	+1	+1	Y <sub>8</sub>

Fonte: Adaptado, Carpinetti (2000)

Como demonstração ainda, com base em Camorim (2008) considerando uma situação com 3 fatores (A, B e C) com 2 níveis cada (A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>), os experimentos seriam as combinações conforme Quadro 2:

A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub>
A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub>	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub>
A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub>
A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub>

**Quadro 2 – Combinação de um planejamento  $2^3$**

Fonte: Adaptado, Camorim (2008)

Ou seja, experimentos com  $k = 3$  e  $n_i = 2$ . Portanto, o número de experimento é dado por:  $2 \times 2 \times 2 = 8$  experimentos necessários. Sendo  $k$  o número de fatores e  $n$  os níveis desses fatores no estudo.

A tabela com a Análise de Variância (ANOVA) para estudar os efeitos principais e de interação que compõem um planejamento de experimento fatorial  $2^k$  pode ser construída

conforme a Tabela 5. A ANOVA apresenta informações importantes sobre os estudos dos efeitos das variáveis que compõe o experimento. Porém, com o auxílio de *software* de estatísticas como o MINITAB, é possível obter gráficos sobre o comportamento dos fatores e suas interações.

Tabela 5 - Tabela de ANOVA para experimento fatorial  $2^k$

Fonte de variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade
K efeitos principais		
A	$SS_A$	1
B	$SS_B$	1
⋮	⋮	⋮
K	$SS_K$	1
$\binom{k}{2}$ dois fatores de interação		
AB	$SS_{AB}$	1
AC	$SS_{AC}$	1
⋮	⋮	⋮
JK	$SS_{JK}$	1
$\binom{k}{3}$ três fatores de interação		
ABC	$SS_{ABC}$	1
ABD	$SS_{ABD}$	1
⋮	⋮	⋮
IJK	$SS_{IJK}$	1
⋮	⋮	⋮
$\binom{k}{k}$ k-fatores de interação		
ABC...K	$SS_{ABC...K}$	1
Erro	$SS_E$	$2^k(n - 1)$
Total	$SS_T$	$n2^k - 1$

Fonte: Montgomery (2013)

Mesmo sendo uma das técnicas mais utilizadas para um planejamento de experimento, o planejamento fatorial  $2^k$ , apresenta suas limitações. Conforme a quantidade de variáveis aumenta a matriz de planejamento assume grandes proporções que pode tornar o estudo difícil e inviável para se trabalhar. Assim, métodos fracionários permitem reduzir o tamanho do experimento para tornar viável as análises.

### 3.5.4 Planejamento Fatorial Fracionário $2^{k-p}$

Os experimentos fatoriais completos contêm todas as combinações de configurações de fatores e podem estimar de forma independente todos os principais efeitos e interações. Já os experimentos fatoriais fracionários contêm um subconjunto de todas as combinações de configurações de fatores e algumas estimativas de efeitos serão confundidas (SHEN & VAN, 2009).

Em muitos casos nos quais é necessário a aplicação do planejamento de experimento completo, é envolvida uma quantidade alta de variáveis, tornando o experimento complexo de resolução, pois devido ao grande número de fatores, estes planejamentos exigem uma grande quantidade de combinações (CARPINETTI, 2000).

Como exemplificação, para um experimento que envolve uma quantidade de 7 fatores requer  $2^7 = 128$  combinações testes. Um planejamento com esta quantidade de combinações entre efeitos principais e de interação, resulta em uma quantidade grande de interação. De acordo com Carpinetti (2000) efeitos de mais alta ordem não são significativos e na maioria das vezes podem ser desprezados.

Caso seja assumido que o experimento que as interações de ordem mais altão são insignificantes, as informações provenientes dos efeitos principais e das interações de ordem baixa podem ser obtidas com o uso de frações de planejamento de experimento (MONTGOMERY, 2013). Ainda de acordo com o autor o Planejamento Fatorial Fracionário está entre os tipos de experimentos mais usados para planejamento de produto e processo, melhoria de processo e experimentação industrial/negócio.

De acordo com Carpinetti (2000) o planejamento fatorial fracionário é um caso específico, em que:

- a)  $k$  fatores são examinados;
- b)  $2^{k-p}$  combinações de testes;
- c) Requerendo que  $p$  das variáveis sejam introduzidas no experimento fatorial completo  $2^k$ ;
- d) Onde as colunas de interação da matriz de cálculo de um experimento fatorial  $2^{k-p}$  são usadas para a introdução das variáveis.

A descrição da técnica de planejamento de experimentos fatorial  $2^{k-p}$  está de forma breve pois não envolve nos estudos. Contudo julgou-se necessário a descrição devido à importância desta técnica em planejamentos mais complexos, com grande quantidade de fatores.

O uso das técnicas do planejamento de experimentos apresenta resultados perceptíveis, conforme esta revisão aborda. Contudo, para as partes envolvidas, mensurar os ganhos com a aplicação das técnicas é uma ação importante, pois mostra uma comparação do estado atual com o estado proposto pela análise de resultados proveniente do uso das técnicas de planejamento de experimento. A seguir é abordado mais sobre a mensuração de desempenho.

### **3.6 Indicadores de Desempenho**

Segundo Braz, Scavarda & Martins (2011) e Barbosa e Musetti (2011) a medição de desempenho quantifica a eficiência e eficácia da ação de parte ou de um processo inteiro de um sistema em estudo. E medir e analisar o desempenho organizacional desempenha um importante papel na transformação das metas organizacionais em realidade (POPOVA & SHARPANSKYKH, 2010).

De acordo com Lebas (1995) duas questões devem ser respondidas para avaliação de desempenho de um sistema, sendo: Porque queremos medir? E o que queremos medir? Segundo o autor a relação entre estas duas questões são difíceis de separar, devido as medidas serem escolhidas com um propósito em mente. Porém nem sempre este propósito é suficiente para definir o que deve ser medido, e torna-se necessários operacionalizar o conceito de desempenho antes.

Popova & Sharpanskykh (2010) ressaltam que o desempenho é avaliado pela estimativa dos valores dos indicadores de desempenho qualitativos e quantitativos, sendo essencial para a empresa determinar indicadores relevantes, devido o relacionamento que tem com os objetivos da empresa. Braz *et al* (2011) ressaltam que é muito importante a forma que ocorre a mensuração do desempenho, e para isto alguns atributos são necessários além da equação que quantifica a performance do sistema de estudo. A Tabela 6 apresenta os atributos necessário para indicadores de desempenho e a descrição de cada um.

A proposta de trabalhar com indicadores de desempenho dentro do planejamento de experimentos é uma forma de mensurar o desempenho gerado pelos resultados das análises do experimento. Neste caso a mensuração do desempenho pode não ser fácil de acontecer, devido o desempenho estar associado aos resultados do planejamento de experimento.

Tabela 6 - Principais atributos e significados da medição de desempenho

<b>Atributo</b>	<b>Descrição</b>
Nome	O nome deve evitar ambiguidades. Um bom nome explica o significado da medida e define por que ela é importante.
Objetivo/ Propósito	Relação entre a medida e o objetivo deve estar bem clara.
Escopo	Áreas de negócios ou partes da organização mensuradas.
Metas	Objetivos que a organização buscar atingir.
Fórmula de cálculo	Fórmula que representa como o desempenho será medido.
Unidade de medida	Unidade de medida utilizada.
Frequência de medição	Relacionado com assiduidade em que os dados serão coletados e armazenados no indicador.
Frequência de revisão	Periodicidade em que as medições serão revisadas.
Fonte de dados	Real fonte de dados para o cálculo da medida. Esta fonte deve ser bem consistente.
Responsável pela medição	Pessoa responsável pela coleta e preenchimento dos dados.
Responsável pela ação	Pessoa responsável por conseguir um melhor desempenho.
Responsável pelos dados	Pessoa responsável por tomar ações baseadas nos dados.
<i>Drivers</i>	Fatores que influenciam no desempenho.

Fonte: Adaptado Braz, Scavarda & Martins (2011) e Galvão *et al* (2016)

## **4 EXPERIMENTO INDUSTRIAL**

### **4.1 Empresa estudada**

Diante da necessidade de uma reestruturação interna no processo gerencial e produtivo de uma empresa de vassoura, o Departamento de Engenharia de Produção – DEP - da Universidade Estadual de Maringá –UEM - juntamente com o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Pesquisa – CNPq – passou a analisar e executar modificações da área de produção com o objetivo de fluir o processo produtivo na organização.

A empresa é classificada como micro porte e iniciou suas atividades na Bahia em 2005 mudando posteriormente para Maringá no estado do Paraná em 2008. A empresa atende o mercado interno nas regiões Sul, Sudeste, Centro Oeste e Nordeste e com perspectivas de mercado para a região Norte do país.

Desde sua fundação a organização desempenha um papel social e ambiental em suas atividades, a partir do reaproveitamento da garrafa PET. Na parte ambiental, a empresa é responsável por dar outra destinação das garrafas PET, que antes seriam encaminhadas para o meio ambiente ou aterros sanitários. Quanto a parte social os processos internos da organização utilizam mão de obras de famílias carentes, dependentes químicos, APAES e detentos.

A principal atividade executada na empresa é o processo de fabricação de vassouras ecológicas, cuja matéria prima é proveniente do polietileno tereftalato, proveniente das garrafas do tipo PET. Com esta matéria prima a empresa fabrica 4 tipos de vassouras diferentes, com funções determinadas para cada tipo de atividade a ser executada. Fora esta linha de produtos, a empresa produz ainda rodos de alumínio e espuma, além de encomendas especiais de produtos, conforme especificação do cliente.

### **4.2 Processo produtivo**

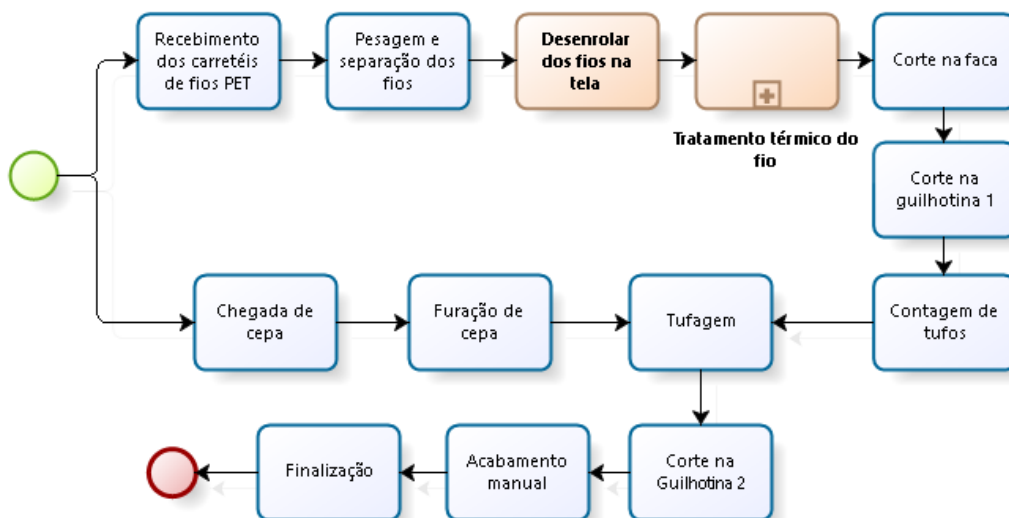
O processo produtivo da empresa é caracterizado por uma produção variada de vassouras, no qual cada modelo apresenta características próprias e peculiares, sendo 3 tipos e vassouras e 4 tipos de vassourões - nome dado pela empresa. A Figura 13 apresenta uma das vassouras que a empresa produz e faz parte do portfólio de produtos comercializados entre os demais tipos de produtos.



**Figura 13 - Vassoura que compõe o portfólio de produção e comercialização da empresa**  
**Fonte: Portal eletrônico da empresa, 2016.**

Porém o processo produtivo para todo o portfólio de produtos é o mesmo, sujeito a um sistema de máquinas construídas e adaptadas para atender as atividades interna da empresa. A alteração que ocorre de um produto para o outro é a forma que os mesmos são montados dependendo da cepa – um componente para encaixe dos tufo de fios – e o acabamento aplicado no final para cada item.

No geral o processo produtivo das vassouras de fios de polietileno tereftalato da empresa está caracterizado na Figura 14, que apresenta a sequência das operações principais para a produção da vassoura.



**Figura 14 - Fluxograma do processo produtivo da empresa Nova Atitude**  
**Fonte: Autor, 2016**



Para o planejamento de experimento são consideradas duas etapas: o procedimento de desenrolar o fio e o de tratamento térmico.

#### 4.2.1 Desenrolar dos fios na tela

Desenrolar o fio, consiste em preparar os fios para o processo de tratamento térmico. A atividade inicia no procedimento de desenrolar o fio do carretel que chega na empresa na tela de ferro, em uma máquina projetada para auxiliar nesta atividade, conforme Figura 15. Na primeira imagem da figura contém a tela na máquina e na segunda a máquina em funcionamento.



Figura 15 - Procedimento de desenrolar fio  
Fonte: Autor, 2016

Analisou-se este processo pelo motivo de avaliar a composição e característica da quantidade de matéria prima, no caso os fios da PET, nas telas. A Figura 16 apresenta um dos modelos da peça que a empresa utiliza no processo produtivo. A tela precisa ter resistência para o tratamento térmico, pois o fio desenvolve uma tração forte capaz de danificar a estrutura da peça.



Figura 16 - Tela de ferro utilizada para o tratamento térmico  
Fonte: Autor, 2016.

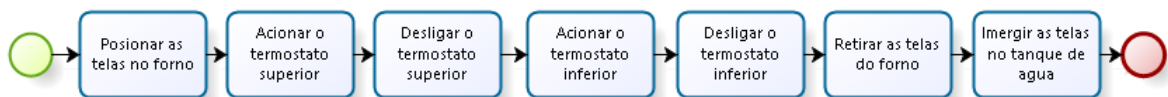
Conforme a Figura 16 mostra, a parte superior e inferior, mesmo com os apoios centrais apresentam deformação na estrutura. Este defeito dificulta a retirada dos fios da tela e diminui a vida útil da peça.

#### 4.2.2 Tratamento térmico

As telas são preenchidas com uma massa de 400 a 850 gramas de fio (matéria prima) na tela, pois a empresa não apresenta até o momento que estava sendo elaborado este trabalho um controlador da quantidade de fio a ser inserido na tela. Com as telas devidamente preenchidas com fios, inicia-se o tratamento térmico.

