

LUCAS DIAS DA SILVA

**APLICAÇÃO DO FATORIAL FRACIONADO NO ESTUDO DE FATORES
RELACIONADOS AO PREPARO DE BEBIDA NÃO ALCOÓLICA**

**Dissertação apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como parte das exigências
do Programa de Pós-Graduação em
Estatística Aplicada e Biometria, para
obtenção do título de Magister Scientiae.**

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2014**

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

S586a
2014
Silva, Lucas Dias da, 1987-
Aplicação do fatorial fracionado no estudo de fatores
relacionados ao preparo de bebida não alcoólica / Lucas Dias da
Silva. – Viçosa, MG, 2014.
viii, 52f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexo.

Orientador: José Ivo Ribeiro Júnior.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 47-50.

1. Refrigerante. 2. Controle de qualidade. 3. Análise
fatorial. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Estatística. Programa de Pós-graduação em Estatística Aplicada
e Biometria. II. Título.

CDD 22. ed. 663.6

LUCAS DIAS DA SILVA

**APLICAÇÃO DO FATORIAL FRACIONADO NO ESTUDO DE FATORES
RELACIONADOS AO PREPARO DE BEBIDA NÃO ALCOÓLICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Estatística Aplicada e Biometria, para obtenção do título de Magister Scientiae.

APROVADA: 06 de novembro de 2014.

Antonio Policarpo Souza Carneiro

Joel Camilo Souza Carneiro

Edimar Aparecida Filomeno Fontes
(Coorientadora)

José Ivo Ribeiro Júnior
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por esta oportunidade de vida e de concluir mais um projeto.

A Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Estatística Aplicada e Biometria, pela oportunidade de realização do curso e deste trabalho, e por alguns dos melhores anos de minha vida.

A CAPES e FAPEMIG pelo apoio financeiro fundamental para realização desse trabalho.

Ao professor José Ivo Ribeiro Júnior, pela orientação, pela amizade, paciência, incentivo e confiança.

As Coorientadoras Prof^a. Ana Carolina Campana Nascimento e Prof^a. Edimar Aparecida Filomeno Fontes, pelas dicas preciosas, pela compreensão, confiança, apoio, amizade.

Aos professores que participaram da banca examinadora Antonio Policarpo Souza Carneiro e Joel Camilo Souza Carneiro, pelas sugestões, críticas e contribuições valiosas que enriqueceram o trabalho.

As secretárias do Departamento de Estatística, Carla e Anita, pela atenção, amizade e dedicação.

Aos amigos da Pós-graduação em Estatística, Laís, Gabi e Edimo, pela companhia e apoio durante as horas de estudo e pelo convívio harmonioso e descontraído.

Aos melhores amigos conquistados em Viçosa, Welington, Thiago, Cláudio, Guilherme e Glauber, amigos que facilitaram minha estadia, pelo apoio, amizade, momentos inesquecíveis e inigualáveis, amigos para toda a vida.

A empresa Whirlpool Latin America, por possibilitar a realização desse trabalho e o meu desenvolvimento profissional, e por apoiar a integração entre universidade e empresa firmando parcerias de sucesso. Agradeço a todos os colegas do Subsistema Cooling os quais tive o prazer de trabalhar junto, em especial ao Jaime Chin,

Jacqueline Marques, Luciano Xavier, Gustavo Bona e Fredy Ranthun. Agradeço também ao Maicon Bueno pela confiança e pela amizade.

Aos amigos conquistados em Joinville, Ronaldo, Rodrigo, Jean, Diego, Ivan e Fernanda, pela amizade, pelo convívio e atenção, pelos momentos de lazer únicos e por me mostrar o melhor de Joinville e região.

A minha mãe Nilza Dias da Silva, que mesmo não estando mais presente em minha vida, me deixou os melhores exemplos de amor incondicional, zelo e humildade.

Ao meu pai João Deusdedit da Silva e minha madrasta Ednalva de Andrade Coimbra, pelo apoio nos momentos difíceis e exemplo de vida.

Aos meus irmãos Lorena, João Victor, Thiago e Fernanda e minhas cunhadas Andrea e Clarice, por sempre me apoiarem em minhas decisões e por juntos proporcionarem os melhores momentos em família.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Sumário

RESUMO	v
ABSTRACT	vii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. Geral.....	3
2.2. Específicos	3
3. REVISÃO DE LITERATURA	4
3.1. Produto: Máquina de bebidas em cápsula.....	4
3.2. Inovação e Desenvolvimento de Novos Produtos.....	4
3.3. Qualidade de Produto	7
3.4. Metodologia Seis Sigma.....	8
3.5. Mapa de Produto	11
3.6. Planejamento de Experimentos	12
3.6.1. Experimentos Fatoriais Completos e Fracionados.....	13
3.6.2. Diagrama de Relação de Fatores.....	19
3.7. Desejabilidade	20
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	23
4.1. Variáveis de Entrada	25
4.2. Variáveis de Saída.....	29
4.2.1. Nível de Carbonatação.....	29
4.2.2. Temperatura	31
4.2.3. Variação do Teor de Sólidos Solúveis.....	32
4.3. Análises Estatísticas	33
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
6. CONCLUSÕES.....	46
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
ANEXO	51

RESUMO

SILVA, Lucas Dias da, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2014. **Aplicação do fatorial fracionado no estudo de fatores relacionados ao preparo de bebida não alcoólica.** Orientador: José Ivo Ribeiro Júnior. Coorientadoras: Edimar Aparecida Filomeno Fontes e Ana Carolina Campana Nascimento.

Para o desenvolvimento de novos produtos, há a necessidade de experimentar muitos fatores, cujos efeitos ainda não são conhecidos. Portanto, é importante, a princípio instalar o experimento fatorial completo 2^k ou o fatorial fracionado 2^{k-p} , para k fatores estudados, que, provavelmente, possibilitará a seleção dos fatores ($< k$) mais importantes para o estudo. Para avaliar a qualidade da bebida em cápsula, foram investigados cinco fatores não passíveis de controle pela indústria: temperatura do copo (A), pH da água (B), material do copo (C), temperatura da cápsula (D) e inclinação do copo (E). Para estudar os efeitos principais e os das interações duplas destes cinco fatores sobre três variáveis-resposta (nível de carbonatação, temperatura e variação do teor de sólidos solúveis), foi conduzido um experimento fatorial fracionado 2^{5-1} , de resolução V, segundo o delineamento inteiramente casualizado, sem repetição, com os seguintes níveis por fator: $a_- = 18$ °C, $a_+ = 32$ °C, $b_- = 6$, $b_+ = 9,5$, $c_- =$ plástico, $c_+ =$ vidro, $d_- = 5$ °C, $d_+ = 32$ °C, $e_- =$ ausente, $e_+ =$ presente. As análises estatísticas das respostas avaliadas no experimento foram realizadas de acordo com o método de Lenth (1989) para $\alpha = 0,05$. O nível de carbonatação foi influenciado negativamente e apenas pela temperatura da cápsula. Portanto, para maximizá-lo, recomendou-se a menor temperatura da cápsula igual a 5 °C. A temperatura da bebida sofreu efeitos significativos da temperatura da cápsula, das interações entre as temperaturas do copo e da cápsula (antagonismo) e entre o material e a inclinação do copo (sinergismo). Para esta variável, foram recomendadas duas combinações de níveis: com copo de plástico inclinado e com copo de vidro não inclinado, ambos a 18 °C, com cápsula a 5 °C e com pH da água igual a 6,0 ou 9,5. E para a variação do teor de sólidos solúveis, foi manifestado efeito positivo do pH da água. Para minimizá-la, recomendou-se o menor valor de pH igual a 6,0, independentemente do níveis dos demais fatores. Para atender as especificações das três variáveis avaliadas,

simultaneamente, foram recomendados dois tratamentos: temperatura do copo em 18 °C, pH da água igual a 6,0 e temperatura da cápsula igual a 5 °C, combinadas com copo de plástico inclinado ou com copo de vidro sem inclinação. A fim de validar as recomendações dos dois tratamentos, foi avaliada a desejabilidade de acordo com os critérios técnicos definidos pela empresa para as três variáveis-resposta. Novamente, os resultados dos melhores tratamentos se repetiram, com, aproximadamente, 83% dos desejos de qualidade atingidos. Como consequência dos resultados obtidos em nível experimental, o projeto de desenvolvimento desta inovação em preparo de bebidas se mostrou viável do ponto de vista técnico, desde que os consumidores obedeçam às recomendações estabelecidas pela empresa.

ABSTRACT

SILVA, Lucas Dias da, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, november of 2014. **Application of fractional factorial designs to study the factors related to the preparation of non-alcoholic beverage.** Advisor: José Ivo Ribeiro Júnior. Co-advisors: Edimar Aparecida Filomeno Fontes and Ana Carolina Campana Nascimento.

