

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO NO PROCESSO DE TRATAMENTO TÉRMICO DE FIOS DE PET

DESIGN OF EXPERIMENT'S TECHNIQUE APLICATION IN A PROCESS OF HEAT TREATMENT OF POLYETHYLENE TEREPHTHALATE

Vinícius Lepper dos Santos

Syntia Lemos Cotrim

Resumo

Este trabalho de conclusão de curso apresenta um estudo da aplicação das técnicas estatísticas de planejamento de experimento para a análise dos parâmetros operacionais de um forno industrial, em uma indústria de transformação de fios de Polietileno Tereftalato (PET) em vassouras ecológicas. Realizou-se uma revisão de literatura sobre qualidade e planejamento de experimentos, para uma imersão no conteúdo do problema e técnica, que posteriormente serão utilizados. Anteriormente houve uma proposta deixado por Machado (2016) e era de conhecimento que os fatores que poderiam influenciar no processo de tratamento térmico seriam a massa, temperatura e tempo, porém, ao final de seu trabalho verificou-se que a massa não apresentaria influencia significativa na qualidade do processo, e então, realizou-se a análise dos dados anteriores, aos quais, nos deram faixas de operação ideais, relacionados ao tempo e temperatura do processo. Ainda é importante salientar que o trabalho realizado por (Machado, 2016) trouxe uma economia no processo, de 14%, com relação ao consumo de energia. Na busca do valor exato de operação do processo, foi construindo o planejamento de experimento baseado na técnica estatística fatorial 2^k , com 2 variáveis de controle, utilizando neste caso, a temperatura e tempo, para avaliar seu comportamento e a relação com a variável de resposta determinada para o processo estudado, para assim, chegar num parâmetro exato de operação do forno elétrico, que foi adaptado ao sistema que não possuía normativas para sua operação com PET, tal parametrização trouxe uma economia de 17% de consumo de energia.

Palavras-chave: *Planejamento de experimento; Polietileno Tereftalato; PET; tratamento térmico.*

Abstract

This course conclusion essay presents a study of the application of the statistics techniques of design of experiment for the operational parameters' analysis of an industrial oven, inside a Polyethylene Terephthalate (PET) transforming factory. A literature review was carried out on quality and design of experiment, for a content immersion for the problem and techniques used in the essay. Firstly we had the proposal made by Machado (2016) and it was acknowledged that the factors could influence in the process of thermal treatment were mass, temperature and time, however, in the end of the work we could verify that mass wasn't really influential in the process quality and therefore previous data analysis was accomplished which brought to us ideal operational buffer areas. Since we didn't possess an exact operational value, the experiment planning was built based on the 2^k statistics factorial technique with two variables, in this case temperature and time, assessing their behaviours and the relation to the response variable determined for the studied process, for finally getting to an exact parameter for the oven operation.

Key-words: *Design of experiment; DOE; quality; Polyethylene Terephthalate.*

1. Introdução

O controle permanente dos processos produtivos, é condição básica para a manutenção da qualidade de bens e serviços, ou seja, o controle da qualidade e a alta qualidade dos produtos e serviços, já não são mais um diferencial no mercado, e sim, condição necessária para manter-se nele competitivo, como pontuado por (CARPINETTI, 2004).

Segundo Mach e Barto (2010), existem muitas variáveis de processo, que influenciam mais ou menos a qualidade de uma produção, e existem muitos parâmetros de um produto, que constituem sua qualidade. O controle de variáveis de um processo produtivo, para a obtenção da qualidade solicitada, é uma tarefa multi-paramétrica. Pode-se desmembrar os fatores que influenciam a qualidade como, fatores internos e externos.

Deste modo, empresas tem um desafio a cumprir, mensurar corretamente os parâmetros de eficiência e eficácia em seus processos de negócio, com o foco na otimização do consumo dos recursos, implicando em uma maior sustentabilidade, e conseqüentemente, em uma maior rentabilidade. Para Taguchi, Showdury e Taguchi (1999), a produção sempre virá acompanhada de uma perda, e, quanto menor for, melhor será a qualidade do processo.

As máquinas e procedimentos de um sistema produtivo, podem ser adaptados e modificados a qualquer momento, e estas mudanças podem refletir direta ou indiretamente no resultado produtivo final. É importante entender o modo em que cada equipamento opera, e como os procedimentos são executados, para assim, atingir a qualidade desejada nos processos produtivos.

Diante do exposto, as técnicas de Planejamento de experimento podem atuar como pivô, no que diz respeito aos problemas internos processuais da indústria, buscando novos meios de chegar na qualidade tida como meta, observando e analisando a maneira pela qual, tais processos da empresa são regidos e realizando testes experimentais nos mesmos.

A partir destas informações, na busca de se obter produtos e processos com a qualidade desejada, as técnicas do planejamento de experimentos (do inglês, design of experiment ou a sigla DOE) aparecem para estabelecer critérios de operação ideais, para a indústria, e assim, atuar como chave na otimização de processos por meio do aumento da eficiência da produção.

A empresa em estudo, utiliza como matéria-prima o perfilado de garrafas PET (Polietileno Tereftalato) e executa um tratamento térmico do mesmo. Tratamento esse em que se promove e aplica a qualidade no produto. O processo é realizado por um forno industrial adaptado, e o mesmo, não possui uma normatização ou especificação quanto à forma de operação para esse processo produtivo, sendo assim, esta operação é passível de otimização por meio da padronização.

Segundo estudos anteriores, conforme Galdamez, Cotrim, et al. (2016), no processo de enriquecimento do fio de PET, o gargalo do processo, concentra-se no equipamento utilizado, o forno. Recursos com abordagens experimentais, baseados em técnicas estatísticas são uma oportunidade que as empresas possuem de, melhorar a execução de suas atividades, visando promover a qualidade do produto final, sem grande investimento.

Esse trabalho visa o estudo da proposta deixada por Machado (2016), onde já foi verificado um ganho no processo, e a partir da faixa de operação ideal estipulado pelo mesmo, efetuarmos análises estatísticas para obter-se então, um valor exato de operação, para que seja redigida uma instrução de trabalho para o equipamento em questão, o TEDESCO FBE 800 forno industrial.

Segundo Montgomery (2013), experimentos são parte do processo científico e, uma das maneiras pela qual, podemos aprender como os sistemas ou processos funcionam. O Planejamento de experimentos é uma ferramenta criticamente importante no âmbito da ciência e da engenharia, no que tange à otimização de processos. A aplicação das técnicas de planejamento de experimentos, quando utilizadas nas fases iniciais da concepção de um produto, podem melhorar o processo de produção do mesmo.

Diante ao exposto, tem-se como objetivo no seguinte trabalho descrever e aplicar as técnicas de planejamento de experimentos no controle do processo de tratamento térmico em uma indústria de vassouras de reciclado de PET, a partir do estudo da proposta deixada por Machado (2016), e fornecer a instrução de operação do processo, chegando em parâmetros operacionais exatos. Ainda pode-se dizer que os objetivos se desdobram em, aprender e compreender as técnicas do planejamento e análise de experimento, elaborar a faixa de operação ótima para o processo de tratamento térmico, para assim, rodar o processo em que se obtenha um produto com a qualidade esperada.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Planejamento de experimentos

Contemporaneamente, as organizações produtivas buscam a habilidade de produzir uma variedade de produtos de alta qualidade, visando sempre o menor custo operacional, para a manutenção da competitividade. A fim de garantir a qualidade de um produto, reduzir os custos de produção e diminuir os riscos causados por eventos imprevisíveis, todas as empresas esperam que o processo de fabricação esteja operando em controle (DAN, HAIPING, et al., 2016).

Como pontuado por Sun e Cheng (2002), à medida em que a indústria vem aumentando seu nível e qualidade de produção, sua performance e capacidade tornaram-se cada vez mais críticos para a manutenção da competitividade econômica. Para Fernandes e Godinho Filho (2010) um sistema de produção é efetivo, quando simultaneamente é eficaz e eficiente. O sistema será eficiente quando utiliza seus recursos da melhor forma possível e eficaz quando tem a capacidade de cumprir com o que foi proposto.

A eficiência dos processos industriais envolve o atendimento de um grande número de características operacionais, e essas, apresentam-se correlacionadas. Segundo (Mangwandi, Adams, et al. (2012) o planejamento de experimento, é uma ferramenta bastante usada na indústria, para a investigação das variáveis operacionais, e a interação que elas possuem entre si.

O método mais eficiente de realizar experimentos é dado pelo Planejamento estatístico de experimentos. Tal método incorpora as matrizes ortogonais para poder, com êxito, projetar e conduzir experimentos fatoriais fracionados, que possibilitam coletar dados estatísticos significantes com o mínimo de repetições possíveis (KHORASANI, AGHCHAI e KHORRAM, 2010).

A técnica estatística utilizada será fundamentada em Montgomery (2013) que trás diversos modelos de inferências experimentais. O fatorial 2^k com dois fatores, será utilizado pois, o mesmo se dá compatível ao modelo de estudo, e assim usado para estimar e avaliar o efeito de cada um de seus parâmetros e sua interação com a variável de resposta, por meio da análise de variância ANOVA.