O tratamento térmico consiste na atividade de aumentar a resistência do fio de PET e garantir que após o tratamento os fios não se encurvem. O processo de tratamento térmico possui uma duração de 25 minutos aproximadamente com uma temperatura em torno de 160°C.

A etapa de tratamento térmico da Figura 14 está detalhada na Figura 17, que apresenta as principais ações da atividade. O procedimento é realizado pelo revezamento dos termostatos, começando inicialmente pelo termostato superior ligado e o inferior desligado e em seguida desliga o superior e liga o termostato inferior. Após a retirada das telas do forno, é avaliada a condição dos fios para uso nos processos subsequentes.



**Figura 17 – Sequência do processo tratamento térmicos dos fios**  
 Fonte: Autor, 2016

A Figura 18 apresenta o esquema de uma tela em seus dois modos de operação e também antes e pós tratamento térmico. A primeira (Figura 18 (a)) mostra a peça de forma “aberta”, que é quando os fios são enrolados. Após a retirada da máquina de desenrolar fio é ajustada a altura da tela. Para que isto ocorra, a tela apresenta um regulador de comprimento para executar a ação. A Figura 18 (b) mostra a estrutura “fechada”. Neste momento os fios que estão em volta se desprendem de suas extremidades e só voltam quando aquecidos pelo forno. As imagens da parte superior exemplificam este procedimento e mostram a tela antes de entrar no forno na figura (a) e após sair do forno na figura (b), e percebe-se o quanto os fios ficaram esticados na tela.

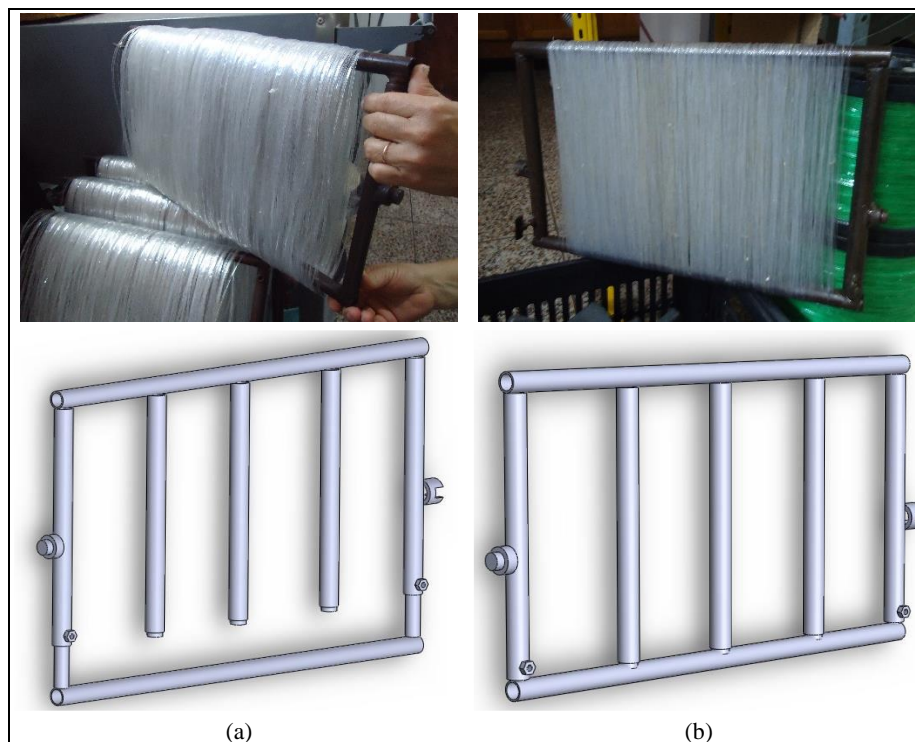


Figura 18 - Modo de operação da tela

Fonte: Autor, 2016

A finalidade desta atividade, é que quando a temperatura começa a agir sobre o conjunto dos fios, ao decorrer do tempo eles começam a encolher e limitando sobre as extremidades da tela novamente, obtendo assim, fios com uma resistência maior e descaracterização circular dos fios da garrafa PET.

### 4.3 Objeto de estudo

O objetivo do trabalho é levantar as faixas dos parâmetros de operação do forno quanto as principais variáveis do equipamento, que é responsável por executar uma das principais atividades da empresa, o tratamento térmico dos fios de polietileno tereftalato. A execução desta atividade garante a resistência e o comportamento reto dos fios nas vassouras.

O equipamento é um forno industrial especificamente projetado para panificadoras. Porém o mesmo foi adaptado para atender a necessidade do processo de fabricação de vassouras. O modelo do forno é um FBE 800 da empresa TEDESCO, com funcionamento a base de energia elétrica na voltagem de 220V. Segundo o manual do fabricante, o forno demora 60 min para aquecer de 0° a 300°C, com um consumo de energia de 4 kW/h, resistência de 5000W de potência e com uma massa de 80kg.

As dimensões externas e internas do forno, podem ser observadas na Figura 19, que apresenta um desenho dimensional do equipamento. As cotas das dimensões estão representadas em letras e sua respectiva referência de valores está associada na Tabela 7.

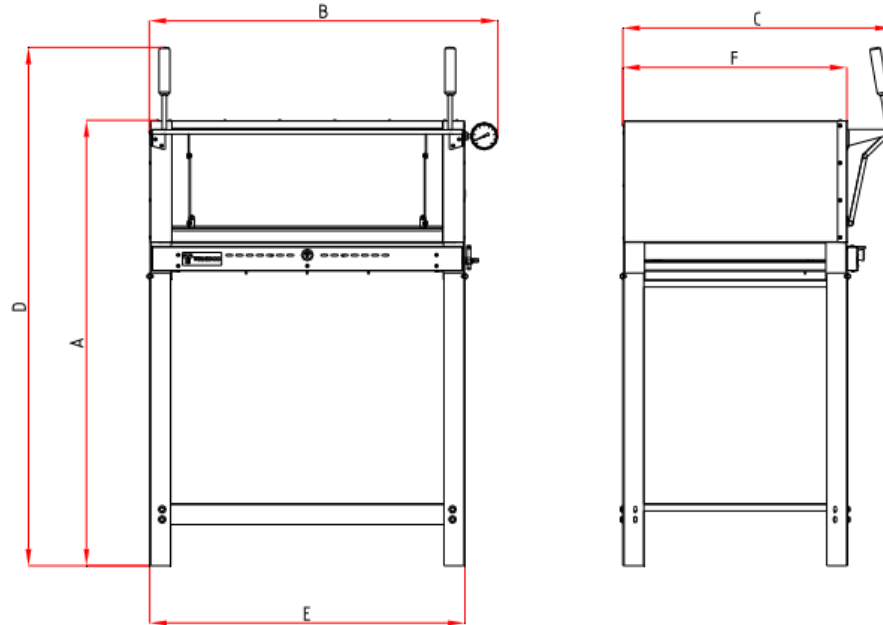


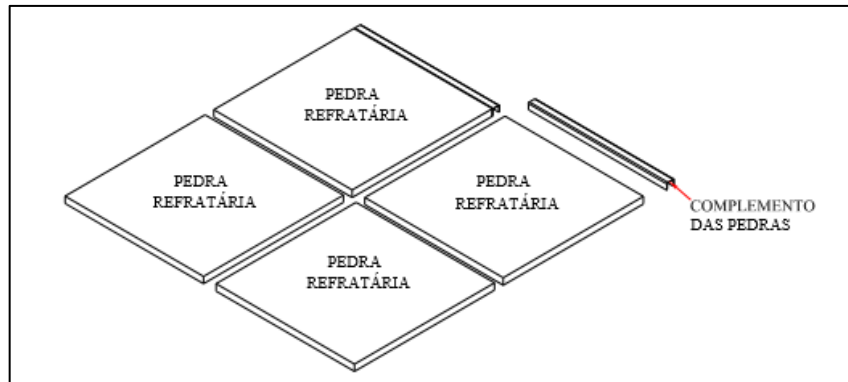
Figura 19 - Desenho do forno responsável pelo tratamento término do fio de PET  
Fonte: Manual do fabricante, TEDESCO (2007)

Tabela 7 - Dimensionamento do forno utilizado na indústria

<b>Dimensionamento Externo</b>						
Cota	A	B	C	D	E	F
Dimensão (mm)	1316	1100	836	1534	930	703
<b>Dimensionamento Interno</b>						
	Largura	Altura	Profundidade			
Dimensão (mm)	800	260	600			

Fonte: Adaptada do Manual do fabricante, TEDESCO (2007)

Na área de aquecimento interna, o forno apresenta uma base com quatro pedras refratárias, responsáveis por manter a temperatura interna constante. O esquema e distribuição destas pedras no interior do forno é destacado na Figura 20. No momento em que os estudos eram realizados dentro da empresa, constatou-se que o estado da desta pedra refratária não se encontrava em boas condições. Uma delas apresentava um trinco na estrutura, e este defeito pode ser responsável por baixar a eficiência do processo de tratamento térmico.



**Figura 20 - Esquema da pedra refratária do forno**  
**Fonte: Manual do fabricante, TEDESCO (2007)**

O equipamento que a empresa utiliza em seu processo de produção é o mesmo apresentado na Figura 19, porém o forno passou por algumas modificações internas para se adequar as necessidades do processo da organização. A modificação principal do forno é a inclusão de uma estrutura que serve de suporte para as telas de ferro que contém os fios de polietileno tereftalato, para realizar o tratamento térmico, conforme sinalizado na Figura 21.



**Figura 21 - Modificações na estrutura interna do forno**  
**Fonte: Autor, 2016.**

A estrutura do forno modificada na Figura 21, permite que as telas sejam enquadradas corretamente dentro do forno, mantendo o fio afastado da superfície inferior ou superior do forno, mesmo que esteja em contato com uma das superfícies, a temperatura nos primeiros minutos reduzirá o comprimento do fio, mantendo-o esticado ao longo das extremidades da tela.

#### 4.4 Planejamento do experimento

A partir do estudo apresentado anteriormente por Curce (2015) e também com base nas análises do processo, foi constatado que o gargalo do processo produtivo se encontra no forno da empresa. Com o objetivo de fazer o processo fluir na organização é necessário realizar alguma interferência no forno, para levantar informações no processo de tratamento térmico dos fios para atuar nas causas. Diante das características do funcionamento do forno e do processo estudado, o Planejamento de Experimento, é uma ferramenta que vem para auxiliar na otimização dos parâmetros de controle que operam este instrumento.

O Planejamento de Experimento, busca trazer dados quando interpretado, transformados em resposta para auxiliar na tomada de decisão na padronização de funcionamento. No caso do forno, busca-se os parâmetros ideais de funcionamento considerando as variáveis que atuam sobre o equipamento.

##### 4.4.1 Estudo e seleção dos fatores de controle

Com o conhecimento do problema e todas as características de operação do objeto de estudo, iniciou-se em seguida a etapa de realizar o levantamento das variáveis de controle, que devem ser escolhidas com cautela, para não descartar um fator importante ou incluir algum outro que não contribuirá com o sucesso do estudo.

Como etapa do planejamento de experimento, após a definição do problema, é realizada a escolha dos fatores de variação e os intervalos e níveis específicos na qual será submetido o experimento, MONTGOMERY (2013).

Após o conhecimento e funcionamento do processo, foram levantados de forma empírica quais eram os fatores de controle que poderiam interferir no rendimento do processo de tratamento térmico dos fios de polietileno tereftalato. A partir de um *brainstorming* realizado na empresa juntamente com os seus funcionários, que tem uma vivência maior com o processo, possibilitou-se levantar os fatores e variáveis que poderiam interferir na operação de tratamento térmico.

Realizar o levantamento das variáveis que atuam sobre um determinado objeto de estudo, pode nem sempre ser tão fácil, e buscar ferramentas ou métodos, auxilia nesta atividade investigatória. Um dos métodos mais difundidos no mundo é o Diagrama de Causa e Efeito, que de acordo com Werkema (1995), é uma ferramenta da qualidade utilizada para expressar a relação entre um resultado do processo e os fatores atuantes neste mesmo processo.

Para identificar todos os parâmetros do processo que causam a baixa eficiência no forno, utilizou-se o diagrama de causa e efeito, conforme representado graficamente na Figura 22.

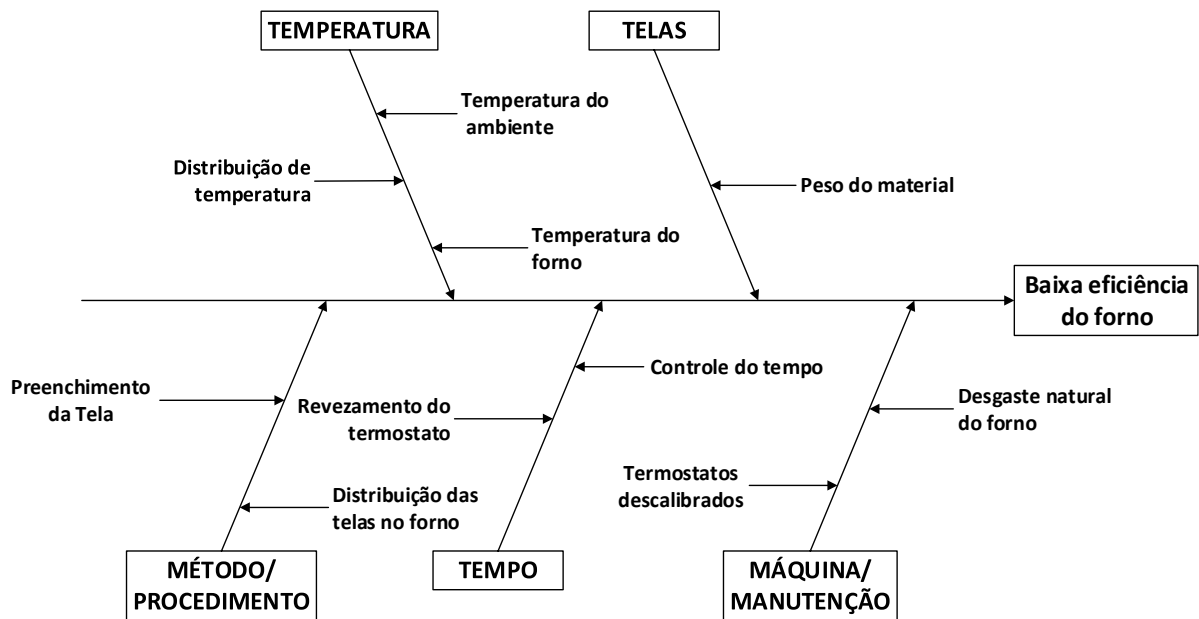


Figura 22 - Diagrama de Causa e Efeito da baixa eficiência do forno  
Fonte: Autor, 2016

A ferramenta de Causa-Efeito representada na Figura 22, foi utilizado para representar a relação dos fatores que agem no processo com a baixa eficiência do forno, que após uma análise do andamento da produção, o forno é apresentado como gargalo do processo.