For the development of new products, there is a need to experiment many factors whose effects are still unknown. Therefore, it is important to initially set up the complete factorial experimental design 2^k or the fractional factorial design 2^{k-p} , for k studied factors, which would probably enable the selection of the most important factors ($< k$) for this study. In order to assess encapsulated beverage quality, five factors that cannot be controlled by industry were investigated: cup temperature (A), water pH (B), cup material (C), capsule temperature (D) and cup inclination (E). To study the main effects and double interactions of these five factors in relation to three response variables (carbonation level, temperature, and soluble solid content variable), it was set up a fractional factorial design 2^{5-1} of resolution V, based on a completely randomized design, without repetition, with the following levels by factor: $a_- = 18\text{ °C}$, $a_+ = 32\text{ °C}$, $b_- = 6$, $b_+ = 9,5$, $c_- = \text{plastic}$, $c_+ = \text{glass}$, $d_- = 5\text{ °C}$, $d_+ = 32\text{ °C}$, $e_- = \text{absent}$, $e_+ = \text{present}$. Statistical analyzes of the responses evaluated in this experiment were carried out according to the method of Lenth (1989) to $\alpha = 0.05$. The carbonation level was negatively influenced and only by the capsule temperature. Then, to maximize it, it was recommended that the lowest temperature of the capsule was equal to 5 °C . The temperature of the beverage suffered significant temperature effect of the capsule, of the interactions between the temperatures of the cup and of the capsule (antagonism) and between the material and the inclination of the cup (synergism). For this variable, two level combinations were recommended: with inclined plastic cup and glass cup not inclined, both at 18 °C with the capsule temperature at 5 °C and water pH equal to 6.0 or 9.5. For the variation of soluble solid content, it was manifested positive effect of water pH. With the view to minimize it, it was recommended the lowest value of pH 6.0, apart from the levels of other factors. In order to meet the specifications of the three variables, two treatments were recommended: glass temperature at 18 °C , water pH

equal to 6.0 and temperature of the capsule equal to 5°C combined with inclined plastic cup or glass cup not inclined. For the purpose of validating the recommendations of the two treatments, the desirability, according to the technical criteria set by the company for the three response variables, was evaluated. Over again, the results of the best treatments were repeated, with approximately 83% of the wishes of quality reached. As a consequence of the results obtained in the experimental level, the project of development of this innovation in preparation of drinks was shown to be viable from a technical standpoint, since consumers meet the recommendations set forth by the company.

1. INTRODUÇÃO

De todas as categorias de bebidas não alcoólicas, o refrigerante é a de maior consumo no país, sendo o mercado brasileiro o terceiro em nível mundial, com um consumo per capita de 86 litros em 2010 (ABIR – Associação Brasileira das Indústrias de Refrigerantes e de Bebidas Não Alcoólicas). Além disso, apresenta um amplo potencial de crescimento, em função do baixo volume de consumo per capita, quando comparado ao México e Estados Unidos, países que possuem os maiores consumos do mundo (SANTOS e AZEVEDO, 2014).

As embalagens de refrigerantes mais comuns encontradas no mercado são as de garrafa PET, lata e garrafa de vidro. Porém, devido ao potencial de crescimento que o mercado vem apresentando, um novo nicho de oferta da bebida conhecido como bebida em cápsula vem chamando a atenção das empresas do setor. A bebida em cápsula é definida como uma bebida pré-fabricada, na qual o conteúdo da cápsula é misturado com um volume definido de água com as características necessárias ao preparo da receita da bebida. O processo de preparo e a mistura da água com o conteúdo da cápsula se dá através de uma máquina doméstica, normalmente fabricada e vendida pela mesma empresa que produz a cápsula. Tal máquina vem despontando como produto inovador no setor de eletrodomésticos, por apresentar praticidade e conveniência no preparo das bebidas.

No Brasil, até o momento, só são conhecidas máquinas e cápsulas para as receitas de café e chá, como as das grandes marcas Nespresso e Três Corações. Já na Europa, é possível encontrar máquinas e cápsulas para a produção de refrigerantes, o que torna provável e imediato o desenvolvimento desses produtos no Brasil, dado ao grande mercado consumidor.

De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 1998), o refrigerante é definido como bebida não alcoólica saturada com dióxido de carbono, obtida pela dissolução, em água potável, de suco ou extrato vegetal e, adicionada de açúcar ou edulcorante. A qualidade desta bebida vai depender dos ingredientes que a compõem e que têm finalidades específicas, que deverá se enquadrar dentro de padrões estabelecidos pela indústria (PALHA, 2005). O nível de carbonatação e o teor de açúcar do refrigerante são exemplos de padrões que são

estabelecidos durante a fase de desenvolvimento da bebida, visando um produto de qualidade.

Porém, quando se considera a bebida em cápsula, a qual é preparada em casa pelo consumidor, existem alguns fatores não inerentes à indústria (máquina e cápsula) que podem comprometer a sua qualidade. As condições de estocagem da cápsula e a qualidade da água utilizada pela máquina são exemplos de alguns desses fatores.

Portanto, é de extrema importância que os profissionais da área de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) de empresas que estão ingressando nessa nova modalidade de negócio, estudem e compreendam esses fatores que estão fora do seu domínio, com a finalidade de entender o que pode provocar um desvio da qualidade desejada e, conseqüentemente, atuar para evitá-lo.

Este trabalho é um estudo que contribuiu para a implantação de um projeto de produto denominado “Máquina de Bebidas” e foi desenvolvido em parceria com a área de P&D de uma empresa multinacional de eletrodomésticos.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

- Estudar os efeitos de cinco fatores selecionados (temperatura do copo, pH da água, material do copo, temperatura da cápsula e inclinação do copo) sobre a qualidade do refrigerante em cápsula tipo cola, que faz parte do portfólio de bebidas produzidas pela máquina de bebidas em fase de desenvolvimento por uma empresa multinacional do segmento de eletrodomésticos.

2.2. Específicos

- Elaborar um Mapa de Produto para selecionar os cinco fatores estudados na avaliação de qualidade da bebida em cápsula;

- Avaliar os efeitos principais e os das interações duplas dos cinco fatores estudados sobre três parâmetros de qualidade (nível de carbonatação, temperatura e variação do teor de sólidos solúveis da bebida) e sobre a desejabilidade estabelecida ao produto;

- Comparar os resultados obtidos pelo método de Lenth (1989) e pela análise de desejabilidade aplicados para a escolha dos melhores tratamentos avaliados.

- Comparar os parâmetros de qualidade da bebida avaliados com base nos padrões estabelecidos pela empresa; e

- Suportar a análise de viabilidade técnica para a implantação desse projeto no que tange a ao preparo e interação do consumidor com o produto.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Produto: Máquina de bebidas em cápsula

O produto alvo desse estudo é uma máquina que apresenta uma plataforma de bebidas all-in-one, ou seja, diferentes tipos de bebidas sendo preparadas na mesma máquina, que faz bebidas a partir de cápsulas.

A proposta muda toda a experiência do consumidor com bebidas em casa: desde a compra, passando pelo armazenamento, até o consumo. Além de água purificada natural, gelada, com gás e quente, a máquina oferece, inicialmente, 24 tipos de bebidas em cápsulas, entre refrigerantes, sucos, néctares, chás quentes e gelados, cafés, chocolates, frapês, energéticos e coquetéis sem álcool. Ao se colocar a cápsula na máquina e apertando apenas um botão, o modo de preparo adequado é iniciado automaticamente, preparando cada bebida na medida e temperatura ideais, uma na sequência da outra.

3.2. Inovação e Desenvolvimento de Novos Produtos

A inovação, aliada ao desenvolvimento de novos produtos, vem sendo considerada como um meio importante para a criação e sustentação da competitividade industrial. A realização de esforços nessa área é um fator estratégico e necessário para continuar atuando no mercado. A implementação de novos produtos sustenta a expectativa das empresas em aumentarem a sua participação de mercado e de melhorar a sua lucratividade e rentabilidade (PARASURAMAN e COLBY, 2002; KOTLER, 2010).

O termo inovação pode ser entendido como a implementação de um produto (bem ou serviço) novo ou significativamente melhorado, ou um novo processo, ou um novo método de marketing, ou um novo método organizacional nas práticas de negócio, na organização do local de trabalho ou nas relações externas (GOVINDARAJAN e TRIMBLE, 2006). Já Todhunter (2014) define o termo

inovar como o ato de criar algo novo, tornar novo, renovar, introduzir novidade. Porém, a introdução de uma novidade no mercado não caracteriza uma inovação, é necessário que tal inovação seja percebida e aceita pelos clientes da empresa, sendo esta a grande diferença entre invenção e inovação.

O ciclo de vida dos produtos estabelece a importância da inovação, visto que todo produto tem um ciclo de vida (introdução, crescimento, maturidade e declínio). Portanto, infere-se que o processo de inovação e renovação deve ser repetido para novas oportunidades. Entretanto, para cada ciclo, as variáveis são diferentes, seja pela diferenciação dos concorrentes no mercado, seja pela mudança do próprio mercado ou pela existência de novas tecnologias (KOHL e ZONATTO, 2011).

Nesta perspectiva, a Gestão do Conhecimento é apontada como uma estratégia central para desenvolver a competitividade das empresas e de auxiliar o processo inovativo, pois além de discutir o investimento em pesquisa e desenvolvimento e os avanços da tecnologia gerencial relacionada à gestão do conhecimento, também são discutidas as tecnologias de informática e de telecomunicações, como também as teorias sobre criatividade e aprendizados individual e organizacional (TERRA, 2010).

Organizações que competem por inovação em produto, criam novos conceitos de bens para os clientes ou segmentos de mercado definidos, e tentam assegurar o sucesso através da contínua introdução de novos produtos no mercado, o que leva a uma diferenciação na competitividade e, portanto, a uma maior possibilidade de enfrentarem crises ou de prosperarem em seus negócios (MOURA et al., 2007).

Burgelman (2013) também compartilha da opinião dos autores citados anteriormente, e acredita que um dos determinantes decisivos da competitividade, é o desenvolvimento da tecnologia. Neste sentido, tem-se que a Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) de uma organização, podem levar a uma vantagem competitiva. Partindo desta premissa, observa-se que a criação de um setor de P&D pode proporcionar ganhos (ou benefícios) diretos à organização.

Segundo Jung (2004), P&D é a junção da pesquisa e do desenvolvimento, considerando-se que a pesquisa é utilizada como ferramenta, para a descoberta de

novos conhecimentos, enquanto que o desenvolvimento refere-se à aplicação através do processo dos novos conhecimentos para a obtenção de resultados práticos.

Govindarajan e Trimble (2006) afirmam que a P&D almeja a inovação tecnológica, ao utilizar-se das tecnologias disponíveis. A sua importância é tal que a inovação passa a ter relevância estratégica. Neste sentido, a P&D abrange várias atividades organizacionais e pode, analogamente à sua sigla, ser enquadrada em duas vertentes: a pesquisa e o desenvolvimento. A pesquisa por sua vez, pode ser classificada em dois tipos de atividades: pesquisas básica e aplicada. E o desenvolvimento pode ser ordenado em quatro tipos de atividade: desenvolvimento de novo produto, adaptação e extensão do produto, engenharia de apoio ao produto e engenharia de processo (KHUARANA, 2006).

