

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA

Luciana Motta Pereira

Redução da variabilidade de pH na produção de líquido de
arrefecimento utilizando a metodologia Lean Six Sigma

Lorena

2020

LUCIANA MOTTA PEREIRA

Redução da variabilidade de pH na produção de líquido de
arrefecimento utilizando a metodologia Lean Six Sigma

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia
de Lorena - Universidade de São Paulo
como requisito parcial para obtenção
do título de Engenheiro Químico.

Orientador: MSc. Marcos Villela
Barcza

Lorena

2020

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizado
da Escola de Engenharia de Lorena,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Pereira, Luciana Motta

Redução da variabilidade de pH na produção de líquido de arrefecimento utilizando a metodologia Lean Six Sigma / Luciana Motta Pereira; orientador Marcos Villela Barcza. - Lorena, 2020.
63 p.

Monografia apresentada como requisito parcial para a conclusão de Graduação do Curso de Engenharia Química - Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo. 2020

1. Líquido de arrefecimento. 2. Lean six sigma. 3. Dmaic. I. Título. II. Barcza, Marcos Villela, orient.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais que foram essenciais para que me tornasse a pessoa que sou hoje. Minha mãe me deu sua dedicação, sua calma e sua compreensão que serão fundamentais para resolver os problemas e enfrentar os futuros desafios. Já meu pai me deu seu pensamento crítico, seu bom humor e me ensinou que sempre devemos nos preocupar com a nossa felicidade. Amo muito vocês dois!

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço às pessoas mais especiais da minha vida: meus pais, Christiane e Edmundo. Obrigada por sempre me apoiarem em todas minhas decisões, por sempre se preocuparem e por todo o carinho.

Um agradecimento especial para minha querida irmã, Mariana, por todas as recordações maravilhosas e engraçadas. Você me motiva todos os dias a ser uma pessoa melhor. Pode contar sempre comigo.

Agradeço ao meu maior companheiro durante toda a faculdade, Ítalo, pelas risadas, por me acalmar antes das provas, por ser essa pessoa incrível e por estar comigo em todos os momentos. Obrigada por dividir essa aventura comigo.

Obrigada aos meus amigos, Herdy, Igor, Ive, Laura, Leo, Letícia e Maria, por sempre estarem ao meu lado apesar de todas as dificuldades que a distância nos impõe. Que nossa amizade siga cada vez mais forte.

Obrigada também a todos meus colegas da faculdade por me ajudarem a enfrentar o dia a dia com mais leveza e diversão. Esse período não teria sido o mesmo sem vocês. Obrigada também a todos os professores que me ajudaram durante essa jornada. Em especial, ao professor Marcos Barcza que me aconselhou e auxiliou durante todo este trabalho.

Por fim, agradeço a todos os colegas de EVG, de Auxiliares e a todos que, de alguma forma, contribuíram para o meu crescimento durante o estágio. Em especial, a aqueles que me ajudaram e apoiaram durante esse projeto: ele não teria saído sem vocês! Obrigada por tornarem os muitos problemas e desafios do dia a dia mais fáceis e divertidos.

RESUMO

Pereira, L. M. **Redução da variabilidade de pH na produção de líquido de arrefecimento utilizando a metodologia Lean Six Sigma**. 2020. 63 p. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2020.

O líquido de arrefecimento é essencial para o bom funcionamento do motor de automóveis visto que sua função é dissipar o calor gerado pelo motor e, assim, evitar o superaquecimento. Para essa finalidade, uma mistura de etilenoglicol com água é recomendada pois garante que o líquido não congelará em temperaturas frias nem ferver em temperaturas quentes. Em sua produção, um parâmetro de controle importante é o pH e há uma certa faixa de especificação que ele deve atender. Caso contrário, é necessário adicionar mais ácido ou base para ajustá-lo. Uma grande empresa química da região do Vale do Paraíba possui um problema recorrente em relação ao pH, que frequentemente não atinge os valores desejados. A causa raiz não pode ser facilmente identificada já que há diversas variáveis que afetam o processo. Portanto, o objetivo desse trabalho foi, através das ferramentas do Lean Six Sigma, descobrir qual era a origem do problema. Para tanto foram levantadas doze possíveis causas raízes e cada uma foi avaliada para determinar se estava afetando o pH do produto. A partir desse levantamento, foi feita uma coleta de dados com o objetivo de medir o processo e conhecer seu comportamento em relação às principais causas raízes destacadas na primeira etapa. Posteriormente, foram feitas análises e chegou-se à conclusão que o que estava afetando o pH era ou o teor inadequado de uma matéria-prima (BF) ou o medidor de vazão que fica na linha dessa matéria-prima.

Palavras-chave: líquido de arrefecimento. Lean Six Sigma. DMAIC.

ABSTRACT

Pereira, L. M. **Reduction the pH variability in coolant production using the Lean Six Sigma methodology**. 2020. 63 p. Graduation Work in Chemical Engineering – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2020.

Radiator coolant is essential for the proper functioning of the car engine since its function is to dissipate heat generated by the engine and thus to prevent overheating. For this purpose, a mixture of ethylenoglycol and water is recommended as it ensure that the liquid will not freeze at low temperatures nor boil at high temperatures. In its production, an important control parameter is pH of the solution and there is a certain specification range that it must meet. Otherwise, it is necessary to adjust it by adding acid or base. A large chemical company in the Vale do Paraíba region has a recurring problem in relation to pH, which often does not reach the desired values. The root cause cannot be easily identified since there are several variables that affect the process. Therefore, the mainly purpose of this research was to find out the root cause of the problem through Lean Six Sigma tools. For this, twelve possible root causes were raised and each one was evaluated to determine if it was affecting the pH of the product. From this survey, data was collected to measure the process and to understand its behavior in relation to the variables highlighted in the first stage. Subsequently, analyzes were carried out and it was concluded that what was affecting the pH was either the inadequate contente of a raw material (BF) or the flow meter of this raw material.

Key words: Coolant. Lean Six Sigma. DMAIC.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema do sistema de radiação	11
Figura 2 – Principais glicóis	12
Figura 3 - Relação entre ponto de fusão e ebulição com a concentração de EG	13
Figura 4 - Esquema do processo de produção do líquido de arrefecimento	15
Figura 5 - Medidor de fluxo por efeito Coriolis da Khrone	17
Figura 6 - Esquema de funcionamento do medidor Optimass da Khrone	17
Figura 7 - Método DMAIC	21
Figura 8 - Exemplo de SIPOC	23
Figura 9 - Exemplo de Diagrama de Ishikawa	25
Figura 10 – Exemplo de Diagrama de Dispersão	26
Figura 11 - Exemplo do uso do 5W2H	27
Figura 12 - Exemplo de histograma	27
Figura 13 - Exemplo de diagrama e curva de Pareto para tipos de defeito	29
Figura 14 - Gráfico de defeitos de pH por ano	33
Figura 15 - Distribuição de pH para o tipo A em 2018 (a) e 2019 (b)	33
Figura 16 - Distribuição de pH para o tipo B em 2018 (a) e 2019 (b)	34
Figura 17 - Distribuição de pH para o tipo C em 2018 (a) e 2019 (b)	35
Figura 18 - Distribuição de pH para o tipo D em 2018 (a) e 2019 (b)	35
Figura 19 - Taxa de retrabalho de pH total ao longo dos meses (todos os tipos)	36
Figura 20 - Distribuição de pH para o tipo A em 2020 (janeiro e fevereiro)	36
Figura 21 - Diagrama de Ishikawa	37
Figura 22 - Priorização das possíveis causas raízes	44
Figura 23 - Histograma dos dados de erro do medidor físico	47
Figura 24 - Histograma dos dados de erro do monitor de controle	47
Figura 25 - pH final versus erro do medidor físico	48
Figura 26 - pH final versus erro do monitor de controle	49
Figura 27 - Lotes da MP 1 versus pH do produto final	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos de análise de líquidos de arrefecimento a base de MEG para radiadores	16
Tabela 2 – Principais informações de pH dos dados obtidos	32
Tabela 3 - Classificação dos critérios utilizados na matriz de priorização	38
Tabela 4 - Pontuações para as possíveis causas raízes apresentadas	43
Tabela 5 - Plano de Ação	45
Tabela 6 - Dados do medidor de BF	47

LISTRA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

5W2H	What, When, Where, Who, Why, How, How much
6M	Materiais, mão de obra, método, máquina, meio ambiente e medição
BF	Base Forte
DMAIC	Define, Measure, Analyse, Improve e Control
EG	Etilenoglicol
FPTR	First Pass Time Rate
LIE	Limite Inferior de Especificação
LSE	Limite Superior de Especificação
MEG	Monoetilenoglicol
MP	Matéria-prima
R^2	Coeficiente de correlação
SIPOC	Suppliers, Inputs, Process, Outputs e Customers
TAP	Termo de Abertura do Projeto

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 Sistema de radiação	11
2.2 O Processo	14
2.2.1 Medidor de Fluxo por Efeito Coriolis	16
2.3 Lean Six Sigma	18
2.3.1 Os 7 Tipos de Desperdício	19
2.3.1 Os 5 Princípios do <i>Lean</i>	20
2.4 DMAIC	20
2.4.1 Termo de Abertura do Projeto	22
2.4.2 SIPOC.....	22
2.4.3 5s.....	23
2.4.4 Diagrama de Ishikawa	24
2.4.5 Diagrama de Dispersão	26
2.4.6 Ferramenta 5W2H	26
2.4.7 Histograma	27
2.4.8 Diagrama de Pareto.....	28
3 METODOLOGIA.....	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
4.1 Definir.....	32
4.2 Medir	46
4.3 Analisar	52
5 CONCLUSÕES	55
REFERÊNCIAS.....	56
APÊNDICE A.....	58
APÊNDICE B.....	60

1 INTRODUÇÃO

O sistema de radiação de automóveis é de vital importância para o bom funcionamento dos motores atuais. Através de trocas de calor, esse sistema consegue manter a temperatura do carro em faixas adequadas, evitando o seu superaquecimento. Seu mecanismo consiste no bombeamento de líquido de arrefecimento pelas suas câmaras dentro do motor para absorver e dispersar o calor (CHE SIDIK; WITRI MOHD YAZID; MAMAT, 2017).

A água é um ótimo líquido de arrefecimento, no entanto, dependendo das condições climáticas do país, é necessário adicionar um anticongelante para abaixar a temperatura de fusão e aumentar a de ebulição, evitando que a água do motor congele em dias frios ou superaqueça em dias quentes. Normalmente, para esse fim é utilizado o etilenoglicol (EG). Além disso, alguns outros aditivos são utilizados para melhorar a performance do sistema de radiação (PEYGHAMBARZADEH et al., 2011).

Para atender ao mercado local, uma grande multinacional do ramo químico do Vale do Paraíba fabrica líquido de arrefecimento. No entanto, frequentemente, o pH sai fora de sua especificação, o que impacta o indicador *First Pass Time Rate* (FPTR), que analisa a quantidade de lotes produzidos sem que houvesse a necessidade de corrigir alguma propriedade sobre o total de lotes produzidos. Além do retrabalho, há outros custos extras envolvidos como tempo a mais de agitação do produto, o custo das matérias primas utilizadas para corrigir o pH e o custo das análises adicionais que devem ser feitas.

Portanto, essa monografia teve como objetivo principal identificar o que estava fazendo com que o pH dos líquidos de arrefecimento sofresse ampla variação e buscar reduzir sua variação. Como o pH possui diversas fontes de variação, ferramentas do *Lean Six Sigma* foram utilizadas.

Além disso, os objetivos específicos foram:

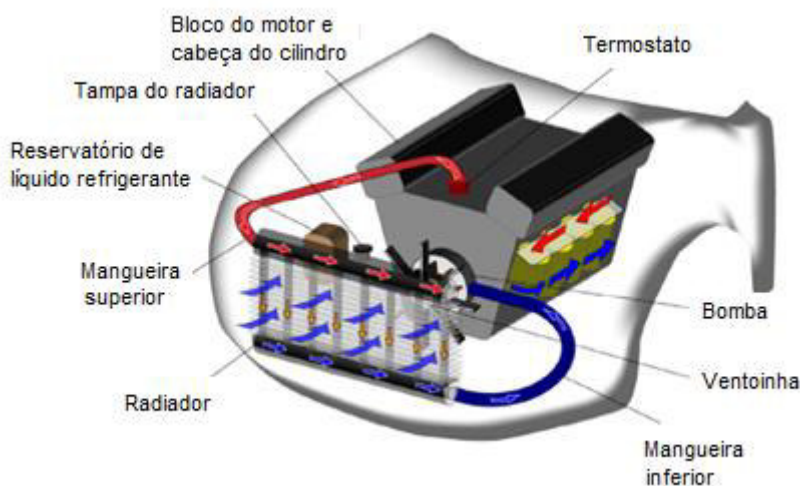
- 1) Conhecer sobre o processo produtivo do líquido de arrefecimento;
- 2) Colocar em práticas conhecimentos de *Lean Six Sigma*;
- 3) Identificar os principais parâmetros que podem afetar o pH do produto e analisar cada um.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistema de radiação

Nas últimas décadas, as grandes montadoras de automóveis vêm buscando melhorar cada vez mais a performance de seus veículos com o objetivo de atender aos desejos de seus clientes e manter um preço competitivo no mercado (CHE SIDIK; WITRI MOHD YAZID; MAMAT, 2017). Uma peça chave de qualquer automóvel é seu sistema de radiação, que é um compacto trocador de calor e consiste no radiador, ventoinha, bomba d'água, líquido de arrefecimento e seu reservatório, termostato e canais para o bombeamento do líquido, como mostrado na figura 1 *Figura 1*. Quando o motor é ligado, o líquido de arrefecimento é aquecido e bombeado de seu tanque para o radiador. O termostato só é aberto quando o líquido chega a sua temperatura ideal, que é por volta de 90°C. Então, o calor é transferido para o radiador e dissipado para o ar através de tubos e aletas ou esse calor pode ser usado para aquecer a cabine do veículo. Se houver superaquecimento, a ventoinha aumenta a taxa de transferência de calor (BIGDELI et al., 2016).

Figura 1 - Esquema do sistema de radiação



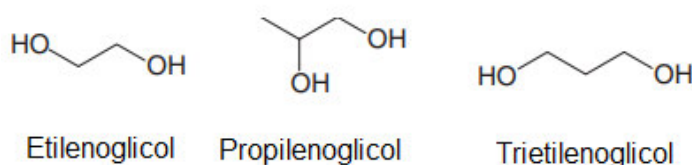
Fonte: CHE SIDIK; WITRI MOHD YAZID; MAMAT, 2017

O radiador possui diversas aletas e finas paredes para maximizar a troca de calor. No entanto, isso não é suficiente. Além disso, também é necessário um líquido de arrefecimento com alta capacidade de trocar calor com o sistema. A água pura poderia ser um ótimo líquido de arrefecimento, no entanto ela poderia

corroer a tubulação e também ferver em temperaturas muito altas ou congelar em temperaturas baixas. Por isso, é utilizado um anticongelante como aditivo pois, além de diminuir a temperatura de fusão, também aumenta a temperatura de ebulição evitando problemas em temperaturas extremas.

Glicol é um grupo de compostos orgânicos que possuem dois grupos hidroxilas; é, portanto, um álcool. Pelo sistema IUPAC, esse composto é nomeado como diol. Os principais glicóis que existem são: etilenoglicol (ou monoetilenoglicol), propilenoglicol e trietilenoglicol. Eles são produzidos através da hidratação de seus óxidos correspondentes. Suas fórmulas químicas estruturais estão mostradas na Figura 2 (SOLOMONS, 2007).