Com a Figura 22 validada pelos funcionários, a próxima etapa do processo de planejamento do experimento é caracterizada pela coleta dos dados, que serve de informação para tomar decisões sobre o andamento do experimento. Assim, foi implantado durante o período de 6 semanas na empresa uma folha de verificação conforme APÊNDICE B.

Após o período de tomada de dados e com todas as folhas devidamente preenchidas, criou-se uma cópia eletrônica através do *software* EXCEL, com os dados organizados de maneira que poderia ser utilizado de *input* de informação para o *software* MINITAB, no qual foi possível construir os histogramas.

Ainda com a construção da Figura 22, estabeleceu-se em reunião com os orientadores do projeto para definir quais variáveis tem maior representatividade e interferência no desempenho do forno. Estabeleceu-se que as variáveis que apresentam impacto e interferência no desempenho do processo da empresa são: tempo necessário para o tratamento térmico, a



massa da matéria prima que é inserida no tratamento do fio e a última variável a temperatura que as telas são submetidas para tratar os fios.

Inicialmente o pesquisador verificou a representatividade do tipo de tela que é alimentada no forno dentro do período estudado, que consistiu em um período com um mês e meio de operação da fábrica. Conforme Figura 23 e Figura 24, pelos dados coletados a partir das folhas de verificação implantadas, pode-se notar que as telas de tamanho P e M, representam 92% (noventa e dois por cento) dos quatro tipos de telas, tanto pela massa de matéria prima que está na tela, quanto pela quantidade de telas.

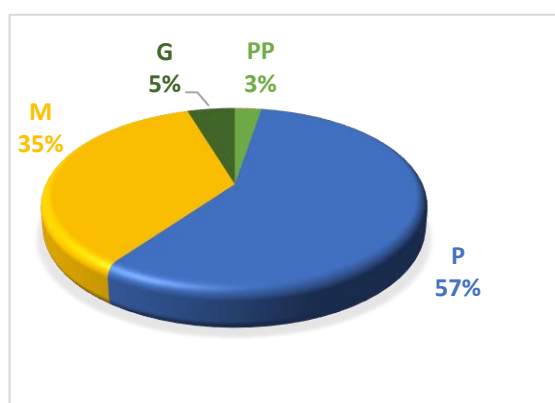


Figura 23 - Massa da matéria prima total por tipo de tela  
Fonte: Autor, 2016

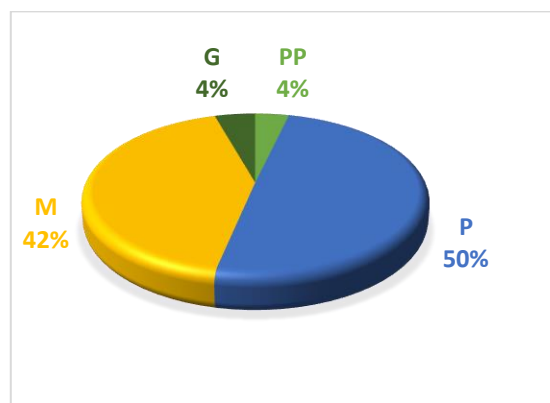


Figura 24 - Quantidade de tela total por tipo de tela  
Fonte: Autor, 2016

Devido as telas de tamanho PP e G apresentarem baixo uso nas atividades da empresa, percebeu-se que o comportamento da quantidade de massa de matéria prima das telas P e M possui quase uma totalidade em relação aos outros dois tipos de telas.

Para continuidade do planejamento de experimento, o pesquisador estudou se antes, dois comportamentos que poderiam interferir no processo. O primeiro está relacionado com o turno diário que é realizado a operação apresentava distinção em que é realizada a atividade e o segundo é a não padronização nas coletas dos fios, ou seja, as diferenças consideráveis da quantidade de fio que entrava no forno entre uma operação e outra.

Portanto, para saber as influências no desempenho do processo foi elaborado uma análise dos histogramas para a quantidade de fios. Assim, da mesma forma, dividiu-se os dados coletados em dois turnos, manhã e tarde, para as duas telas (P e M) de forma isolada e diária. Subsequentemente, iniciou a construção dos histogramas de forma que para cada tipo de tela são gerados dois histogramas.



Os histogramas na Figura 25 apresentam os gráficos da massa dos fios nas telas P e M retirado na parte da manhã e da tarde durante o período de coleta de dados.

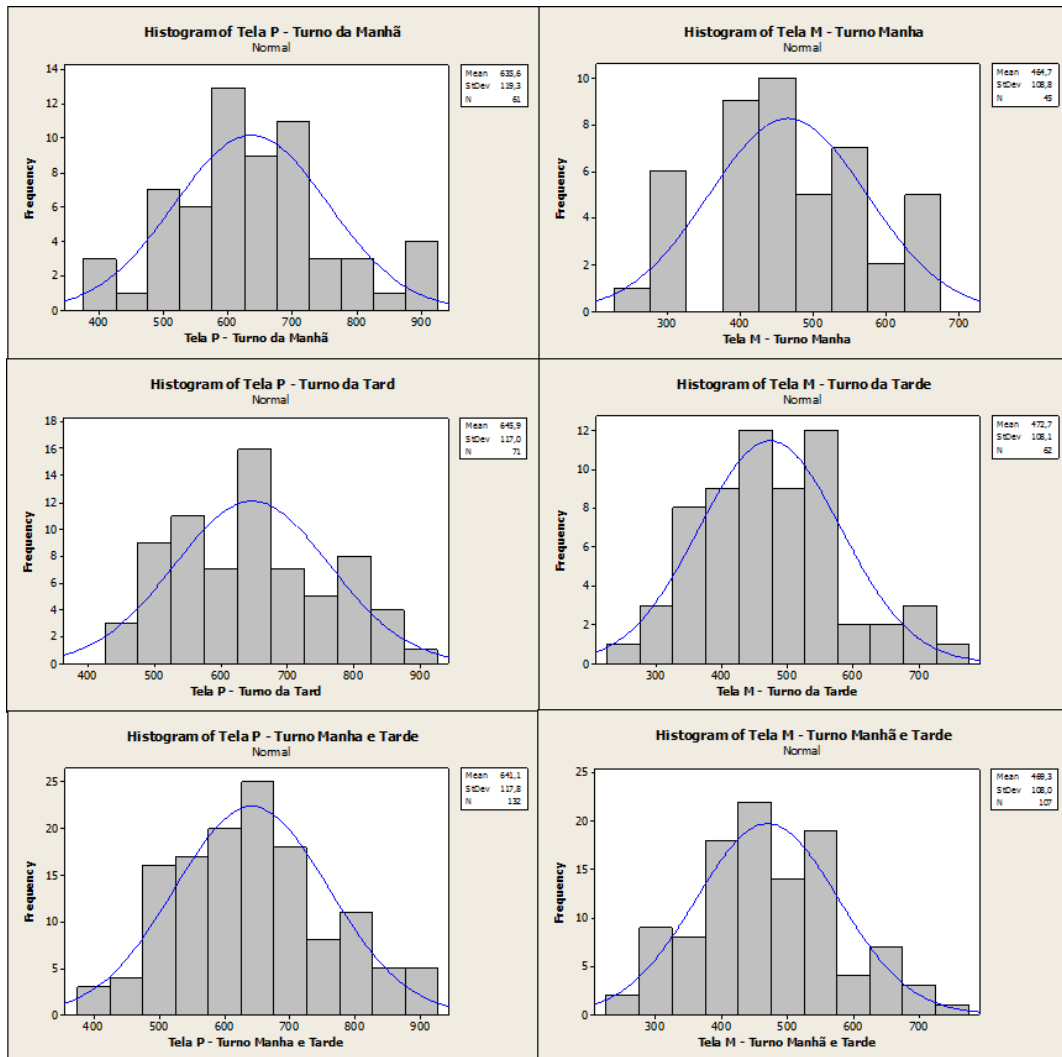


Figura 25 - Histograma da massa de fios nas telas separada por turnos

Fonte: Autor, 2016.

Analisando ainda os gráficos de forma geral, pode-se observar que os fatores atuam diretamente no processo criando uma instabilidade na atividade de enrolar os fios de polietileno tereftalato nas telas. Esta falta de padronização, ocasionada por motivos expostos abaixo, são responsáveis por garantir uma ineficiência do processo assim como um mal aproveitamento do tempo de processamento, capacidade de fios da tela e consumo de energia.

O motivo das instabilidades dos histogramas está relacionado tanto a fatores mecânicos quanto operacionais dos colaboradores. Alguns aspectos levantados foram:

1. Tempo de tomada de fios nas telas, de forma não padronizada;
2. Percepção do operador quanto ao critério de parada do fio na tela

- Interrupções durante o processo de enrolar o fio na tela ocasionada pela máquina;

#### 4.4.2 Parâmetros do processo

Juntamente com a equipe responsável pela condução do Planejamento de Experimento validou-se quais seriam as variáveis de resposta do processo estudado: quantidade de fio dentro dos padrões aceitáveis pela empresa e se estava conforme ou não conforme.

Os fatores já definidos anteriormente, está estruturado em dois níveis cada, o primeiro denotado pelo sinal (-) para o nível inferior e o segundo denotado pelo sinal (+) para um nível superior. A composição e estruturação do planejamento de experimento está representada na Tabela 8, que apresenta cada fator e seus respectivos níveis superiores e inferiores.

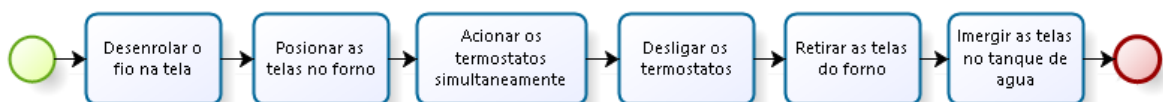
**Tabela 8 - Fatores de Controle e seus respectivos níveis**

Fator	Símbolo	Unidade	Níveis	
			-1	+1
Temperatura do forno	T	°C	120	160
Massa	P	Gramas	500	600
Tempo	t	Min.	15	25

Fonte: Autor, 2016

A faixa de temperatura entre 120 a 160 °C, foi estabelecida entre os extremos superior e inferior, a partir dos dados tomados no estudo do processo (ver APÊNDICE B) com a finalidade de possuir uma maior eficiência das amostragens quando testada em cada nível.

Pela tiragem das primeiras amostras, a empresa adotava o revezamento dos termostatos como justificativa que se ligasse os termostatos simultaneamente o mesmo interferia na estabilidade da rede elétrica. Porém com o avançar do trabalho, a empresa resolveu esta instabilidade elétrica, e assim para o experimento adotou-se uma temperatura única nos dois termostatos funcionando simultaneamente. Portanto, o novo processo adotado para este experimento é apresentado na Figura 26.



**Figura 26 - Processo adotado para realizar a experimentação**

Fonte: Autor, 2016

Quanto a massa de fios, embora pela folha de verificação e pelos histogramas realizados anteriormente apresentem uma faixa de massa de 400 a 850 gramas aproximadamente, considerou-se para a experimentação, níveis de 500 e 600 gramas, devido a atividade seguinte do processo produtivo: Corte na guilhotina. A partir de uma análise do processo da empresa, quando a quantidade de fios ultrapassa a massa de 600 gramas, apresenta uma dificuldade de realizar o corte das partes laterais do conjunto de fios antes presentes na tela.

Com relação ao tempo, o presente trabalho continuou utilizando a faixa usual conforme levantados na folha de verificação, porem com base na análise técnica do processo, considerou o tempo de 15 min, a partir de observações do comportamento do fio quando inserido dentro do forno.

A primeira limitação do processo foi quanto a retirada de fios na tela com a quantidade exata para o processo. A empresa não conta com sistema automatizado para interromper a retirada do fio quando a cota fosse atingida. Com esta restrição estudou-se uma forma de atingir o objetivo e a forma mais eficiente foi com base no tempo de coleta, a partir de uma relação do tempo corrido com a quantidade de fios presente na tela. Com base nesta relação foi possível levantar que:

- Para 500g a retirada ocorria em 2 minutos e 53 segundos;
- Para 600g a retirada ocorria em 3 minutos e 27 segundos.

#### **4.4.3 Influência dos fatores de controle sobre a qualidade do produto**

Com o levantamento dos fatores que interferem no processo de tratamento térmico das telas, levantou-se um estudo sobre os problemas de qualidade dos fios quando submetidos ao processo de tratamento térmico.

##### **4.4.3.1 Qualidade no Processo**

As garrafas de polietileno tereftalato apresentam elevado percentual de cristalinidade, tornando-se translúcidas devido ao tipo de cristais formados durante a preparação da embalagem, que ocorrem por estiramento e sopro. Estas características só são alteradas nos ciclos de aquecimento e/ou resfriamento (BANNACH & PERPÉTUO, 2011).

De acordo com Freire, Reyes & Castle (1998) o sucesso da aplicação do PET deve-se às suas propriedades físico-mecânicas, como rigidez, brilho, estabilidade térmica, estabilidade à luz, assim como propriedades de barreira a gases. Estas características justificam a resistência

que as vassouras apresentam no final do processo produtivo. Contudo, durante o processo de produção, os fios por ser estruturas menores podem ter facilmente estas características perdidas.

As atribuições dos problemas de qualidade quanto ao processo estão relacionadas a forma de operação das atividades de tratamento térmico da empresa. No momento em que se coleta os dados, observou-se que todas as atividades não são padronizadas, pois quando o operador enrola os fios na tela, o critério de parada é a percepção que o mesmo possui sobre a atividade, ou seja, de acordo com sua experiência. Esta forma de operação pode estar contribuindo para descaracterizar as propriedades do PET ou então reduzindo a eficiência do processo produtivo.

Este comportamento de coleta de dados interfere na quantidade de fios presente na tela, comprovando o que foi levantado pela análise do processo e do histograma no item (4.4.1) deste documento, em que é possível ver que não existe um padrão da quantidade que entra no processo de tratamento térmico, impactando na qualidade do produto final desta etapa de produção.

#### **4.4.3.2 Qualidade no Produto**

Como todo o processo produtivo e o próprio produto da empresa são inovadores no mercado, o presente trabalho apresentou uma dificuldade de encontrar informações em base científica sobre problemas de qualidade nesta segmentação de mercado, assim os dados descritos utilizados foram baseados na experiência dos funcionários no processo produtivo da empresa.