2.2 Abordagens iniciais do planejamento de experimentos

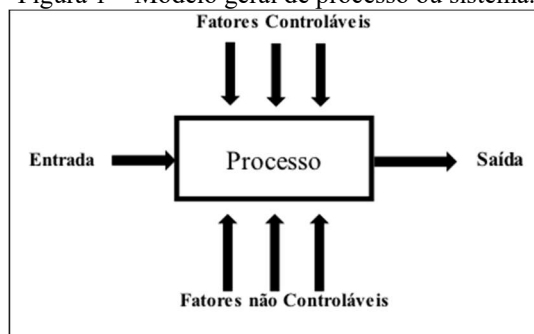
Segundo o exposto anteriormente, pode-se relacionar a qualidade do produto com a qualidade do processo que o concebe. Os processos são responsáveis pelo desempenho da empresa, que por sua vez, pode apresentar uma série de interferências, sendo elas as, máquinas, processos, pessoas, ambiente, entre outros.

Apenas o método de planejamento de experimentos possibilita a investigação sobre a interação entre dois fatores, e possui um alto potencial de produzir os outputs desejados em setores específicos como a manufatura (SHAHAR, AZIZ e KALTHUM, 2015).

Em vários casos, os planos de testes gerados pelo DOE, tendem a contemplar toda uma faixa de operação, e implica que, experimentos em parâmetros operacionais pré-estabelecidos devem ser conduzidos, para assim, obter-se um conjunto significativo de dados WONG, GAO, et al. (2017). O autor ainda pontua que o objetivo do DOE é determinar quais parâmetros devem ser testados (inputs), para assim, avaliar sua resposta (outputs). O uso da técnica correta do DOE pode reduzir com efetividade o número de dados a serem mensurados, sobre o sistema, para que haja a compreensão da sua relação input-output.

Na figura 1 a seguir pode-se ver de maneira esquemática a transformação dos inputs em outputs.

Figura 1 – Modelo geral de processo ou sistema.



Fonte: (MONTGOMERY, 2013).

Para Montgomery (2013), verifica-se que na realização do processo de transformação, diversas variáveis agem no processo, e essas são classificadas como: Controláveis (x_1, x_2, \dots, x_n) que por sua vez são as variáveis passíveis de alteração. As outras são chamadas de variáveis de ruído ou também incontroláveis (z_1, z_2, \dots, z_n), ou seja, são àquelas em que não apresentam controle durante a realização de um experimento.

Se usados da maneira correta, segundo Dowlatshahi (2004), as técnicas do planejamento de experimentos, juntamente com os conceitos de qualidade, podem

proporcionar um nível de eficiência elevada, por meio do aumento da confiabilidade do processo. O método desempenha papel fundamental na resolução de problemas, tanto científicos quanto industriais (BOX, HUNTER e HUNTER, 2005).

2.3 Aplicabilidade do planejamento de experimentos

Na concepção de produtos de qualidade de ponta, o planejamento de experimento é usado para otimizar parâmetros do produto e de seus processos, que possuem baixa sensibilidade diante das variações, e otimizar seu desenvolvimento visando o baixo custos (TSAI, CHANG, et al., 2016).

Para Montgomery (2013), o DOE possui extensa aplicação no desenvolvimento de novos processos, e o uso das técnicas, na fase inicial do processo de desenvolvimento, pode resultar em aumento no rendimento do processo, redução da variabilidade de requisitos de conformidade, reduzir tempo de desenvolvimento e custos globais.

Ainda, o autor reforça que, o planejamento de experimentos desempenha papel importante em projetos de engenharia onde novos produtos são criados ou produtos já existentes são melhorados. Algumas aplicações do planejamento de experimento incluem:

- Avaliação e comparação das configurações básicas do projeto;
- Avaliação de materiais alternativos;
- Seleção dos parâmetros do projeto, em que o produto irá operar sob uma larga variação de suas condições de atuação, assim, comprovando sua robustez;
- Determinação dos parâmetros chave do produto, quem influenciam diretamente na performance do mesmo.

O planejamento estatístico de experimentos refere-se ao processo de planejar o experimento e então, dados apropriados serão coletados e analisados por métodos estatísticos, resultando em uma conclusão objetiva e válida (MONTGOMERY, 2013).

Temos como princípios básicos do planejamento de experimentos à randomização, replicação e o bloqueamento.

A randomização é implicitamente o uso de métodos estatísticos em planejamento de experimento. Pela randomização tem-se que ambas as alocações dos materiais do experimento e a ordem das execuções em que os experimentos serão realizados devem ser determinados de maneira aleatória.

A replicação apresenta-se como sendo uma execução repetida de um experimento, com cada combinação de fatores. O bloqueamento, trata-se da técnica de planejamento de experimentos usada para aumentar a precisão em que as comparações entre os fatores de interesse são feitas. Frequentemente o bloqueamento é usado para reduzir ou eliminar a variabilidade transmitida por variáveis de incômodo, ou seja, variáveis fatores que podem influenciar o experimento, porém, que não estamos diretamente interessados.

2.4 Diretrizes do planejamento de experimentos

Ainda segundo Montgomery (2013), possuímos um sequenciamento no que diz respeito às diretrizes para o planejamento de experimentos, e são:

- Reconhecimento e declaração do problema: Concentra-se em identificar o ponto em que é necessária a aplicação do planejamento de experimentos. Essa identificação se dá por meio da participação de uma equipe multidisciplinar.
- Seleção das variáveis de resposta: Deve ser realizado com atenção de maneira a evitar erros operacionais de medição, para que se obtenham informações úteis sobre o processo de estudo.
- Seleção dos fatores, níveis e variação: A partir das informações levantadas deve-se definir os fatores que causam variação no objeto de estudo, o intervalo em que esse fator irá variar e os níveis de variação.
- Escolha da técnica de planejamento de experimento: Verifica-se, a partir dos dados definidos, qual técnica se adequa mais ao caso.
- Executando o experimento: Etapa onde o experimento é executado e deve-se monitorá-lo cuidadosamente, de maneira a certificar-se que, o que foi proposto no planejamento está sendo seguido.
- Análise estatística dos dados: Métodos estatísticos devem ser usados para analisar os dados. Os resultados e conclusões devem ser objetivos, diferindo do senso comum.
- Conclusões e recomendações: Uma vez que os dados já foram analisados, o experimento deve extrair conclusões práticas sobre os resultados e recomendar um plano de ação.

2.5 Planejamento fatorial

Por se tratar de um modelo, que estuda o efeito de duas variáveis ou mais, o planejamento fatorial acaba sendo a técnica que mais se encaixa para o mesmo (MONTGOMERY, 2013).

Tratando dos fatores do planejamento, segundo Mach e Barto (2010), os inputs podem ser quantitativos ou qualitativos. Os fatores quantitativos são comumente mensurados, e seu resultado é visualizado em indicadores. Parâmetros qualitativos também podem ser mensurados, e utiliza-se para isso a escala Likert, a qual, traduz as atitudes humanas em números, e a mesma é amplamente utilizada no campo das ciências sociais e pesquisa educacional (JOSHI, KALE, et al., 2015).

Montgomery (2013) traz o exemplo de um experimento entre dois fatores, com dois níveis cada um. Será uma combinação de dois fatores, em dois níveis, ou seja, 2^2 vezes (4 experimentos). Com relação a esta combinação acima citada, Mach e Barto (2010) traz seu diagrama, para exemplificar, presente na Figura 2.

Figura 2 – Planejamento de experimento fatorial, com dois fatores

nível do fator	1	2	...	b
1	y111,	y121,	...	y1b1
	y112,	y122,		y1b2

	y11n	y12n		y1bn
2	y211,	y221,	...	y2b1
	y212,	y222,		y2b2

	y21n	y22n		y2bn
⋮				
a	ya11,	ya21,	...	yab1,
	ya12,	ya22,		yab2,

	ya1n	ya2n		yabn

Fonte: Adaptada (MACH e BARTO, 2010).

Considerando y_{ijk} , como sendo a variável de resposta, conceito trazido por Montgomery (2013), quando o fator A está no i -ésimo nível (sendo $i=1, 2, \dots, a$), o fator B está no j -ésimo nível (sendo $j=1, 2, \dots, b$) ambos para k repetições do experimento.

O autor ainda descreve um modelo de efeitos em resposta de y , conforme equação (1) e (2).

Equação (1)

$$y_{ijk} = \mu_{ij} + \varepsilon_{ijk} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

Fonte: (MONTGOMERY, 2013)

O conteúdo do ij-ésimo fator é dado por:

Equação (2)

$$\mu_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij}$$

Fonte: (MONTGOMERY, 2013)

Sendo:

- μ_{ij} = Média global
- τ_i = Efeito do fator A
- β_j = Efeito do fator B
- $(\tau\beta)_{ij}$ = Efeito da interação entre os fatores A e B
- ε_{ijk} = erro experimental

Ainda com relação ao experimento, após realizado, para verificar as medições obtidas, a técnica da análise de variância ANOVA é amplamente usada. A técnica vem para analisar as medições levando em consideração vários tipos de efeitos de forma simultânea, julgar quais efeitos são mais importantes e mensurá-los.