Figura 2 – Principais glicóis

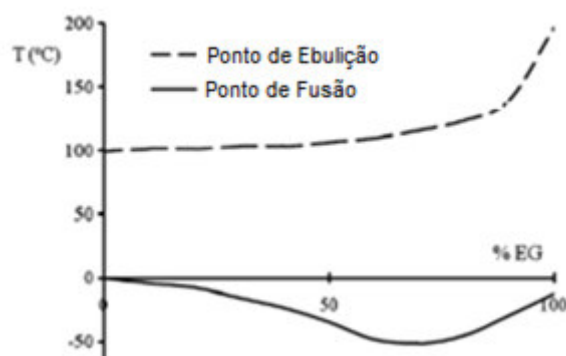


Fonte: SOLOMONS, 2007

Embora seja tóxico, o etilenoglicol (EG) ou etano-1,2-diol (HOCH₂CH₂OH) possui algumas propriedades que o torna um bom anticongelante para líquidos de arrefecimento. Dentre essas propriedades, podemos destacar solubilidade em água, alto ponto de ebulição e baixo peso molecular (SOLOMONS, 2007). No entanto, como a água é um líquido de arrefecimento muito melhor e mais barato, o EG não é utilizado puro. Além disso, a mistura de água com EG possui ponto de fusão menor e ponto de ebulição maior que tanto o EG puro quanto a água pura (PEYGHAMBARZADEH et al., 2011).

Como pode ser visto na figura 3, as temperaturas de fusão e de ebulição dessa mistura não possui uma relação linear em relação à concentração de EG. O ponto de fusão aumenta com o aumento da concentração de EG até chegar em 70% do aditivo, quando a temperatura é por volta de -50°C, e após essa concentração, a temperatura volta a subir novamente.

Figura 3 - Relação entre ponto de fusão e ebulição com a concentração de EG



Fonte: PEYGHAMBARZADEH et al., 2011

O grande desafio atualmente é produzir um radiador compacto de alta eficiência a um preço baixo. No entanto, as tecnologias tradicionais já não são mais suficientes. Além disso, líquidos de arrefecimento com baixa condutividade térmica inviabilizam um radiador compacto e ao mesmo tempo eficiente (CHE SIDIK; WITRI MOHD YAZID; MAMAT, 2017). No passado, cientistas haviam desconsiderado utilizar nanopartículas para aumentar a eficiência térmica porque entupia a tubulação e corroía o sistema. No entanto, com o avanço tecnológico, foi possível dispersar nanopartículas nos líquidos de arrefecimento tradicionais e esta inovação foi chamada de nanofluidos. Porém, o aumento da eficiência térmica normalmente é acompanhado pelo aumento da viscosidade e corrosão do sistema, por isso uma série de propriedades devem ser controladas como, condutividade térmica, capacidade específica de calor, densidade e viscosidade (BIGDELI et al., 2016).

Basicamente, nanofluidos são suspensão de partículas com diâmetro inferior a 100 nm dispersos em um fluido base, que pode ser tanto água como EG. Suas propriedades dependem tanto das características das nanopartículas quanto das características do fluido base. Cerâmicas (como CuO, Al₂O₃, TiO₂, SiC, SiO₂, Fe₃O₄, ZnO), metais (como cobre, alumínio, prata, ouro e ferro) ou compostos baseados em carbono podem ser utilizados como nanopartículas (BIGDELI et al., 2016).

Atualmente, existem dois métodos para produção de líquidos de arrefecimento. O primeiro é mais utilizado quando se trata de partículas metálicas pois previne sua oxidação. Ele transforma o vapor metálico em nanopartícula através da condensação direta pelo contato com uma corrente de

vapor de baixa pressão. Esse processo sintetiza a partícula direto no fluido base, evitando sua secagem, transporte e re-dispersão. Porém, essa corrente de vapor é incompatível com processos em larga escala e, portanto, esse método não é muito utilizado industrialmente (BIGDELI et al., 2016).

O segundo método é utilizado para líquidos de arrefecimento baseados em compostos cerâmicos (como óxidos e carbonetos). Essa técnica consiste na dispersão das nanopartículas em pó no fluido base sem reação química. Esse é o método mais utilizado industrialmente por ser barato e também porque já foram desenvolvidos meios para a síntese de nanopartículas em pó em larga escala. Além disso, essa técnica permite precisão e sua concentração e tamanho de partículas podem ser facilmente controlados. (BIGDELI et al., 2016).

O líquido de arrefecimento que será alvo desse estudo foi desenvolvido por um multinacional alemã em 1929. Ele consiste numa mistura de aproximadamente 90% de monoetilenoglicol (MEG) com aditivos. A descrição desses aditivos e suas percentagens não poderão constar nesse trabalho visto que são informações de propriedade intelectual da empresa, porém é de informação pública que ele possui ácidos e bases diversos.

Não é aconselhável utilizar esse produto puro, mas sim em uma mistura com 50% de água pois, como já foi visto na figura 3, a temperatura de fusão do EG diluído é menor do que a do EG puro e do que a da água pura. Essa mistura, além de diminuir a temperatura de fusão, também aumenta a temperatura de ebulição para 110°C para proteger contra o superaquecimento. Além disso, esse líquido de arrefecimento também protege contra corrosão, o que nem a água nem o EG puros conseguem fazer. Essa é uma propriedade muito importante, pois o radiador possui finas paredes e a corrosão pode danificar sua estrutura e provocar vazamento.

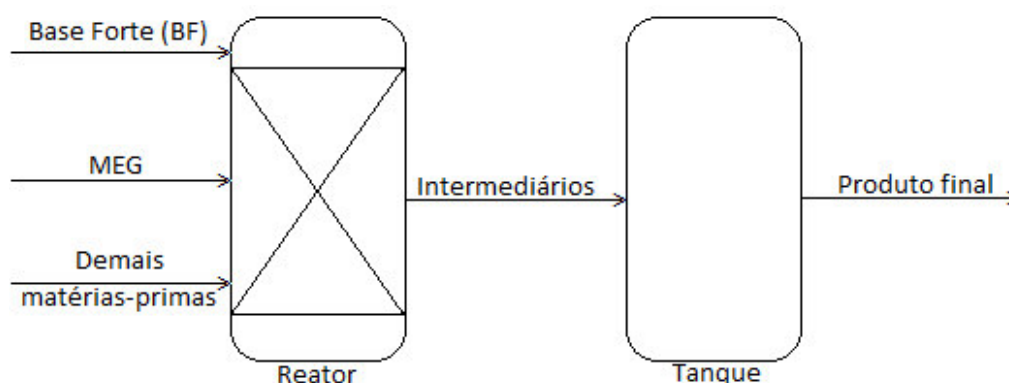
2.2 O Processo

O processo de fabricação é feito em batelada através de sucessivas dispersões em MEG no reator e os produtos dessas dispersões são transferidos para um tanque de capacidade maior onde serão agitados até completa homogeneização. O esquema desse processo pode ser visto na figura 4.

Depois que o produto final é homogeneizado, é retirada uma amostra do tanque para fazer as análises necessárias, inclusive a medição de pH. Se o pH não estiver dentro da especificação, é feito o reajuste com ácido ou base direto no tanque e o produto é agitado por mais algumas horas.

O processo conta com uma tubulação exclusiva para o MEG e outra exclusiva para uma matéria-prima (MP) de caráter básico forte – que será chamada nesse trabalho de Base Forte (BF) por ser uma informação sensível – que vão desde o tanque dessas matérias-primas até o reator da produção. Essas tubulações possuem medidor de fluxo por efeito Coriolis, que será melhor detalhado na seção 2.2.1. As demais matérias-primas são adicionadas diretamente pela boca do reator.

Figura 4 - Esquema do processo de produção do líquido de arrefecimento



Fonte: A própria autora

Vale ressaltar que o processo não possui reação química, exceto por reações de neutralização ácido-base. Além disso, não é necessário utilizar um sistema de aquecimento ou resfriamento.

A empresa fabrica através deste processo diversos tipos de líquidos de arrefecimento que possuem algumas variações de composição entre si. Esse estudo se concentrou em quatro tipos que, para manter a confidencialidade da empresa, serão chamados de tipo A, tipo B, tipo C e tipo D.

Um indicador muito importante desse processo é o *First Time Pass Rate* (FTPR) que relaciona o número de lotes que foram produzidos sem nenhum defeito (ou seja, sem que nenhum retrabalho fosse necessário) em relação ao total de lotes, conforme fórmula 1.

$$FTPR = \frac{\text{quantidade de lotes produzidos sem defeitos}}{\text{quantidade de lotes produzidos}} \quad (1)$$

O processo e a fábrica passam constantemente por auditorias com o intuito de avaliar se o produto final e a maneira como ele é feito estão dentro das normas pré-estabelecidas. A NBR 13705:2016 regula os requisitos e métodos de análise dos líquidos de arrefecimento de motor a base de MEG, monopropilenoglicol e glicerina (tabela 1).

Tabela 1 - Requisitos de análise de líquidos de arrefecimento a base de MEG para radiadores

Requisitos	Unidade	Limites de Especificação
Cloretos	-	$\leq 25 \times 10^{-6}$
Ponto de Congelamento	°C	≤ -33
Teor de água	% massa	≤ 5
pH	-	7,5 - 11,5
Formação de espuma	mL	≤ 150
Tempo de quebra de espuma	s	≤ 5
Reserva alcalina	mL HCl	≥ 10
Ponto de ebulição	°C	≥ 163
Cinzas	% massa	≤ 5
Densidade relativa	-	1,110 – 1,140
Ponto de fulgor	°C	≥ 110

Fonte: NBR 13705:2016 (adaptado)

2.2.1 Medidor de Fluxo por Efeito Coriolis

Para melhorar a eficácia e economia do processo, é fundamental garantir que a medição de fluxo seja feita de maneira adequada. Para tanto, existem diversos métodos que devem ser escolhidos levando-se em conta o tipo de fluido utilizado no processo e suas características físico-químicas, a faixa de fluxo que será necessária e outras características específicas do processo (pressão, temperatura, tamanho e tipo da tubulação utilizada e etc). (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2007)

O princípio dos medidores de fluxo por efeito Coriolis se baseiam na descoberta de Gustave Coriolis em 1835 que diz que um corpo em movimento altera o seu curso por conta da direção rotacional e da velocidade da Terra.

Portanto, o funcionamento desse medidor consiste em introduzir de forma artificial uma rotação na tubulação e, através do momento angular causado, medir a massa do fluido. Medidores que funcionam por esse efeito são considerados universais por possuírem a capacidade de medir uma ampla diversidade de líquidos e gases. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2007)

O medidor utilizado nesse processo específico é o Optimass 1300C da empresa Khrone (figura 5).

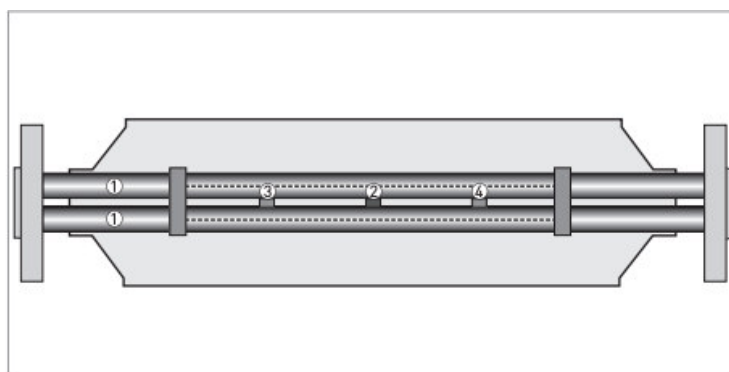
Figura 5 - Medidor de fluxo por efeito Coriolis da Khrone



Fonte: KHRONE, 2011

Segundo a ficha técnica do fornecedor, esse medidor possui dois tubos de medição identificados por 1 na figura 6. Quando o fluido passa pelo medidor, uma bobina (identificada por 2) é acionada fazendo com que os tubos vibrem formando uma onda senoidal que é monitorada por dois sensores (identificados por 3 e 4). A massa do fluxo é diretamente proporcional a essa onda gerada.

Figura 6 - Esquema de funcionamento do medidor Optimass da Khrone



Fonte: KHRONE, 2011

2.3 Lean Six Sigma

No século XIX, o sistema produtivo era baseado no trabalho de artesões, que eram altamente qualificados e que realizavam diversas tarefas. Não havia padrões estabelecidos, então cada produto era fabricado de uma maneira e raramente dois produtos eram idênticos em relação à sua especificação, ao formato e ao tamanho. Isso levou Henry Ford, no século XX, a criar o sistema de produção de massa que era mais padronizado, mais simplificado e com tempo de fabricação reduzido (RODRIGUES, 2017).

Nesse novo modelo de produção, a empresa passou a utilizar profissionais especializados para desempenhar poucas funções e máquinas específicas para cada tipo de atividade. Estas máquinas aumentaram a capacidade produtiva da fábrica, no entanto elas fabricam apenas um produto específico e padronizado. (WOMACK; JONES; ROOS, 2004).

O próximo salto produtivo foi dado pelo Japão em 1940 que passava por uma complicada situação por conta de sua participação na Segunda Guerra Mundial. Nesse contexto, surgiu o “Sistema Toyota de Produção” que também ficou conhecido por “Sistema de Produção Enxuta” ou “*Lean Manufacturing*”. Esse sistema, no entanto, só foi ganhar fama no Ocidente com a crise do petróleo, em 1973, quando as falhas e defeitos do sistema fordista pararam de ser encobertas pelos enormes lucros dessas corporações (RODRIGUES, 2017).

O *Lean Manufacturing* era composto por vários métodos ou programas desenvolvidos pelos japoneses e por métodos do Ocidente adaptados. Porém a verdadeira inovação desse método consistiu em criar uma cultura de buscar a eliminação de desperdícios em todas as etapas do processo (RODRIGUES, 2017). Atualmente, o conceito de *Lean* não é apenas um conjunto de métodos, mas sim um conjunto de princípios que busca sempre melhorar os processos produtivos, eliminando etapas que não agregam valor para o cliente e aumentando a produtividade dos funcionários (SOMMER; BLUMENTHAL, 2019).

Mais tarde, a metodologia *Lean* se uniu ao conceito de *Six Sigma* que surgiu com a Motorola em 1980. Ela percebeu que, quanto maior fosse a qualidade de seus produtos, maior seria a satisfação do cliente e isso geraria mais lucro. Um de seus engenheiros, William Smith, ficou conhecido como pai

do *Six Sigma* por desenvolver conceitos para reduzir variações, melhorar a qualidade e maximizar a produtividade. Utilizando essa metodologia, a empresa foi capaz de aumentar sua renda de \$2,3 bilhões para \$8,3 bilhões em apenas 10 anos (TAGHIZADEGAN, 2006).

O Six Sigma tem como foco reduzir a variabilidade do processo utilizando princípios estatísticos para análise de dados. Suas ferramentas também são usadas para resolução de problemas em que a causa raiz não pode ser facilmente identificada (MONTGOMERY, 2004).