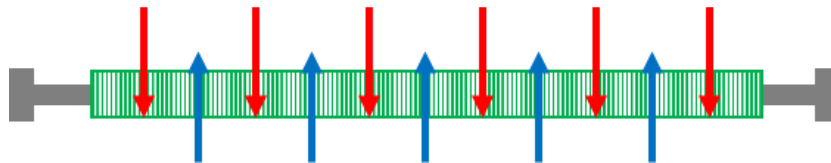
A qualidade do produto é definida pela empresa como um fio resistente sem deformação. Neste caso, é o fio que após o tratamento térmico não apresenta mais as características da garrafa, ou seja, fios que não tendem a enrolar ao longo do tempo após o término do tratamento térmico.

O primeiro problema de qualidade são os fios que apresentam características de queimado, ou seja, o fator temperatura agiu de tal forma sobre os fios que modificaram a coloração de um branco/verde transparente para uma cor mais próxima de uma marrom/cinza com aspecto de opaco, conforme Figura 27, além de romperem a estrutura facilmente.



**Figura 27 - Exemplo de fios que excederam no processo de cristalização**  
**Fonte: Autor, 2016**

O fator distribuição de poucos fios na tela junto a temperatura pode também resultar no problema citado anteriormente. Porém, a distribuição de fios de forma uniforme sobre a tela, conforme Figura 28, é responsável também por uma produção com qualidade de forma uniforme para todo o conjunto de matéria prima presente na tela, ou seja, a distribuição da temperatura é capaz de fluir sobre os fios de forma que apresentem fios padronizados.



**Figura 28 - Distribuição de temperatura em tela com baixa quantidade de fios**  
**Fonte: Autor, 2016**

O segundo fator são os fios que não tiveram um tratamento térmico suficiente para apresentar um fio rígido e resistente, resultando, portanto, em um fio mole com a presença do formato da garrafa, ou seja, o fio não fica reto e sim encurvado.

Os principais fatores para esta ocorrência estão a combinação ou não de uma grande quantidade de fios na tela com baixa temperatura, ou até mesmo com alta temperatura. Devido a este alto volume de fios na tela, o processo não é capaz de ter uma distribuição uniforme em todo o forno, apresentando um efeito similar ao da Figura 29.

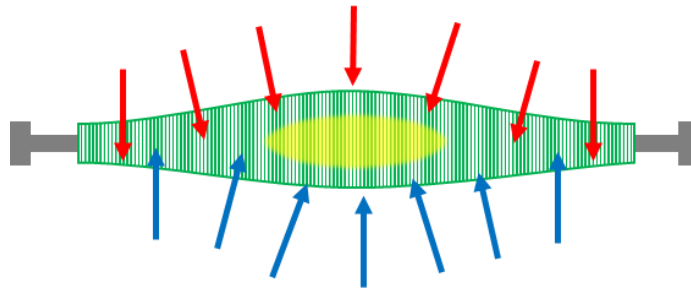


Figura 29 - Distribuição de temperatura em tela com alta quantidade de fios  
Fonte: Autor, 2016

#### 4.4.4 Determinação das variáveis de respostas

Com a finalidade de determinar as interferências mais importante em um produto final, porém considerando todo o andar do produto dentro do processo produtivo, o presente trabalho realizou ainda um *brainstorming* com os funcionários da empresa, responsáveis pela atividade do processo produtivo e também com os que tem contato com os clientes, na tentativa de captar informações sobre um produto de qualidade.

Quando questionados sobre quais eram as características mais importantes para um produto, seja pronto ou dentro do processo produtivo, chegou-se em um consenso que os fios de PET devem ter firmeza, interpretado como fios rígidos, e fios não opacos, ou seja, fios que não queimaram ou tiveram falha no processo de tratamento térmico.

Assim tomou-se como atributos para a resposta do experimento a firmeza do fio ou rigidez e se os fios apresentavam alteração na coloração cristalina para opaca dos fios durante o tratamento térmico, que indica um sinal de fios fora do padrão. Para estudos posteriores das respostas foram criados escalar numéricas, com a finalidade de converter a interpretação subjetiva do experimento em números, conforme Figura 30.

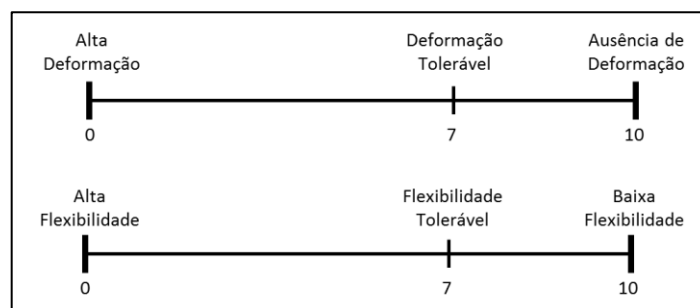


Figura 30 - Escala numérica dos atributos de qualidade  
Fonte: Autor, 2016

Para avaliação da deformação e flexibilidade dos fios presente na tela o pesquisador elaborou uma escala variando entre as notas 0 e 10. No quesito deformação da tela a nota zero representa um produto rejeitado pois os fatores interferiram de forma negativa e a nota 10 representa um conjunto de fios com ausência de defeitos. Quanto ao quesito flexibilidade, a nota zero também representa um conjunto de fios rejeitado pois apresenta alta flexibilidade e a nota 10 representa um produto ideal para o processo, ou seja, fios com baixa flexibilidade. A nota intermediária 7 representa um fio que não tem o padrão de qualidade da empresa, porém, pode ser absorvido pelo processo.

#### 4.5 Execução do Planejamento Experimental

Com todas as etapas anteriores estudadas e definidas, pode-se construir a matriz de planejamento. Conforme descrito anteriormente, foram considerados três fatores de controle, cada um em dois níveis, resultando em 8 combinações. A quantidade de oito experimentos foi viável para aplicação na empresa, assim decidiu usar a técnica de fatorial completo  $2^k$ .

A matriz de planejamento de experimento, conforme Tabela 9, mostra os valores codificados nos níveis (+) e (-) e suas respectivas referências, denotados por valores conforme estipulado na definição dos fatores de controle.

**Tabela 9 - Matriz de planejamentos e dados do experimento**

Ordem	Valores Codificados			Valores Descodificados		
	T (°C)	M (g)	t (min)	T (°C)	M (g)	t (min)
1	-1	-1	-1	120	0,500	15
2	+1	-1	-1	180	0,500	15
3	-1	+1	-1	120	0,600	15
4	+1	+1	-1	180	0,600	15
5	-1	-1	+1	120	0,500	25
6	+1	-1	+1	180	0,500	25
7	-1	+1	+1	120	0,600	25
8	+1	+1	+1	180	0,600	25

Fonte: Autor, 2016

No experimento realizado cada rodada forneceu uma quantidade de 4 telas, que é a demanda do forno para o tratamento térmico. Cada tela foi codificada previamente, com objetivo de rastreamento de cada uma, para a posterior avaliação.

Como a mensuração de qualidade do produto ocorre de forma subjetiva, ou seja, pelos sentidos de tato e visual das pessoas que trabalham com os fios, criou-se uma ficha de avaliação

que permitiria depois que se convertesse o sentido atribuído pela pessoa em nota, utilizando a escala numérica, conforme definido anteriormente, para a realização de uma análise sensorial.

Para avaliação de cada tela, elaborou-se uma ficha - APÊNDICE C- na qual os envolvidos no processo de fabricação ou venda do produto atribuíram notas a cada tela de acordo com a percepção de cada colaborador. As atribuições realizadas por cada operador ocorreram com os seguintes critérios:

- Produto ótimo: produto que atende todos os requisitos de qualidade da empresa. Neste caso todos os atributos estão no nível máximo;
- Produto bom: produto que não tem o padrão de qualidade da empresa, contudo pode ser utilizado;
- Produto ruim: produto com padrão de qualidade considerado indesejável pela empresa, e não pode ser utilizado no processo.

Para a avaliação considerou-se alguns aspectos importantes:

- Cada operador avaliou as quatro telas de um mesmo arranjo do experimento;
- Os envolvidos na avaliação não trocaram contato uns com os outros durante as avaliações;
- Foi enfatizada a importância da avaliação e solicitado que tivessem comprometimento na execução.

Todo este cuidado com as respostas atribuídas pelos colaboradores, é o reflexo da subjetividade que os mesmos apresentaram durante a avaliação. Pode-se perceber que a definição de qualidade não era muito clara ou unânime para um mesmo produto. Assim, a equipe que estava conduzindo os experimentos optou por trabalhar nas notas, de forma que a qualidade mensurada por meio de uma escala de notas fosse mais condizente com o produto avaliado.

A avaliação realizou-se sobre o conjunto de fios cristalizados, após o processo de tratamento térmico, ou seja, não estava no formato de vassoura ainda. Considerando a subjetividade da avaliação e o objetivo de possuir notas mais homogêneas, considerou-se um sistema de ponderação em 3 níveis:

- i. O peso 3 (três) na nota foi atribuído para quem trabalha diretamente no processo;



- ii. Peso 2 (dois) para quem trabalha dentro da empresa e tem contato com o produto menor ao anterior;
- iii. Peso 1 (um) para quem trabalha externo à empresa, no caso vendedores que possuem contato com os clientes.

A equação utilizada para o cálculo da média ponderada está descrita conforme Eq. (12):

$$\bar{x}_p = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i * x_i)}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad \text{Eq. (12)}$$

O próximo capítulo contém a análise dos resultados coletados no experimento realizado.

## 5 ANÁLISE DE RESULTADOS

Com a matriz de planejamento, escala numérica dos parâmetros de qualidade para a avaliação e as considerações definidas, deu-se continuidade no planejamento de experimento neste capítulo pela análise estatística das informações coletadas já nas etapas iniciais do experimento. A Tabela 10, apresenta os resultados obtidos com a avaliação dos operadores para cada conjunto de fios. Importante ressaltar que os valores para as variáveis de resposta ou parâmetros do processo: deformação e flexibilidade é a média ponderada das notas de cada produto que os colaboradores atribuíram na avaliação do experimento.

Tabela 10 - Resultados do experimento

Nº teste	Produto	Deformação	Flexibilidade	Nº teste	Produto	Deformação	Flexibilidade
1	T1T1	7,625	6,875	5	T5T1	10	8,5
	T1T2	8,125	4,375		T5T2	5,125	7,75
	T1T3	8,125	8,125		T5T3	8,5	8,125
	T1T4	7,375	7		T5T4	10	8,125
2	T2T1	7	7,75	6	T6T1	10	10
	T2T2	8,5	7,625		T6T2	9,25	8,125
	T2T3	8,875	7,75		T6T3	7,375	7,375
	T2T4	7,75	6,875		T6T4	10	8,875
3	T3T1	8,875	9,25	7	T7T1	9,25	8,125
	T3T2	8,5	8,5		T7T2	10	10
	T3T3	8,5	7,25		T7T3	9,25	8,125
	T3T4	8,5	8,75		T7T4	9,25	8,875
4	T4T1	4,375	4,375	8	T8T1	9,25	5,5
	T4T2	9,25	3,375		T8T2	6,25	8,875
	T4T3	8,875	5,125		T8T3	9,25	9,625
	T4T4	7,75	6,875		T8T4	8,875	10

Fonte: Autor, 2016

Para a realização da análise estatística do planejamento utilizou-se o *software* Minitab para construção de relatórios, tabelas e gráficos. Como o presente trabalho apresenta duas respostas no planejamento, são elas: deformação e flexibilidade, realizou-se a análise para ambas as respostas.

A determinação do índice de confiabilidade para realizar as análises é uma decisão importante para dar continuidade com os estudos. Em reunião junto com os pesquisadores envolvidos, considerando o processo produtivo em estudo, determinou-se um índice de 95% de confiabilidade para as análises estatísticas.

## 5.1 Análise de Resultados para Deformação

Com base no processamento das informações pelo *software*, obteve-se dois relatórios de análises de resultados. O primeiro relatório é o de estimativa de efeitos e coeficientes na deformação, conforme Tabela 11.

**Tabela 11 - Estimativa de efeitos e coeficiente na deformação**

<b>Termo</b>	<b>Efeito</b>	<b>Coef</b>	<b>EP de Coef</b>	<b>Valor-T</b>	<b>Valor-P</b>
Constante		8,426	0,241	34,99	0,000
Temperatura	0,852	0,426	0,241	1,77	0,090
Tempo	0,383	0,191	0,241	0,79	0,435
Massa	0,242	0,121	0,241	0,5	0,620
Temperatura*Tempo	-0,242	-0,121	0,241	-0,5	0,620
Temperatura*Massa	0,648	0,324	0,241	1,35	0,191
Tempo*Massa	-0,008	-0,004	0,241	-0,02	0,987
Temperatura*Tempo*Massa	0,148	0,074	0,241	0,31	0,761

Fonte: Autor, 2016.

Embora a temperatura apresente o maior valor de efeito, é necessário antes avaliar o Valor-P na Tabela 11, comparando-o ao nível de significância de  $\alpha = 0,05$ . Assim percebe-se que não é possível determinar a importância (nível de significância) dos fatores para a deformação, devido os Valores-P de cada fator serem maiores que 0,05. Contudo, o fator temperatura se destaca em relação ao demais devido possuir o Valor-P consideravelmente abaixo em comparação com os outros valores.

A segunda análise corresponde a ANOVA (Análise de variância), conforme Tabela 12.

**Tabela 12 – Análise de variância (ANOVA) - deformação**

<b>Análise de Variância - Deformação</b>						
<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ (Aj.)</b>	<b>QM (Aj.)</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor-P</b>	
Modelo	7	11,4526	1,63609	0,88	0,535	
Linear	3	7,4429	2,48096	1,34	0,286	
Temperatura	1	5,8013	5,80127	3,13	0,090	
Tempo	1	1,1724	1,17236	0,63	0,435	
Massa	1	0,4692	0,46924	0,25	0,620	
Interações de 2 fatores	3	3,8335	1,27783	0,69	0,568	
Temperatura * Tempo	1	0,4692	0,46924	0,25	0,620	
Temperatura * Massa	1	3,3638	3,36377	1,81	0,191	
Tempo * Massa	1	0,0005	0,00049	0	0,987	
Interações de 3 fatores	1	0,1763	0,17627	0,09	0,761	
Temperatura * Tempo * Massa	1	0,1763	0,17627	0,09	0,761	
<b>Erro</b>	<b>24</b>	<b>44,543</b>	<b>1,85596</b>			
<b>Total</b>	<b>31</b>	<b>55,9956</b>				

Fonte: Autor, 2016

Quando analisada a tabela de Análise de Variância (ANOVA) para a deformação com confiabilidade de 95% não é possível determinar a importância dos fatores na variável reposta. Comparando os valores-P de cada fator com o nível de significância de  $\alpha = 0,05$ , todos os fatores apresentam valores maiores que 0,05, não sendo possível determinar que são significantes para a Deformação. Analisando ainda através do Valor F de cada fator

comparando com os respectivos Valores F tabelado, os Valores F dos fatores são menores que os tabelados, também concluindo que não é possível afirmar que são significativos.