Contudo, novos produtos podem falhar e o risco de insucesso de uma inovação é tão grande quanto a sua recompensa. O fator-chave para as inovações de sucesso reside no desenvolvimento de arranjos organizacionais mais apropriados para lidar com ideias de novos produtos, no desenvolvimento de recursos e procedimentos de decisão em cada estágio do desenvolvimento de novos produtos (QUADROS, 2008).

Segundo Kotler (2010), o processo de desenvolvimento de novos produtos consiste de oito estágios: geração de ideias, seleção de ideias, desenvolvimento e teste do conceito, desenvolvimento da estratégia de marketing, análise do negócio, desenvolvimento do produto, teste de mercado e comercialização. O propósito de cada estágio é decidir se a ideia deve continuar a ser desenvolvida ou deve ser rejeitada. A empresa deve trabalhar no sentido de minimizar a chance de uma má ideia ser aprovada e uma boa ideia ser rejeitada.

Portanto, fica evidente a importância da área de P&D para uma empresa que deseja ser reconhecida no mercado, por lançar produtos inovadores e com alto valor agregado para os seus consumidores. É possível deduzir também que os profissionais que trabalham com P&D devem apresentar conhecimentos técnicos acerca do negócio da empresa, gestão de produto, gestão da qualidade, além de possuir habilidades para interagir com praticamente todas as demais áreas da empresa (FERNANDINO e OLIVEIRA, 2010).

3.3. Qualidade de Produto

A qualidade tornou-se um dos mais importantes fatores de decisão dos consumidores na seleção de produtos e serviços que competem entre si. O fenômeno é geral, independente do fato de o consumidor ser um indivíduo, uma organização industrial ou uma loja de varejo. Conseqüentemente, compreender e melhorar a qualidade são fatores-chaves que conduzem ao sucesso, crescimento e a uma melhor posição da competitividade de um negócio. A melhor qualidade e o emprego bem-sucedido da qualidade como parte integrante da estratégia geral da empresa produzem retorno substancial sobre o investimento (MONTGOMERY, 2004).

Pode-se definir qualidade de várias maneiras. A maioria das pessoas tem uma compreensão conceitual de qualidade como de algo relacionado a uma ou mais características desejáveis que um produto ou serviço deva ter. Assim, a definição tradicional de qualidade baseia-se no ponto de vista de que os produtos e serviços devem apresentar as especificações exigidas por aqueles que os usam (PALADINI, 2008).

Entretanto, na literatura, pode-se observar a existência de três grandes vertentes que embasam a definição de qualidade: a qualidade como adequação ao uso; a qualidade enquanto conformidade com especificações; e a qualidade associada às perdas que um produto impõe à sociedade após a sua venda.

A ideia de qualidade como adequação ao uso significa, em outras palavras, que a qualidade é o grau com que o produto atende satisfatoriamente às necessidades do usuário durante o uso, ou seja, a qualidade passa a ser uma propriedade da relação do objeto com o usuário, descrevendo a capacidade de um dado objeto satisfazer a uma dada necessidade. A segunda vertente supõe que somente é possível pensar em qualidade de produto se houver um conjunto de especificações deste produto previamente definidas. Portanto, a qualidade seria avaliada pelo grau de conformidade do produto real com as suas especificações de projeto. A terceira vertente, apresentada por Taguchi (1986), aborda a questão pelo lado da não qualidade (ou da falta de qualidade). A qualidade é definida, neste caso, como sendo a perda, em valores monetários, que um produto causa à sociedade após a sua venda.

Quanto maior a perda associada ao produto, menor a sua qualidade (ALMEIDA e TOLEDO, 1991).

Contudo, percebe-se que a qualidade deve ser pensada em todas as fases do ciclo de vida do produto, desde a concepção até o pós venda, de forma a garantir o sucesso do produto. Percebe-se também que as próprias características da avaliação da qualidade fornecem justificativas práticas para desenvolvê-la. De fato, produzir novos produtos e melhorar processos com qualidade, é uma atividade que envolve sempre grande número de variáveis, o que por si só requer análise permanente do processo e do produto. Além disso, trata-se de uma ação essencialmente dinâmica, ou seja, há sempre elementos novos que surgem no ambiente interno (inovação tecnológica, por exemplo) ou externo (mudança de hábitos de consumo, por exemplo) (TOLEDO, 1994).

A importância da avaliação da qualidade fica mais evidente quando se percebe que variados conceitos de Gestão da Qualidade investem nessa direção, isto é, consideram que a ação da avaliação é, em muitos casos, a própria razão de ser do processo gerencial da qualidade (PALADINI, 2008).

3.4. Metodologia Seis Sigma

Com um mercado altamente competitivo, oferecer produtos e serviços de alta qualidade não é mais um diferencial, mas sim um pré-requisito para a sobrevivência das organizações (PINTO et al., 2006). Em resposta, as empresas vêm buscando melhorar os seus produtos e processos, para obterem maiores vantagens competitivas e que atendam às expectativas de seus clientes e acionistas. Para desenvolver os produtos e melhorar os processos nas empresas, existem várias metodologias. Alinhada ao planejamento estratégico e à melhoria contínua, a metodologia Seis Sigma tem sido utilizada por grandes empresas para agregar mais valor aos seus negócios (GONÇALVES, 2009).

Segundo Rotondaro (2002), Seis Sigma é uma filosofia de trabalho para alcançar, maximizar e manter o sucesso comercial, por meio da compreensão das necessidades do cliente e do produto. Pode-se definir também, como uma

metodologia estruturada que incrementa a qualidade por meio da melhoria contínua dos processos, produtos e serviços. Falar em Seis Sigma significa reduzir a variação em produtos e serviços que são entregues aos clientes. Para Rodrigues (2010), o Seis Sigma utiliza ferramentas, técnicas e análise estatística para medir e melhorar o desempenho das organizações, por meio da identificação e eliminação de defeitos e desperdícios, e da agregação de valor ao produto ou processo, aumentando assim a satisfação do cliente com o produto e reduzindo os custos do processo.

Sigma (σ) é a décima oitava letra do alfabeto grego, sendo usada pela estatística como medida da dispersão em torno da média (desvio-padrão) gerada por um determinado processo. Já o termo seis indica o número de desvios-padrão que um processo deve conter entre a sua média e os requisitos do cliente para ser considerado um processo seis sigma (CHOWDHURY, 2001). No gráfico ilustrado na Figura 3.1, observa-se que a média do processo ($\mu = 0$) está distanciada em 6σ ($\sigma = 1$) dos limites inferior (LIE = -6) e superior de especificação (LSE = 6).

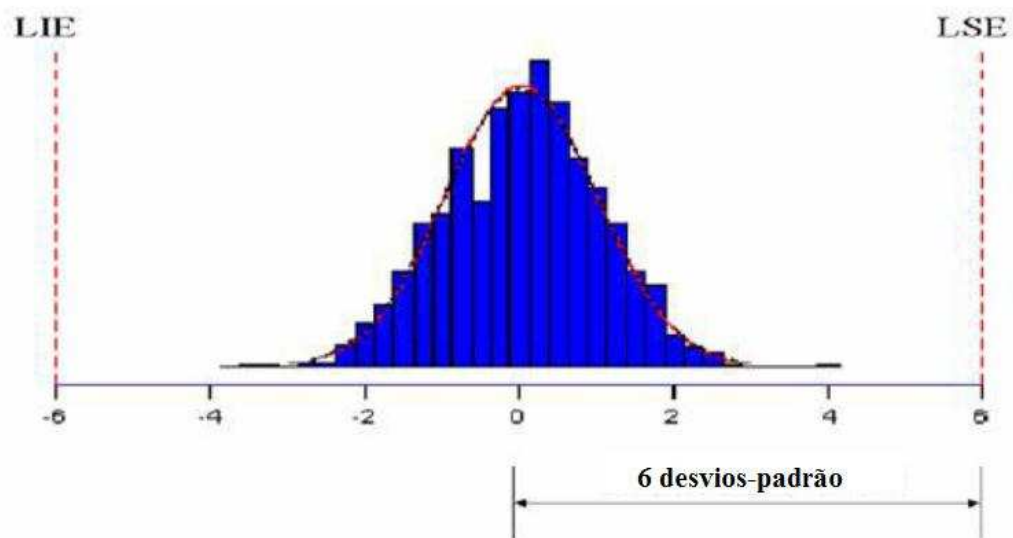


Figura 3.1 – O processo seis sigma deve fornecer no mínimo, 6 desvios-padrão entre a média e os limites de especificação.

Fonte: Oliveira, 2003.

De acordo com Werkema (2002), se o valor do desvio-padrão de um processo é elevado, há pouca uniformidade do processo, com muita variação entre os resultados gerados; se o valor do desvio-padrão é baixo, há muita igualdade no processo com

pouca variação entre os resultados obtidos. Quanto menor for o desvio-padrão, melhor será o processo.

O Seis Sigma surgiu na empresa Motorola, em meados da década de 80, e foi desenvolvido pelo engenheiro Bill Smith que estudou a correlação entre as falhas dos produtos em processos de manufatura com as falhas para o cliente. Os cientistas da companhia foram construindo durante quase 10 anos a metodologia, utilizando técnicas estatísticas avançadas e integradas a outras metodologias existentes para a análise de processos e produtos (WERNKE, 2011). A estratégia auxiliou a Motorola no alinhamento dos processos às necessidades do cliente, na mensuração e aprimoramento do desempenho dos processos críticos e na documentação desses, levando-a a triplicar a produtividade e a obter economias da ordem de 11 bilhões de dólares até o ano de 1997 (GONÇALVES, 2009).