2.6 Planejamento fatorial 2^k

Podemos também citar a respeito do planejamento fatorial 2^k , técnica usada no seguinte trabalho, onde cada fator “k” possui 2 níveis, sendo eles o nível positivo ou superior (+), e o nível negativo ou inferior(-) (Montgomery, 2013). Esses valores são tratados como extremos, logo, eles serão os valores limitantes do experimento.

No seguinte trabalho, trazemos os fatores temperatura e tempo, e ambos em 2 níveis, os máximos e mínimos, irão resultar em 4 combinações, ou seja, 4 ensaios de testes. A seguir, de maneira a ilustrar, temos a tabela.

Tabela 1 - Matriz de planejamento para um experimento 2^k , com k=2.

Teste	Efeitos de Controle		
	X ₁	X ₂	Y
1	+1	+1	Y ₁
2	+1	-1	Y ₂
3	-1	-1	Y ₃
4	-1	+1	Y ₄

Fonte: Montgomery (2013)

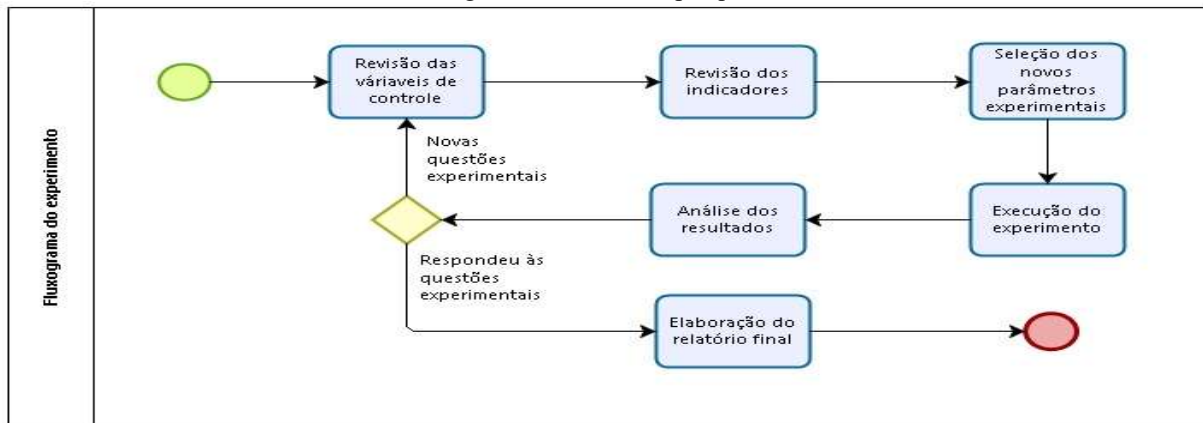
3. Método de Pesquisa

A abordagem do problema da pesquisa enquadra-se como quantitativa, pois propõe a mudança de algo subjetivo em mensurável, por meio de estatística (FREITAS e PRODANOV, 2013). Quanto à classificação do trabalho, por se tratar do aprimoramento de uma proposta deixada anteriormente, classifica-se como explicativa, pois, objetiva-se identificar os fatores que determinam e/ou contribuem para ocorrência de um fenômeno (GIL, 2002).

Segundo Freitas e Prodanov (2013), a seguinte pesquisa apresentada advém de uma natureza aplicada, pois, colabora com a obtenção de conhecimentos para a sua aplicação na prática, direcionando para soluções de problemas pontuais, além de possuir interesses locais.

Os procedimentos técnicos referentes a execução do trabalho partem do princípio de que, como tem-se uma proposta deixada anteriormente por outro autor, iremos replicar o mesmo experimento, utilizando os indicadores de desempenho e técnicas do DOE propostos, para assim, mensurar os ganhos e perdas no processo, visando a parametrização da atividade de tratamento térmico. Em seguida o fluxograma esquemático da pesquisa.

Figura 3 - Método de pesquisa



Fonte: Autor (2017)

Pode-se dissertar de maneira explicativa que, primeiramente na revisão das variáveis de controle, foi verificado, de acordo com os resultados anteriores de Machado (2016), quais variáveis influenciavam no processo do tratamento térmico. Em seguida houve a avaliação e revisão dos indicadores para verificar se os mesmos estavam coerentes com o experimento em questão. Ao verificar as etapas anteriores, foram selecionados novos parâmetros experimentais, tendo presente apenas os elementos relevantes ao processo, e então, foi dado início à realização do experimento.

O experimento foi fundamentado nas técnicas do DOE fatorial 2^k , descrita por Montgomery (2013), e utilizamos como banco de dados e base de estudo o trabalho de Machado (2016), pois, o mesmo realizou o experimento de maneira inicial na mesma empresa e processo em questão. O planejamento fatorial analisa todas as interações que influenciam no processo ou produto Mei, Guo, et al. (2015), e como necessita-se verificar todas estas interações, se dá coerente seu uso.

Após finalizado o experimento, houve a compilação dos dados para a posterior análise e, ao verificar que os dados respondiam a todas as questões propostas, elaborou-se o relatório final.

4. Experimento Industrial

4.1 Caracterização da empresa

A empresa estudada faz parte de um projeto de melhoria do Grupo de Pesquisa em Engenharia da Qualidade (GPEC) do Departamento de Engenharia de Produção (DEP), da universidade estadual de Maringá (UEM), juntamente com o conselho nacional de desenvolvimento científico e pesquisa (CNPq), desde 2015.

A empresa iniciou suas atividades na Bahia em 2005 mudando posteriormente para Maringá no Paraná, em 2008. Sua produção atende o mercado interno da região sul, sudeste, centro oeste e nordeste do país, e tem grande papel social pois, algumas etapas de sua produção contam com mão-de-obra externa advinda de famílias carentes e entidades como APAEs.

Quanto a questão ambiental, a empresa utiliza como matéria-prima o PET, material esse proveniente da reutilização de garrafas dos mais diversos conteúdos. As garrafas são coletadas e, diversas famílias carentes parceiras da empresa, atuam na transformação dessas garrafas em fios, e por sua vez, dão outra destinação ao material que antes, estaria nas ruas ou em aterros sanitários. O ramo de atividade da empresa concentra-se na produção de vassouras ecológicas produzidas a partir de perfilados de PET.

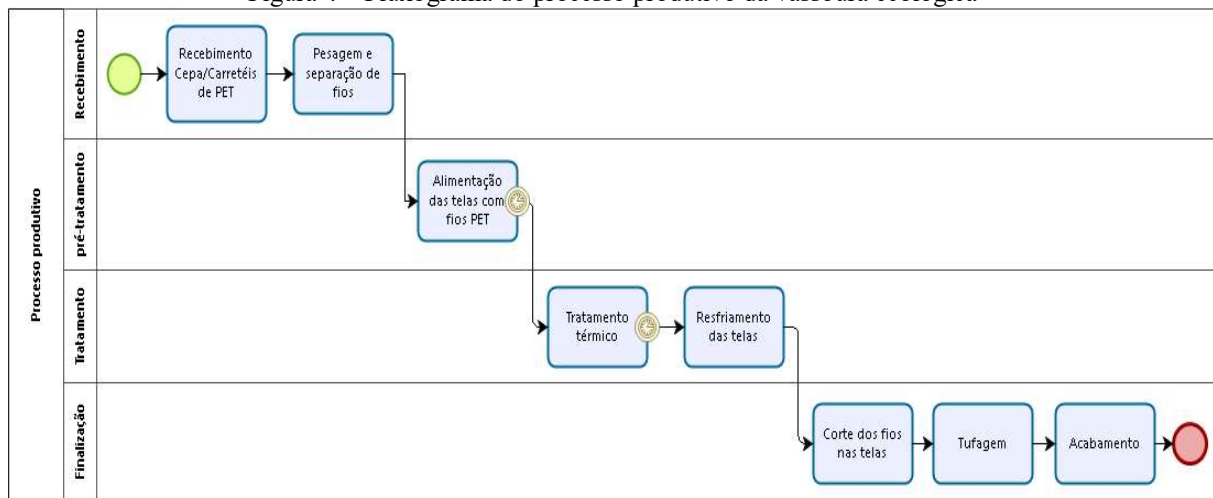
4.2 Processo produtivo

A empresa produz diversos modelos de vassouras ecológicas, e seu processo produtivo para o portfólio de produtos, é representado igualmente para todo o mix de produtos, e são eles sujeitos a um sistema de máquinas construídas e adaptadas para atender ao processo

produtivo da empresa. Entre os produtos, a diferenciação que ocorre, é em relação à qual cepa (base onde são encaixados os tufos de fios) será utilizada, e o acabamento final aplicado para cada uma delas.

Em geral, o processo produtivo das vassouras ecológicas, produzidas através do PET, na empresa citada, estão caracterizados na figura a seguir, e são elas as principais operações da produção. O processo adotado para o estudo, e que podemos chamar como padrão da empresa foi do Vassourão, pois o mesmo, encontra-se como o produto mais vendido, o que representa o maior volume de produção.

Figura 4 – Fluxograma do processo produtivo da vassoura ecológica



Fonte: Autor (2017)

Para a realização do experimento considerou-se apenas a atividade de desbobinar o fio e tratamento térmico.