Iniciando as análises dos gráficos para a resposta da deformação, o primeiro apresentado é o gráfico normal de efeitos, conforme Figura 31, que apresenta todos os pontos dos efeitos principais e de interação próximos à reta, o que mostra que não é possível determinar a significância destes fatores na variável resposta, pois a linha ajustada indicam os pontos onde se esperam que os efeitos sejam zero.

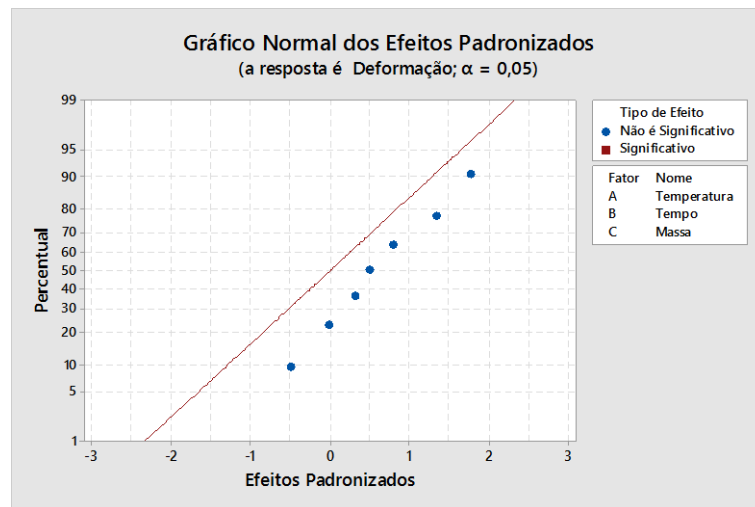


Figura 31 - Gráfico normal dos efeitos padronizados – deformação  
Fonte: Autor, 2016.

Pelo gráfico de probabilidade normal *versus* resíduos, conforme Figura 32, a normalidade é identificada quanto os dados tendem a uma reta, a que se aplica neste caso.

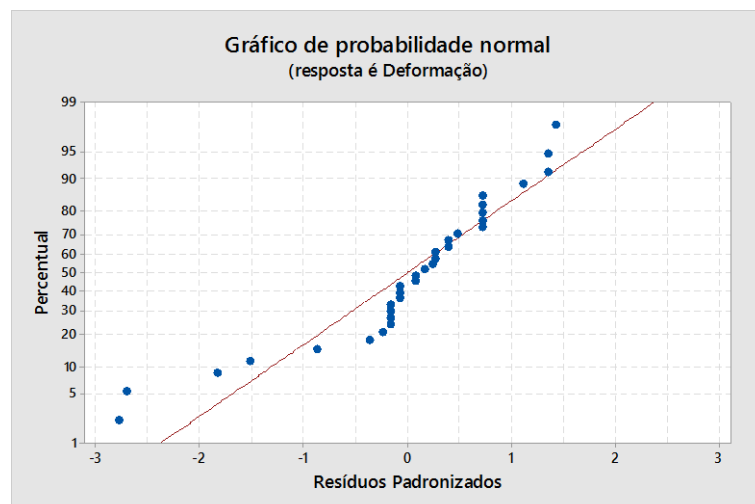


Figura 32 - Gráfico de probabilidade normal versus resíduos – deformação  
Fonte: Autor, 2016

## 5.2 Análise de resultados para Flexibilidade

Da mesma forma que para o tópico anterior, analisou-se os dois relatórios emitidos pelo *software*. O primeiro a ser analisado foi o relatório de estimativa de efeitos e coeficientes na flexibilidade, conforme Tabela 13.

**Tabela 13 - Estimativa de efeitos e coeficientes na Flexibilidade**

<b>Termo</b>	<b>Efeito</b>	<b>Coef</b>	<b>EP de Coef</b>	<b>Valor-T</b>	<b>Valor-P</b>
Constante		7,684	0,216	35,58	0,000
Temperatura	1,633	0,816	0,216	3,78	0,001
Tempo	1,242	0,621	0,216	2,88	0,008
Massa	-0,461	-0,23	0,216	-1,07	0,296
Temperatura*Tempo	-0,961	-0,48	0,216	-2,22	0,036
Temperatura*Massa	0,836	0,418	0,216	1,94	0,065
Tempo*Massa	0,133	0,066	0,216	0,31	0,761
Temperatura*Tempo*Massa	-0,227	-0,113	0,216	-0,52	0,605

Fonte: Autor, 2016.

Da mesma forma que na resposta da deformação, na flexibilidade para avaliar o efeito dos fatores, analisou o Valor-P de cada fator em comparação como valor de  $\alpha = 0,05$ . Os três fatores significantes são, temperatura, massa e o de interação temperatura\*massa.

**Tabela 14 - Análise de variância (ANOVA) - Flexibilidade**

Análise de Variância - Flexibilidade						
<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ (Aj.)</b>	<b>QM (Aj.)</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor-P</b>	
Modelo	7	48,9019	6,986	4,68	0,002	
Linear	3	35,3726	11,7909	7,9	0,001	
Temperatura	1	21,3286	21,3286	14,29	0,001	
Tempo	1	12,3442	12,3442	8,27	0,008	
Massa	1	1,6997	1,6997	1,14	0,296	
Interações de 2 fatores	3	13,1187	4,3729	2,93	0,054	
Temperatura * Tempo	1	7,3872	7,3872	4,95	0,036	
Temperatura * Massa	1	5,5903	5,5903	3,75	0,065	
Tempo * Massa	1	0,1411	0,1411	0,09	0,761	
Interações de 3 fatores	1	0,4106	0,4106	0,28	0,605	
Temperatura * Tempo * Massa	1	0,4106	0,4106	0,28	0,605	
<b>Erro</b>	<b>24</b>	<b>35,8164</b>	<b>1,4924</b>			
<b>Total</b>	<b>31</b>	<b>84,7183</b>				

Fonte: Autor, 2016.

No caso da resposta Flexibilidade, pode-se perceber que pela ANOVA na Tabela 14, que para esta resposta, dois fatores principais são significativos, sendo: temperatura e massa, além de um fator de interação, sendo: temperatura\*massa. É possível chegar nesta conclusão tanto analisando o Valor-P quanto o Valor F para cada fator principal e de interação, considerando uma confiabilidade para análise de 95%.

O gráfico normal dos efeitos para a flexibilidade, representado pela Figura 33, diferentemente do gráfico normal dos efeitos de deformação, apresenta três efeitos significantes considerando o valor de  $\alpha = 0,05$ , sendo os fatores principais: A = temperatura e

B = tempo e a interação entre A e B, AB = temperatura\*tempo. O gráfico de probabilidade normal da Figura 33 mostra que a temperatura e o tempo exercem um efeito significativo positivo na flexibilidade do produto, mas a interação entre ambos exerce um efeito significativo negativo na flexibilidade do produto, os demais se ajustam à reta e não é possível determinar a importância destes fatores para o experimento considerando um nível de confiabilidade de 95%.

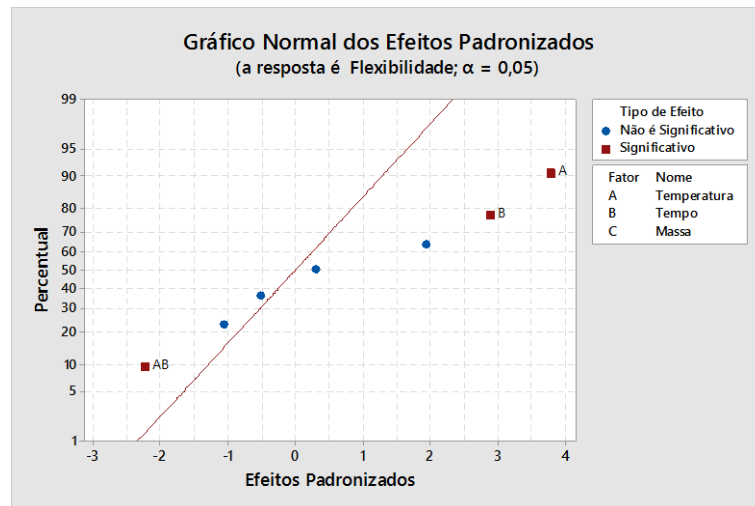


Figura 33 - Gráfico normal dos efeitos – flexibilidade  
Fonte: Autor, 2016

Pelo gráfico de probabilidade normal *versus* resíduos, conforme Figura 34, a normalidade é identificada também para a flexibilidade devido os dados tenderem a uma reta.

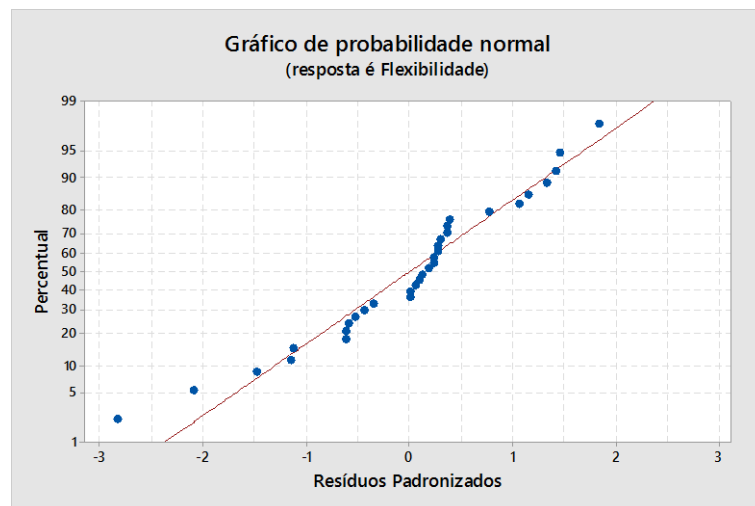


Figura 34 - gráfico de probabilidade normal versus resíduos – flexibilidade  
Fonte: Autor, 2016

### 5.3 Análise Geral do Experimento

Para as análises anteriores de cada variável resposta, pode-se por meio do estudo dos efeitos principais e de interação, através da ANOVA e auxílio de gráficos verificar o

comportamento de cada fator. Neste tópico do trabalho serão analisadas ambas as repostas lado a lado, para comparar os resultados que cada uma gerou.

O estudo das interações entre as variáveis, é apresentado pela Figura 35 (a) e (b). Os gráficos já confirmam as análises anteriores. Tanto para a variável de resposta Flexibilidade representada pela figura (a) quanto para a deformação representada na figura (b) a análise é análoga. Assim conforme os gráficos para uma temperatura de 120°C o melhor arranjo é uma composição de matéria prima com 500g e tempo de 25 minutos e para uma temperatura de 160°C o melhor arranjo é matéria prima com massa de 600g e tempo de 25 minutos. Como a linha entre tempo e massa é paralela, o gráfico indica que não há interação entre estes dois parâmetros para ambas as variáveis de resposta.

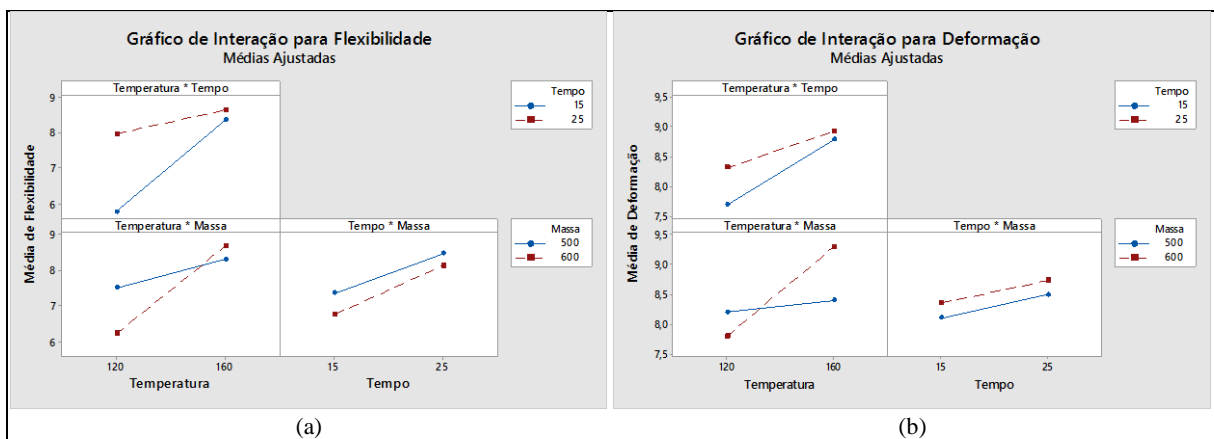


Figura 35 - Gráficos de interação para Flexibilidade (a) e Deformação (b)  
Fonte: Autor, 2016.

Nos gráficos que estudam os efeitos principais dos fatores, cada ponto representa o tempo de processamento médio para um nível, conforme Figura 36.

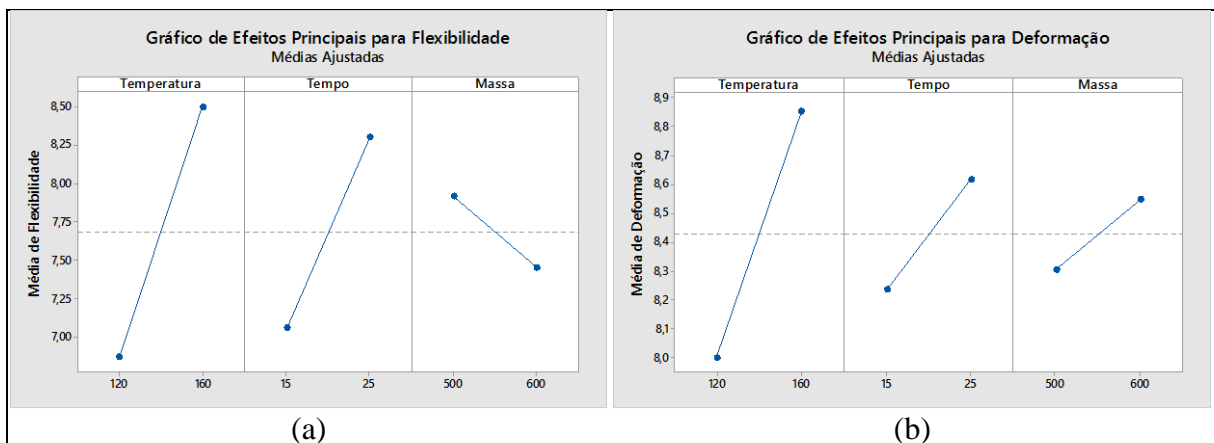


Figura 36 - Gráficos de efeitos principais para Flexibilidade (a) e Deformação (b)  
Fonte: Autor, 2016.