Em termos estatísticos, o foco do Seis Sigma é reduzir a variabilidade dos processos e atingir um nível de qualidade de até 3,4 defeitos por milhão de oportunidades (DPMO), conforme mostra a Figura 3.2, em que LSE é o limite superior de especificação e LIE é o limite inferior de especificação.

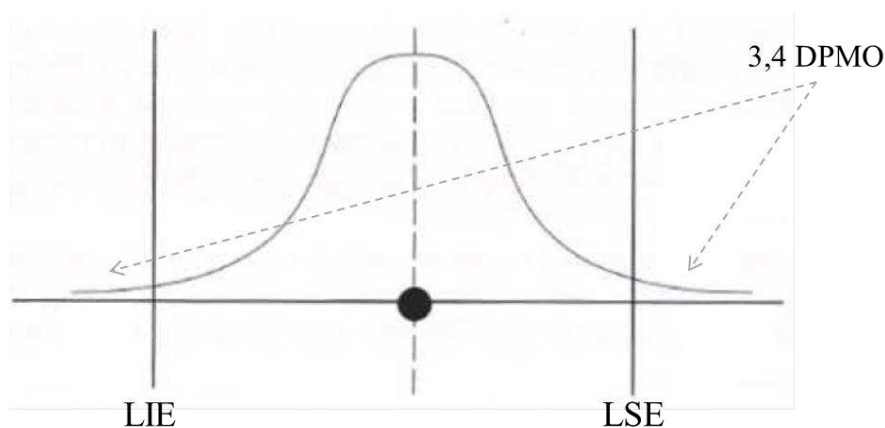


Figura 3.2 – Curva normal representativa do processo.

Fonte: Rotondaro, 2002.

Ter um processo Seis Sigma significa ter uma baixíssima variação no resultado de processos, produtos ou serviços, capazes de apresentarem apenas 3,4 defeitos por milhão de produtos produzidos, ou seja, uma eficiência de 99,99966%, como pode

ser verificada na Tabela 3.1. Portanto, seria equivalente dizer que o Seis Sigma avalia a capacidade do processo em trabalhar praticamente sem falhas.

Tabela 3.1 – Interpretação da escala sigma

Taxa de Acerto (%)	Taxa de Erro (%)	Defeitos por Milhão de Oportunidades (DPMO)	Escala Sigma
30,9	69,1	691462	1
69,1	30,9	308538	2
93,3	6,7	66807	3
99,38	0,62	6210	4
99,977	0,023	233	5
99,99966	0,000034	3,4	6

Fonte: Werkema, 2002.

A filosofia seis Sigma pode ser resumida como uma metodologia estruturada por um conjunto de ferramentas estatísticas focadas na contínua diminuição da variação dos processos, gerando resultados financeiros para a empresa com respaldo e gerenciamento dos níveis mais altos da estrutura hierárquica da organização (WERKEMA, 2002).

Dentre as várias ferramentas utilizadas no Seis Sigma, pode-se citar três delas que foram utilizadas na metodologia deste trabalho: mapa de produto, planejamento de experimentos e diagrama de relação de fatores.

3.5. Mapa de Produto

O mapa de produto é uma ferramenta que permite visualizar como componentes e sub-montagens interagem, facilitando a descrição funcional de um produto, de modo a auxiliar no entendimento das relações existentes entre os seus componentes e a fornecer informações básicas para a sua utilização (WERKEMA, 2002).

O mapa de produto também é uma ferramenta de comunicação e entendimento universal para todas as áreas de uma empresa (design, engenharia, manufatura, laboratórios, fornecedores, etc.). É caracterizado como um documento “vivo”, no

qual se registra o que se sabe sobre o projeto do produto. Portanto, o mapa deve ser atualizado à medida em que novos conhecimentos são gerados.

Além de gerar informações e teorias sobre o produto, com essa ferramenta é possível determinar as variáveis e parâmetros de controle do produto, identificar parâmetros críticos e assim determinar onde focar recursos, documentar as funções de cada componente do produto, bem como identificar componentes que não agregam valores (WERNKE, 2011).

Na elaboração de um mapa de produto é feito um esboço ou um desenho dos componentes (ou características dos componentes) que estão contidos no produto ou subsistema. Os desenhos são ligados como um diagrama de blocos, de modo a mostrar como os componentes fazem interface uns com os outros. Quanto maior o detalhe, maior a possibilidade de identificar potenciais de estudo ou melhoria e elaborar boas perguntas para serem respondidas (TAVARES et al., 2013).

Após o esboço, são definidos os objetivos principais de estudo para o produto (representado por Y's maiúsculos). Perguntas como “o que será medido?” e “o que o produto irá entregar ao consumidor?” auxiliam nessa definição. Na sequência são identificadas as funções que cada componente tem e que podem afetar o produto em termos dos Y's definidos (tais funções são representadas por y's minúsculos). Por último são definidos os fatores (x's minúsculos) que afetam as funções y's definidas para cada componente. Esses fatores são tipicamente características individuais do produto. Os fatores x's são classificados em controlável (C), fator que pode ser manipulado, ou ruído (N), fator não manipulado ou inerente ao produto/processo, que pode ainda ser classificado como crítico (*) ou não, de acordo com o grau de importância atribuído pela equipe de elaboração do mapa (TAVARES et al., 2013).

3.6. Planejamento de Experimentos

O planejamento de experimentos é utilizado para tomar conhecimento de algo que ocorreu, ocorre ou possa vir a ocorrer em certo produto ou processo de um sistema (WERNKE, 2011). Segundo Montgomery (2004), um experimento planejado é um teste, ou uma série de testes, no qual são feitas mudanças propositalmente

nas variáveis de entrada de um processo, de modo a possibilitar observar e identificar mudanças correspondentes na resposta de saída.

Um dos problemas encontrados pelas empresas ao realizar experimentos é estudar os efeitos e interações dos fatores que têm influência direta na característica de qualidade, visto que o número de testes requeridos para a experimentação tende a aumentar na mesma proporção que a quantidade de fatores aumenta, podendo tornar os experimentos inviáveis porque os custos e o tempo de execução se elevam (RAMM, 2007).

A utilização do planejamento de experimentos permite melhorar o desempenho do produto ou processo, acentua a confiabilidade dos produtos em campo, diminui a sensibilidade dos elementos que não podem ser controlados (ruídos) e diminui custos, tempo de desenvolvimento e de fabricação dos produtos (MONTGOMERY, 2004).

A ferramenta delineamento de experimentos ou Design of Experiments (DOE) é extremamente poderosa para verificar quais são as principais fontes de variação em um experimento ou processo e auxiliar na determinação do melhor tratamento ou ajuste do processo (MOEN, 1999). O DOE é comumente aplicado quando se deseja avaliar a influência de dois ou mais fatores em uma ou mais propriedades, possibilitando que sejam avaliadas as interações entre os fatores, ou seja, que possam ser descobertas combinações dos fatores diferentes das utilizadas rotineiramente, mas que sejam capazes de originar as mesmas propriedades (ou melhorá-las) e de reduzir o tempo ou os custos envolvidos. Em último caso, quando não é alcançado o objetivo desejado, tem-se uma melhor compreensão da influência de cada fator avaliado na propriedade estudada (OLIVEIRA, 2003).

3.6.1. Experimentos Fatoriais Completos e Fracionados

A necessidade de melhorar um processo ou de desenvolver um produto novo requer um procedimento experimental para avaliar os efeitos que suas variáveis independentes ou fatores exercem sobre as respostas avaliadas. Portanto, é normal

os pesquisadores listarem, no início, um grande número de fatores a serem analisados (RODRIGUES e IEMMA, 2005).

Embora o número de fatores a serem estudados nos estágios iniciais de um projeto possa ser grande, espera-se que poucos sejam realmente significativos. Nesse contexto, a utilização de delineamentos para a triagem de fatores se faz necessária, com a finalidade de identificar os mais importantes entre um grande número que pode afetar uma resposta em particular (COTTER, 1979; ACODEDJI, 2003).

Os delineamentos para a triagem de fatores mais comuns são os fatoriais completos e fracionados, que são caracterizados por experimentos nos quais são avaliados k fatores controláveis de interesse com dois níveis, codificados por baixo (-) e alto (+), sendo estes qualitativos ou quantitativos. Se forem avaliadas todas as combinações entre os dois níveis dos k fatores controláveis de interesse, ou seja, se forem avaliados todos os tratamentos, tem-se o fatorial completo. Caso contrário, se algumas combinações forem descartadas do experimento, tem-se o fatorial fracionado (RIBEIRO JÚNIOR, 2012).

Realizar experimentos fatoriais completos significa estimar os efeitos dos fatores e os efeitos das interações entre eles com igual precisão. Segundo Montgomery (2009), interação é a falha de um fator em produzir o mesmo efeito na resposta, sob diferentes níveis do outro fator. Montgomery e Runger (2009) afirmam que há interação quando a diferença na resposta entre os níveis de um fator não é a mesma em todos os níveis dos outros fatores. Recomenda-se a utilização dos fatoriais completos quando se investiga um pequeno número de fatores, digamos até cinco, visto que quanto maior for o número de fatores, maior será a quantidade de tratamentos.

Se, por exemplo, fosse de interesse avaliar um fatorial completo 2^5 , seria necessário ensaiar 32 tratamentos. Neste caso, somente cinco graus de liberdade correspondem aos efeitos principais e 10 graus de liberdade aos das interações de segunda ordem. Dezesesseis dos 31 graus de liberdade são usados para estimar as interações de ordens mais altas (terceira, quarta e quinta ordens). Caso não haja interesse nessas interações, normalmente em estágios iniciais da experimentação, um fatorial fracionado envolvendo menos tratamentos que um completo poderá ser

usado para obter as estimativas dos efeitos principais e das interações de segunda ordem (RIBEIRO JÚNIOR, 2012).