4.3 Desenrolar dos fios na tela

O desenrolar dos fios é o ato de transferir os fios dos carretéis para as telas, que então, serão posteriormente posicionados dentro do forno para a execução do tratamento térmico. Para a execução da atividade, a empresa conta com as telas para serem enrolados os fios, para posterior tratamento, e uma máquina projetada para o processo de enrolar os fios na tela, conforme Figura 5 e 6.

Figura 5 – Exemplo de tela utilizada no processo de tratamento térmico de PET



Fonte: Autor (2017)

Figura 6 – Máquina referente a atividade de alimentação de telas com fio de PET



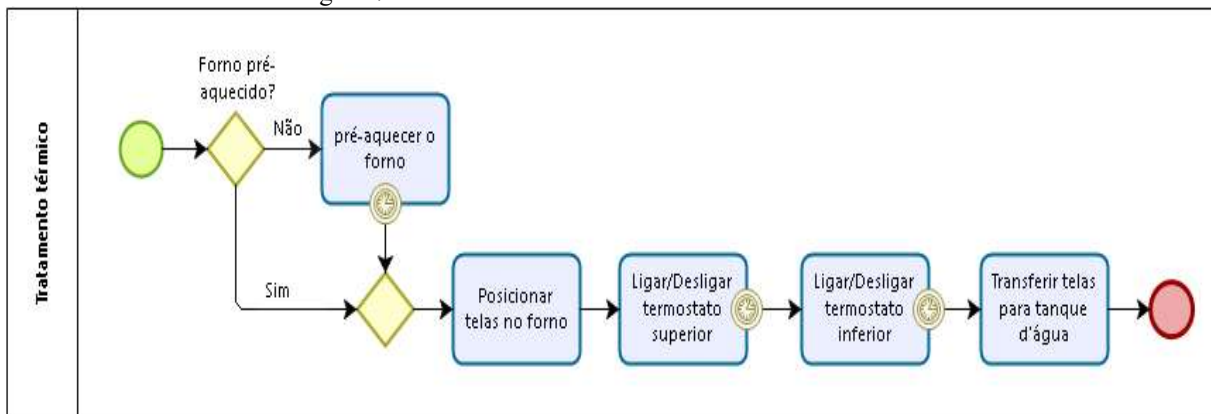
Fonte: Autor (2017)

Este processo fora analisado anteriormente no trabalho de Machado (2016), e constatado que a variável massa não influenciava no processo, e então, foi-se padronizado o tempo de alimentação das telas em 3 minutos e 30 segundos, para obtermos a quantidade de 600g em média de fios de PET, em cada tela. Ainda, a atividade de desenrolar dos fios na tela é responsável por distribuir de maneira uniforme, os fios na tela, para que não haja diferença no recebimento de calor do forno, na atividade referente ao processo de cristalização do PET, o tratamento térmico.

4.4 Tratamento térmico

O tratamento térmico é a atividade de cristalização dos fios de PET, que por sua vez, promovem um aumento na resistência do fio, e além disso, ainda faz com que os fios percam o formato da silhueta da garrafa, ideal para que não haja variabilidade no formado das cerdas. Em seguida, na Figura 6, temos o fluxograma da atividade de tratamento térmico.

Figura 7 – Atividade de tratamento térmico de fios de PET



Fonte: Autor (2017)

A atividade de tratamento térmico resume-se em, levar quatro telas ao forno pré-aquecido, acionar o termostato superior por metade do tempo da atividade, em seguida

desliga-se o mesmo e é acionado o termostato inferior, durante a outra metade do tempo. Por fim, ao desligar o forno, são retiradas as telas e depositadas em um tanque com água à temperatura ambiente, para que haja o resfriamento das telas em um tempo menor.

Com relação às telas, ao realizar a atividade de alimentação com fios de PET, ficam tensionadas, e então, o operador efetua a regulagem para que reduza o comprimento da tela, reduzindo a tensão dos fios. Ao realizar a atividade de tratamento térmico, os fios, por receberem calor, reduzem seu tamanho linearmente, e então, diminuem de comprimento e voltam a tensionar a tela, como mostrado no esquema da Figura 8.

Figura 8 – Tela antes e depois do tratamento térmico



Fonte: Autor (2017)

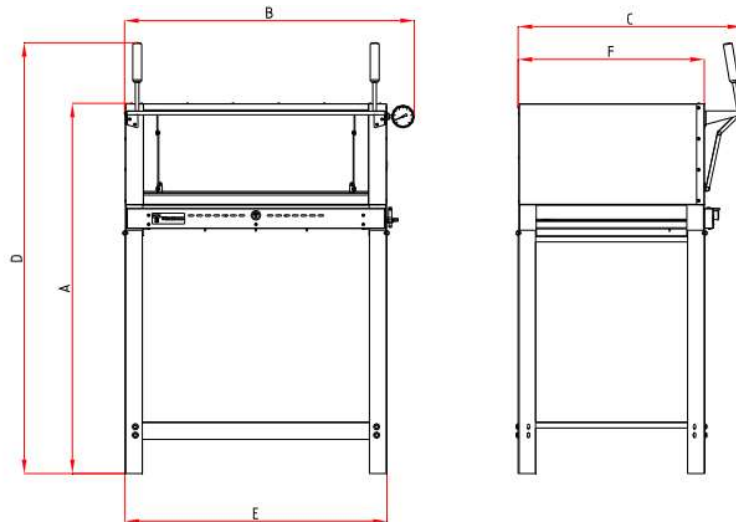
4.5 Objeto de estudo

O objetivo do estudo foi levantar os parâmetros de operação ideais na atividade de tratamento térmico, visando a alta qualidade do produto, aliado à economia financeira, ou seja, utilizando menos energia possível. A peça chave no processo de tratamento térmico é o forno, que transforma os fios de PET, e nosso foco será, a partir da faixa de dados ótimos, constantes no trabalho de Machado (2016), chegar em um resultado ainda melhor, e também, iremos analisar a influência do posicionamento das telas no forno, e verificar se o mesmo trás influência no processo.

O equipamento trata-se de um forno industrial que foi adaptado ao processo, ou seja, ele originalmente é comercializado para outras finalidades, sendo elas a produção de pães, pizzas e diversos. O forno de modelo FBE 800 da TEDESCO, com a tensão nominal de 220V. O forno possui 80Kg de massa, seu consumo se dá a 4KW/h, de uma potência de 5000W. O forno leva 60 minutos para aquecer de 0°C a 300°C.

A seguir tem-se a Figura esquemática do forno, e em seguida a tabela com as dimensões do mesmo.

Figura 9 – Desenho do forno FBE 800 TEDESCO.



Fonte: Manual do fabricante, TEDESCO (2007)

Tabela 2 - Dimensionamento do forno utilizado na indústria

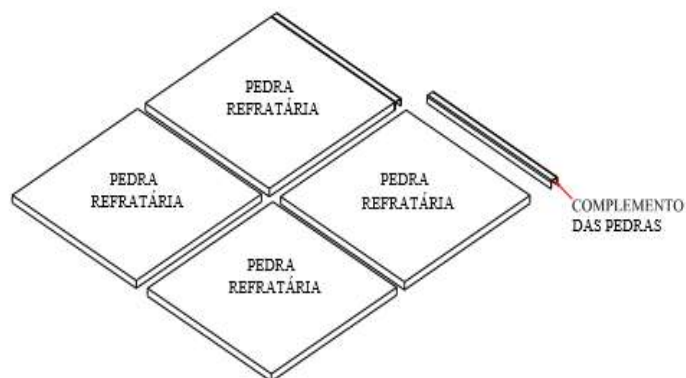
Dimensionamento Externo						
Cota	A	B	C	D	E	F
Dimensão (mm)	1316	1100	836	1534	930	703

Dimensionamento Interno			
	Largura	Altura	Profundidade
Dimensão (mm)	800	260	600

Fonte: Autor (2017)

Na região interior do forno, em sua base, há uma camada de pedras refratárias, que são responsáveis por “devolver” o calor emitido pelas resistências, que estão localizadas na parte superior interna, e mantê-lo mais tempo no interior do forno, assim, colaborando para um maior rendimento do processo. A seguir a Figura 10, representa de maneira esquemática as pedras refratárias.

Figura 10 – Esquema das pedras refratárias do forno FBE 800 TEDESCO



Fonte: Manual do fabricante, TEDESCO (2007)

No decorrer do trabalho, foi levantada a questão com relação a uniformidade da distribuição de calor no forno, e o mesmo se deu possível ao analisar que a resistência, responsável pela emissão do calor, possui o formato de uma serpentina, conforme a Figura 11.

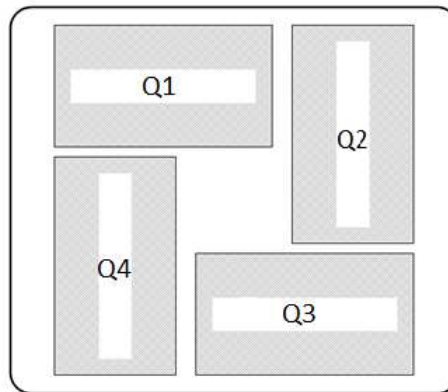
Figura 11 – Exemplo da resistência do forno FBE 800 TEDESCO.