Analisando a Figura 36 (a) e (b), percebe-se que a temperatura em ambas as variáveis de resposta apresenta o maior efeito principal, pois a linha que conecta as respostas médias do nível mais baixo para o nível mais alto tem a inclinação mais íngreme em comparação com os demais fatores. O fator tempo também possui um efeito principal alto, contudo a reta da temperatura é mais íngreme. A massa para ambos os gráficos da Figura 36 apresenta o menor efeito principal, pois de modo análogo a fator temperatura e tempo, a linha que conecta os pontos médios apresenta a menor inclinação.

Assim, com as informações do estudo dos efeitos, ANOVA e os gráficos apresentados, é possível chegar à conclusão que com um nível de 95% de confiabilidade os efeitos principais que são significativos para o processo são temperatura e tempo, por ordem de relevância respectivamente. Para os efeitos com interação, o único que se destaca é a interação entre temperatura e tempo, o que é aceitável, visto que quanto maior a temperatura e maior o tempo, mais rápido a matéria prima tende a passar por mudança de suas propriedades.

Analisando os relatórios gerados pelo *software*, realizou-se a otimização das respostas de Deformação e Flexibilidade. A Tabela 15, apresenta oito soluções viáveis para operar o processo. Contudo as quatro primeiras apresentam uma baixa variação nas respostas de Flexibilidade e Deformação, e como o objetivo do trabalho é também apresentar novas formas de operação, a solução 4 pode ser a melhor configuração, devido permitir uma redução no tempo de operação.

**Tabela 15 - Otimização das respostas**

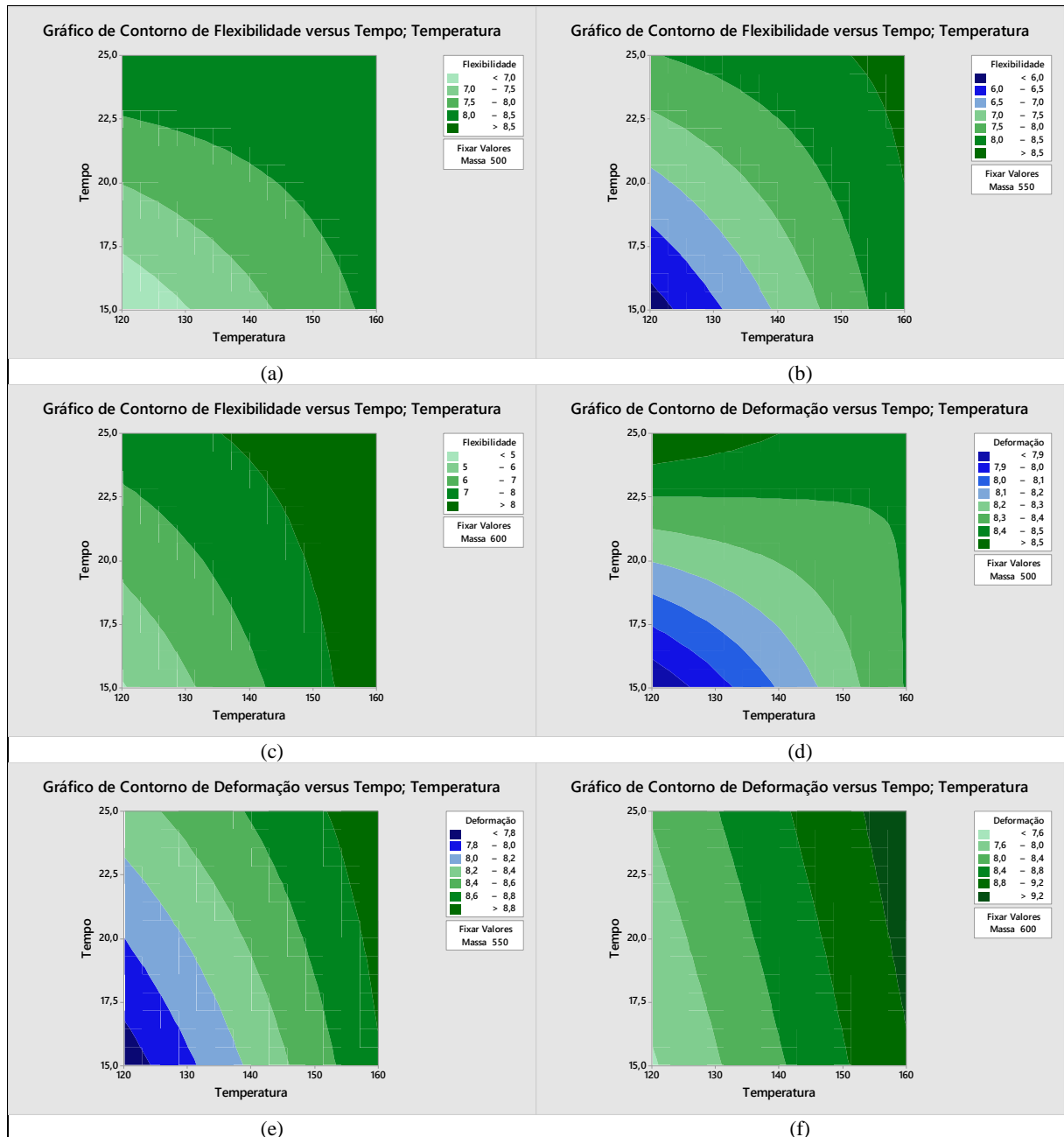
Solução	Temperatura	Tempo	Massa	Flexibilidade	Deformação	<i>Desirability</i>
				Ajuste	Ajuste	
1	160	25	600	8,78125	9,4375	0,856991
2	160	23,0541	599,705	8,74383	9,37989	0,849147
3	159,858	25	585,777	8,73731	9,28664	0,840688
4	160	20,3817	599,808	8,69395	9,30588	0,838921
5	120	25	500	8,4375	8,59375	0,757042
6	148,4	19,4676	571,539	7,95732	8,69922	0,729193
7	150,774	15,0489	562,463	7,76201	8,59502	0,704835
8	126,952	25	590,472	7,79183	8,30287	0,682306

Fonte: Autor, 2016.

Por meio dos gráficos de contorno, pode-se validar as soluções de otimização das respostas, sendo possível identificar que a resposta deformação – gráficos (d), (e) e (f) da Figura 37 – permite uma oscilação maior entre as variáveis de controle e manter valores de qualidade aceitáveis para a resposta. O mesmo não acontece para a flexibilidade – os gráficos (a), (b) e (c) da Figura 37 – trazem que para possuir bons valores para a variável resposta o fator



temperatura precisa estar entre 150 a 160°C e o tempo não menos que 20 minutos, independente da massa.



**Figura 37 - Gráficos de contorno para as respostas em função dos fatores**  
 Fonte: Autor, 2016.

Embora no relatório apresenta a melhor combinação dos parâmetros dos fatores para aplicar no processo, nota-se que existem outros arranjos dos fatores que trazem também resultados satisfatórios, conforme Tabela 15. Diante das opções de otimização e da análise dos gráficos de contorno, elaborou-se a Tabela 16, que apresenta a faixa de temperatura e tempo para cada valor fixo da massa.

Tabela 16 - Parametrização do processo de tratamento térmico

	Flexibilidade			Deformação		
Massa (g)	500	550	600	500	550	600
Temperatura (°C)	120-160	155-160	135-160	120-140	155-160	155-160
Tempo (min)	15-25	20-25	16-25	23-25	16-25	16-25

Fonte: Autor, 2016.

A determinação das faixas de trabalho da temperatura e tempo, foi feita através da análise da região ótima dos gráficos de contorno da Figura 37, considerando a variação dos valores dos fatores, para delimitar a região com as melhores repostas. Com estas informações, pode-se continuar os estudos para encontrar uma função que represente estas limitações.

Um aspecto importante a comentar é o não levantamento de nenhum efeito principal ou de interação para a variável de resposta Deformação. Isto pode ser justificado através do conceito que esta resposta apresenta. A deformação de fato só ocorre quando o fio passa do tempo de retirada do forno, quando as propriedades do fio passam por mudanças, e um fio que era rígido e forte, torna-se fraco pois passa a ter aspecto de plástico derretido. Na opinião da equipe, isto é aceitável devido a quantidade de conjuntos de fios que apresentaram alguma alteração na estrutura física ter sido praticamente desprezível. Assim os fios do jeito que entram no tratamento térmico, ocorrendo o processo dentro do conforme, saem com a mesma aparência.

#### 5.4 Mensuração do desempenho do Planejamento de Experimentos

Para mensuração do desempenho do planejamento de experimento, utilizou-se um indicador de desempenho para o planejamento de experimento. Neste caso considerou-se a resposta 4 (temperatura de 160°C, tempo de 20 min, e massa de 600g) da Tabela 15, que não apresenta grande variação na qualidade do experimento em comparação com as três primeiras.

Para mensurar o possível ganho com a implantação da resposta no processo da empresa, realizou-se algumas considerações, do processo atual:

- 25 minutos por tratamento térmico;
- 12 tratamentos térmico por dia e 3 vezes por semana;
- O forno é operado 12 dias por mês;
- 60 minutos de *setup* por dia;
- 45 min de transição entre tratamentos por dia;

Com estas considerações, o forno passava em torno de 6,75 horas por dia no processo que a empresa opera, com o resultado do DoE, considerando a opção 4 que mantém a temperatura e a massa aproximadas. Porém ao diminuir o tempo de 25 para 20 minutos, o novo arranjo de operação entre estes fatores totaliza 5,75 horas por dia já considerando o tempo de *setup* e transição entre um tratamento e outro. Com o indicador representado na Tabela 17, é possível mensurar o desempenho que o experimento pode fornecer para a empresa.

**Tabela 17 - Mensuração de Desempenho do Planejamento**

Indicador de Desempenho do consumo de energia	
Atributo	Descrição
Título	Consumo de Energia
Objetivo	Compara o consumo de energia do forno antes do DoE e com a resposta do planejamento de experimento
Escopo	Manufatura
Meta	Não se aplica
Fórmula de Cálculo	$\frac{\text{Energia consumida com o processo atual}}{\text{Energia consumida como resposta do DoE}} \times 100$
Unidade de Medida	kW (kilo Watts)
Frequência de medida	Diário
Frequência de Revisão	Quando necessário
Fonte de dados	Planejamento de experimento e dados técnicos do forno
Responsável pela medição	Pesquisador
Responsável pela ação	Pesquisador
Responsável pelos dados	Pesquisador e Funcionários da empresa
<i>Drivers</i>	<i>No drivers</i>

Fonte: Autor: 2016.

Utilizando o indicador da Tabela 17 e os dados técnicos do forno, conforme descrito anteriormente, que traz que o consumo de energia é de 4 kW/h, é possível chegar à conclusão de que este novo arranjo vai implicar numa redução de 14,8% de energia, que reflete numa diminuição de 4 kW diário ou 48 kW mês.

Com estes dados, juntamente com a tarifa de energia cobrada, é possível determinar o ganho financeiro do experimento além do ganho produtivo na fabricação das vassouras.

## 5.5 Avaliação do Produto Final

Após os conjuntos de fios terem passados pela avaliação para realizar a análise do planejamento de experimento, os mesmos foram encaminhados para continuar a produção. Porém, os mesmos foram rastreados durante as etapas em que o produto era formado. Ao

finalizar a produção, foi solicitado que cada pessoa voltasse a fazer a avaliação do produto final da mesma forma que ocorreu na primeira, neste caso, os produtos já se encontravam prontos para venda. Com a avaliação desenvolveu a Tabela 18, que apresenta os experimentos realizados, os níveis dos fatores de controle e a média aritmética das notas de cada produto envolvidos na atividade e venda.

**Tabela 18 - Avaliação do Produto Final**

Teste	Temperatura	Tempo	Massa	Nota
1	120	15	500	7
2	120	25	600	6
3	120	25	500	6,75
4	120	15	600	5,25
5	160	15	500	8,5
6	160	15	600	6,25
7	160	25	600	10
8	160	25	500	9,25

**Fonte: Autor, 2016.**

Observa-se que a maior nota atribuída pelos funcionários coincide com a melhor resposta mostrada pela Tabela 15, no qual é apresentado uma lista de otimização de resposta. Contudo, a Tabela 18 apresenta outras notas consideravelmente boas para o produto em arranjos diferentes dos fatores.

Quanto à aprovação dos produtos, todos os colaboradores estavam de comum acordo de que todos os produtos apresentavam capacidade de ser vendidos., ou seja, o resultado foi consensual e positivo. Porém, alguns se destacaram com uma qualidade superior. Os resultados do produto já em fase de venda reforçam os estudos realizados no processo.

## 6 CONCLUSÕES

Experimento fatorial completo é um método de planejamento de experimentos que analisa as influências de todos os fatores estudados e as interações entre si. Os experimentos fatoriais são usados quando vários fatores precisam ser investigados.

Neste trabalho estudou-se a aplicação do planejamento de experimentos em um forno industrial que realiza o tratamento térmico de fios de polietileno tereftalato, fios de garrafas do tipo PET, com o objetivo de levantar quais eram os parâmetros que influenciavam no desempenho do equipamento. Após o levantamento destes parâmetros, estudou-se a formulação e aplicação do planejamento de experimentos no objeto de estudo.

A ideia de qualidade que os envolvidos na avaliação dos experimentos apresentaram, foi o parâmetro para mensurar a qualidade na variável de resposta. Estes envolvidos são pessoas que estão ligados ao processo produtivo ou em contato com o cliente, que recebe o *feedback* dos produtos produzidos.

Com base em relatórios, Análise de Variância (ANOVA) e gráficos, analisou-se por meio de técnicas estatísticas o comportamento que os fatores apresentaram no experimento realizado. A interação entre os gráficos gerados confirmou o que os relatórios de efeitos principais e de interação e a ANOVA levantaram sobre o comportamento do processo. Mesmo diante de adversidades, como por exemplo a subjetividade dos operadores em mensurar a qualidade do produto, as análises efetuadas são favoráveis, além de poder ser considerada condizente com a realidade da empresa.