2.3.1 Os 7 Tipos de Desperdício

O objetivo principal do *Lean* é eliminar desperdícios com foco em produção enxuta. Em 1988, Taiichi Ohno identificou sete tipos de desperdício:

- 1) Produção Excessiva: acontece quando a empresa produz mais do que o cliente necessita, o que leva a custos adicionais e a geração de estoque.
- 2) Espera: ocorre quando se cria uma “fila de espera” na produção, ou seja, um item não pode seguir para a próxima etapa porque algo essencial (como uma matéria-prima) está faltando, gerando uma inatividade do processo.
- 3) Transporte: ocorre quando há transportes desnecessários na produção. Em geral, essa etapa necessita ser otimizada pois não agrega valor para o cliente e aumenta o tempo de produção.
- 4) Processamento excessivo: ocorre quando são necessárias operações extras no processo. Por exemplo, quando uma peça necessita ser retrabalhada.
- 5) Inventário: ocorre quando há estoque de materiais desnecessários para atender a demanda do cliente, podendo se referir tanto a matérias-primas quanto a produto acabado. Esse inventário em excesso gera custos e requer mais espaço no depósito.
- 6) Movimentação: ocorre quando o espaço do ambiente do trabalho não está otimizado e os operadores necessitam percorrer espaços desnecessários.
- 7) Defeitos: ocorre quando um item não sai conforme o esperado e é necessário ser descartados. (HICKS, 2007)

Mais tarde, foi identificado mais um tipo de desperdício: o talento não utilizado. Esse desperdício ocorre quando a capacidade intelectual do trabalhador e suas habilidade não são bem utilizadas. As causas desse desperdício são geralmente relacionadas a falta de reconhecimento, justiça, reconhecimento, objetivo ou motivação. (BRITO; CARNEIRO, 2019)

2.3.1 Os 5 Princípios do *Lean*

Há cinco princípios básicos que guiam a filosofia *Lean*:

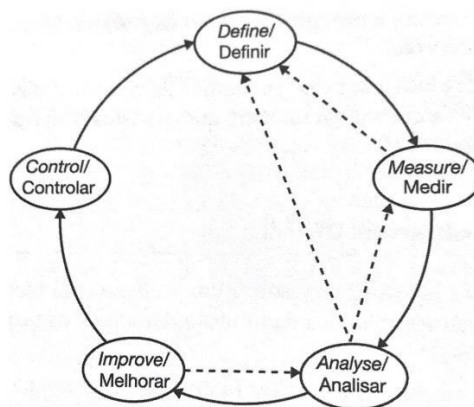
- 1) Definir valor sob a perspectiva do cliente: é necessário reconhecer que apenas uma pequena fração das atividades de uma empresa realmente produzem valor para o cliente. Ao identificar essas atividades, fica mais fácil trabalhar com a mentalidade enxuta e enxergar possíveis fontes de desperdícios.
- 2) Mapear o Fluxo de Valor: mapear todo o processo de operação (desde a entrada de matérias-primas até o produto final) e definir quais atividades agregam valor para o cliente, quais não agregam – que devem ser eliminadas – e também quais não agregam mas que são essenciais para o processo – que devem ser otimizadas.
- 3) Fluxo contínuo de atividades: reorganizar o processo conforme o mapeamento feito para evitar esperas ou processamento excessivos.
- 4) Produção puxada: entender a demanda do cliente e produzir exatamente aquilo que o cliente necessita e no momento que ele necessitar, evitando estoques desnecessários.
- 5) Buscar perfeição: o objetivo final do *Lean* é buscar sempre aperfeiçoar seus processos almejando um processo com zero defeitos. (ČIARNIENĖ; VIENAŽINDIENĖ, 2012)

2.4 DMAIC

O DMAIC é um acrônimo para *Define, Measure, Analyse, Improve* e *Control* (em português: Definir, Medir, Analisar, Implementar e Controlar), que funciona como um ciclo (figura 7). É um método de resolução de problemas por meio de ferramentas analíticas, como métodos estatísticos e ferramentas da gestão da

qualidade. Ele funciona como um funil: no início do projeto, várias causas potenciais são identificadas e, com o passar do tempo, elas são filtradas até sobrar as poucas que mais influenciam o processo. (TOLEDO et al., 2013)

Figura 7 - Método DMAIC



Fonte: TOLEDO et al., 2013

Suas fases podem ser descritas como:

- *Define* (Definir): o objetivo dessa etapa é identificar o problema e garantir que a resolução deste problema esteja alinhada com a estratégia da empresa. Nessa etapa, é necessário definir os responsáveis, os recursos disponíveis, definir datas limites para o projeto e obter o apoio dos superiores.
- *Measure* (Medir): nessa etapa, são coletadas informações sobre os processos para entender melhor o seu funcionamento. Para isso, é necessário identificar métricas válidas e verificar se os dados atuais são suficientes para seguir com o projeto.
- *Analyse* (Analisar): determina as causas mais prováveis dos defeitos a partir de análises estatísticas. Nessa etapa serão validadas ou não as causas levantadas anteriormente.
- *Improve* (Implementar): busca encontrar soluções para as causas raízes dos defeitos e, testando essas soluções, é possível confirmar o que estava gerando efeitos indesejados no processo.
- *Control* (Controlar): determina maneiras que garantirão que as soluções encontradas na fase *Improve* serão mantidas e serão eficientes, garantindo que o problema não aconteça mais. (SHANKAR, 2009)

A seguir, serão apresentadas algumas ferramentas comuns utilizadas no DMAIC.

2.4.1 Termo de Abertura do Projeto

Segundo o *Project Management Body of Knowledge* (PMBOK), o Termo de Abertura do Projeto (TAP) ou *Project Charter* é um documento formal que autoriza o início do projeto e concede ao líder do projeto autoridade para executar o projeto. Seu objetivo é alinhar entre as partes interessadas a estrutura e a estratégia do projeto. Antes de iniciar a TAP, é necessário ter em mente qual é a necessidade do negócio – que pode ser baseada em uma nova demanda de mercado, em um avanço tecnológico ou em um requisito legal – que justificará o projeto. Além disso, é necessário saber a descrição do escopo do produto ou serviço que será entregue e qual será o plano estratégico (metas e objetivos) que será adotado pelo projeto. (PMI, 2013)

É importante que esse documento contenha:

- 1) Uma breve descrição do problema e um pouco de seu histórico para que todos os envolvidos saibam do motivo que aquele projeto está sendo realizado;
- 2) O objetivo SMART do projeto, isto é, um objetivo que seja específico (*Specific*), mensurável (*Mesurable*), atingível (*Achievable*), relevante (*Relevant*) e temporal (*Timebound*);
- 3) O escopo do projeto, ou seja, o que está dentro dos limites do projeto e o que está fora;
- 4) Cronograma das principais entregas;
- 5) Equipe e responsabilidades de cada um. (TOLEDO et al., 2013)

2.4.2 SIPOC

O SIPOC (figura 8) é um acrônimo para *Suppliers, Inputs, Process, Outputs* e *Customers* (em português: Fornecedor, Entradas, Processo, Saídas e Clientes) e é um diagrama para monitorar e mapear todo o fluxo de um processo. Essa ferramenta tem como intuito identificar todos os elementos que compõe o processo e distinguir as entradas das saídas do processo. Dessa maneira, fica

mais fácil analisar um problema pois todas as variáveis de entrada de um determinado processo estão explicitadas e é possível analisar como as entradas afetam as saídas. (TAGHIZADEGAN, 2006)

Para construí-lo, deve-se primeiramente especificar todas as entradas do processo e seus fornecedores. Depois é registrado o que é o processo, todas suas saídas e quais são os clientes do processo. (TOLEDO et al., 2013)

Figura 8 - Exemplo de SIPOC

Processo:		Atividade:	
Responsável:			
ENTRADAS			
FORNECEDORES (SUPPLIERS)	INSUMOS (INPUTS)	FREQUÊNCIA	FATOR CRÍTICO
PROCESSAMENTO (PROCESS)			
SAÍDAS			
CLIENTES (CLIENTS)	RESULTADOS (OUTPUTS)	FREQUÊNCIA	FATOR CRÍTICO
INDICADOR		MELHORIA	

Fonte: TOLEDO et al., 2013 (adaptado)

2.4.3 5s

5s é um conceito japonês desenvolvido por Hiroyuki Hirano que visa manter o local de trabalho organizado para melhorar a produtividade dos colaboradores. 5s é um acrônimo para cinco palavras japonesas: *Seiri*, *Seiton*, *Seiso*, *Seiketsu* e *Shitsuke*, que, em português, foram traduzidos como cinco sentidos: senso de utilização, de organização, de limpeza, de padronização e de disciplina. Os benefícios desse método incluem maior segurança para os trabalhadores, redução de custo e tempo e aumento da produtividade e eficiência. (GUPTA; JAIN, 2015)

São cinco etapas para aplicar esse método:

1s - Seiri (senso de utilização): a primeira etapa consiste em separar os materiais conforme a sua necessidade de utilização. Materiais que não são mais utilizados devem ser eliminados com o intuito de deixar somente o necessário com o intuito de melhor aproveitar o local de trabalho.

2s – *Seiton* (senso de organização): com o objetivo de evitar perda de tempo ao procurar por materiais, a segunda etapa consiste em organizar os materiais separados na primeira etapa. Materiais usados com grande frequência devem ser de fácil acesso. Já materiais utilizados raramente devem ser mantidos em outro ambiente. Além disso, deve-se definir e demarcar o local correto de todos os materiais.

3s – *Seiso* (senso de limpeza): a terceira etapa é limpar o ambiente de trabalho para evitar acidentes de trabalho e aumentar a eficiência dos trabalhadores.

4s – *Seiketsu* (senso de padronização): com o local de trabalho limpo e organizado, o intuito da quarta etapa é criar padrões de boas práticas para garantir que todos os trabalhadores entendam os procedimentos e não façam cada um de uma maneira diferente.

5s – *Shitsuke* (senso de disciplina): o intuito da quinta e última etapa é criar uma cultura de organização na empresa e garantir que o método 5s esteja sendo seguido corretamente e que todos entendam sua importância. Para isso, são criadas rotinas de inspeção mensais. (SOMMER; BLUMENTHAL, 2019)

2.4.4 Diagrama de Ishikawa

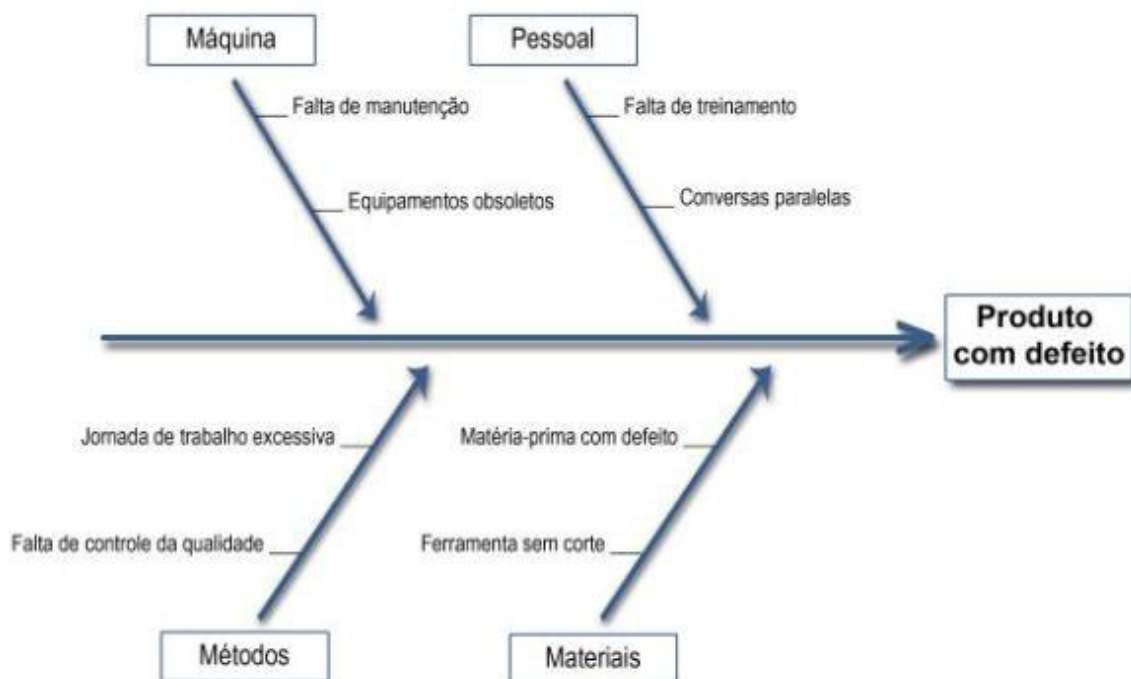
O Diagrama de Ishikawa ou Diagrama de Causa e Efeito tem como objetivo levantar todas as possíveis causas para um determinado problema que, à primeira vista, não é de fácil resolução e, além disso, também é uma ótima maneira para organizar ideias quando em discussão em equipe. Essa ferramenta também pode ser chamada de Espinha de Peixe por seu formato similar como mostrado na figura 9. (MONTGOMERY, 2004)

Essa ferramenta foi desenvolvida por Kaoru Ishikawa na Universidade de Tóquio em 1943 e ele propôs oito passos para a confecção do diagrama:

- 1) Identificar o problema e colocá-lo na parte direita, desenhando uma seta apontando para ele;

- 2) Determinar todas as causas principais que podem gerar o problema.
Nessa etapa é comum utilizar a técnica 6M para criar categorias para separar as causas. Essas categorias são: materiais, mão de obra, método, máquina, meio ambiente e medição;
 - 3) Colocar esses fatores principais em “galhos”;
 - 4) Determinar as causas secundárias;
 - 5) Colocar essas sub-causas em “galhos” secundários e, se necessário, criar “galhos” terciários e quaternários;
 - 6) Analisar se todas as possíveis causas foram identificadas;
 - 7) Selecionar as causas mais prováveis e buscar soluções para estas.
- (TOLEDO et al., 2013)

Figura 9 - Exemplo de Diagrama de Ishikawa



Fonte: JUNIOR et al., 2003 (adaptado)

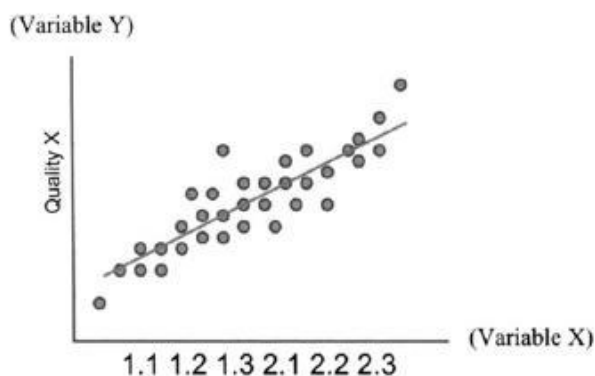
O *Brainstorming* ou tempestade de ideias é uma ferramenta bastante utilizada para a elaboração do Diagrama de Ishikawa. Essa técnica consiste na formação de um grupo de indivíduos que, de maneira livre e sem julgamentos, emitem ideias acerca de um problema específico. Seu propósito é, em um primeiro momento, lançar a maior quantidade possível de ideias sem se importar com seu conteúdo ou se possuem sentido. Depois essas ideias são

documentadas, analisadas e selecionadas conforme opinião da equipe participante. (JUNIOR et al., 2003)

2.4.5 Diagrama de Dispersão

O Diagrama de Dispersão (figura 10) tem como objetivo tornar a visualização de correlações entre variáveis mais claras. Ele não garante que haja relação de causa-efeito entre as variáveis, apenas indica a intensidade de relação entre eles que pode ser positiva, negativa ou sem correlação. (TAGHIZADEGAN, 2006)

Figura 10 – Exemplo de Diagrama de Dispersão



Fonte: TAGHIZADEGAN, 2006

Essa intensidade é numericamente expressa pelo coeficiente de correlação (R^2) que varia de 0 a 1. Quando maior for esse coeficiente, maior será a correlação entre os fatores e os pontos do gráfico terão maior tendência de se concentrar em torno de uma linha reta. (COSTA; EPPRECHT; CARPINETTI, 2012)

2.4.6 Ferramenta 5W2H

A ferramenta 5W2H (figura 12) tem como objetivo facilitar a compreensão e visualização de informações de mapeamentos de processos, de plano de ação e de procedimentos. É um acrônimo com as iniciais das palavras *why* (por que), *what* (o que), *where* (onde), *when* (quando), *who* (quem), *how* (como) e *how much* (quanto custa). (JUNIOR et al., 2003)