Em geral, um planejamento fatorial completo 2^k que pode ser reduzido em uma fração $\frac{1}{2^p}$ é chamado de planejamento fatorial fracionado 2^{k-p} . Na Tabela 3.2 é mostrado o número de tratamentos dos fatoriais completo e fracionado, para diferentes valores de p, sendo p a ordem de redução do fatorial completo.

Tabela 3.2 – Número de tratamentos para k fatores com dois níveis

k	Fatorial 2^k	Fatorial 2^{k-1}	Fatorial 2^{k-2}	Fatorial 2^{k-3}	Fatorial 2^{k-4}
2	4	2	1	-	-
3	8	4	2	1	-
4	16	8	4	2	1
5	32	16	8	4	2
6	64	32	16	8	4
7	128	64	32	16	8
8	256	128	64	32	16
9	512	256	128	64	32
10	1.024	512	256	128	64

Fonte: Ribeiro Júnior, 2012.

Quando se pensa num fatorial fracionado, deve-se pensar, a priori, no seu planejamento. Segundo Jiju (2003), a resolução de um fatorial fracionado é uma característica do aliasing ou confundimento padrão do planejamento. Portanto, a resolução será um instrumento fundamental para determinar qual planejamento fatorial fracionado será a melhor escolha para um determinado experimento.

Se o interesse for somente pelos efeitos principais, utiliza-se a resolução III, situação na qual os efeitos principais não estarão confundidos entre si, mas com as interações duplas. Porém, se o interesse for estudar os efeitos principais e algumas interações duplas, utiliza-se a resolução IV, na qual os efeitos principais e de algumas interações de segunda ordem não estarão confundidos entre si, mas com as interações de ordens maiores. Já na resolução V, é possível estudar os efeitos principais e de todas as interações duplas, que não estarão confundidos entre si, mas com as interações de ordens maiores.

Para definir os tratamentos que serão ensaiados no fatorial fracionado e, conseqüentemente, definir a resolução do mesmo, é necessário conhecer a relação de definição (I), vetor que contém somente valores de uma unidade, positivos ou negativos, obtidos pelo produto dos efeitos que constituem os geradores do fatorial, com as escolhas de + ou de -, respectivamente. Se os p geradores escolhidos forem positivos, então os tratamentos ensaiados serão aqueles com sinais positivos para I. Caso contrário, se forem negativos, os tratamentos serão aqueles com sinais negativos para I (RIBEIRO JÚNIOR, 2012). Na Tabela 3.3 são apresentados os geradores e as relações de definição de alguns fatoriais fracionados.

Tabela 3.3 – Geradores e relações de definição de alguns fatoriais fracionados 2^{k-p}

k	Fatorial	Combinações	Geradores	Relações de definição
3	2_{III}^{3-1}	4	$C = \pm AB$	$I = \pm ABC$
4	2_{IV}^{4-1}	8	$D = \pm ABC$	$I = \pm ABCD$
5	2_{III}^{5-2}	8	$D = \pm AB$	$I_1 = \pm ABD$
			$E = \pm AC$	$I_2 = \pm ACE$
	2_V^{5-1}	16	$E = \pm ABCD$	$I = \pm ABCDE$
6	2_{III}^{6-3}	8	$D = \pm AB$	$I_1 = \pm ABD$
			$E = \pm AC$	$I_2 = \pm ACE$
			$F = \pm BC$	$I_3 = \pm BCF$
	2_{IV}^{6-2}	16	$E = \pm ABC$	$I_1 = \pm ABCE$
			$F = \pm BCD$	$I_2 = \pm BCDF$
7	2_{III}^{7-4}	8	$D = \pm AB$	$I_1 = \pm ABD$
			$E = \pm AC$	$I_2 = \pm ACE$
			$F = \pm BC$	$I_3 = \pm BCF$
			$G = \pm ABC$	$I_4 = \pm ABCG$
	2_{IV}^{7-3}	16	$E = \pm ABC$	$I_1 = \pm ABCE$
			$F = \pm BCD$	$I_2 = \pm BCDF$
			$G = \pm ACD$	$I_3 = \pm ACDG$

Fonte: Ribeiro Júnior, 2012.

Em um fatorial completo 2^k ou fracionado 2^{k-p} , estudam-se principalmente os efeitos principais dos fatores e os das interações duplas entre eles.

O efeito principal de um fator controlável de interesse é uma medida da variação que ocorre na variável-resposta Y correspondente às variações nos níveis desse fator com base nas suas médias marginais, ou seja, o quanto Y aumenta ou diminui, em média, quando se passa do nível baixo (-) para o alto (+).

O efeito da interação dupla entre dois fatores controláveis de interesse representa o quanto Y aumenta ou diminui, em média, quando se passa das combinações dos níveis iguais (-- e ++) para as combinações dos níveis diferentes (-+ e +-) entre esses fatores.

Existem vários métodos para avaliar a significância dos efeitos estimados em um experimento fatorial. A escolha de um ou mais métodos depende de alguns critérios adotados pelo pesquisador, como o tipo do fatorial (completo ou fracionado) e se o experimento teve repetições ou apenas observações individuais por tratamento.

No caso de um fatorial com observações individuais para os tratamentos, a significância pode ser verificada pelo método de Lenth (1989), que apresenta os resultados por meio dos gráficos de probabilidade normal e de Pareto.

No gráfico de probabilidade normal das estimativas dos efeitos, se nenhum deles for significativo, as estimativas se comportarão como uma amostra aleatória extraída de uma distribuição normal com média zero, e os efeitos plotados se localizarão aproximadamente ao longo de uma reta. Os efeitos que não se localizarem ao redor da reta, serão de fatores significantes (MONTGOMERY, 2004).

A utilização do gráfico de probabilidade normal para identificar os efeitos possivelmente significativos em um estudo experimental que envolve um planejamento fatorial de tratamentos foi proposta por Daniel (1959). Esta ideia é bastante utilizada por ser simples e conseguir apontar a direção correta dos efeitos em grande parte dos experimentos. A aplicação eficaz desse gráfico depende do fato das estimativas dos efeitos terem a mesma variância, estando fundamentada no princípio da esparsidade dos efeitos. Segundo esse princípio, espera-se que apenas uma pequena fração dos contrastes deverá ser significativa dentre todos aqueles envolvidos no estudo (MELO, 2007).

Sejam $\hat{e}_1, \hat{e}_2, \dots, \hat{e}_n$ os n efeitos estimados. Sendo $\hat{e}_{(i)}$ o i -ésimo dos n efeitos ordenados, $\hat{e}_{(1)} \leq \hat{e}_{(2)} \leq \dots \leq \hat{e}_{(n)}$, então o gráfico de probabilidade normal pode ser obtido dispondo-se os pontos em um gráfico cujas coordenadas são dadas por:

$$(\hat{e}_{(i)}, \Phi^{-1} \left[\frac{i-0,5}{n} \right]), \quad (\text{equação 1})$$

em que $\Phi(\cdot)$ é a função de distribuição acumulada da distribuição normal padrão.

O método de Lenth (1989) também está baseado no princípio da esparsidade dos efeitos e consiste em obter uma estimativa para o erro-padrão dos efeitos estimados. Sejam e_1, e_2, \dots, e_n os efeitos de interesse e $\hat{e}_1, \hat{e}_2, \dots, \hat{e}_n$ as suas estimativas correspondentes. Assumindo que os $\hat{e}_{(i)}$ são realizações independentes de uma variável aleatória normal com média zero e variância σ^2 , define-se o pseudo-erro-padrão (PSE) das estimativas dos efeitos como sendo:

$$PSE = 1,5 \times Md |\hat{e}_j|, \text{ em que:} \quad (\text{equação 2})$$

$$|\hat{e}_j| = |\hat{e}_i| < 2,5s_0; \quad (\text{equação 3})$$

$$s_0 = 1,5 \times Md |\hat{e}_i|; \quad (\text{equação 4})$$

$|\hat{e}_i|$ = vetor que contém todas as estimativas absolutas dos efeitos a serem testados ($i=1,2,\dots,n$);

Md = mediana.

É importante notar que as equações 2 e 4 são bastante similares. A pequena diferença existente entre elas está no fato de que na equação 2, a mediana é mais restrita, ou seja, o valor mediano é obtido após a exclusão de efeitos claramente ativos. Portanto, o PSE superestima menos o σ do que o s_0 e, conseqüentemente, deve ser o naturalmente utilizado (DANIEL, 2008).

Define-se então uma margem de erro (ME) para os $\hat{e}_{(i)}$, dada por:

$$ME = t_{(1-\frac{\alpha}{2}; d)} \times PSE, \quad (\text{equação 5})$$

em que $t_{(1-\frac{\alpha}{2}; d)}$ é o quantil da distribuição t com d graus de liberdade. Após a realização de estudos de simulação, a sugestão dado por Lenth (1989) foi utilizar

$d = n/3$. O intervalo dado por $[\hat{e}_{(i)} \pm ME]$ pode ser considerado um intervalo de confiança para e_i com, aproximadamente, $100(1 - \alpha)\%$ de confiança.

Com a execução dos cálculos acima, o método de Lenth (1989) pode ser mostrado em um gráfico de Pareto dos efeitos, adicionando-se como referência, linhas relativas a $\pm ME$. Um efeito estimado será considerado significativo se a sua barra no gráfico exceder uma das linhas referentes a margem de erro e será considerado não significativo caso contrário. Se $|\hat{e}_i| \geq ME$, então rejeita-se a hipótese $H_0: e_i = 0$.

3.6.2. Diagrama de Relação de Fatores

O diagrama de relação de fatores (Factor Relationship of Diagram – FRD) é uma ferramenta gráfica para representar esquematicamente um plano experimental que retrata as relações entre as fontes potenciais de variação no experimento. A randomização ajuda a reduzir a probabilidade de fatores desconhecidos se misturarem com um ou mais dos fatores manipulados durante o experimento (HILD, 2008).