### 6.1 Contribuições

Com esta rodada do planejamento de experimentos pode-se determinar que o melhor arranjo de operação do forno entre os pontos ótimos obtidos pelo relatório, é com temperatura de 160°C, tempo de 20min e massa da matéria prima de 600 gramas. Contudo, percebeu-se por meio de análise de gráficos de contorno que é possível dar continuidade neste estudo, visto que existe uma região de pontos ótimos, e possivelmente dentro desta região pode haver mais arranjos dos fatores que otimizam o processo de tratamento térmico e determinando a melhor faixa de operação do forno industrial no processo de tratamento térmico.

O trabalho contribui ainda para a empresa em mostrar a importância de manter um processo produtivo com suas atividades padronizadas. Inicialmente, percebeu-se que a execução das atividades era realizada pelo senso do operador, ou seja, a quantidade de matéria

prima (fios de PET) que passava pelo tratamento não tinha um valor exato. E, com o planejamento de experimentos, foi possível mostrar que a massa de cada tela com fio, introduzida dentro do processo altera a qualidade do fio pós-tratamento térmico.

Quanto à proposta dos indicadores de desempenho, embora apresente uma margem de ganho com o experimento, é preciso validar antes o experimento para determinar o real desempenho que o experimento pode contribuir. Os indicadores serão uma forma de mensurar para a empresa qual a interferência que as faixas de operação poderão interferir no processo produtivo, como por exemplo: consumo de energia e hora homem necessário.

## **6.2 Limitações do trabalho**

As dificuldades enfrentadas na aplicação do planejamento de experimentos na empresa, está relacionada a:

- Resistência em realizar os estudos;
- Falta do senso de qualidade contínua dentro da empresa;
- Mensuração dos dados devido a tecnologia presente nos equipamentos ser rudimentar;
- Subjetividade dos operadores para avaliar o conceito de qualidade para o produto.

## **6.3 Trabalhos Futuros**

O estudo do planejamento de experimentos no processo de tratamento térmico para empresa levantou bons resultados. Mesmo sem poder determinar o melhor valor de operação do processo, o trabalho apresentou o comportamento do forno industrial presente na empresa. Nas análises de otimização e dos gráficos de controle, percebe-se que o estudo ainda tem oportunidade de avançar para chegar em respostas mais concretas. Como proposta de trabalhos futuros, sugere-se:

- Encontrar uma função que descreva o comportamento do forno, com relação aos fatores de operação nas variáveis de respostas;
- Realizar mais uma rodada para validar os estudos presentes neste trabalho;
- Validar indicadores de desempenho para mensurar as contribuições deste planejamento de experimentos à empresa.
- Implantar um medidor de temperatura para verificar se os termostatos do forno estão em conformidades;

## REFERÊNCIAS

AL-GHAMDI, Khalid A. **A simple method for dealing with aliasing in experimental design.** International Journal of Quality & Reliability Management, v. 30, n. 8, p. 877-896, 2013.

ANGRISANI, Leopoldo et al. **Design of experiments for power measurement method in wireless communications systems.** In: Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2011 IEEE. IEEE, 2011. p. 1-6.

BADIA, J. D. et al. **A statistical design of experiments for optimizing the MALDI-TOF-MS sample preparation of polymers.** An application in the assessment of the thermo-mechanical degradation mechanisms of poly (ethylene terephthalate). Analytica chimica acta, v. 692, n. 1, p. 85-95, 2011.

BANNACH, G., PERPÉTUO, G. L., CAVALHEIRO, É. T. G., CAVALHEIRO, C. C. S., & ROCHA, R. R. **Efeitos da história térmica nas propriedades do polímero pet: um experimento para ensino de análise térmica.** Química Nova, p. 1825-1829, 2011.

BARBOSA, Danilo Hisano; MUSETTI, Marcel Andreotti. **The use of performance measurement system in logistics change process: proposal of a guide.** International journal of productivity and performance management, v. 60, n. 4, p. 339-359, 2011.

BRAZ, Renata Gomes Frutuoso; SCAVARDA, Luiz Felipe; MARTINS, Roberto Antonio. **Reviewing and improving performance measurement systems: An action research.** International Journal of Production Economics, v. 133, n. 2, p. 751-760, 2011.

CAMORIM, José Eduardo Vieira. **Estudo Comparativo das Aproximações Baseadas no Método de Decomposição Paramétrico para Avaliar Redes de Filas de Manufatura Utilizando Planejamento de Experimentos.** 188 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos - SP, 2008.

CARPINETTI, Luiz C. R. **Planejamento e análise de experimentos.** EESC/USP, São Carlos, 2000.

CURCE, Juliana Soares. **Uma Abordagem da Função de Custos da Qualidade para uma Indústria de Vassouras PET.** 84 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Estadual de Maringá (UEM), Maringá – PR, 2015.

DOWLATSHAHI, Shad. **An application of design of experiments for optimization of plastic injection molding processes.** Journal of Manufacturing Technology Management, v. 15, n. 6, p. 445-454, 2004.

ENSSLIN, Leonardo; ENSSLIN, Sandra Rolim; PINTO, H. de M. **Processo de investigação e Análise bibliométrica: Avaliação da Qualidade dos Serviços Bancários.** Revista de Administração Contemporânea, v. 17, n. 3, p. 325-349, 2013.

FERNANDES, Flavio Cesar Faria; GODINHO FILHO, Moacir. **Planejamento e controle da produção: dos fundamentos ao essencial.** 2010.

FREIRE, Maria Teresa de A.; REYES, Felix GR; CASTLE, Laurence. **Estabilidade térmica de embalagens de poli (tereftalato de etileno (PET): determinação de Oligômeros**. Polímeros, v. 8, n. 1, p. 46-53, 1998.

GALDÁMEZ, Edwin Vladimir Cardoza. **Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos**. 2002. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo

GALVÃO, E. M; COTRIM, S. L.; LEAL, G. C. L. & GALDAMEZ, E. V. C.. **Resultados Preliminares da Implantação de Indicador de Desempenho de Produção em uma Indústria de Nutrição Animal**. Revista ESPACIOS| Vol. 37 (Nº 16) Año 2016, 2016.

GERHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo. **Métodos de Pesquisa – 1ª Edição**. UFRGS Editora, 2009.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa -4ª Edição**, Editora Atlas, São Paulo, 2002.

GLANZEL, Wolfgang. **Bibliometrics as a research field a course on theory and application of bibliometric indicators**. 2003.

LACERDA, Rogério Tadeu de Oliveira; ENSSLIN, Leonardo; ENSSLIN, Sandra Rolim. **Uma análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho**. Gestão & Produção, v. 19, n. 1, 2012.

LEBAS, Michel J. Performance **measurement and performance management**. International journal of production economics, v. 41, n. 1, p. 23-35, 1995.

LICHT, Alexandre Pillon. **Planejamento de Experimentos Aplicado à Criação de Equivalentes de Potência para Avaliação da Influência da Geração Distribuída**. 129 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 2006.

MACEDO, Meire Penha Revoredo de. **Aplicação da Metodologia de Planejamento de Experimentos para Formulação de Massas Cerâmicas para Telhas**. 116 f. Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, 2007.

MACH, Pavel; BARTO, Seba. **Comparison of different approaches to manufacturing process optimization**. In: Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), 2010 IEEE 16th International Symposium for. IEEE, 2010. p. 297-300.

MONTGOMERY, Douglas C. **Design and Analysis of Experiments – 8ª Edição**, Editora John Wiley & Sons, 2013.

MONTGOMERY, Douglas C. **Introduction to Statistical Quality control**. John Wiley & Sons, 2007.

MUTHUKUMAR, M.; MOHAN, D. **Optimization of mechanical properties of polymer concrete and mix design recommendation based on design of experiments**. Journal of Applied Polymer Science, v. 94, n. 3, p. 1107-1116, 2004.



PONTES, K. V. et al. **Process analysis and optimization mapping through design of experiments and its application to a polymerization process.** Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 28, n. 1, p. 137-150, 2011.

POPOVA, Viara; SHARPANSKYKH, Alexei. **Modeling organizational performance indicators.** Information systems, v. 35, n. 4, p. 505-527, 2010.

PRODANOV, Cleber Cristiano; DE FREITAS, Ernani Cesar. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico-2ª Edição.** Editora Feevale, 2013.

ROY, Ranjit K. **Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement.** Editora John Wiley & Sons, 2001.

SALDANHA, Izabel Cristina Corrêa. **Aleatorização em Planejamento de Experimentos: um estudo de caso.** 99 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2008.

SANTOS, Silvio Nunes dos. **Uso do Planejamento De Experimentos na Melhoria do Produto e Processo no Setor de Próteses de Quadril em uma Empresa de Produtos Cirúrgicos.** 92 f. Dissertação de mestrado Profissional em engenharia Mecânica – Universidade de Taubaté, Taubaté – SP, 2007.

SCHEFFÉ, Henry. **The Analysis of Variance.** John Wiley & Sons, 1959

SHEN, Hua; WAN, Hong. **Controlled sequential factorial design for simulation factor screening.** European Journal of Operational Research, v. 198, n. 2, p. 511-519, 2009.

SINHA, Pritibhushan. **A search method for process optimization with designed experiments and some observations.** International Journal of Quality & Reliability Management, v. 28, n. 5, p. 503-518, 2011.

STAICULESCU, Daniela et al. **Design and optimization of 3-D compact stripline and microstrip Bluetooth/WLAN balun architectures using the design of experiments technique.** IEEE transactions on antennas and propagation, v. 53, n. 5, p. 1805-1812, 2005.

WANG, P. C.; COOK, R. Dennis. **Analysis and efficient 2k-1 designs for experiments in blocks of size two.** Quality and Reliability Engineering International, v. 28, n. 1, p. 105-113, 2012.

WERKEMA, Maria Cristina Catarino. **Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos – 1ª Ed.** Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia, Belo Horizonte - MG, 1995.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A

Lista dos trabalhos que compõe o banco de dados final formado pela revisão bibliométrica.

- [1] AL-GHAMDI, KHALID A. A simple method for dealing with aliasing in experimental design", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 30 Iss 8 pp. 877 – 896, 2013.
- [2] ALMEIDA, LARISSA FARIAS & VIVACQUA, CARLA ALMEIDA. Experimentação: modelo para implementação de técnicas de planejamento de experimento como fator potencializador da inovação em indústrias. XXXIII ENEGEP, Salvador, BA, Brasil, 2013
- [3] ANACLETO, CRISTIANE ALVES; SANTOS, NERILSON TERRA. Estudo do número de repetições e de diferentes resoluções de fatoriais completos 2k sobre as estimativas dos efeitos dos fatores e da interação entre eles; XXVII ENEGEP, Foz do Iguaçu-PR-Brasil, 2007.
- [4] ANGRISANI, LEOPOLDO; LO MORIELLO, ROSARIO SCHIANO; D'APUZZO, MASSIMO & D'ARCO, MAURO; Design of experiments for power measurement method in wireless communications systems; Università degli Studi di Napoli Federico II, Napoli-Itália, 2011.
- [5] ARAYAPRANEE, W.; PRASASSARAKICH, P.; REMPEL, G. L. Factorial experimental design for graft copolymerization of styrene and methyl methacrylate onto styrene–butadiene rubber. *Journal of applied polymer science*, v. 100, n. 4, p. 2867-2874, 2006.
- [6] ARYAL, G., MAPA, L., & CAMSARAPALLI, S. K.. Effect of variables and their interactions on RFID tag readability on a conveyor belt - Factorial analysis approach. *IEEE - International Conference on Electro/Information Technology, EIT2010*, 2010

- [7] ASGHARI, Tony A. PCB thermal via optimization using design of experiments. In: Thermal and Thermomechanical Proceedings 10th Intersociety Conference on Phenomena in Electronics Systems, 2006. IThERM 2006. IEEE, 2006. p. 224-228.
- [8] AVERYANOVA, M., CICALA, E., BERTRAND, PH., & GREVEY, DOMINIQUE. Experimental design approach to optimize selective laser melting of martensitic 17-4 PH powder: part I – single laser tracks and first layer. *Rapid Prototyping Journal*, pag. 28–37, 2012.
- [9] BADÍA, J. D., STRÖMBERG, E., RIBES-GREUS, A., & KARLSSON, S.. A statistical design of experiments for optimizing the MALDI-TOF-MS sample preparation of polymers. An application in the assessment of the thermo-mechanical degradation mechanisms of poly (ethylene terephthalate). *Analytica Chimica Acta*, 692(1-2), pag. 85–95, 2011.
- [10] BARTO, Seba & RADEV, Radoslav. Using fractional factorial experiments for determination of factors influencing parameters of electrically conductive adhesives. *International Spring Seminar on Electronics Technology 2012 35th* . IEEE, 2012. p. 266-269.
- [11] BERLING, TOMAS & RUNESON, PER. Efficient evaluation of multifactor dependent system performance using fractional factorial design. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 29(9), pag. 769–781, 2013.
- [12] BESSERIS, GEORGE J.. Applying the DOE toolkit on a Lean-and-Green Six Sigma Maritime-Operation Improvement Project. *International Journal of Lean Six Sigma*, 2(3), pag. 270–284, 2011.
- [13] BESSERIS, GEORGE J.. Prioritised multi-response product screening using fractional factorial designs and order statistics. *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 20 n° 4, pag. 513–532, 2009
- [14] BESSERIS, GEORGE J.. Profiling effects in industrial data mining by non-parametric DOE methods: An application on screening checkweighing systems in packaging operations. *European Journal of Operational Research*, 220(1), pag. 147–161, 2012.