Figura 11 - Exemplo do uso do 5W2H

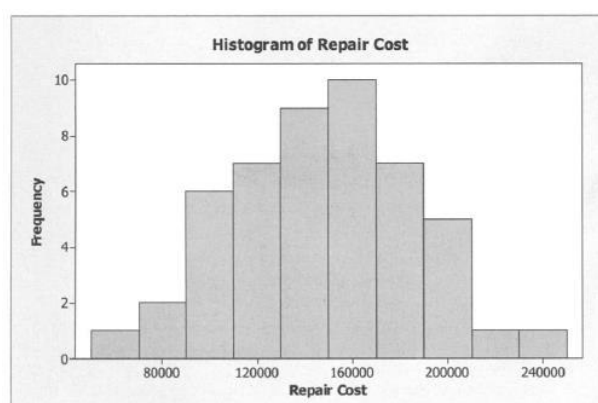
Plano de ação						
Setor: Serviços de Apoio e Logística			Responsável: João			
Objetivo: Reduzir custo internos de geração de fotocópias em 30%			Prazo: 30-6-200X			
O QUE (What)	QUEM (Who)	QUANDO (When)	ONDE (Where)	POR QUE (Why)	COMO (How)	CUSTOS (How Much)
Revalidação de contratos e negociação com fornecedores	Joana	Até 15-4-X	Em nossa empresa e nos fornecedores	Há suspeitas de as cláusulas de desconto por volume não estarem compatíveis com o mercado	Comparação com outros contratos (mercado) e pesquisa junto a fornecedores alternativos	Remuneração de 100 horas de técnicos + R\$2.000,00 em despesas diversas
Estabelecimento de maior rigor nas autorizações	Paulo	Até 10-5-X	Nos departamentos e cargos com poder de autorização	Há muitas cópias particulares e também documentos que poderiam circular por e-mail	Conversas com as chefias e responsáveis pela análise de fluxos de tarefas	Remuneração de 150 horas de técnicos
Centralização dos serviços	Carlos	Até 25-6-X	Na administração central	Para facilitar a implementação de controles	Realocação das máquinas e colaboradores do setor	Remuneração de 120 horas de técnicos + R\$5.000,00 em obras e mudança

Fonte: JUNIOR et al., 2003 (adaptado)

2.4.7 Histograma

O Histograma ou Diagrama de Barras (figura 12) é um gráfico utilizado para melhor visualização dos dados pois indica a frequência com que cada dado aparece. Através dele, é possível identificar a maneira como os dados estão estruturadas, a posição ou tendência central e o espalhamento ou dispersão dos dados. (MONTGOMERY, 2004)

Figura 12 - Exemplo de histograma



Fonte: TAGHIZADEGAN, 2006

Para fazer esse gráfico é preciso coletar os dados, ordenar seus valores em escala crescente, calcular sua amplitude, definir o número de classes (se

houver necessidade), determinar a frequência absoluta ou relativa de cada dado e, enfim, desenhar o histograma. (TOLEDO et al., 2013)

Os dados do histograma podem estar distribuídos de diversas formas:

- 1) Distribuição normal: quando a média dos dados está situada no centro do gráfico. Além disso, no centro as frequências são maiores, enquanto nas extremidades são menores;
- 2) Distribuição assimétrica: quando a média do gráfico não está situado no centro do gráfico. Pode acontecer quando não é possível ocorrer valores acima de determinado limite, por exemplo quando se trata da pureza de produtos, que pode chegar até no máximo 100%;
- 3) Distribuição em platô: quando há muitos picos com frequências próximas;
- 4) Distribuição com dois picos ou bimodal: como o nome já diz, é quando o histograma apresenta dois picos distintos com médias diferentes. Nesse caso, há de se tomar cuidado pois pode ser que existem dois conjuntos de dados diferentes e é preciso separá-los para melhor compreensão de cada um. (VIEIRA, 2012)

2.4.8 Diagrama de Pareto

Para facilitar a visualização de um conjunto de dados é utilizado o Diagrama ou Análise de Pareto (figura 13), que é uma representação gráfica dos dados obtidos e identifica quais são os que aparecem com maior frequência. (TOLEDO et al., 2013)

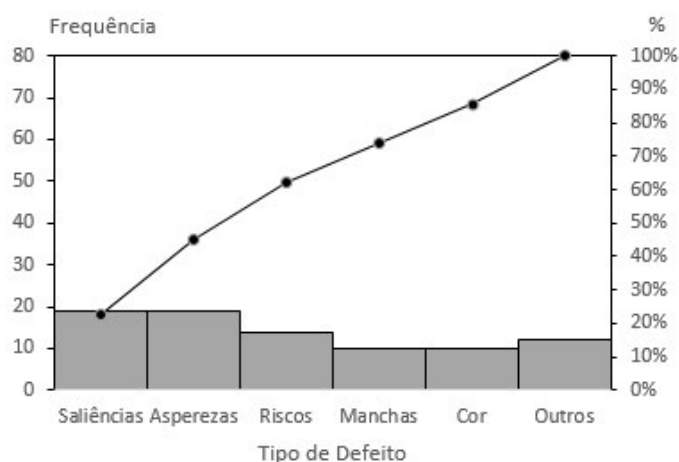
Essa ferramenta remonta do século XIX quando um economista italiano, Vilfredo Pareto, estava estudando a desigualdade da distribuição de riqueza. Seu estudo concluiu que uma minoria da população (20%) detinha a maior parte da riqueza produzida (80%), enquanto a grande maioria da população detinha o que sobrava. Mais tarde, essa relação ficou conhecida como Regra dos 80/20 ou Princípio de Pareto. (JUNIOR et al., 2003) A partir dessa regra, pode-se interpretar também que 80% dos problemas são explicados por 20% das causas de variação. Portanto, é mais eficiente descobrir quais são essas causas e atacá-las primeiro. Desse modo, o Diagrama de Pareto é um gráfico que prioriza quais

causas devem ser solucionadas primeiro ou quais problemas devem ser solucionados primeiro. (VIEIRA, 2012)

Os passos para montar o diagrama são:

- 1) Determinar o problema que será estudado;
- 2) Discutir quais causas pode gerar o problema e recolher dados referentes a elas;
- 3) Ordenar as causas decrescentemente de acordo com sua magnitude;
- 4) Calcular a magnitude total;
- 5) Calcular a percentagem e a percentagem acumulada de cada causa;
- 6) No eixo vertical esquerdo do diagrama, colocar a frequência de cada causa e, no eixo direito, a frequência acumulada. Já o eixo horizontal são as causas com alturas correspondentes a sua magnitude. (TOLEDO et al., 2013)

Figura 13 - Exemplo de diagrama e curva de Pareto para tipos de defeito



Fonte: VIEIRA, 2012 (adaptado)

3 METODOLOGIA

Segundo MIGUEL et al. (2012), a metodologia pesquisa-ação é uma variação do estudo de caso. Porém, enquanto o pesquisador é apenas um observador na segunda metodologia, na primeira ele participa ativamente do objeto de estudo e colabora com os demais participantes na investigação de um problema. Essa pesquisa pode ser dividida em cinco fases: planejar a pesquisa, coletar dados necessários, fazer a análise desses dados e planejar as próximas ações, implementar as ações definidas e avaliar os resultados. Além disso, durante todas essas etapas é fundamental fazer o monitoramento para garantir que os resultados e ações sejam feitas conforme o esperado. Essa metodologia apresenta bastante aspectos em comuns com o DMAIC (conforme visto no item 2.4) que foi a ferramenta utilizada para guiar esse projeto.

Em relação à abordagem de pesquisa, a abordagem qualitativa é utilizada quando se deseja entender um fenômeno estudado, porém ela não é adequada quando a intenção é coletar dados e interpretá-los, ao contrário da abordagem quantitativa. É possível combinar essas duas formas de abordagem e, assim, utilizar múltiplas visões para tentar entender um problema combinando os pontos fortes das duas abordagens. (MIGUEL et al., 2012)

Por fim, segundo Gil (2002), pesquisas que têm como objetivo identificar causas de um fenômeno específico e buscar explicações para ele são chamadas de pesquisas explicativas.

Portanto, como neste trabalho foram utilizadas ferramentas qualitativas (TAP e Diagrama de Ishikawa, por exemplo) bem como ferramentas quantitativas (coleta e análise de dados numéricos), a natureza de pesquisa dessa monografia foi aplicado com abordagem quali-quantitativa. Seu objetivo foi explicativo e foi feita com base no método pesquisa-ação.

O projeto foi feito com base no ciclo DMAIC e, portanto, foi dividido nessas fases.

A primeira fase, *Define* (Definir), foi uma das mais importantes de todo o projeto pois consiste em entender a fundo o problema e levantar as principais variáveis do processo que foram estudadas mais a fundo nas próximas fases.

Também foi nessa fase que foram definidos o escopo e a equipe do projeto e com essas informações foi montada a TAP para deixar claro para todos qual é o problema e o objetivo final. Nessa fase, foram recolhidos dados históricos sobre o problema para melhor entendê-lo e o processo de obtenção do líquido de arrefecimento foi analisado para verificar onde possivelmente está ocorrendo falhas. Com todas essas informações, foi possível construir o SIPOC e o Diagrama de Ishikawa através da técnica de *brainstorming* para levantar todas as possíveis causas que estão afetando o processo.

Na fase *Measure* (Medir), com as principais possíveis causas raízes já levantadas, foi realizado um plano de coleta de dados com o objetivo de medir as variáveis para estudar as potenciais causas.

Com todos os dados já levantados, a etapa *Analyse* (Analisar) avaliou os dados coletados. Por fim, as causas raízes levantadas na etapa *Define* foram validadas ou descartadas.

Por conta da pandemia de Covid-19 (G1, 2020), o Estado de São Paulo e a empresa foco do estudo decretaram isolamento social. Desse modo, os trabalhadores dessa empresa começaram a trabalhar de *home office*, reduzindo mais de 50% a força de trabalho na empresa. Por conta desses fatores, as fases *Improve* (Implementar) e *Control* (Controle) não puderam ser feitas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Definir

Antes de começar a análise do problema, primeiro foi necessário entendê-lo um pouco melhor para que o projeto fosse melhor direcionado e focasse nas questões corretas. Para isso, a equipe acompanhou o processo de fabricação do tipo A do produto e conversou com os operadores envolvidos no processo com intuito de prestar atenção a cada detalhe que poderia afetar o pH e também para entender o funcionamento de cada etapa do processo.

Além disso, também foi coletado os dados históricos que estavam disponíveis visando responder perguntas como: algum tipo apresenta maior taxa de retrabalho de pH que os demais? Existe alguma época do ano que tem tendência de apresentar mais falhas? Em geral, a média do pH dos produtos fica abaixo do limite inferior de especificação (LIE) ou acima do limite superior de especificação (LSE)?

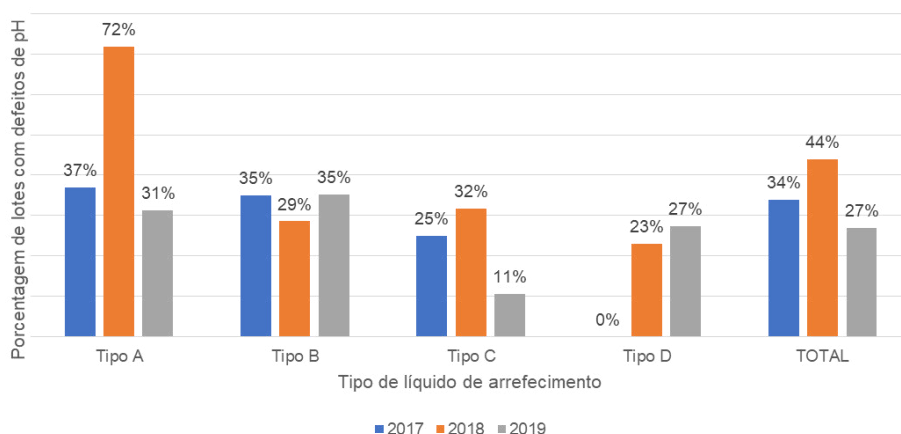
A tabela 2 mostra os principais dados obtidos dessa coleta de dados. A figura 14 mostra a porcentagem de falhas de pH ao longo dos anos. Já as figuras 15 a 18 mostram a frequência de pH para os tipos A, B C e D, respectivamente, sendo que as barras cinzas representam os limites de especificação (LIE e LSE) para melhor compreensão dos dados. Já as figuras 19 e 20 mostram a variação da taxa de retrabalho de pH ao longo dos meses de 2018 e 2019, respectivamente.

Tabela 2 – Principais informações de pH dos dados obtidos

Tipo	Limites de especificação		Ano	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	Taxa de retrabalho
	Inferior	Superior						
A	8,2	8,6	2018	8,14	0,52	7,6	10,4	72%
			2019	8,22	0,25	7,7	8,6	31%
B	7,1	7,3	2018	7,25	0,11	7	7,4	29%
			2019	7,17	0,15	6,9	7,4	27%
C	7,1	7,3	2018	7,2	0,13	6,9	7,4	23%
			2019	7,15	0,1	7	7,3	35%
D	7,2	7,9	2018	7,82	0,22	7,5	8,3	32%
			2019	7,67	0,2	7,3	8,2	11%

Fonte: a própria autora

Figura 14 - Gráfico de defeitos de pH por ano

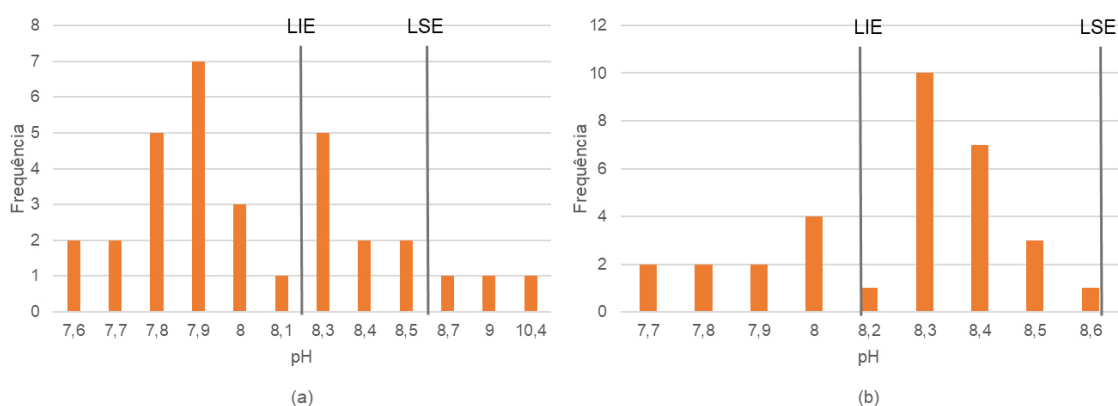


Fonte: a própria autora

Vale ressaltar que o tipo D não foi produzido em 2017. Da figura 14 é possível observar que o tipo que mais apresentou defeitos de pH foi o tipo A em 2018, quando sua taxa de retrabalho chegou a 72%. Já o tipo que apresentou menos defeitos foi o tipo D em 2019. No total, a taxa de retrabalho de pH diminuiu de 2018 para 2019.

Como pode ser visto na tabela 2 e na figura 15, a média do pH do tipo A em 2018 ficou abaixo do LIE e o pH 7,9 foi o que mais se repetiu (7 vezes). Nesse ano, o tipo A apresentou o maior desvio padrão (0,52) entre todos os tipos no período estudado, o que pode ser confirmado pela ampla distribuição da faixa de pH que foi de 7,6 a 10,4. Já em 2019, o tipo A apresentou grande redução da taxa de retrabalho e de desvio padrão. Sua média ficou acima porém bem próxima do LIE.

Figura 15 - Distribuição de pH para o tipo A em 2018 (a) e 2019 (b)



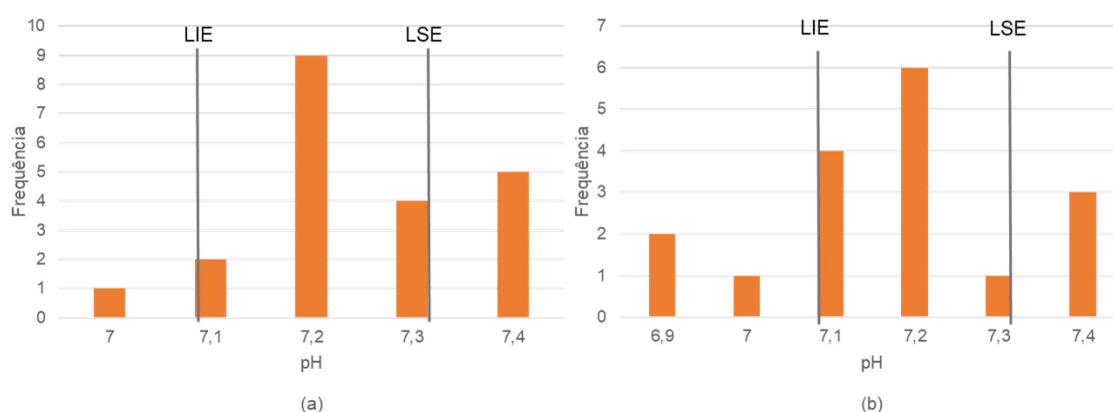
Fonte: a própria autora

Como a média de pH para o tipo A ficou bem próximo do LIE nos dois anos estudados, é possível afirmar que o pH está mais baixo do que deveria, pois ele deveria dar no meio da faixa de especificação (8,4). Isso pode indicar uma das duas hipóteses abaixo:

- I. Está entrando mais matérias-primas ácidas do que o necessário;
- II. Está faltando matéria-prima básica no processo.