Fonte: Autor (2017)

Pelo fato de o formato da resistência ser como o mostrado na figura 10, foi levantada a questão se todas as telas estariam submetidas à mesma quantidade de emissão de calor. Como em cada “fornada” são levadas quatro telas ao forno, e elas são dispostas duas a duas, nomeamos a localidade de cada uma delas, assim como esquematizado na Figura 12, para posteriormente serem usadas na realização dos experimentos.

Figura 12 – Esquema da nomenclatura dos quadrantes das telas no forno, em vista superior

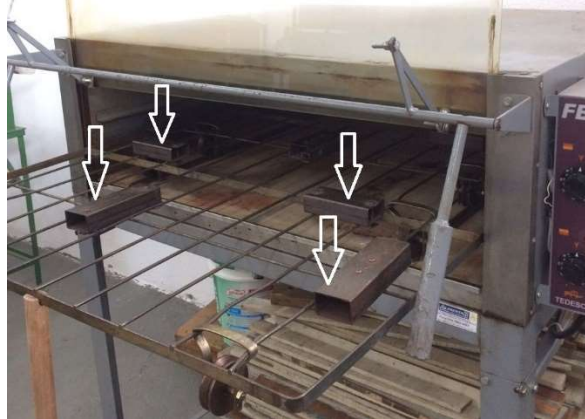


Frente do forno

Fonte: Autor (2017)

O forno ainda conta com uma adaptação, a inclusão de bases de apoio, para que as telas com os fios de PET encaixem-se de maneira mais adequada ao forno, não permitindo com que os fios encostem em qualquer parte do mesmo, para que não haja queimas por contato. Em seguida temos a Figura 13 apresentando como são as bases para as telas.

Figura 13 – estrutura interna do forno FBE 800 TEDESCO



Fonte: Autor (2017)

Assim, com a adaptação das bases no forno, indicado pelas setas na figura 12, as telas com fios de PET podem ser acomodadas corretamente dentro do forno, e colabora para o espaçamento correto com relação as superfícies inferior e superior do forno.

4.6 Planejamento de experimentos

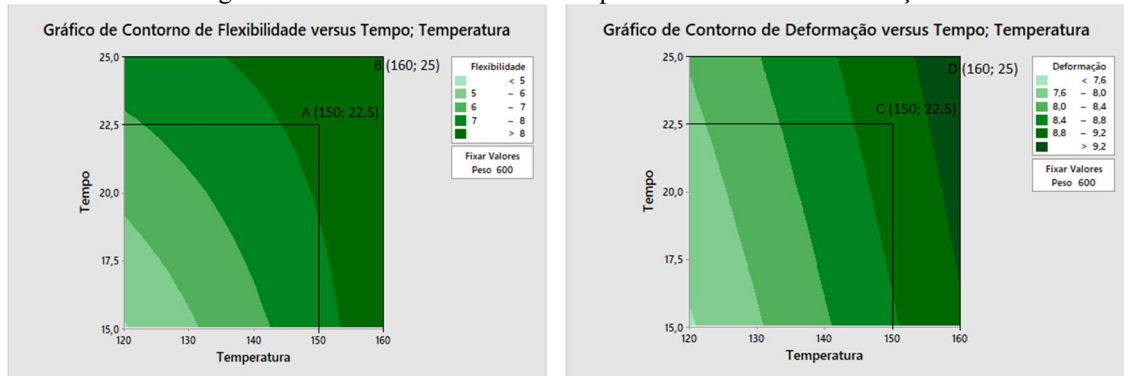
Através do exposto no trabalho de Machado (2016) e análises dos processos da empresa, sabemos que o gargalo do sistema produtivo da mesma concentra-se no tratamento térmico, o que hoje ainda é feito de forma empírica. Objetivando uma parametrização exata do processo, trazendo assim um equilíbrio entre a qualidade do produto alinhado à um ganho financeiro, motivados pela utilização correta do forno, em relação aos parâmetros de tempo e temperatura, iremos utilizar as técnicas de planejamento de experimento, para que assim, possamos escolher o melhor ponto que nos tragam as características anteriormente citadas.

Além dos preceitos do planejamento de experimento, que nos auxiliam na obtenção dos ensaios, para que sejam realizados os testes, ainda devemos compilar os dados, utilizando o software de estatística MiniTab.

4.6.1 Estudo e seleção dos fatores de controle

Ambos os fatores tempo e temperatura foram escolhidos a partir da análise dos gráficos de controle presentes no trabalho de (MACHADO, 2016). Foi levantado o range de operação que obteve a maior nota, segundo o gráfico de controle, e assim, a partir desses dados, foram apresentados à prof^a orientadora, e posteriormente, validados, para sua utilização no experimento. Nas Figuras 14 e 15 temos os gráficos de controle anteriormente citados, para exemplificarmos visualmente, como foram obtidos os fatores do experimento.

Figura 14 e 15 – Gráfico de contorno para flexibilidade e deformação



Fonte: (MACHADO, 2016)

Na Figura 14 verificamos que, ambos os pontos contemplam a área do gráfico a qual, possui a melhor nota, já na Figura 15 o ponto C encontra-se na área da segunda melhor nota, porém o parâmetro foi validado e utilizado no experimento.

4.6.2 Parâmetros do processo

Após validados então, os fatores de resposta do processo, tivemos os seguintes valores, representados na tabela 2.

Tabela 3 - Fatores de Controle e seus respectivos níveis

	Símbolo	Unidade	Níveis	
			-	+
Temperatura do forno	T	°C	150	160
Tempo	t	Min.	22,5	25

Fonte: Autor (2017)

Os fatores foram coletados dois a dois, e segundo aos preceitos do planejamento de experimentos, eles possuem dois níveis, o inferior (-), e o superior (+), assim como denotados na tabela 2.

Como a empresa sofreu uma mudança no local de suas instalações físicas recentemente, o novo local, conta com uma rede elétrica com baixa estabilidade. Esse ponto foi de extrema importância para a realização do experimento pois, a princípio o objetivo do trabalho era parametrizar o forno de modo a usá-lo com ambos os termostatos ligados, buscando a maior assertividade com relação à padronização do processo, para garantir a uniformidade da temperatura no interior do forno. Não foi possível realizar de tal forma, pois, as novas instalações da empresa apresentavam problemas quando ambos os termostatos eram acionados simultaneamente. Segundo orientação, foi definido que o tempo de tratamento térmico seria efetuado com um termostato ligado de cada vez, cada um durante metade do tempo estipulado.

4.7 Influência dos fatores de controle sobre a qualidade do produto

Nesta etapa apenas validamos com o estudo do trabalho de Machado (2016) que, os fatores que influenciam a qualidade do produto ainda se referem ao tempo e temperatura, e assim, não foi necessário estudo com relação à definição de novos fatores.

4.7.1 Qualidade do processo

Os problemas de qualidade do processo estão relacionados em como as atividades da empresa são executadas. Durante o período de coleta de dados foi observado que, a empresa atualmente possui um mecanismo que distribui por igual, os fios de PET nas telas, quando executando a alimentação das mesmas, porém, o processo ainda não possui um tempo padrão, é finalizado pelo operador após um tempo subjetivo estipulado pelo mesmo.

Segundo Bannach, Lini Perpétuo, et al. (2011), para o uso adequado de polímeros, novos e usados, é de suma importância conhecer as propriedades desses materiais, tais como temperatura de fusão, grau de cristalinidade, pureza, transição vítrea e história térmica. O sucesso da aplicação do PET se dá devido às suas propriedades físico-mecânicas, sendo elas, rigidez, brilho, estabilidade térmica, estabilidade à luz e barreira a gases, pontua (Tereza de A. Freire, G. R. Reyes e Castle (1998). Exemplificamos assim então, a larga utilização do PET.

4.7.2 Qualidade do produto

Como o processo produtivo da empresa e seu próprio produto, são inovadores, as informações a respeito deles são poucas. Há poucas ou até mesmo não há empresas para a realização de um benchmarking, tampouco o processo de tratamento térmico conta com um maquinário padronizado, e sim, apenas adaptações de itens já existentes ou especificamente projetados para o mesmo. A própria empresa define, mesmo que subjetivamente, a qualidade do produto, e o tem como sendo um fio com resistência adequada para efetuar a ação de varrer. Ainda há a questão a qual resistência do fio seria melhor para determinado tipo de superfície, porém, a análise ainda não é feita pela empresa, ou seja, eles produzem um produto único de cada modelo, e esse é ofertado para ser utilizado nos mais diversos tipos de superfície presente.

Ainda temos em relação a qualidade do produto que, após o tratamento térmico, os mesmos devem permanecer sem a presença de fios queimados. Fios esses que são

identificados visualmente por segmentos que se rompem e obtêm o formato ondulado ou circular e cor esbranquiçada, como mostrado na Figura 16 a seguir.