- [15] CAMORIM, JOSÉ EDUARDO VIEIRA. Estudo comparativo das aproximações baseadas no método de decomposição paramétrico para avaliar redes de filas de manufatura utilizando planejamento de experimentos, 188 pag. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal De São Carlos, São Carlos, SP, Brasil, 2008.
- [16] CAPPETTI, N., DONNARUMMA, A., NADDEO, A., & RUSSO, L.. Design of experiment about foam CF45 for pedestrian safety in car design. *Journal of Materials Processing Technology*, 175(1-3), pag. 77–82, 2006.
- [17] CARLOS, PEDRO OPRIME & PUREZA, VITÓRIA. (2008). Sequenciamento de experimentos fatoriais para minimização do número de mudanças de variáveis. XXVIII ENEGEP, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- [18] DOWLATSHAHI, SHAD. An application of design of experiments for optimization of plastic injection molding processes. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 15(6), pag. 445–454, 2004.
- [19] DRUMOND, JULIOVANY & ZVIRTES, LEANDRO. Aplicação do planejamento de experimentos na indústria siderúrgica, XVI SIMPEP. 2008
- [20] FONTÃO, HENIO; LOPES, ELOISA DE MOURA; SILVA, JOSÉ ÇUIS GOMES DA; SILVA, MESSIAS BORGES & MORETTI, SERGIO LUIZ DO AMARAL. Aplicação do Planejamento de Experimentos como Ferramenta de Apoio à Tomada de Decisão Empresarial. XVI SIMPEP, 2009.
- [21] GALTON, D. J.. A study of the effects of the process parameters on the flexographic printing problem “dot bridging” – Part I: experimental design and linear run length. *Pigment & Resin Technology*, 33(5), pag. 293–301, 2004.
- [22] HAILONG, YOU; XINZHANG, JIA & SHAOXI, WANG. The Characterization and Optimization of the Thermal Oxidation Process Equipment Using Experimental Design and Data Transformation. 25th International Conference on Microelectronics, (Miel), pag. 14–17, 2006.
- [23] HUND, E., VANDER HEYDEN, Y., HAUSTEIN, M., MASSART, D. L., & SMEYERS-VERBEKE, J. (2000). Robustness testing of a reversed-phase high-performance liquid chromatographic assay: Comparison of fractional and

- asymmetrical factorial designs. *Journal of Chromatography A*, 874(2), pag. 167–185, 2000.
- [24] JONES, Bradley; SHINDE, Shilpa Madhavan & MONTGOMERY, Douglas C. Alternatives to resolution III regular fractional factorial designs for 9–14 factors in 16 runs. *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, v. 31, n. 1, p. 50-58, 2015.
- [25] JUNIOR, LUCIANO QUEIROZ DE ARAUJO; BORGES, THYAGO DE MELO DUARTE, PINHEIRO, TUIRA MORAIS AVELINO, ALMEIDA, LARISSA FARIAS & NETO, JOAO AGRA. Desmitificando o planejamento de experimentos: exemplo didático de helicópteros de papel. XXXIV ENEGEP, Curitiba, PR, Brasil, 2014.
- [26] KUNATH, STEPHANIE, MARCHYK, NATALIYA, HAUPT, KARSTEN, & FELLER, KARL-HEIZ. Multi-objective optimization and design of experiments as tools to tailor molecularly imprinted polymers specific for glucuronic acid. *Journal Talanta*, 105, pag. 211–218, 2013.
- [27] LAW, AVERILL. M. A tutorial on design of experiments for simulation modeling. *Winter Simulation Conference Proceedings of the 2014* . IEEE Press, 2014. p. 66-80.
- [28] LICHIT, ALEXANDRE PILLON. Planejamento de experimento aplicado à criação de equivalentes de potência para avaliação da influência da geração distribuída; Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS-Brasil, 2006.
- [29] LIMA, LUIS GUSTACO GUEDES BESSA. Planejamento de Experimentos Bayesianos: Aplicações em Experimentos na Presença de Tendências Lineares, 121 p.. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil, 2006.
- [30] MACEDO, ROSE MEIRE PENHA REVOREDO. Aplicação da metodologia de planejamento de experimentos para formulação de massas cerâmicas para telhas. Total de folhas. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2007

- [31] MACH, PAVEL, & BARTO, SEBA. Comparison of different approaches to manufacturing process optimization. 2010 IEEE - 16th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), 297–300, 2010
- [32] MIRANDA, RAFAEL DE CARVALHO & MONTEVECHI, JOSE ARNALDO BARRA. Planejamentos fatoriais na análise de sensibilidade para otimização de modelos de simulação a eventos discretos. XXXII ENEGEP, Bento Gonçalves, RS, Brasil, 2012.
- [33] MUTHUKUMAR, M., & MOHAN. Optimization of mechanical properties of polymer concrete and mix design recommendation based on design of experiments. *Journal of Applied Polymer Science*, 94(3), pag. 1107–1116, 2006.
- [34] PARK, Jae-Bum; JOHNSON, Matthew; TOLIYAT, Hamid A. Interior PMSM double layer rotor core parametric design study. In: IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2014. p. 695-701.
- [35] PONTES, K. V, MACIEL, M. R. W., MACIEL, R., & EMBIRUÇU, M.. Process Analysis and Optimization Mapping Through Design of Experiments and Its Application To a Polymerization Process. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 28(01), pag. 137–150, 2011.
- [36] ROCHA, FABIANA MARRA & DELAMARO, MAURICIO CESAR. Redução de não conformidade em uma linha de montagem de impressoras utilizando seis-sigma e planejamento de experimentos. XVI SIMPEP, 2009.
- [37] ROUT, B. K., & MITTAL, R. K.. Screening of factors influencing the performance of manipulator using combined array design of experiment approach. *Journal Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25(3), pag. 651–666, 2009.
- [38] SALDANHA, IZABEL CRISTINA CORRÊA. Aleatorização em planejamento de experimentos: um estudo de caso, 99 pag.. Dissertação de Mestrado, Pontifca Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- [39] SANTOS, SILVIO NUNES DOS. Uso do planejamento de experimentos na melhoria do produto e processo no setor de próteses de quadril em uma empresa de

produtos cirúrgicos, 92 pag.. Dissertação de Mestrado, Universidade de Taubaté, Taubaté – SP, Brasil, 2007.

- [40] SANTOS, SILVIO NUNES DOS; CARDOSO, ÁLVARO AZEVEDO; CHAVES, CARLOS ALBERTO; CAMARGO, JOSÉ RUBENS & ARTHUZO, ALEXANDRE. Planejamento de Experimentos aplicado à linha de próteses de joelho, XIII SIMPEP – BAURU, SP, Brasil, 2006.
- [41] SHEN, HUA & WAN, HONG. Controlled sequential factorial design for simulation factor screening. *European Journal of Operational Research*, 198(2), pag. 511–519, 2009.
- [42] SHIRI, N. D., BHAT, T., BHAT, S., & KUMAR, G. Investigation of the effect of aging variables on the impact behaviour of Al 6061 alloy and its composites. *National Conference on Challenges in Research & Technology in the Coming Decades (CRT 2013)*. (pp. 1-6). IET, 2013.
- [43] SILVA, CARLOS EDUARDO DA; SANTOS, ERIVELTON ANTONIO DOS & SILVA, EDMIR AUGUSTO DA,. A relevância do planejamento de experimentos no processo de desenvolvimento de produtos de uma empresa têxtil. XXIV ENEGEP, pag. 2791–2798, Florianópolis, SC, Brasil, 2004.
- [44] SINHA, PRITIBHUSHAN. A search method for process optimization with designed experiments and some observations. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 28(5), pag. 503–518, 2011.
- [45] STAICULESCU, DANIELA; BUSHYAGER, NATHAN; OBATOYINBO, ADE; MARTIN, LARA J., & TENTZERIS, MANOS M.. Design and optimization of 3-D compact stripline and microstrip bluetooth/WLAN balun architectures using the design of experiments technique. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 53(5), pag. 1805–1812, 2005.
- [46] TANABE, EDUARDO HIROMITSU; AGUIAR, MOMINA LOPES & OPRIME, PEDRO CARLOS. Otimização de parâmetros operacionais na filtração de gases aplicando técnicas de superfície de resposta. XXXI ENEGEP, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2011.

- [47] TAVAKOLI, ALI; KERACHIAN, REZA; NIKOO, MOHAMMAD REZA; SOLTANI, MARYAM & ESTALAKI, SIAMAK MALAKPOUR. Water and waste load allocation in rivers with emphasis on agricultural return flows: application of fractional factorial analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(9), pag. 5935–5949, 2014.
- [48] TONG, TEO SOON; KUMAR, JATINDER & KANAN, MOHD MISRI DOLLAH. A Study and Investigation on Processes Inducing Delamination in QFN Package Using Statistical Analysis. *International Electronic Manufacturing Technology*, pag. 381-389, IEMT 2006, Putrajaya, Malaysia, 2006.
- [49] WANG, P. C., & COOK, R. D.. Analysis and efficient 2k-1 designs for experiments in blocks of size two. *Quality and Reliability Engineering International*, 28(1), pag. 105–113, 2012.



## APÊNDICE B

Folhas de Verificação aplicadas para estudo do processo.

FOLHA DE VERIFICAÇÃO			
Processo:		Instrumento: <u>Forno</u>	
Responsável:		Data: <u>dd / mm / aaaa</u>	

	periodo	condição do ambiente	Peso da Tela		Tamanho				Temperatura do forno (°C)	Horário do tratamento térmico	duração do tratamento (min)	Condições das telas	
			Tela + Fio	Fio Bruto	PP	P	M	G					
<b>Coleta 01</b>	<input type="radio"/> Manhã	<input type="radio"/> Frio	Tela 1:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Temp. Superior:	Início:		
	<input type="radio"/> Tarde	<input type="radio"/> Ameno	Tela 2:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Temp. Inferior:	Término:		
		<input type="radio"/> Quente	Tela 3:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
			Tela 4:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
<b>Coleta 02</b>	<input type="radio"/> Manhã	<input type="radio"/> Frio	Tela 1:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Temp. Superior:	Início:		
	<input type="radio"/> Tarde	<input type="radio"/> Ameno	Tela 2:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Temp. Inferior:	Término:		
		<input type="radio"/> Quente	Tela 3:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
			Tela 4:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
<b>Coleta 03</b>	<input type="radio"/> Manhã	<input type="radio"/> Frio	Tela 1:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Temp. Superior:	Início:		
	<input type="radio"/> Tarde	<input type="radio"/> Ameno	Tela 2:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Temp. Inferior:	Término:		
		<input type="radio"/> Quente	Tela 3:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
			Tela 4:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
<b>Coleta 04</b>	<input type="radio"/> Manhã	<input type="radio"/> Frio	Tela 1:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Temp. Superior:	Início:		
	<input type="radio"/> Tarde	<input type="radio"/> Ameno	Tela 2:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Temp. Inferior:	Término:		
		<input type="radio"/> Quente	Tela 3:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
			Tela 4:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
<b>Coleta 05</b>	<input type="radio"/> Manhã	<input type="radio"/> Frio	Tela 1:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Temp. Superior:	Início:		
	<input type="radio"/> Tarde	<input type="radio"/> Ameno	Tela 2:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Temp. Inferior:	Término:		
		<input type="radio"/> Quente	Tela 3:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
			Tela 4:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
<b>Coleta 06</b>	<input type="radio"/> Manhã	<input type="radio"/> Frio	Tela 1:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Temp. Superior:	Início:		
	<input type="radio"/> Tarde	<input type="radio"/> Ameno	Tela 2:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Temp. Inferior:	Término:		
		<input type="radio"/> Quente	Tela 3:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
			Tela 4:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
<b>Coleta 07</b>	<input type="radio"/> Manhã	<input type="radio"/> Frio	Tela 1:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Temp. Superior:	Início:		
	<input type="radio"/> Tarde	<input type="radio"/> Ameno	Tela 2:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Temp. Inferior:	Término:		
		<input type="radio"/> Quente	Tela 3:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
			Tela 4:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
<b>Coleta 08</b>	<input type="radio"/> Manhã	<input type="radio"/> Frio	Tela 1:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Temp. Superior:	Início:		
	<input type="radio"/> Tarde	<input type="radio"/> Ameno	Tela 2:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Temp. Inferior:	Término:		
		<input type="radio"/> Quente	Tela 3:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
			Tela 4:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
<b>Coleta 09</b>	<input type="radio"/> Manhã	<input type="radio"/> Frio	Tela 1:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Temp. Superior:	Início:		
	<input type="radio"/> Tarde	<input type="radio"/> Ameno	Tela 2:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Temp. Inferior:	Término:		
		<input type="radio"/> Quente	Tela 3:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
			Tela 4:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
<b>Coleta 10</b>	<input type="radio"/> Manhã	<input type="radio"/> Frio	Tela 1:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Temp. Superior:	Início:		
	<input type="radio"/> Tarde	<input type="radio"/> Ameno	Tela 2:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Temp. Inferior:	Término:		
		<input type="radio"/> Quente	Tela 3:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
			Tela 4:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
<b>Coleta 11</b>	<input type="radio"/> Manhã	<input type="radio"/> Frio	Tela 1:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Temp. Superior:	Início:		
	<input type="radio"/> Tarde	<input type="radio"/> Ameno	Tela 2:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Temp. Inferior:	Término:		
		<input type="radio"/> Quente	Tela 3:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
			Tela 4:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
<b>Coleta 12</b>	<input type="radio"/> Manhã	<input type="radio"/> Frio	Tela 1:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Temp. Superior:	Início:		
	<input type="radio"/> Tarde	<input type="radio"/> Ameno	Tela 2:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Temp. Inferior:	Término:		
		<input type="radio"/> Quente	Tela 3:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
			Tela 4:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
<b>Coleta 13</b>	<input type="radio"/> Manhã	<input type="radio"/> Frio	Tela 1:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Temp. Superior:	Início:		
	<input type="radio"/> Tarde	<input type="radio"/> Ameno	Tela 2:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Temp. Inferior:	Término:		
		<input type="radio"/> Quente	Tela 3:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
			Tela 4:			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				

Peso médio das estruturas de ferro das telas: PP: 2219 P: 1972 M: 2569 G: 2999
--

## APÊNDICE C

Modelo da ficha de avaliação do experimento realizado.

Avaliação da Tela									
Seq.	Código	Deformação			Nota	Flexibilidade			Nota
		Ruim	Bom	Ótimo		Ruim	Bom	Ótimo	
1	T5T4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2	T7T3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3	T3T3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4	T8T1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5	T0T2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	T1T2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
7	T2T3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
8	T4T2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
9	T8T3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
10	T1T1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
11	T0T1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
12	T3T2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
13	T1T3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
14	T2T1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
15	T5T1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
16	T6T1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
17	T7T2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
18	T4T3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
19	T6T2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
20	T7T4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
21	T3T1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
22	T5T3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
23	T7T1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
24	T6T4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
25	T4T1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
26	T5T2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
27	T2T4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
28	T8T2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
29	T3T4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
30	T4T4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
31	T8T4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
32	T2T2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
33	T6T3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	T1T4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Legenda:

RUIM: Produto não atende os requisitos de qualidade da empresa;

BOM: Produto abaixo do esperado porem pode ser utilizado no processo produtivo;

ÓTIMO: Produto dentro os requisitos de qualidade da empresa.

**Universidade Estadual de Maringá**  
**Departamento de Engenharia de Produção**  
**Av. Colombo 5790, Maringá-PR CEP 87020-900**  
**Tel: (044) 3011-4196/3011-5833 Fax: (044) 3011-4196**