O tipo B não apresentou uma faixa de distribuição de pH muito ampla tanto em 2018 quanto em 2019 conforme pode ser vista na figura 16 e na tabela 2. Nesses dois anos, as médias do pH ficaram bem próximas do meio da faixa de especificação. Mesmo assim, as taxas de retrabalho de pH ficaram próximas de 30% nos dois anos.

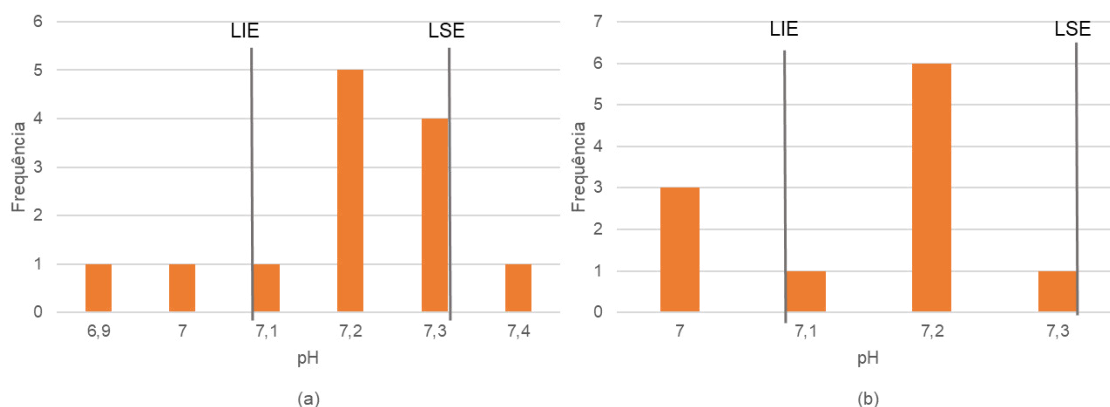
Figura 16 - Distribuição de pH para o tipo B em 2018 (a) e 2019 (b)



Fonte: a própria autora

O tipo C apresentou em 2019 o menor desvio padrão dentre todos os tipos no período estudado conforme tabela 2 e figura 17. Em 2019, esse tipo não apresentou pH maior que o LSE. No entanto, o pH 7 está fora da especificação e apareceu 3 vezes. Houve um aumento da taxa de retrabalho de pH de 2018 para 2019.

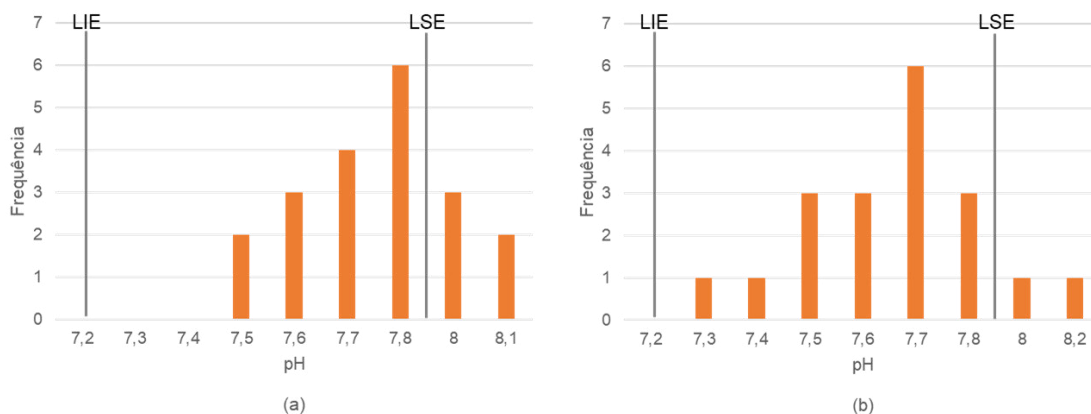
Figura 17 - Distribuição de pH para o tipo C em 2018 (a) e 2019 (b)



Fonte: a própria autora

O tipo D não apresentou pH menor que o LIE no período estudado conforme tabela 2 e figura 18. Esse foi o tipo que apresentou menor taxa de retrabalho de pH (11%) dentre todos os tipos. Esse foi o único tipo que as médias de pH ficaram mais próximas do LSE.

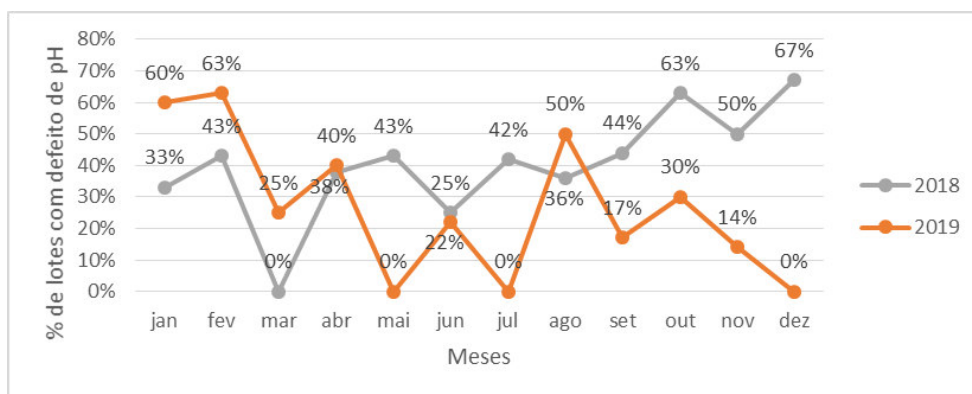
Figura 18 - Distribuição de pH para o tipo D em 2018 (a) e 2019 (b)



Fonte: a própria autora

Na figura 19, é possível observar que, em geral, a taxa de retrabalho de pH para um mesmo mês varia de 2018 para 2019. A maior taxa de retrabalho foi em dezembro de 2018 que foi 67%. Em períodos de temperatura mais baixas (junho e julho) as taxas de retrabalho não foram tão altas.

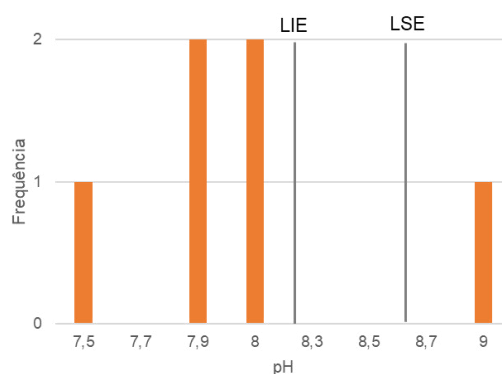
Figura 19 - Taxa de retrabalho de pH total ao longo dos meses (todos os tipos)



Fonte: a própria autora

Poder-se-ia chegar à conclusão que o problema estivesse sido resolvido ou parcialmente resolvido devido à melhora apresentada pela tabela 2 e figura 14. No entanto, existe uma explicação para essa melhora. Por volta de julho de 2019, os envolvidos no processo, percebendo que o pH estava menor do que deveria, resolveram adicionar mais BF no produto. Logicamente, se for adicionada mais matéria-prima básica no processo, o pH tenderia a aumentar. Isso não significa, necessariamente, que a causa raiz do problema tenha sido solucionada e, por isso, voltaram a colocar a BF conforme a formulação original do produto e o problema voltou a ocorrer como pode ser visto na figura 20.

Figura 20 - Distribuição de pH para o tipo A em 2020 (janeiro e fevereiro)



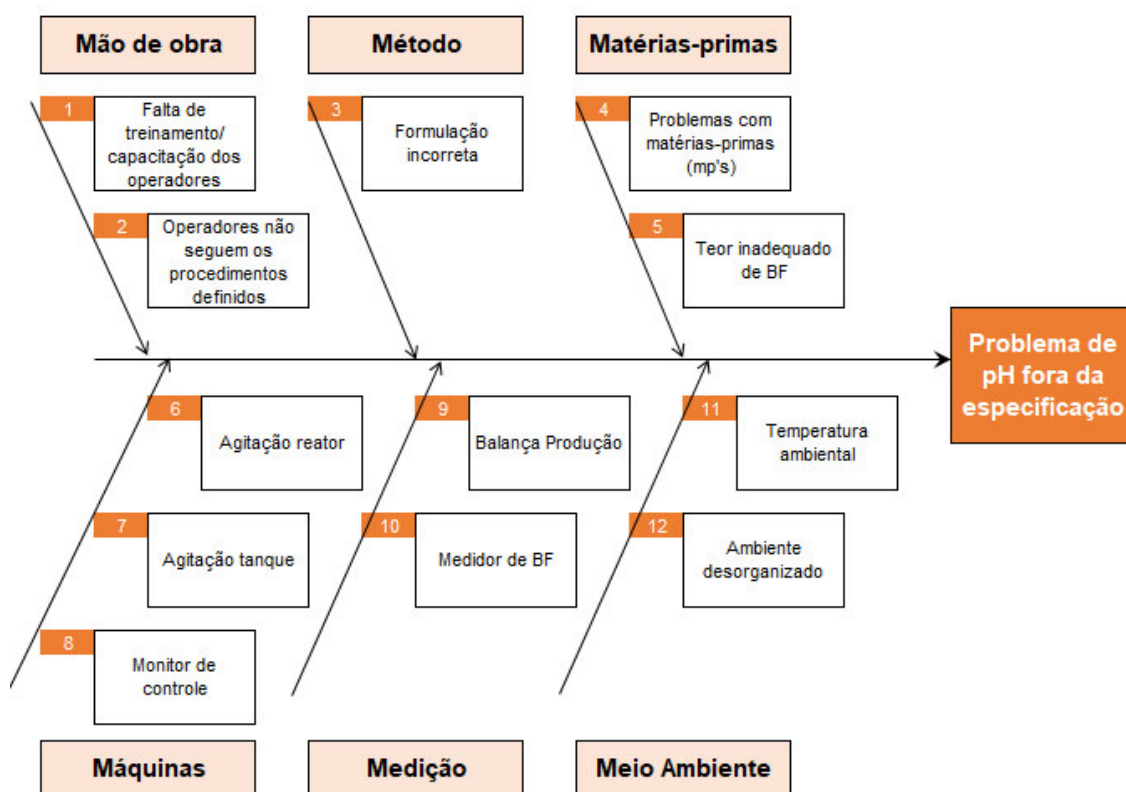
Fonte: a própria autora

Com um melhor entendimento do problema, o Termo de Abertura do Projeto (TAP) foi elaborado com o intuito de oficializar a abertura do projeto. Além disso, o SIPOC foi feito para se ter em mente todas as variáveis que podiam afetar o pH do produto e todos os equipamentos utilizados. Contudo, por conter informações sensíveis, o SIPOC não pode constar nesse trabalho.

A TAP se encontra disponível na íntegra no Apêndice A. Dentre seus principais pontos, consta a justificativa para o projeto que consiste na grande porcentagem de falhas que o processo apresenta em relação ao pH (como visto na figura 14), e seu objetivo que é identificar a causa raiz do problema e fazer com que o indicador FPTR atinja a meta estabelecida. Além disso, a TAP também apresenta outras informações importantes como: a restrição de alteração da formulação do produto, a falta de orçamento disponível para esse projeto, a premissa que existe apenas uma causa raiz que está afetando o pH do processo (para evitar complexidades desnecessárias) e o risco de o processo precisar de grandes investimentos financeiros para corrigir o problema.

Através de conversas e reuniões com a equipe e com os operadores, o Diagrama de Ishikawa (figura 21) foi realizado. Para isso, o método 6M foi utilizado como base para os tópicos principais e a partir deles foram levantados pontos mais específicos. Desse modo, doze causas raízes foram levantadas que serão detalhadas em breve.

Figura 21 - Diagrama de Ishikawa



Fonte: a própria autora

A próxima etapa consistiu em classificar as possíveis causas raízes levantadas com o intuito de priorizar esforços e direcionar o projeto. Para isso, foram levados em conta dois aspectos: a probabilidade dessa causa raiz estar acontecendo com base no histórico levantado e na experiência da equipe; e do impacto que o pH do produto final teria se a causa raiz estivesse realmente acontecendo.

Além disso, foram estabelecidos pesos para cada critério. O aspecto de probabilidade foi considerado como peso 10 por levar em conta toda a experiência que a equipe tem com esse processo e saber quais são os seus principais problemas ou pontos críticos. Já o aspecto de impacto no pH foi considerado como peso 4. Esses pesos não devem ser entendidos como uma escala de importância, mas apenas para gerar uma proporção de relevância entre os critérios (nesse caso, a proporção é de 5:2). A tabela 3 mostra os critérios utilizados.

Tabela 3 - Classificação dos critérios utilizados na matriz de priorização

Pontuação	Classificação	Probabilidade	Impacto
10	Muito alto	Probabilidade alta e que já aconteceu no passado	Impacto direto
7	Médio alto	Probabilidade alta sem evidências que já tenha acontecido	Impacto indireto
4	Médio baixo	Probabilidade baixa sem mecanismos de controle	Impacto atenuado por algum fator
1	Muito baixo	Probabilidade baixa e com mecanismos de controle	Sem impacto

Fonte: a própria autora

Vale explicar que o impacto direto se referiria a algo que com certeza iria afetar o pH final, como, por exemplo, erro de medição da balança de matéria-prima: se a balança apresentar leituras incorretas, com certeza não será adicionado a quantidade correta daquele material. Já o impacto indireto são ações que podem ou não ocorrer, como, por exemplo, falta de treinamento dos operadores: se os operadores não tiverem treinamentos, pode ser que eles não meçam a quantidade de matéria-prima corretamente, o que faria que a quantidade correta não fosse adicionada e poderia causar um desvio no pH. Por último, impacto atenuado é uma causa que, se ocorrer, pode ser reparada por

algum outro fator como, por exemplo, a agitação do reator: se houver algum problema na agitação do reator, esse problema será atenuado pelo fato de que ainda haverá a agitação do tanque e o problema poderá ser corrigido.

Abaixo se encontram maiores detalhes sobre cada possível causa raiz e as considerações feitas para cada uma em relação aos aspectos de probabilidade e impacto no pH.

- **MÃO DE OBRA**

- 1) Falta de treinamento/ capacitação dos operadores**

- IMPACTO: médio alto. A falta de capacitação poderia levar ao uso incorreto das ferramentas de produção (bombas, monitor de controle e etc), o que poderia afetar, por exemplo, a quantidade de adição de determinada matéria-prima, o que poderia impactar o pH.
 - PROBABILIDADE: muito baixa. Todos os operadores são devidamente treinados e para esse processo produtivo existe um operador exclusivo que já está nessa função há vários anos e que foi constatado que ele possui experiência e conhecimento do processo. Se ele precisar se ausentar, existem outros operadores treinados por ele. Além disso, existem outros mecanismos que impediriam esse problema como supervisão e um procedimento bem definido e rígido.

- 2) Operadores não seguem os procedimentos definidos**

- IMPACTO: médio alto. Mesmo sendo treinados, os operadores podem cometer erros se não seguirem os procedimentos corretamente como, por exemplo, pulando etapas para tornar o processo mais rápido ou simplificando tarefas.
 - PROBABILIDADE: muito baixa. Foi constatado que o operador segue os procedimentos devidamente. Além disso, existe um rígido procedimento que o operador deve seguir com o acompanhamento de um supervisor e ele precisa anotar todas suas ações na folha de processo.