Figura 16 – Amostra de fios que possuem qualidade indesejada



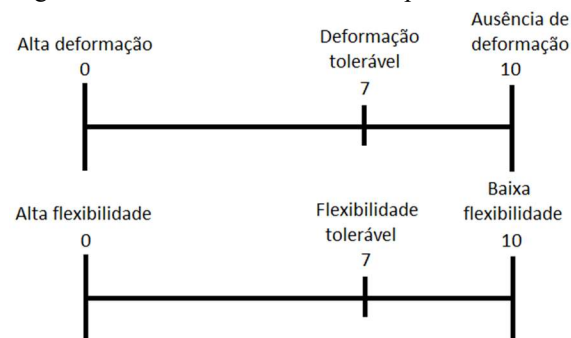
Fonte: Autor (2017)

Atualmente o problema de falta de uniformidade dos fios de PET nas telas foi resolvido, após adaptação do processo de alimentação do mesmo, e então foi adquirida uma maior confiabilidade no processo. Temos hoje que, os únicos fatores que podem contribuir para que o processo produza fios com qualidade indesejada, são os parâmetros de operação do processo de tratamento térmico, sendo eles tempo e temperatura de processamento.

4.7.3 adequação e validação da escala avaliativa

As variáveis de resposta responsáveis por avaliar a qualidade produto final, já haviam sido determinadas, e são elas a flexibilidade e deformação das cerdas de fio de PET. Anteriormente utilizado por Machado (2016), os parâmetros avaliativos das respostas haviam 3 níveis sendo eles esquematizados na Figura 17, a seguir.

Figura 17 – Escala dos fatores de resposta em 3 níveis



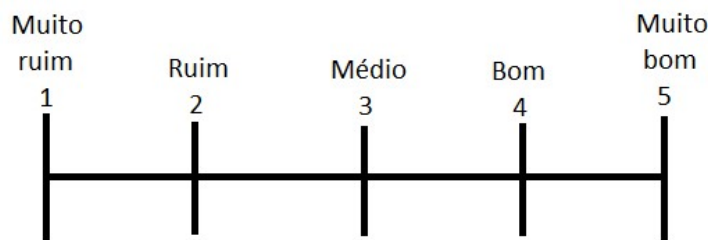
Fonte: (MACHADO, 2016)

A escala apresentava-se adequada para o atual experimento, porém, ao realizar a primeira tentativa, foi constatado que um dos operadores estaria fornecendo dados viciados à avaliação. O operador em questão executa diretamente a atividade estudada, e o mesmo

mostrou-se relutante às mudanças que o processo iria passar, e então, avaliou a maioria das amostras com notas zero, o que não poderia ocorrer pois, os parâmetros utilizados eram os melhores valores deixados em uma proposta anterior, logo, a tendência era de obter-se notas iguais ou melhores.

Na busca de readequar a escala, e assim, estratificar melhor a resposta dos operadores, de acordo com as subjetividades em que os mesmos apresentam, assim na busca de refinarmos a escala utilizada, foi definida a utilização da escala Likert para estratificar dados mais coerentes. Segundo (JOSHI, KALE, et al., 2015) as técnicas de pesquisa qualitativa tentam compensar, ao descrever a complexidade dos pensamentos, sentimentos e perspectivas humanas, através de várias técnicas de ciências sociais, ainda a quantificação desses traços continua a ser um requisito. Na Figura 18 temos o esquema da escala Likert.

Figura 18 – Escala Likert para avaliação do tratamento térmico dos fios de PET



Fonte: Autor (2017)

5. Resultados e discussões

5.1 Execução do planejamento experimental

Após definição dos parâmetros, pode-se criar a matriz de planejamento. Cada um dos fatores possui dois níveis, assim como dado pela técnica de planejamento 2^k .

A seguir na tabela 3, temos os códigos dos níveis de controle e suas referências.

Tabela 4 - Matriz de planejamentos e dados do experimento

Ordem	Valores Codificados		Valores Decodificados	
	T (°C)	t (min)	T (°C)	t (min)
1	-1	-1	150	22,5
2	+1	-1	160	22,5
3	-1	+1	150	25
4	+1	+1	160	25

Fonte: Autor (2017)

Além dos valores constantes na Tabela 3, e pelo fato de cada fornada comportar 4 telas por vez, foram usados também a notação dos quadrantes, assim como presente na figura 11, para uma assertividade maior no experimento e também para que haja a rastreabilidade de cada item quanto ao seu local no forno.

Para a avaliação posterior, de cada tela, foi elaborado uma ficha ao qual os envolvidos no processo produtivo da empresa deram notas para cada tela, e então, foram executados tratamento nos dados, ponderando-os de maneira a valorizar mais a nota de quem está mais presente no processo. O dono da empresa e vendedores também avaliaram.

Com todos os parâmetros experimentais definidos, matriz do planejamento, escala avaliativa relacionados à qualidade do produto, demos continuidade executando a análise estatística das informações levantadas. A tabela a seguir apresenta os resultados da avaliação dos produtos, feita pelos operadores e funcionários da empresa, para cada amostra. Os dados já foram tratados e agrupados.

Tabela 5 - Resultados do experimento

Nº teste	Produto	Deformação	Flexibilidade
1	3717Q1	4,429	4,000
	3717Q2	4,429	3,143
	3717Q3	3,714	3,857
	3717Q4	4,000	3,000
2	4717Q1	4,429	4,000
	4717Q2	4,429	3,143
	4717Q3	4,714	4,571
	4717Q4	3,571	4,143
3	4717Q1	4,429	4,000
	4717Q2	4,429	3,143
	4717Q3	4,714	4,571
	4717Q4	4,000	3,286
4	4717Q1	4,429	4,000
	4717Q2	4,429	3,143
	4717Q3	4,571	4,429
	4717Q4	3,571	4,143

Fonte: Autor (2017)

Após a disponibilidade dos dados, foi dado início à etapa de compilação no software MiniTab, e no software, executado a análise de variância ANOVA, e assim, obtivemos os relatórios, tabelas e gráficos, presentes a seguir.

5.2 Análise dos resultados: Flexibilidade

Nesta etapa então, após o processamento dos dados no software MiniTab, obtivemos os relatórios referentes à estimativa de efeitos e coeficientes para flexibilidade.

Tabela 6 - Estimativa de efeitos e coeficiente na flexibilidade

Termo	Efeito	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P
Constante		4,2679	0,0676	63,13	0,000
Temperatura	-0,3214	-0,1607	0,0676	-2,38	0,035
Tempo	-0,3214	-0,1607	0,0676	-2,38	0,035
Temperatura*Tempo	-0,3214	-0,1607	0,0676	-2,38	0,035

Fonte: Autor, 2017.

Em relação à flexibilidade, podemos concluir que, ao verificarmos a coluna efeito, obtemos valores negativos, o que nos diz que, ao variarmos positivamente, tanto a variável temperatura quanto a variável tempo, isoladamente ou combinadas, a qualidade do produto tende a diminuir.

Ao analisarmos o valor-P, podemos concluir que, tanto a variável tempo quanto a variável temperatura, à um nível de significância de $\alpha=0,05$, apresentam-se significativas para o processo, e ambas combinadas também, pois, seu valor é menor que o de α .

Tabela 7 – Análise de variância (ANOVA) - flexibilidade

Análise de Variância - flexibilidade					
Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Valor-P
		(Aj.)	(Aj.)		
Modelo	3	1,2398	0,41327	5,65	0,012
Linear	2	0,8265	0,41327	5,65	0,019
Temperatura	1	0,4133	0,41327	5,65	0,035
Tempo	1	0,4133	0,41327	5,65	0,035
Interações de 2 fatores	1	0,4133	0,41327	5,65	0,035
Temperatura * Tempo	1	0,4133	0,41327	5,65	0,035
Erro	12	0,8776	0,07313		
Total	15	2,1173			

Fonte: Autor, 2017.

Com relação à análise do ANOVA, para a flexibilidade, verificamos que à um nível de significância de $\alpha=0,05$, o modelo linear, a variável temperatura, o tempo e a combinação das variáveis, são significativos para o processo, pois, seu valor encontrado foi menor que o de α estipulado no experimento, o que podemos concluir que, as variáveis interferem na qualidade final do produto.

Analisando os mesmos fatores, no trabalho de (MACHADO, 2016), confirmamos que, as duas variáveis interferem na flexibilidade, ou seja, o seguinte experimento vem de forma a confirmar o proposto anteriormente.

5.3 Análise dos resultados: Deformação

Tabela 8 - Estimativa de efeitos e coeficiente na deformação

Termo	Efeito	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P
Constante		3,7857	0,0850	44,53	0,000
Temperatura	-0,7857	-0,3929	0,0850	-4,62	0,001
Tempo	0,4286	0,2143	0,0850	2,52	0,027
Temperatura*Tempo	0,0714	0,0357	0,0850	0,42	0,682

Fonte: Autor, 2017.

Ao efetuarmos a análise da Tabela 7 de efeitos, para a deformação, verificamos que, ao variarmos positivamente apenas a variável temperatura, a qualidade do produto tende a diminuir, e além disso, sua variação se dará de forma mais acentuada, pois, o módulo do efeito da temperatura é consideravelmente grande.

Para a variável tempo, temos uma análise de que, ao variarmos positivamente a mesma, a qualidade do produto tende a subir, porém, numa “velocidade” menor, quanto a variação que a variável temperatura pode proporcionar, para a qualidade do produto.

Temos com relação ao valor-P que, levando em consideração um nível de significância de $\alpha=0,05$, as variáveis tempo e temperatura, isoladamente, apresentam relevância em relação a qualidade do produto, entretanto, a combinação de ambas, segundo o modelo, não apresenta.