O FRD mostra as relações entre os fatores manipulados e não manipulados. Estes fatores não manipulados podem ser vistos como fontes de variação, cujo impacto contribui para decisões incorretas quando um experimento restrito é analisado como um experimento completamente randomizado. Da mesma forma, as fontes de variação não manipuladas podem contribuir para a não repetibilidade dos resultados experimentais (SANDERS e COLEMAN, 2006). Na Figura 3.3 é mostrado o esquema de um FRD para um experimento hipotético.

As regiões em vermelho assinaladas do FRD referem-se aos fatores não manipulados durante o experimento e as regiões em preto referem-se aos fatores manipulados. As linhas horizontais na cor verde indicam a divisão dos materiais experimentais presentes no FRD. Esta linha é definida como a linha de restrição, que destaca a estrutura de erro, auxilia no entendimento de como os graus de liberdade estão disponíveis em cada nível e, desta forma, ilustra os testes de significância estatísticos apropriados (RAMM, 2007).

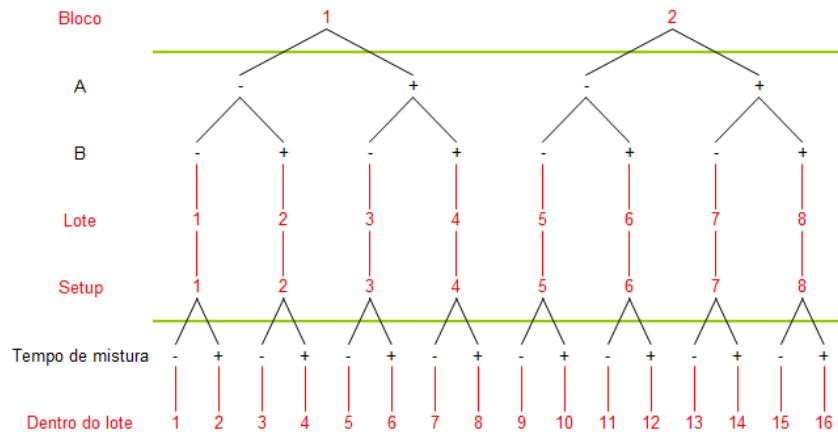


Figura 3.3 – Exemplo de um diagrama de relação de fatores.

Fonte: WERNKE (2011).

3.7. Desejabilidade

Em alguns experimentos, como por exemplo, num problema geral de otimização, com várias respostas Y_1, Y_2, \dots, Y_m , para as quais são construídos modelos baseados no mesmo conjunto de fatores codificados X_1, X_2, \dots, X_n , será de interesse descobrir os níveis dos fatores que produzirão o conjunto de respostas mais satisfatório. A metodologia de otimização simultânea proposta por Derringer e Suich (1980) pode ser bastante útil quando aplicada com o devido cuidado.

O método de Derringer e Suich (1980) se baseia na definição de uma função de desejabilidade (d) para cada resposta, com valores restritos ao intervalo $[0, 1]$. Zero significa um valor inaceitável, e um o valor mais desejável. Após as funções de desejabilidade terem sido especificadas para todas as respostas, uma desejabilidade global (D) é obtida pela média geométrica das m desejabilidades individuais:

$$D = \sqrt[m]{d_1 d_2 \dots d_m} . \quad (\text{equação 6})$$

Assim, a otimização simultânea das várias respostas se reduz à maximização de um único valor, a desejabilidade global, ou seja, o objetivo passa a ser descobrir os níveis dos fatores que maximizam o valor D .

Uma vantagem desta metodologia é que a utilização da média geométrica faz com que a desejabilidade global se anule sempre que uma das respostas tiver um valor inaceitável, não importando o quão satisfatórios sejam os valores das outras respostas (BARROS NETO et al., 2007).

A equação da função de desejabilidade de uma dada resposta dependerá de como o problema foi formulado. Para o caso em que a resposta tenha um valor alvo ótimo A, situado em algum ponto dentro de uma faixa de aceitação com limites inferior e superior (LI e LS), a função de desejabilidade é definida por:

$$d = \left(\frac{\hat{y} - LI}{A - LI} \right)^s, \text{ para } LI \leq \hat{y} \leq A ; \quad (\text{equação 7})$$

$$d = \left(\frac{\hat{y} - LS}{A - LS} \right)^t, \text{ para } A \leq \hat{y} \leq LS ; e \quad (\text{equação 8})$$

$$d = 0, \text{ para } \hat{y} \text{ fora do intervalo } (LI, LS). \quad (\text{equação 9})$$

O valor d está restrito ao intervalo [0,1], portanto desejabilidade igual a um só é obtida se a resposta coincide exatamente com o valor alvo A, o que torna os numeradores das frações iguais aos respectivos denominadores. À medida que o valor \hat{y} se afasta do alvo A, o valor da desejabilidade cairá até alcançar o valor zero, quando um dos limites da faixa de aceitação for alcançado.

A taxa de variação da desejabilidade com a resposta estimada pelo modelo é definida pelos valores dos expoentes s e t. Fazendo-os variar, a taxa poderá acelerar ou retardar, atribuindo diferentes desejabilidades aos diversos níveis da resposta. Valores altos dos dois expoentes (por exemplo, 10) farão com que a desejabilidade caia rapidamente, tornando-se muito baixa a menos que \hat{y} esteja muito perto do alvo. Valores baixos, por outro lado, permitirão que a resposta tenha uma variação mais ampla sem que a desejabilidade seja muito diminuída. A escolha vai depender da prioridade ou da importância relativa desejada para cada resposta. Além disso, a taxa de queda da desejabilidade não precisa ser simétrica em torno do alvo. Os valores de s e t podem ser diferentes. Por exemplo, se a resposta for a quantidade de cerveja contida numa garrafa, o fabricante certamente preferirá pecar pelo excesso do que arriscar sua reputação pondo à venda garrafas com um nível inferior ao normal. Neste caso, deve-se escolher $t < s$.

Em muitos casos, não se tem um valor-alvo e sim um limite unilateral, acima ou abaixo do qual se deseja que a resposta fique. Nestes casos é necessário alterar uma parte da definição de desejabilidade, fazendo coincidir o valor alvo com um dos extremos e considerando $d=1$ a partir daí.

Se o objetivo é manter a resposta abaixo do limite inferior LI, a equação 7 deve ser descartada e $d = 1$ deve ser considerado para $\hat{y} \leq LI$.

Se, ao contrário, o objetivo é manter a resposta acima do limite superior LS, descarta-se a equação 8 e considera-se $d = 1$ para qualquer $\hat{y} \geq LS$.

O uso da metodologia de Derringer e Suich (1980) para otimização de várias respostas requer certo cuidado. A aplicação mecânica do algoritmo de busca poderá levar a um conjunto de condições matematicamente otimizadas, porém sem viabilidade prática, talvez porque algumas condições de contorno tenham sido relaxadas no início da investigação, ou porque os expoentes não foram escolhidos da forma mais adequada. Às vezes, só se percebe que o problema está mal formulado quando se descobre que as condições experimentais absurdas são identificadas como ótimas. Uma sugestão é carregar o algoritmo de otimização com várias escolhas diferentes para os expoentes s e t . Assim, é possível chegar a vários conjuntos e condições otimizadas, dentre os quais poderá ser selecionado o que mais for conveniente. A própria variedade desses conjuntos dará uma ideia da robustez das condições experimentais definidas, sendo que se elas forem relativamente insensíveis à variação dos expoentes s e t , isso será um bom sinal (BARROS NETO et al., 2007).

Após descobrir um conjunto de condições que maximize a desejabilidade global D , recomenda-se examinar o comportamento individual de cada uma das respostas para garantir que todas elas estão realmente em regiões aceitáveis, com todas as restrições satisfeitas. Também é sugerido fazer alguns experimentos confirmatórios nas condições selecionadas e, se possível, no seu contorno (BARROS NETO et al., 2007).

4. MATERIAL E MÉTODOS

O planejamento e a execução desse estudo foram realizados em uma empresa multinacional de eletrodomésticos, situada na cidade de Joinville em Santa Catarina, durante os meses de janeiro e fevereiro de 2014.

Para selecionar os fatores que foram avaliados através de um experimento fatorial fracionado, utilizou-se o mapa de produto, o qual foi elaborado por uma equipe multidisciplinar da área de P&D dessa empresa. Após a elaboração do mapa, foram selecionados os cinco fatores: temperatura do copo, pH da água, material do copo, temperatura da cápsula e inclinação do copo. Tais fatores foram considerados os mais importantes para as avaliações iniciais por serem fatores não controláveis pela fabricante do produto.

Na Figura 4.1 está representada a elaboração do mapa de produto.