- **MÉTODO**

- 3) Formulação incorreta**

- IMPACTO: muito alto. Se a formulação do produto tiver sido desenvolvida de forma equivocada, isso levaria a um produto final que não atenda aos limites de especificação esperados.
 - PROBABILIDADE: média baixa. O desenvolvimento do produto é feito por especialistas na matriz global da empresa. Lá eles utilizam a mesma formulação para produzir esse produto e não possuem problemas recorrentes de pH.

- **MATÉRIAS-PRIMAS**

- 4) Problemas com matérias-primas**

- IMPACTO: muito alto. Se as especificações das matérias-primas não forem adequadas para a produção deste líquido de arrefecimento, o pH final seria afetado. Não se considera nesse tópico que o material possa estar vencido, pois existem mecanismos que impedem a utilização de produtos vencidos nos processos. No entanto, pode ser que determinada matéria-prima tenha, por exemplo, um teor de material ativo de 50% e talvez o líquido de arrefecimento precise ser feito com uma matéria-prima com teor de 70%. Outra hipótese é que o fornecedor possa estar mandando matéria-prima com um valor diferente do indicado em seu certificado de análise.
 - PROBABILIDADE: média alta. Quando as matérias-primas chegam na fábrica, o controle de qualidade analisa apenas os certificados de análise e não fazem testes para comprovar se os valores informados estão corretos. No entanto, nunca houve problemas com os fornecedores e nunca houve problemas de qualidade com esses materiais. Outro ponto é que, apesar de os materiais e suas características serem estudados antes de serem aprovados para o processo, ao longo do tempo pode ter havido pequenas modificações em suas características por parte dos fornecedores e estas novas características poder não ser adequadas para o produto final.

5) Teor inadequado de BF

- IMPACTO: muito alto. Nesse tópico se aplicam os mesmos pontos destacados no anterior, no entanto resolveu-se separar a BF dos demais porque ela possui uma especificidade. Como já foi dito, esta matéria-prima é armazenada em tanque e possui uma tubulação ligando o tanque ao reator. Existe a possibilidade que a BF esteja se cristalizando no tanque ou na tubulação e que isso afete sua qualidade.
- PROBABILIDADE: muito alta. O operador já observou BF cristalizada algumas vezes; não se sabe, porém, se isso foi um evento isolado ou se isso ocorre frequentemente.

• MÁQUINAS

6) Agitação do reator

- IMPACTO: médio baixo. Se a agitação do reator não for suficiente, pode não dissolver toda a matéria-prima o que pode afetar o pH da solução final. No entanto, depois de serem agitadas as dispersões seguem para um tanque, como já foi dito na seção 2.2. Portanto, se a solução não tiver sido bem homogeneizada no reator, ela ainda poderá homogeneizada no tanque.
- PROBABILIDADE: muito baixa. Além de nunca ter sido constatado falha de agitação ou partículas sobrenadantes, o sistema de agitação passa por calibrações frequentes.

7) Agitação do tanque

- IMPACTO: muito alto. Se a agitação do tanque não for suficiente para a completa homogeneização do produto, o pH final pode ser afetado.
- PROBABILIDADE: muito baixa. Assim como no item anterior, nunca foi constatado partículas sobrenadantes e nem nenhuma falha. Além de também passar por calibrações regulares.

8) Monitor de controle

- IMPACTO: médio alto. O operador utiliza o monitor de controle para acompanhar todo o processo e é através dele que é ativado as linhas de BF e de MEG. Se esse monitor não estiver funcionando devidamente ou se estiver mandando um sinal incorreto para as

linhas, o operador não poderia acompanhar o processo direito e poderia levar também à adição incorreta de um material.

- PROBABILIDADE: muito baixa. O monitor passa frequentemente por calibrações e nunca foi constatada nenhuma falha.

- **MEDIÇÃO**

- 9) Balança de produção**

- IMPACTO: muito alto. O operador necessita fracionar algumas matérias-primas e para isso utiliza uma balança industrial. Se essa balança não estiver medindo corretamente, isso vai levar a adição incorreta de matérias-primas.
 - PROBABILIDADE: muito baixa. A balança passa por calibrações frequentemente.

- 10) Medidor de BF**

- IMPACTO: muito alto. O medidor de BF é responsável por regular a quantidade dessa matéria-prima no processo. Se ele não estiver funcionando devidamente, ele pode acabar transferindo mais ou menos produto que o necessário e, conseqüentemente, afetar o pH final da solução. Além do mais, é necessário considerar que a BF entra em várias dispersões do processo, então haveria também um erro acumulado.
 - PROBABILIDADE: média alta. Apesar de ele passar por calibrações frequentes, a equipe não sabe qual é a precisão do medidor e nem como ele funciona exatamente.

- **MEIO AMBIENTE**

- 11) Baixa temperatura ambiental**

- IMPACTO: muito alto. Existe a hipótese que, em temperaturas baixas, a BF se cristalize no tanque ou na tubulação e isso acabaria comprometendo sua qualidade e, portanto, o pH poderia ser afetado.
 - PROBABILIDADE: muito baixa. Segundo a figura 19, os problemas de pH não são exclusivos ou acentuados nos meses de temperaturas baixas.

12) Ambiente desorganizado

- IMPACTO: médio alto. O operador poderia se confundir se estiver trabalhando em um ambiente desorganizado. Por exemplo, ele poderia trocar uma matéria-prima por outra e acabar colocando quantidades incorretas no reator.
- PROBABILIDADE: muito baixa. A fábrica passa regularmente por rondas de 5s tanto internas quanto externas. Atualmente, ela está no nível 4s, o que significa que a organização e limpeza do ambiente estão em padrões aceitáveis.

Com base nessas considerações, as pontuações de probabilidade (P) e impacto (I) de cada aspecto e a pontuação final podem ser vistas na tabela 4.

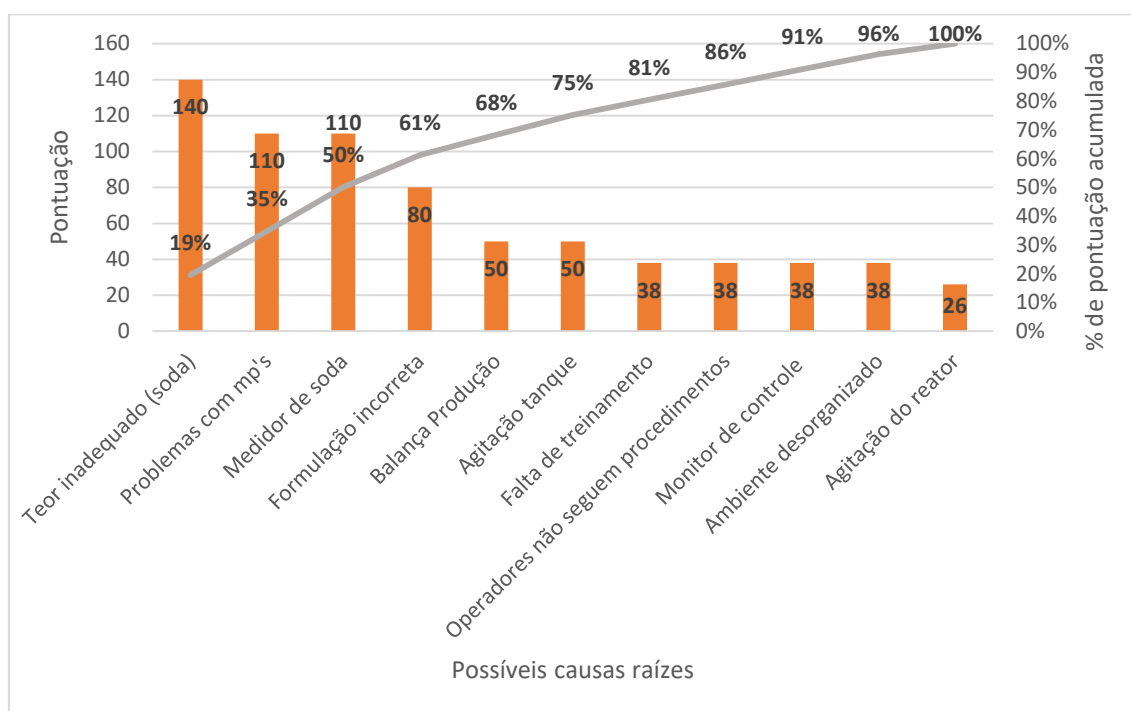
Tabela 4 - Pontuações para as possíveis causas raízes apresentadas

Item	Entrada/ Possíveis Causas	Grupos de afinidade	P	I	Final
1	Falta de treinamento/ capacitação dos operadores	Mão de Obra	1	7	38
2	Operadores não seguem os procedimentos definidos	Mão de Obra	1	7	38
3	Formulação incorreta	Método	4	10	80
4	Problemas com matérias-primas	Matérias primas	7	10	110
5	Teor inadequado (BF)	Matérias primas	10	10	140
6	Agitação do reator	Máquinas	1	4	26
7	Agitação tanque	Máquinas	1	10	50
8	Monitor de controle	Máquinas	1	7	38
9	Balança Produção	Medição	1	10	50
10	Medidor de BF	Medição	7	10	110
11	Temperatura ambiental	Meio Ambiente	1	10	50
12	Ambiente desorganizado	Meio Ambiente	1	7	38

Fonte: a própria autora

As pontuações foram ordenadas em ordem decrescente e foi feito um gráfico de Pareto (figura 22).

Figura 22 - Priorização das possíveis causas raízes



Fonte: a própria autora

Na sequência, o plano de ação (tabela 5) foi feito levando em conta as possíveis causas raízes com maior pontuação conforme figura 22, que foram: teor inadequado de BF, problemas com matérias-primas, medidor de BF e formulação incorreta.

O plano de ação foi realizado com o auxílio da ferramenta 5W2H. No entanto, apesar de alguns itens apresentarem custos, estes não foram levantados e, portanto, não constam na tabela. Cada item apresentado no plano será detalhado na seção “Medir”.

Com o plano de ação definido, a etapa “Definir” foi concluída e passou-se para a etapa de “Medir”. No fim dessa primeira etapa foi definido que o projeto focaria mais na produção do tipo A para evitar complexidades desnecessárias e para economizar tempo. O tipo A foi escolhido pois é o mais produzido e vendido pela empresa e é o que apresenta a maior taxa de retrabalho de pH (figura 14). No entanto, sempre se levou em conta os dados apresentados nessa seção e as particularidades de cada tipo de produto.

Tabela 5 - Plano de Ação

Item	O que?	Causa	Quem?	Quando?	Onde?	Por que?	Como?
1	Coleta dos dados do medidor	Medidor de BF	Operador	1-fev	Produção	Analisar o comportamento e a variação do medidor	Checagem física e análise estatística
2	Compreensão do funcionamento do medidor	Medidor de BF	Luciana e Instrumentista	12-mar	Produção	Obter maior conhecimento do instrumento	Reunião
3	Formulação em escala laboratorial	Formulação Incorreta com Problemas MP's	Luciana	14-fev	Laboratório	Verificar se a formulação está correta	Testes laboratoriais em duplicata
4	Comparação da formulação atual com a original	Formulação Incorreta	Todos	6-mar	Laboratório	Avaliar se teve mudança ao longo do tempo que alterou as quantidades	Checagem de documentos
5	Correlação entre MP's x pH final	Problemas com MP's	Luciana	7-fev	-	Verificar se algum lote específico de MP causou maior variação no pH final do produto	Análise estatística
6	Teste industrial com BF pesada em balança	Teor Inadequado (BF) Medidor de BF Formulação Incorreta	Operador	30-abr	Produção	Eliminar a ação do medidor de BF para avaliar o comportamento do pH	Produção de três lotes

Fonte: A própria autora

4.2 Medir

Nessa fase, os itens do Plano de Ação (tabela 5) foram executados. O detalhamento e o desdobramento de cada um são apresentados a seguir. Análises mais profundas serão feitas na etapa Analisar (seção 4.3).

1) Coleta de dados do medidor de BF

Com o intuito de entender melhor o comportamento do medidor de BF e analisar se o medidor estava colocando mais ou menos BF que o necessário, foram coletados os dados de medição do equipamento.

Essa coleta foi feita de duas maneiras diferentes. A primeira delas foi através do mostrador do equipamento físico. Esse mostrador indica a quantidade acumulada de volume que passou por ele, então o operador anotou a quantidade inicial indicada pelo mostrador e a quantidade final a cada vez que ele adicionava BF no processo. Vale ressaltar que esse mostrador possui um total de dez dígitos, então existe a possibilidade de o operador ter anotado algum número errado.

A segunda forma de coleta foi através do monitor de controle do operador pois, após o operador programar a quantidade que deve ser adicionada, o monitor mostra a quantidade real adicionada. Neste monitor, o número é composto por apenas quatro dígitos.

Após a coleta, foram calculados os erros indicados por cada forma de medição, sendo que erro pode ser considerado a quantidade real menos a quantidade desejada. A tabela 6 mostra o resumo dos dados obtidos para cada adição de BF e as figuras 23 e 24 mostram os gráficos gerados através do software *Minitab*. Os dados foram coletados de outubro de 2019 a janeiro de 2020.

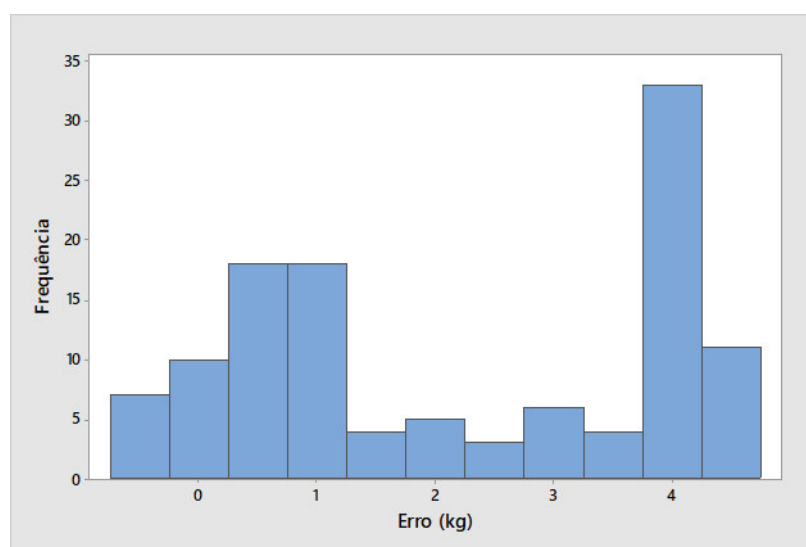
Como o objetivo dessa análise é medir a quantidade a mais ou a menos que o medidor de BF está adicionando ao processo, não foi possível utilizar dados relativos pois podem ser adicionados valores diferentes de BF em cada dispersão e o erro não tem relação com a quantidade de BF a ser adicionada. Hipoteticamente, ora pode-se adicionar 30 kg e ora pode-se adicionar 80 kg. Portanto, se o medidor adicionar 2 kg a mais, o valor absoluto seria o mesmo para os dois casos, mas seria bem diferente em valores relativos.