Tabela 9 – Análise de variância (ANOVA) - deformação

Análise de Variância - Deformação						
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	
Modelo	3	3,22449	1,07483	9,29	0,002	
Linear	2	3,20408	1,60204	13,85	0,001	
Temperatura	1	2,46939	2,46939	21,35	0,001	
Tempo	1	0,73469	0,73469	6,35	0,027	
Interações de 2 fatores	1	0,02041	0,02041	0,18	0,682	
Temperatura * Tempo	1	0,02041	0,02041	0,18	0,682	
Erro	12	1,38776	0,11565			
Total	15	4,61224				

Fonte: Autor, 2017.

Podemos dizer que, em relação à análise de variância para a deformação, o modelo linear, e as variáveis tempo e temperatura, trabalhadas isoladamente, apresentam relevância com relação à qualidade do produto, segundo um nível de significância de $\alpha=0,05$, porém, a interação dos dois parâmetros não apresentam tal relevância pois, seu valor-P encontra-se maior que α .

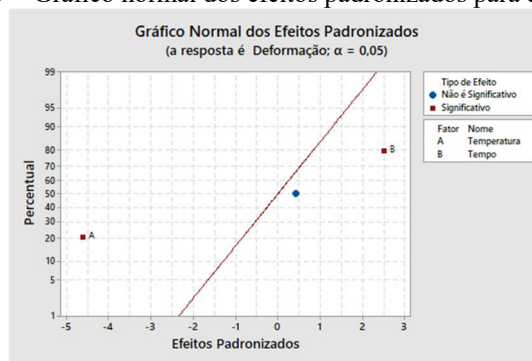
Ainda diante do exposto nas Tabelas 8 e 7, conseguimos concluir que nossos dados se comportam da mesma maneira dos dados de (MACHADO, 2016), assim, validando seu modelo.

5.4 Análise gráfica

5.4.1 Deformação

Neste tópico iremos analisar os gráficos para a resposta à deformação, e o primeiro apresentado será o gráfico normal de efeitos padronizados, constante na Figura 19, que nos traz todos os pontos dos efeitos principais onde, demonstram os efeitos da temperatura e tempo e a combinação entre elas.

Figura 19 – Gráfico normal dos efeitos padronizados para deformação

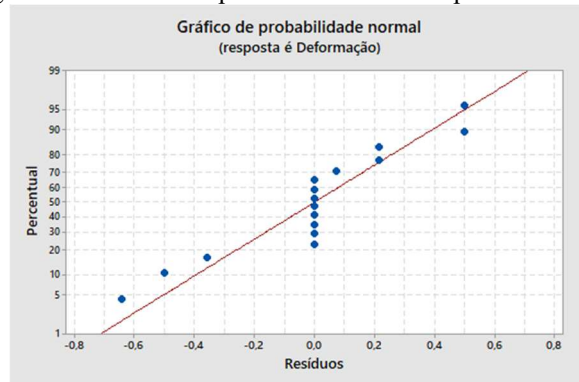


Fonte: Autor (2017).

O gráfico nos mostra que não é possível determinar a significância para a combinação entre temperatura e tempo, porém, cada um dos parâmetros isolados, apresenta significância pois, os mesmos encontram-se distantes da reta.

Pelo gráfico de probabilidade normal verificamos que, a normalidade é identificada quando os dados tendem a uma reta, o que se aplica neste caso pois, verificamos que os pontos presentes no gráfico, embora não sejam propriamente ditos uma reta, eles tendem a uma, por não serem dispersos.

Figura 20 – Gráfico de probabilidade normal para deformação

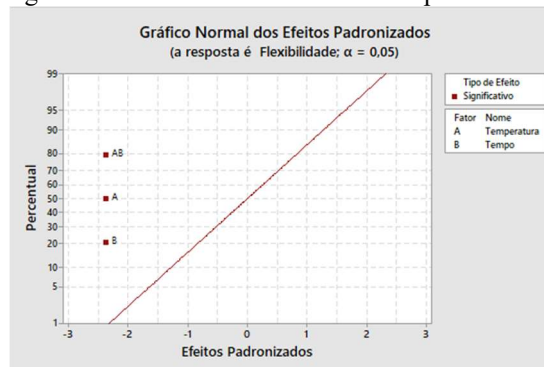


Fonte: Autor (2017)

5.4.2 Flexibilidade

Iremos neste tópico, efetuar a análise gráfica para flexibilidade. Segue Figura 21, com o gráfico normal dos efeitos padronizados.

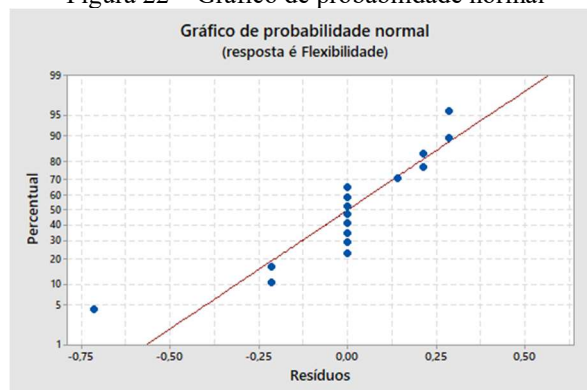
Figura 21 – Gráfico normal dos efeitos padronizados



Fonte: Autor (2017)

E a figura 22, com o gráfico de probabilidade normal, com relação à flexibilidade.

Figura 22 – Gráfico de probabilidade normal



Fonte: Autor (2017)

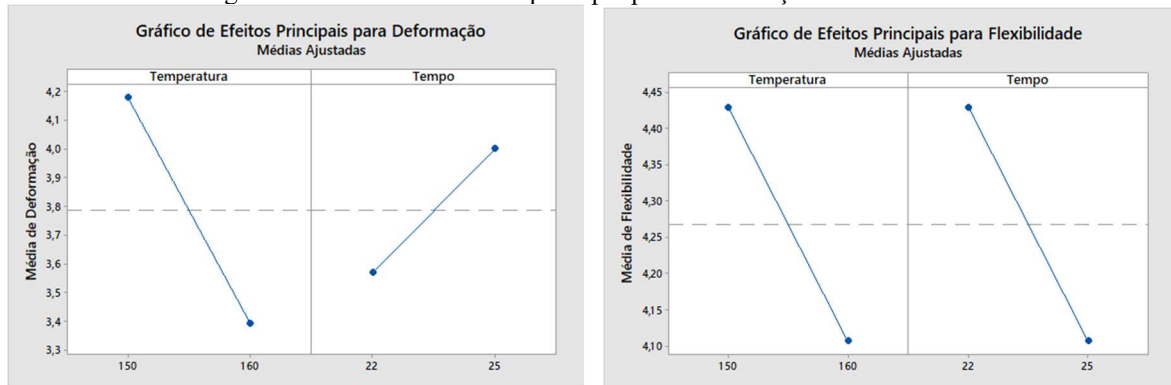
Segundo o gráfico normal dos efeitos padronizados, presente na Figura 19, verificamos que, para a flexibilidade, os efeitos da temperatura, tempo, e sua combinação, por

estarem distantes da reta, apresentam significância para o modelo proposto. Para o gráfico de probabilidade normal, também verificamos que os dados podem ser considerados como normalizados pois, os dados não se apresentam caóticos e tendem a uma reta.

5.5 Análise geral do experimento

Após análises anteriores, neste tópico iremos realizar um comparativo com relação aos efeitos principais dos fatores. Iremos realizar um comparativo para ilustrar de uma melhor forma o citado. Ainda vale ressaltar que todo o material foi aprovado, pois, o mesmo se deu a partir da faixa de dados ótimos de Machado (2016), e então, obtendo valores refinados.

Figura 23 – Gráficos de efeito principal para Deformação e Flexibilidade



Fonte: Autor(2017)

Verificamos que, o parâmetro Tempo, no gráfico para Deformação, apresenta um efeito principal alto, pois, a reta que liga as respostas médias do nível mais baixo para o nível mais alto, possui alta inclinação. Para a Flexibilidade, temos que o tempo também apresenta um alto efeito principal, devido ao tamanho de sua reta.

O parâmetro temperatura possui efeito principal alto em ambos os casos, devido ao tamanho de sua reta que liga as extremidades das respostas médias.

Dessa forma, podemos chegar a conclusão de que, à um nível de confiabilidade de 95% ($\alpha=0,05$), os efeitos principais que são significativos ao processo, em ordem de relevância são, temperatura e tempo.

Analisando as informações geradas pelo MiniTab, obtemos a otimização para as variáveis de resposta temperatura e tempo. Foram geradas quatro respostas otimizadas e elas estão presentes na Tabela 9 a seguir.