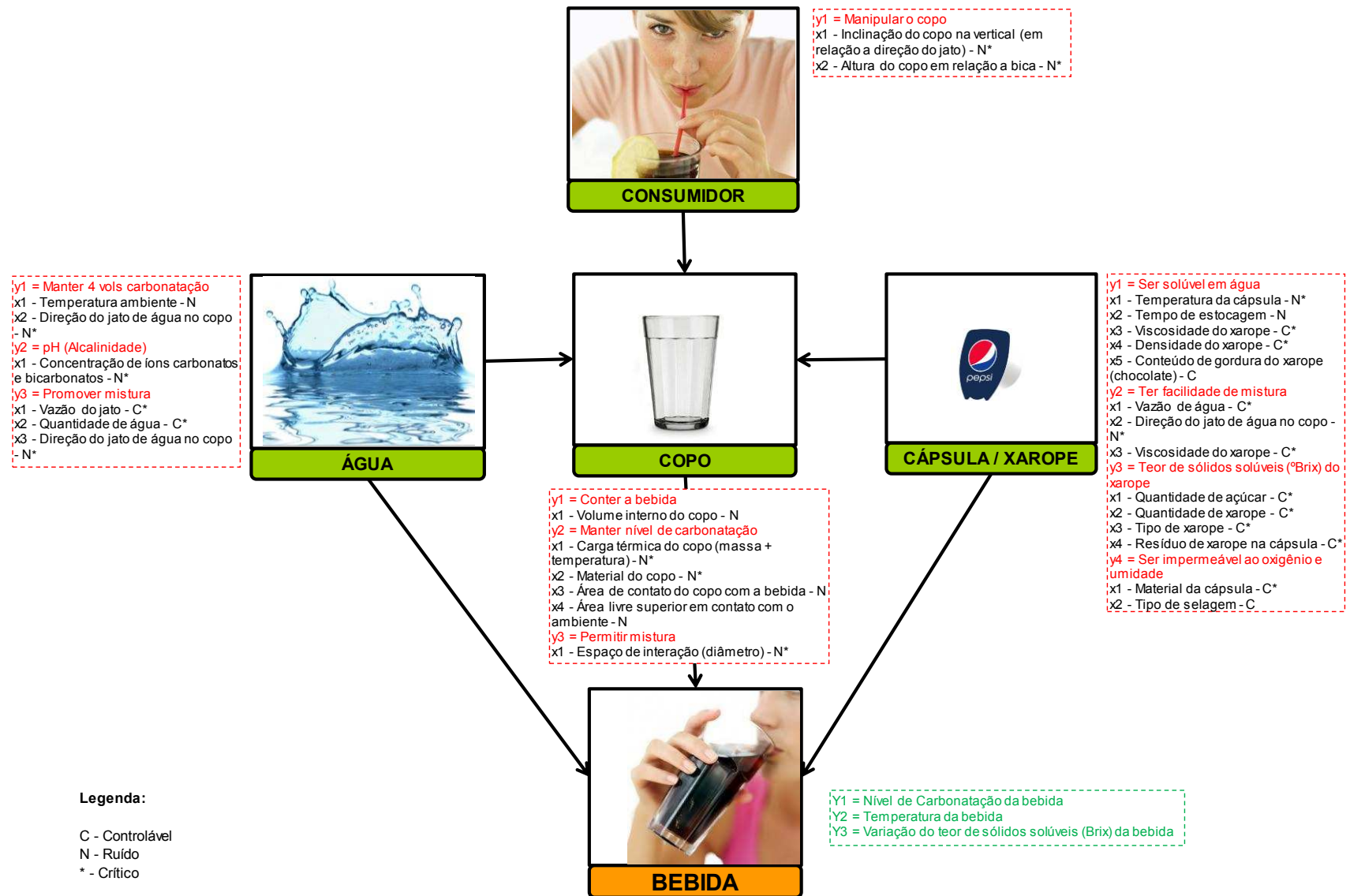


Figura 4.1 – Mapa de produto elaborado para a seleção dos fatores avaliados no experimento fatorial fracionado.

4.1. Variáveis de Entrada

Foi realizado um experimento fatorial fracionado 2^{5-1} sem repetição de acordo com o delineamento inteiramente casualizado (DIC), para os fatores selecionados pelo mapa de produto e os seus respectivos níveis (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Fatores e níveis estudados no experimento

Fatores	Nível	
	Baixo (-)	Alto (+)
A - Temperatura do copo	18 °C	32 °C
B - pH da água	6	9,5
C - Material do copo	Plástico	Vidro
D - Temperatura da cápsula	5 °C	32 °C
E - Inclinação do copo	Ausente	Presente

O experimento foi executado no Laboratório de Desenvolvimento e Aprovação de Produtos (LDAP) em câmara térmica a temperatura ambiente de 32 °C. Dessa forma, as temperaturas altas do copo e temperatura da cápsula foram obtidas com a estabilização dos copos e das cápsulas dentro da própria câmara utilizada nos testes, na qual se encontrava também a máquina de bebidas. Para se obter a temperatura baixa do copo, foi utilizada uma segunda câmara térmica a temperatura de 18 °C, onde os copos foram estabilizados na referida temperatura. No caso da temperatura baixa da cápsula, foi utilizado um refrigerador convencional em temperatura média de 5 °C para a estabilização das cápsulas. O tempo mínimo de estabilização das temperaturas dos copos e das cápsulas foi de 5 horas.

Para as obtenções dos dois valores de pH da água, foram utilizados dois tipos de águas minerais comerciais com todas as características semelhantes e diferindo apenas no seu pH característico, sendo uma com pH igual a 6 (marca “Da Guarda”) e outra com pH igual a 9,5 (marca “Crystal”).

Os materiais dos copos utilizados, plástico acrílico e vidro, foram transparentes e incolores. Para estudar o efeito da inclinação do copo, estabeleceu-se uma inclinação de 45° com a vertical no momento da retirada da bebida (Figura 4.2).

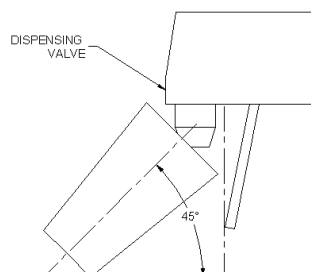


Figura 4.2 – Representação esquemática da inclinação a 45° com a base de sustentação do copo.

Visando a robustez na qualidade, os produtos que são desenvolvidos na empresa em questão precisam ser aprovados em alguns testes realizados em câmaras térmicas a uma temperatura de 32 °C, que é o valor usado para representar a temperatura média de um país tropical como o Brasil. Esta foi a justificativa para a escolha das temperaturas altas do copo e da cápsula. Para representar localidades e dias mais frios, a temperatura baixa do copo foi definida em 18 °C. Já a temperatura baixa de 5 °C atribuída à temperatura da cápsula, foi utilizada para representar a situação em que o consumidor armazenaria a cápsula da bebida na sua geladeira em casa.

Segundo a portaria N° 2914 do Ministério da Saúde, que trata sobre os padrões de potabilidade da água para o consumo humano, recomenda-se que a água nos sistemas de distribuição tenha pH na faixa de 6,0 a 9,5. Portanto, os dois valores de pH da água foram definidos com base nessa legislação.

A utilização de copos de vidro e de plástico acrílico foi definida devido ao fato desses materiais serem os mais comuns nas residências do Brasil e o estudo desse fator foi motivado pela diferença existente entre os dois materiais na retenção do CO₂ da bebida.

O que motivou o estudo da inclinação do copo foi a importância atribuída à sua presença ou ausência, sendo que a ausência da inclinação parece contribuir para

melhorar a mistura do conteúdo da cápsula com a água carbonatada, além de manter uma maior concentração de CO₂ na bebida pronta.

A escolha dos 16 tratamentos a serem ensaiados nesse experimento foi baseada no gerador E = ABCD e na relação de definição I = ABCDE (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 – Rodadas e tratamentos do fatorial fracionado 2_V^{5-1}

Rodada	Tratamento	A	B	C	D	E
1	e	-	-	-	-	+
2	d	-	-	-	+	-
3	c	-	-	+	-	-
4	cde	-	-	+	+	+
5	b	-	+	-	-	-
6	bde	-	+	-	+	+
7	bce	-	+	+	-	+
8	bcd	-	+	+	+	-
9	a	+	-	-	-	-
10	ade	+	-	-	+	+
11	ace	+	-	+	-	+
12	acd	+	-	+	+	-
13	abe	+	+	-	-	+
14	abd	+	+	-	+	-
15	abc	+	+	+	-	-
16	abcde	+	+	+	+	+

O diagrama de relação de fatores (FRD) mostrando as 16 rodadas do experimento bem como os fatores avaliados e os fatores não manipulados é apresentado na Figura 4.3.