Tabela 6 - Dados do medidor de BF

Propriedade	Medidor Físico	Monitor de Controle
Erro Mínimo (kg)	-0,74	-0,70
Erro Máximo (kg)	4,56	5,10
Média de erro (kg)	2,19	0,57
Desvio padrão do erro (kg)	1,737668	0,61678

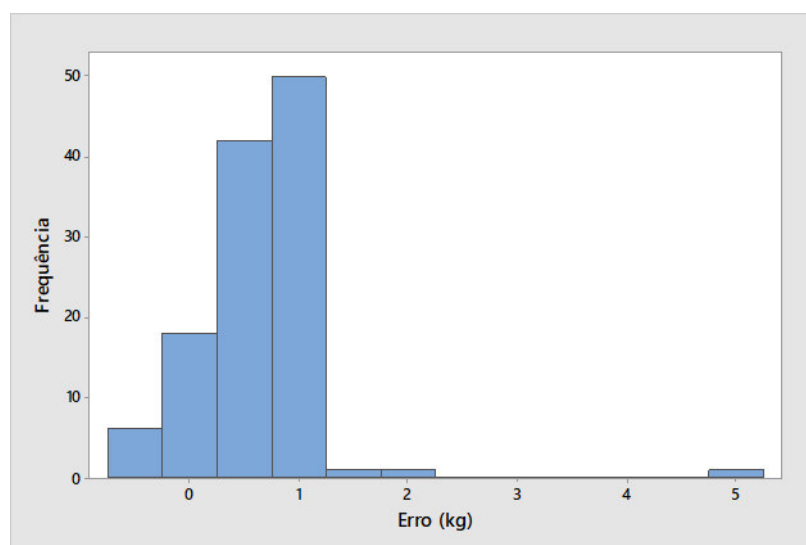
Fonte: a própria autora

Figura 23 - Histograma dos dados de erro do medidor físico



Fonte: a própria autora

Figura 24 - Histograma dos dados de erro do monitor de controle



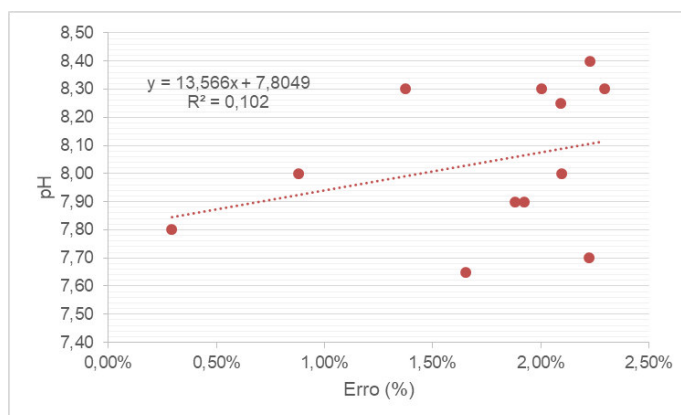
Fonte: a própria autora

Em um cenário ideal, os dados obtidos pelo medidor físico seriam iguais aos do monitor de controle e os erros de ambos conjuntos de dados seriam bem próximos de zero. Não é isso que acontece na prática. Nota-se uma clara diferença entre os dados tanto em suas médias conforme tabela 6 (2,19kg para o medidor físico e 0,57kg) e também em suas distribuições conforme figuras 23 e 24. Vale ressaltar que essas quantidades são pequenas em relação à quantidade total adicionada.

Em seguida, comparou-se os erros acumulados para o lote inteiro com o pH daquele lote (figuras 25 e 26).

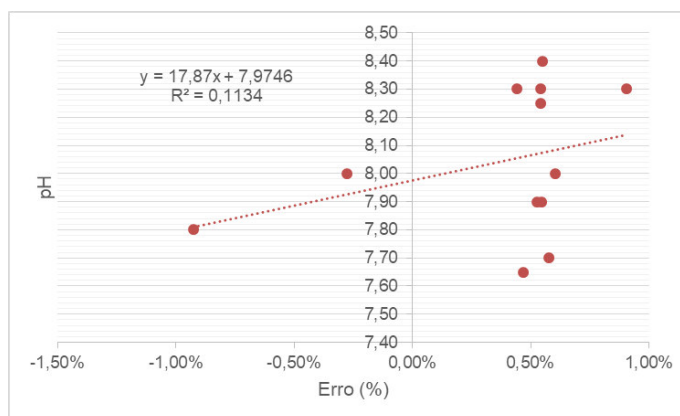
Seria esperado que, se mais BF fosse colocada no processo, o pH tenderia a ser maior por se tratar de uma matéria-prima básica. No entanto, os coeficientes de correlação dos gráficos das figuras 25 e 26 são muito baixos para afirmar que existem uma correlação entre o pH final e o erro de BF. Essa falta de correlação também é percebida nos gráficos pois um erro na faixa de 0,50% resultam em pH finais desde 7,65 até 8,4 na figura 26.

Figura 25 - pH final versus erro do medidor físico



Fonte: a própria autora

Figura 26 - pH final versus erro do monitor de controle



Fonte: a própria autora

2) Compreensão do medidor de BF

Para entender melhor o medidor de BF e suas limitações, foi feita uma reunião com o instrumentista responsável pelo processo. Nessa reunião, descobriu-se que a precisão do medidor é de 0,50%.

Além disso, o instrumentista também explicou sobre o comportamento do medidor: nos primeiros 70% do total da massa a ser adicionada, a válvula fica completamente aberta. Nos últimos 30% de massa, a válvula se fecha um pouco e passa a operar com 20% de abertura até chegar a 100% de massa adicionada, quando ela se fecha completamente.

No entanto, a válvula demora alguns segundos para fechar completamente e nesse período continua passando BF. Levando em conta essa explicação, pode-se interpretar que, nesse período de fechamento de válvula, normalmente passa cerca de quatro quilos a mais segundo o medidor físico (figura 23) e um quilo a mais segundo os dados do monitor de controle (figura 24).

3) Formulação em escala laboratorial

Com o intuito de eliminar a interferência dos equipamentos do processo (reatores, agitação, medidor de BF e balança industrial) e analisar se a formulação do produto está incorreta ou se há algum problema em relação às matérias-primas, foram feitos dois lotes do líquido de arrefecimento tipo A em laboratório utilizando as mesmas matérias-primas utilizadas no processo.

No primeiro teste, o pH da amostra final foi 8,17, o que está fora da especificação (8,2 – 8,6). Já no segundo teste, o pH foi 8,23 e ficou dentro dos limites de especificação, porém muito próximo ao limite inferior.

A intenção era fazer os testes em triplicata, porém não foi possível realizar o último teste devido ao isolamento social imposto por conta da pandemia do Covid-19 já mencionada.

4) Comparação da formulação atual com a original

Como já foi dito, o produto foi formulado na matriz global da empresa por especialistas e é feita uma transferência de tecnologia deles para a produção local. Como o tipo A desse produto já é feito localmente há vários anos e já passou por várias pequenas modificações, poderia ter havido algum engano e a formulação atual poderia estar diferente da original. Por isso, comparou-se o documento da formulação original com o da atual e foi verificado que eles são iguais.

5) Correlação entre matérias-primas e pH final

O intuito dessa análise foi verificar o comportamento dos lotes de matéria-prima em relação ao pH do produto final para avaliar se algum lote específico de matéria-prima causou mais erros de pH do que os outros.

Para esse estudo, algumas considerações são necessárias:

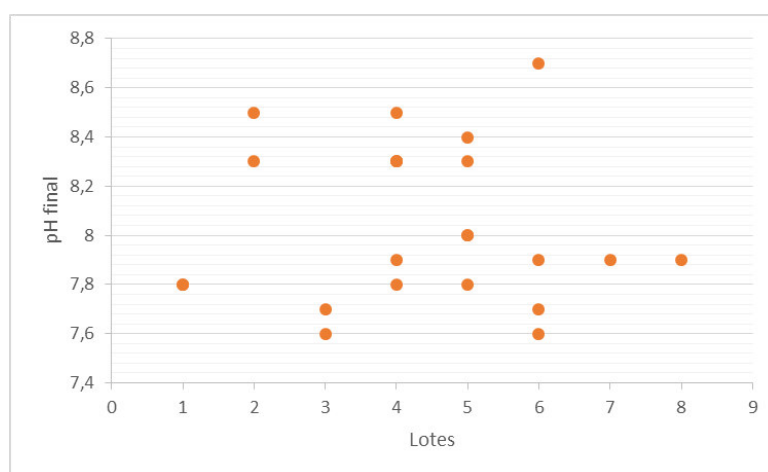
- a) A BF, como já foi dito, é armazenada em tanque próprio. Quando o tanque chega a um determinado nível, mais BF é adicionada gerando uma mistura de lotes, o que altera suas características e gera uma nova identificação de lote. Portanto, as características da BF que é realmente usada na produção não são iguais às características iniciais analisadas pelo laboratório de Controle de Qualidade. Portanto, esse estudo não foi feito para a BF.
- b) Os lotes das matérias-primas foram renomeados para facilitar a análise dos dados e para manter a confidencialidade do processo. Já as matérias-primas foram chamadas de MP 1 a MP 12 também para manter a confidencialidade.
- c) As matérias-primas passam pela análise de Controle de Qualidade quando chegam à fábrica e poderiam sofrer degradações até que sejam utilizadas no processo. Para esse estudo, desconsidera-se que as

características das matérias-primas sofram grandes variações ao longo do tempo pois elas são armazenadas em locais adequados e sempre são utilizadas dentro da validade indicada pelo fornecedor.

d) Foram utilizados os dados de 2018.

Na figura 27, é possível ver o resultado desse estudo para a matéria-prima A. No Apêndice B, estão os demais gráficos desse estudo para as outras matérias-primas.

Figura 27 - Lotes da MP 1 versus pH do produto final



Fonte: a própria autora

É possível observar que houveram vários lotes que produziram resultados de pH diferentes. Por exemplo, a figura 27 mostra que o lote “4” gerou pH desde 7,8 até 8,5, ou seja, esse lote de matéria-prima gerou resultados de pH dentro e fora da especificação. Observações semelhantes podem ser feitas os demais gráficos desse estudo (Apêndice B).

6) Teste industrial com BF pesada em balança

Como teor inadequado de BF, problemas com matérias-primas e medidor de BF foram as possíveis causas raízes com maior pontuação segundo a figura 23, o objetivo desse teste foi eliminar a interferência do medidor de BF do processo e observar o comportamento do pH. Sendo assim, o intuito do teste era produzir três lotes do líquido de arrefecimento tipo A com a BF previamente pesada e colocada em uma embalagem apropriada. A BF seria pesada após passar por toda a tubulação de BF para manter as características desse material tal qual é usado na produção normalmente.

Infelizmente, por conta da pandemia do Covid-19, além de ter sido implementado o isolamento social, a demanda desse produto caiu no mercado e ele não foi fabricado nesse período. Por isso, não foi possível realizar esse teste.

4.3 Analisar

Nessa seção, serão apresentados os motivos para o descarte ou não das quatro causas raízes com maior pontuação segundo figura 22: medidor de BF, formulação incorreta, problemas com matérias-primas e teor inadequado de BF.

- **Medidor de BF**

Os dados e as informações obtidas nos itens 1 e 2 da seção 4.2 não são suficientes para descartar a hipótese que a causa raiz seja o medidor de BF. Por um lado, conforme figuras 25 e 26, resultados de pH diferentes são obtidos em uma mesma faixa de erro do medidor tanto para os dados do medidor físico (faixa 1,75 a 2,25%) quando para a medição do monitor (faixa 0,50%), então esses resultados parecem indicar que o pH é independente do erro do medidor.

Por outro lado, os dados indicam que o medidor adiciona uma quantidade de BF em excesso (figuras 23 e 24). Apesar de ser uma quantidade pequena se comparada com o total, não é possível afirmar que essa quantidade não impacta o pH. Se houvesse impacto, o pH seria mais alto que o pH desejado, o que é contraditório com os dados apresentados na seção Definir (tabela 2 e figura 14). Nesse caso, é possível duvidar dos dados do medidor, o que abriria a hipótese do medidor não está contabilizando a quantidade de BF adicionada corretamente.

- **Formulação incorreta**

Conforme item 3 da seção 4.2, os testes em escala laboratorial apresentaram pH próximos ao LIE, assim como os resultados de pH apresentados na produção. Isso poderia indicar que o problema fosse na formulação do produto. No entanto, como a formulação é a mesma utilizada na matriz global da empresa (item 4 da seção 4.2) e lá o produto não apresenta falhas recorrentes de pH, é improvável que esta seja a causa raiz já que, se o problema fosse exclusivamente a formulação do produto, o pH deveria dar fora da especificação independentemente do local que fosse produzido.

- **Problemas com matérias-primas**

Como foi descartado que a causa raiz seja a formulação do produto, os testes em laboratório poderiam ser explicados por problemas com matérias-primas. Porém, o estudo de correlação entre lotes de matérias-primas versus pH do produto final (item 5 da seção 4.2) mostra que todas as matérias-primas tiveram ao menos um lote que resultou em lotes com pH diferentes e, muitas vezes, o mesmo lote de matéria-prima gerou um pH dentro da especificação e outro fora. Ou seja, os resultados apontam que há um outro fator que esteja causando essa variação de pH. É preciso lembrar, no entanto, que esse estudo não foi feito para a BF, porém essa hipótese foi considerada na causa raiz “teor inadequado de BF”.

- **Teor inadequado de BF**

Descartando as causas raízes “formulação incorreta” e “problemas com matérias-primas”, os resultados de pH abaixo do esperado podem ser explicados pelo teor inadequado de BF. No entanto, mais testes devem ser feitos para confirmar essa hipótese.

Em suma, restaram duas possíveis causas raízes: medidor de BF e teor inadequado de BF. O teste industrial com a BF pesada em balança (item 6 da seção 4.2) seria essencial para se chegar a uma conclusão pois seria retirada a interferência do medidor de BF do processo.

Nesse teste dois resultados seriam possíveis. O primeiro seria se o pH final estivesse dentro da especificação, o que indicaria que a causa raiz é o medidor de BF pois foi a única variável que está diferente do processo normal. A solução para esse caso seria estudar em investir em um medidor mais adequado às características da BF e ao processo.

O segundo resultado seria se o pH continuasse saindo fora da especificação, o que significaria que seria impossível que o problema fosse o medidor de BF e indicaria que o problema é o teor de BF. Nesse caso os próximos passos seriam:

- i. Comparar uma amostra de BF após passar por toda a tubulação (amostra 1) com uma amostra do tanque (amostra 2) e com uma amostra de BF que acabou de chegar a fábrica (amostra 3).
- ii. Se apenas a amostra 1 fosse diferente das demais, o problema estaria na tubulação de BF e seria necessário acionar a manutenção ou até mesmo investir em uma tubulação mais moderna que se adequasse melhor às características de BF.
- iii. Se a amostra 3 estivesse de acordo com os parâmetros requeridos mas as amostras 1 e 2 não, isso significaria que o problema está no tanque e na forma de como a BF é armazenada. Nesse caso, seria necessário estudar a melhor maneira de armazenar a BF e se há necessidade de implementar um agitador no tanque.
- iv. Se nenhuma das amostras estivessem de acordo com os parâmetros, o problema estaria no fornecedor e seria necessário estudar um fornecedor melhor.

5 CONCLUSÕES

Na fase Definir, o problema pode ser compreendido através dos dados históricos obtidos. O Diagrama de Ishikawa foi essencial para levantar as doze possíveis causas raízes e o gráfico de Pareto conseguiu reduzir esse número para quatro com o auxílio de ferramentas de priorização.

Na etapa Medir, o medidor de BF foi investigado e foi visto que ele estava adicionando BF em excesso no processo, o que deveria deixar o pH mais alto. A formulação original foi avaliada e não foi observado diferenças para a formulação atual. Em laboratório, foi descoberto que o pH continuava próximo ao LIE mesmo sem a interferência dos equipamentos do processo. Por fim, os lotes de cada matéria-prima – com a exceção da BF – foram comparados com o pH final do produto e não foi observada correlação para nenhuma matéria-prima. Com esses resultados obtidos, as hipóteses de “formulação incorreta” e de “problemas com matérias-primas” foram descartadas. As análises não foram suficientes para eliminar a possível causa raiz “medidor de BF” e a única explicação encontrada para o pH obtido em laboratório foi o teor de BF.