Tabela 10 - Otimização das respostas

Solução	Temperatura	Tempo	Deformação Ajuste	Flexibilidade Ajuste	Desirability Composta
1	150	25	4,35714	4,42857	0,804815
2	150	24,9500	4,35119	4,42857	0,803047
3	150	24,9338	4,34927	4,42857	0,802476
4	150	24,8901	4,34406	4,42857	0,800927

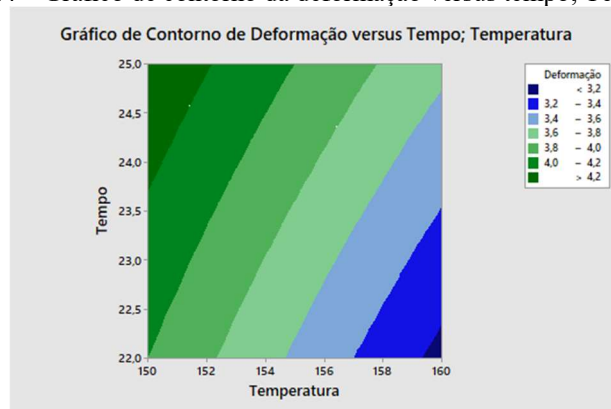
Fonte: Autor, 2017.

Sendo assim, possuímos então um valor exato para a operação do processo, levando em consideração os parâmetros adotados, nível de significância e a qualidade desejada do produto, alinhados à uma economia energética.

5.6 Gráficos de controle

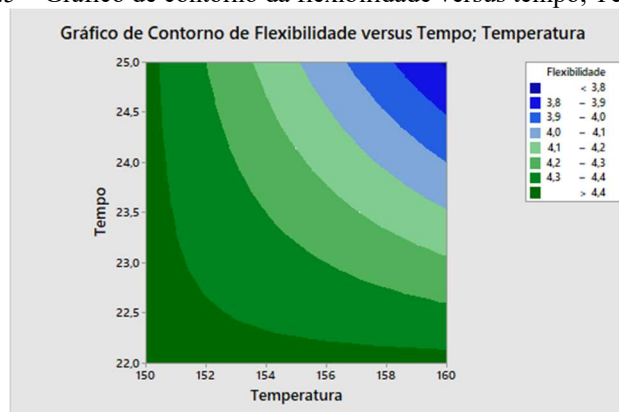
Afim de validar as soluções de otimização das respostas obtidas, iremos demonstrar por meio dos gráficos de contorno, quais seriam as regiões ótimas para operar o processo de tratamento térmico.

Figura 24 – Gráfico de contorno da deformação versus tempo; Temperatura



Fonte :Autor (2017)

Figura 25 – Gráfico de contorno da flexibilidade versus tempo; Temperatura



Fonte: Autor (2017)

Diante do exposto, podemos definir qual seria a região ótima para a operação do processo, e vemos que para a resposta Flexibilidade, permite-se uma variação maior nas variáveis de controle, do que o representado referente à Deformação, a qual, tem uma área ótima menor, ou seja, permite uma variação menor de suas variáveis. De acordo com a escala do gráfico de contorno, as regiões em verde escuro são as melhores, e diminuem em degradê, até a cor azul.

Podemos ainda representar na tabela 10, as regiões ótimas dos gráficos de controle, de forma esquemática.

Tabela 11 - Parametrização do processo de tratamento térmico

	Flexibilidade			Deformação
Temperatura (°C)	150-151	151-152	152-160	150-152
Tempo (min)	22-25	22-22,75	12-22,25	23,75-25

Fonte: Autor, 2017.

A seguinte tabela foi preenchida de modo a, contemplar apenas os valores presentes nas faixas ideais de operação para o processo, segundo análise do gráfico de controle.

6. Conclusão

O seguinte trabalho estudou a aplicação do planejamento de experimento em um equipamento referente ao processo de tratamento térmico de fios de PET, afim de levantar, a partir de faixas de operação ideais já conhecidos, qual seria o melhor parâmetro operacional para o mesmo. Experimentos fatoriais são métodos presentes no planejamento de experimento que, analisam a influencia de todos os fatores estudados, a interação entre eles e, são utilizados quando vários fatores necessitam ser investigados.

Tendo como base os relatórios gerados pela análise estatística ANOVA, e seus gráficos, foi possível verificar o comportamento das variáveis estudadas, e assim, estipular um valor pontual de operação do processo, visando a alta qualidade do produto alinhado à economia energética na empresa.

Mesmo submetidos a erros e diante da subjetividade da avaliação do produto, ainda foi possível realizar o trabalho e chegar num resultado satisfatório. Ainda temos como contribuição para a empresa a manutenção do conceito de qualidade, e sua importância.

Inicialmente sabíamos, que apesar de estudos anteriores, o processo ainda era operado de maneira subjetiva pelos operadores, estando assim, suscetível a erros e variabilidade

inadmissível, e com o planejamento de experimento, foi possível mostrar que ao padronizar o processo e operá-lo dentro das faixas estipuladas, o produto seria gerado com a qualidade desejada.

No decorrer do processo foi encontrado uma dificuldade na realização do estudo pois, durante a realização do mesmo, a empresa efetuou a mudança de sua sede, deslocando-se para um novo barracão, ao qual, além da mudança de lay-out no processo produtivo como um todo, houve uma mudança na qualidade das instalações elétricas do barracão. Instalações essas que, não suportavam manter a rede estável para a realização da atividade de tratamento térmico com os dois termostatos ligados ao mesmo tempo, ou seja, em um último momento, o estudo sofreu uma alteração forçada, ao qual não esperávamos.

7. Referências bibliográficas

BANNACH, G. et al. Efeitos da história termica nas propriedades do polímero PET: Um experimento para ensino de análise térmica. **Química Nova - Sociedade Brasileira de química**, São Paulo, v. 34, julho 2011.

BOX, G. E. P.; HUNTER, J. S.; HUNTER, W. G. **Statistics for experiments: Design, innovation, and discovery**. 2ª. ed. [S.l.]: Wiley , 2005.

CARPINETTI, L. C. R. **Controle estatístico de qualidade**. São Paulo: Atlas S.A., 2004.

DAN, H. et al. **Economic Optimal Model Integrating statistical Process Control and Preventive maintance**. Huazhong University of Science & Technology. Chongqing, p. 7. 2016.

DOWLATSHAHI, S. An application of design of experiments for optimization of plastic injection molding process. **Journal of Manufacturing Technology Management**, Kansas City, p. 12, 2004.

FERNANDES, F. C. F.; GODINHO FILHO, M. **Planejamento e Controle da Produção: dos fundamentos ao essencial**. [S.l.]: Atlas, 2010.

FREITAS, E. C.; PRODANOV, C. C. **Metodologia do trabalho científico: Métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2º. ed. Novo Hamburgo - RS: Feevale, 2013.

GALDAMEZ, E. C. et al. Melhoria da produtividade por meio do mapeamento de processo e balanceamento da produção: Impacto em uma industria de vassouras de garrafas de PET. **Sodebras**, v. 11, p. 169, Abril 2016.

GIL, A. C. **Como elaborar projeto de pesquisa**. 4º. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

JOSHI, A. et al. Likert Scale: Explored and explained. **British Journal of Applied Science & Technology**, p. 8, 2015.

KHORASANI, A. M.; AGHCHAI, A. J.; KHORRAM, A. Chatter prediction in turning process of conical workpieces by using case-based reasoning (CBR) method and taguchi design of experiment. **The international journal of advanced manufacturing technology**, 22 dezembro 2010.

MACH, P.; BARTO, S. Comparison of different approaches to manufacturing process optimization. **2010 IEEE - 16th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)**, Pitesti, Romênia, 03 Dezembro 2010.

MACHADO, A. D. A. **Aplicação da Técnica de Planejamento de Experimentos no Processo de Tratamento Térmico do Fio de Garrafas PET**. Maringá: [s.n.], 2016.

MANGWANDI, C. et al. An investigation of the influence of process and formulation variables on mechanical properties of high Shear granules using desing of experiment. **International Journal of Pharmaceutics**, Sheffield, maio 2012.

MEI, K.-C. et al. Organic Solvent-free, one-step engineering, of graphene-based magnetic-responsive hybrids using design of experiment-driven mechanochemistry. **ACS Applied materials & interfaces**, London, 2015.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of experiments**. Tempe: John Wiley & Sons, 2013.

SHAHAR, M. A.; AZIZ, A. Z.; KALTHUM, U. N. Design of Experiment (DOE) for Microstrip Transmission Line in RF and Microwave Undergraduate Course. **Computer application in engineering education**, Nibong Tebal, Pulau Pinang, Malaysia, v. 23, 18 janeiro 2015.

SUN, H.; CHENG, T.-K. Comparing reasons, practicies and effects of ISO 9001 certification and TQM implementation in Norwegian SMEs and large firms. **International Small Business Journal**, Hong Kong, v. 20, p. 22, 2002.

TAGUCHI, G.; SHOWDURY, S.; TAGUCHI, S. **Robust Engineering**. New York: McGrawHill, 1999.

TEREZA DE A. FREIRE, M.; G. R. REYES, F.; CASTLE, L. Estabilidade térmica de embalagens de Poli (Tereftalato de Etileno (PET)): Determinação de oligômeros. **Polímeros**, São Carlos, Janeiro 1998.

TSAI, J.-T. et al. Optimal parameter design for IC wire bonding process by using Fuzy logic and Taguchi method. **IEEE Access**, Pingtung, 2016.

WONG, P. K. et al. Efficient point-by-point engine calibration using machine and sequential design of experiment strategies. **Journal of the Franklin Institute**, Macau, janeiro 2017.