Infelizmente, por fatores externos, o teste industrial com BF pesada em balança não pode ser feito. Este teste seria essencial para determinar a causa raiz do problema dentre as duas. Testes adicionais teriam que ser feitos para determinar se o problema está na tubulação, no tanque ou no fornecedor.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13705: Veículos rodoviários automotores - Aditivos concentrados para arrefecimento de motor endotérmico, tipos A, B e C - Requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, p. 56. 2016.
- BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas, v.2**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- BIGDELI, M. B. et al. A review on the heat and mass transfer phenomena in nanofluid coolants with special focus on automotive applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 1615–1633, 2016.
- BRITO, M. F.; CARNEIRO, P. The eighth waste: non-utilized talent. n. April, 2019.
- CHE SIDIK, N. A.; WITRI MOHD YAZID, M. N. A.; MAMAT, R. Recent advancement of nanofluids in engine cooling system. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, n. April 2015, p. 137–144, 2017.
- ČIARNIENĖ, R.; VIENAŽINDIENĖ, M. Lean Manufacturing: Theory and Practice. **Economics and Management**, v. 17, n. 2, p. 726–732, 2012.
- COSTA, A. F. B.; EPPRECHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. **Controle Estatístico de Qualidade**. 2. ed. São Paulo: Atlas SA, 2012.
- DATASHEET, T. Optimass 1000. 2011.
- G1. **Mortes por coronavírus no mundo chegam a 300 mil**. Disponível em: <https://g1.globo.com/bemestar/coronavirus/noticia/2020/05/14/mortes-por-coronavirus-no-mundo-chegam-a-300-mil.ghtml>. Acesso em: 30 de maio de 2020.
- GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. São Paulo: Atlas SA, 2002.
- GUPTA, S.; JAIN, S. K. An application of 5S concept to organize the workplace at a scientific instruments manufacturing company. **International Journal of Lean Six Sigma**, v. 6, n. 1, p. 73–88, 2015.
- HICKS, B. J. Lean information management: Understanding and eliminating waste. **International Journal of Information Management**, v. 27, n. 4, p. 233–249, 2007.
- JUNIOR, I. M. et al. **Gestão da Qualidade**. [s.l: s.n.]
- MIGUEL, P. A. C. et al. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2012.
- MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. 4. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2004.
- PEYGHAMBARZADEH, S. M. et al. Experimental study of heat transfer enhancement using water/ethylene glycol based nanofluids as a new coolant for car radiators. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 38, n. 9,

p. 1283–1290, 2011.

PMI. **Um Guia do Conhecimento em Gerenciamento de Projetos (guia PMBOK)**. 5. ed. Rio de Janeiro: Saraiva, 2013.

RODRIGUES, M. V. **Entendendo, Aprendendo e Desenvolvendo Sistemas de Produção Lean Manufacturing**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2017.

SHANKAR, R. **Process Improvement Using Six Sigma: A DMAIC Guide**. New York: ASQ, 2009.

SOMMER, A. C.; BLUMENTHAL, E. Z. Implementation of Lean and Six Sigma principles in ophthalmology for improving quality of care and patient flow. **Survey of Ophthalmology**, v. 64, n. 5, p. 720–728, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.survophthal.2019.03.007>>.

TAGHIZADEGAN, S. **Essentials of Lean Six Sigma**. 1. ed. Burlington: Elsevier Editora Ltda, 2006.

TOLEDO, J. C. de et al. **Qualidade: Gestão e Métodos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2013.

VIEIRA, S. **Estatística para Qualidade**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2012.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T.; ROOS, D. **A Máquina que Mudou o Mundo**. São Paulo: Elsevier Editora Ltda, 2004.

APÊNDICE A

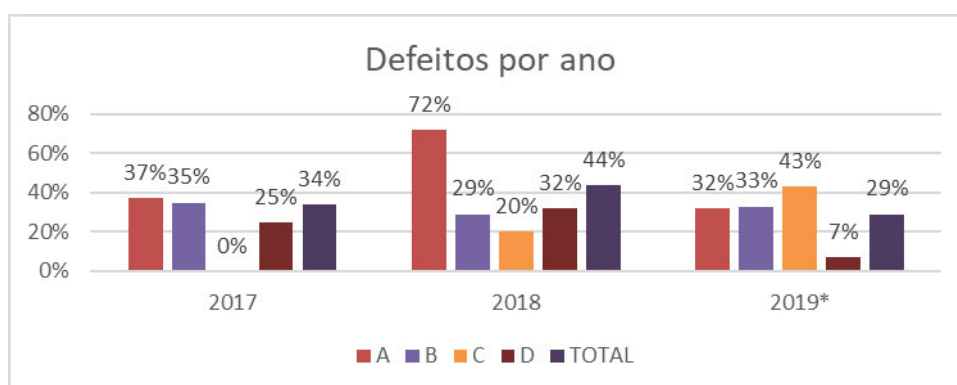
Termo de Abertura do Projeto

1 Objetivos deste documento

Este documento tem como propósito definir o escopo e os objetivos desse projeto. Além disso, também contém os principais riscos, restrições, marcos e premissas do projeto.

2 Situação atual e justificativa do projeto

Desde 2017, o pH da linha (*Confidencial*) frequentemente sai fora da faixa de especificação e é necessário ajustá-lo gerando retrabalho e gasto de matéria-prima, o que afeta o indicador FPTR



* Dados coletados até setembro/2019

3 Objetivos SMART e critérios de sucesso do projeto

Identificar e corrigir a causa raiz do problema fazendo com o que o indicador FPTR atinja a meta estipulada ao fim do projeto

4 Estrutura Analítica do Projeto – Fases e principais entregas

1. Planejamento
 - i. Cronograma
 - ii. Termo de Abertura do Projeto
 - iii. Plano de Comunicação
2. Definir
 - i. Diagrama de Ishikawa
 - ii. SIPOC

- iii. Matriz de Priorização
 - iv. Plano de Ação
- 3. Measure
 - i. Plano de Coleta de Dados
 - ii. Resultado da Coleta de Dados
 - iii. Experimentos laboratoriais
- 4. Analyze
 - i. Análise de Dados
 - ii. Validação das Causas Raízes
- 5. Improve
 - i. Plano de Ação de Melhoria
- 6. Control
 - i. Plano de Controle
 - ii.

5 Partes interessadas do projeto

(Confidencial)

6 Restrições

- Não é possível alterar a formulação do produto sem autorização da *(confidencial)*
- Não há orçamento disponível para esse projeto

7 Premissas

- Com base na formulação do produto, o pH final deveria sair conforme definido em seu plano de controle
- Existe apenas uma causa especial no processo que faz com que o pH saia fora de seus limites

8 Riscos

- Investimento tecnológico no processo
- Necessidade de grandes alterações na formulação do produto

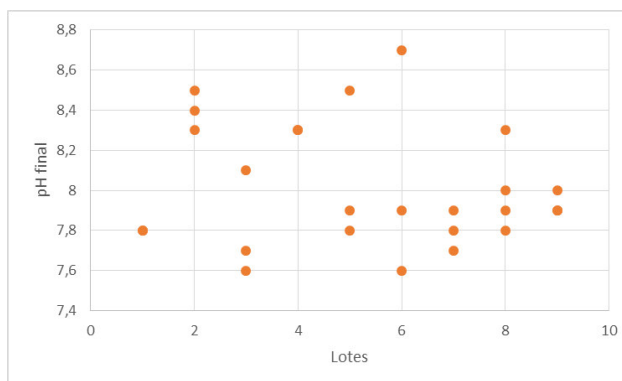
9 Orçamento do Projeto

- O único custo previsto para esse projeto será o custo das matérias primas usadas para experimentos laboratoriais

APÊNDICE B

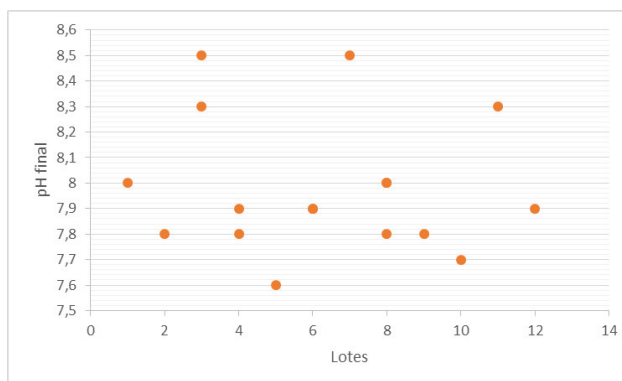
Análise de Correlação entre matérias-primas e pH do produto final

Figura A - Lotes da MP 2 versus pH do produto final



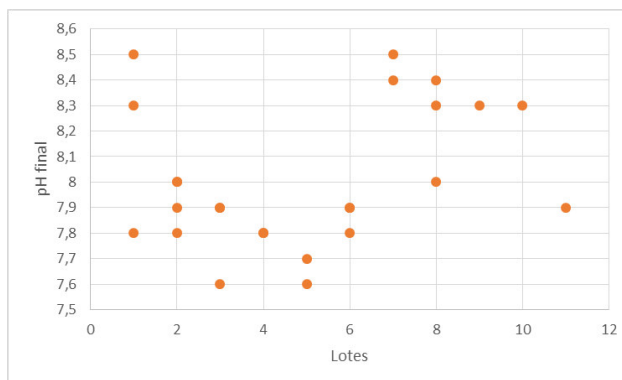
Fonte: a própria autora

Figura B – Lotes da MP 3 versus pH do produto final



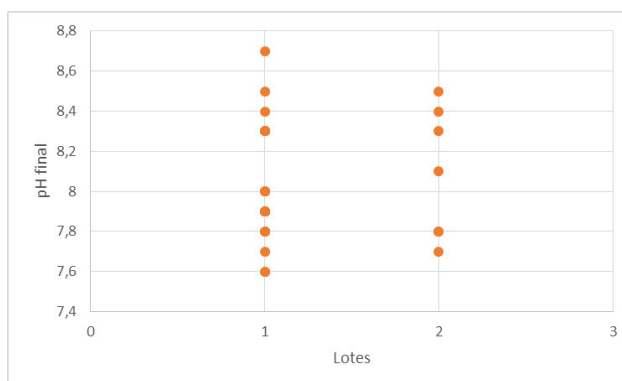
Fonte: a própria autora

Figura C - Lotes da MP 4 versus pH do produto final



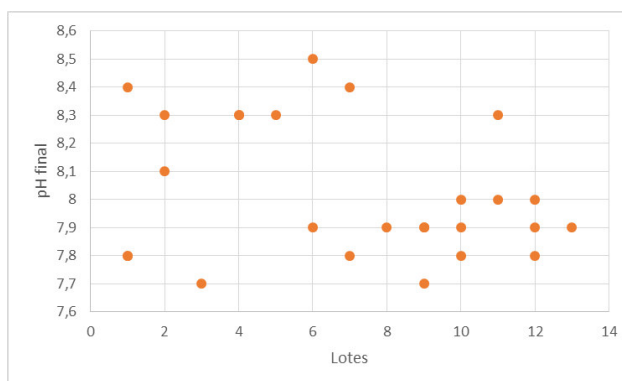
Fonte: a própria autora

Figura D – Lotes da MP 5 versus pH do produto final



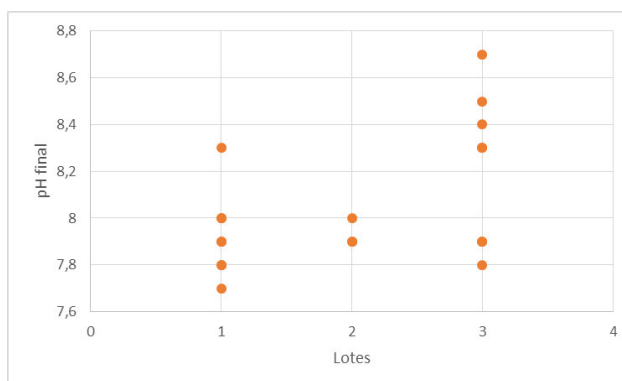
Fonte: a própria autora

Figura E - Lotes da MP 6 versus pH do produto final



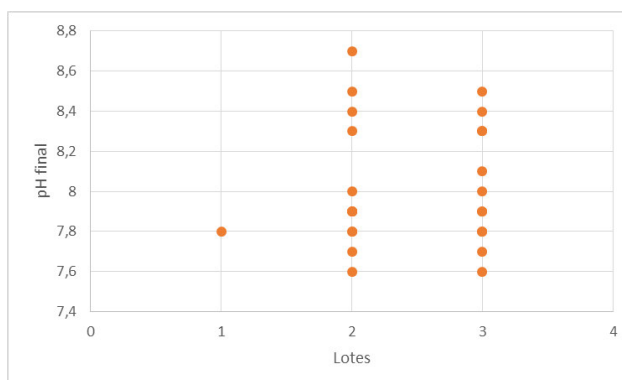
Fonte: a própria autora

Figura F - Lotes da MP 7 versus pH do produto final



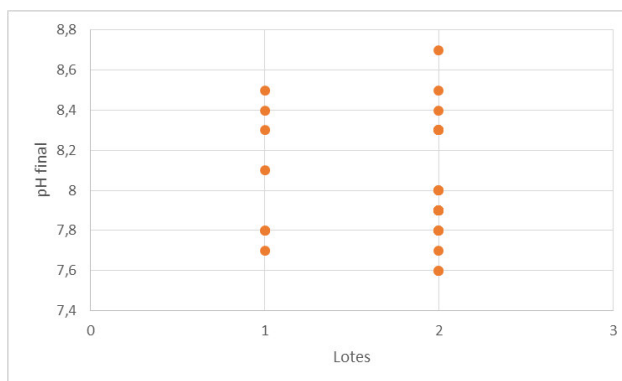
Fonte: a própria autora

Figura G - Lotes da MP 8 versus pH do produto final



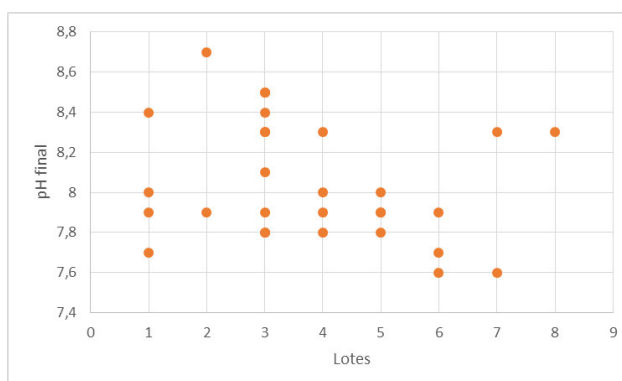
Fonte: a própria autora

Figura H - Lotes da MP 9 versus pH do produto final



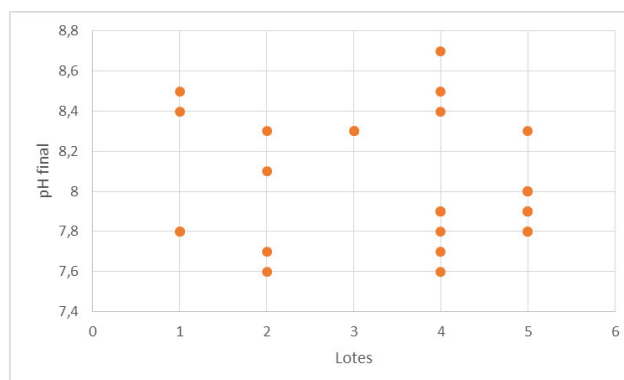
Fonte: a própria autora

Figura I - Lotes da MP 10 versus pH do produto final



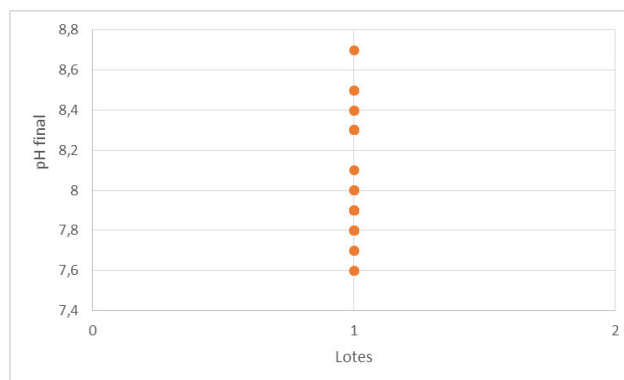
Fonte: a própria autora

Figura J - Lotes da MP 11 versus pH do produto final



Fonte: a própria autora

Figura K - Lotes da MP 12 versus pH do produto final



Fonte: a própria autora