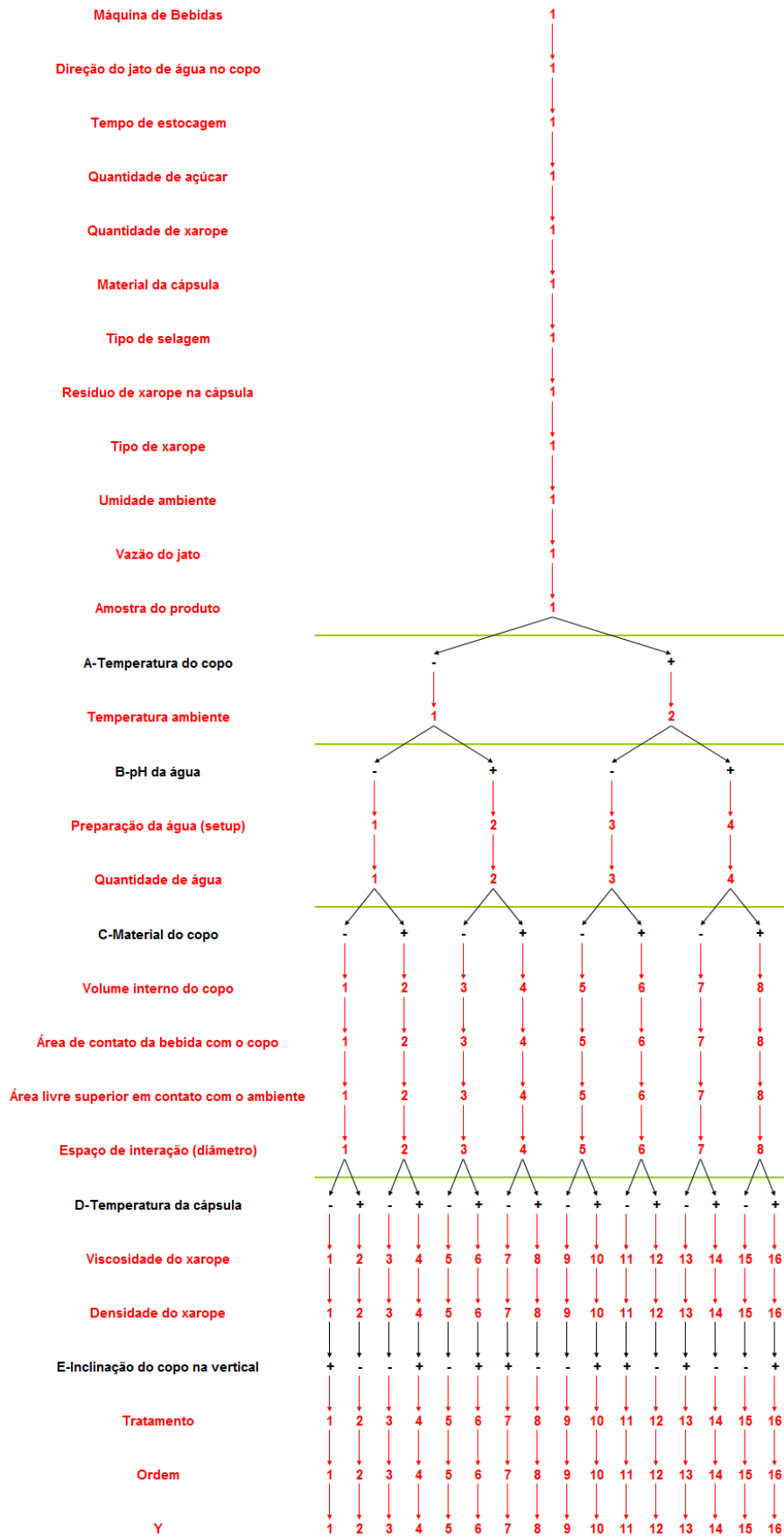


Figura 4.3 - Diagrama de relação dos fatores do experimento.

4.2. Variáveis de Saída

As variáveis selecionadas para avaliar a qualidade da bebida em cápsula foram: nível de carbonatação (Y_1) expresso em Vols (volume de CO_2 / volume de bebida), temperatura da bebida (Y_2) dada em $^{\circ}C$ e a variação do teor de sólidos solúveis (Y_3) expressa em $^{\circ}Brix$ (gramas de sólidos solúveis por 100 gramas de bebida).

Para cada rodada do experimento foram retirados dois copos de bebida da máquina, sendo o primeiro para a avaliação do nível de carbonatação e, o segundo, para a avaliação da temperatura e da variação do teor de sólidos solúveis.

O preparo da bebida se deu através da mistura do conteúdo da cápsula com a quantidade definida de água já a uma temperatura ideal para a bebida final. A mistura é feita diretamente no copo e os conteúdos da cápsula e a água são liberados diretamente da máquina. A receita do refrigerante avaliado no estudo é uma mistura de aproximadamente 40 ml do conteúdo da cápsula com 160 ml de água, resultando em um copo de bebida de 200 ml.

Para que a bebida fosse considerada de qualidade, ela deveria atender aos padrões estabelecidos pela empresa para cada uma das variáveis-resposta definidas. Para o nível de carbonatação, desejou-se valores iguais ou superiores a 4 Vols. Para a temperatura, os valores menores ou iguais a $6^{\circ}C$ foram os considerados como adequados. E para a variação do teor de sólidos solúveis, buscou-se o alvo de 0 $^{\circ}Brix$, o que significa que a bebida está homogênea após o preparo.

4.2.1. Nível de Carbonatação

O propósito de se medir a carbonatação da bebida logo depois de retirada da máquina, visou garantir que ela tenha níveis adequados de CO_2 para se enquadrar como um refrigerante, além de prover o frescor característico do produto quando ingerido.

Para este procedimento, foi utilizado o aparelho medidor de carbonatação Carbonation Tester Hand-Held Fountain da empresa Terriss (Figura 4.4). O

aparelho é formado por duas partes, a superior que possui um manômetro medidor de pressão interna e um termômetro medidor de temperatura, e a inferior que é o recipiente que contém a amostra da bebida a ser analisada. A medida da concentração de CO₂ foi feita de forma indireta através da pressão exercida pela liberação do CO₂ da bebida quando o aparelho foi agitado e da temperatura da bebida. Com os valores de pressão e temperatura foi feita a conversão dos dados em nível de carbonatação expresso em volume de CO₂ por volume de bebida. A tabela para a conversão dos valores de pressão e temperatura foi fornecida pela fabricante do equipamento e pode ser consultada no Anexo 1.

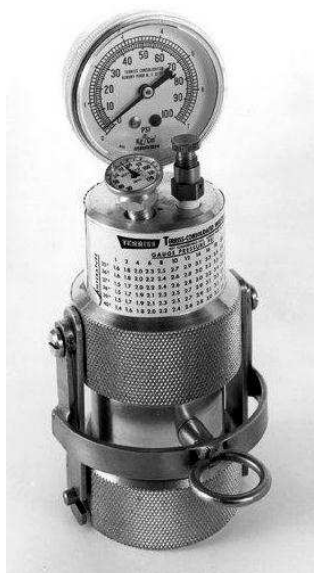


Figura 4.4 – Aparelho medidor de carbonatação.

Fonte: Terriss Consolidated Industries.

Vinte minutos antes de cada medição, o aparelho foi colocado em banho de gelo para que o recipiente a conter a amostra da bebida se estabilizasse em temperatura de 0 °C (pré-requisito do aparelho). Depois de retirada da máquina, a bebida foi cuidadosamente transferida para o recipiente do aparelho, imediatamente removido do banho de gelo e agitado para a remoção do excesso de água. A transferência foi feita de forma consistente pelas paredes do recipiente, evitando o desprendimento excessivo de CO₂, até que o líquido atingisse o transbordo do recipiente (Figura 4.5).

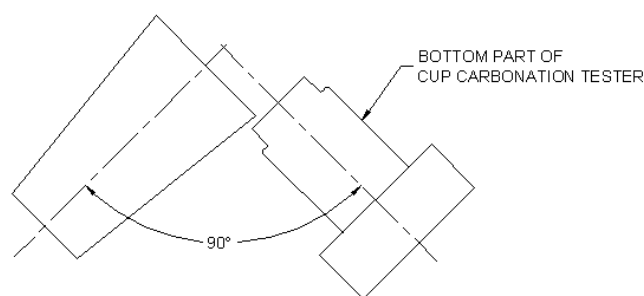


Figura 4.5 – Representação esquemática do processo de transferência da bebida para o recipiente do medidor de carbonatação.

O aparelho, após fechado, foi agitado vigorosamente por 30 segundos até a estabilização da pressão através de um agitador mecânico que foi construído para esta finalidade. Os valores de pressão e temperatura foram lidos e registrados.

4.2.2. Temperatura

O propósito de se medir a temperatura da bebida retirada da máquina visou verificar se a mesma estava a uma temperatura adequada ao paladar do consumidor, conforme padrão estabelecido pela empresa.

Para este procedimento, foi utilizado um termopar conectado a um sistema de aquisição de dados de temperatura através do software RTS. A temperatura do termopar foi registrada a cada 3 segundos formando um perfil descritivo em um intervalo de tempo.

Para cada medição, depois de produzida a bebida, o termopar foi colocado no ponto médio do copo. Com o passar do tempo, a temperatura registrada diminuiu até atingir o ponto de equilíbrio (temperatura da bebida) e depois começou a subir novamente, devido à troca de calor com o ambiente. Um perfil descritivo era formado gerando um pico de temperatura mínima, conforme é exemplificado na Figura 4.6. A temperatura mínima foi lida e registrada como valor observado.

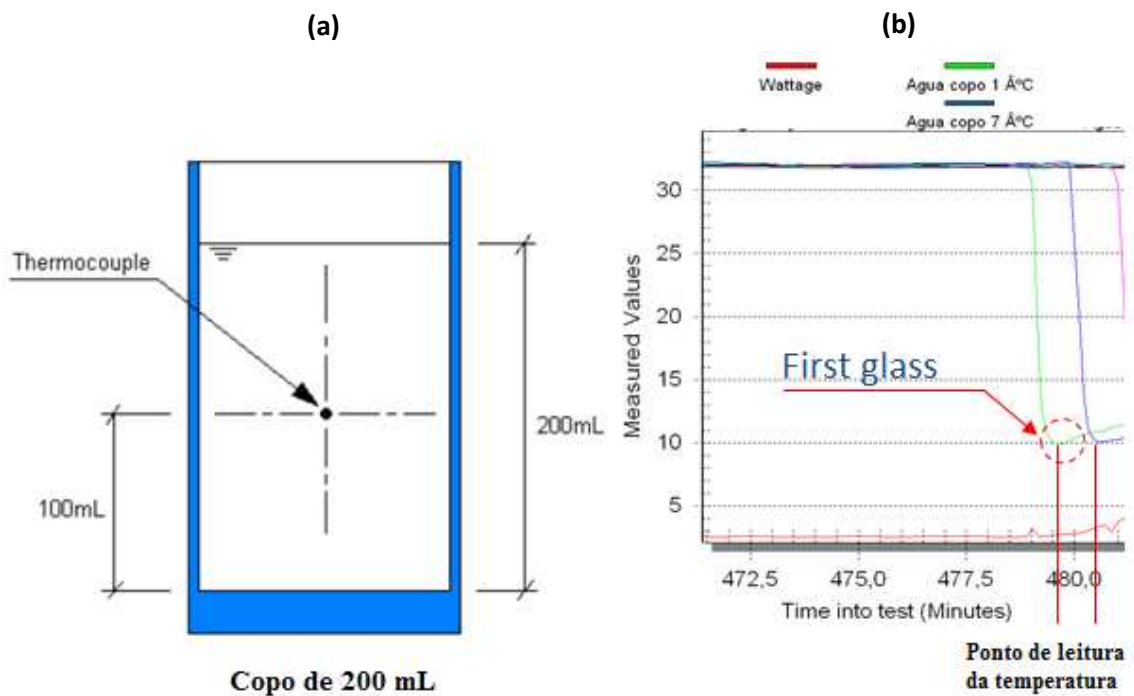


Figura 4.6 – Perfil descritivo da temperatura registrada pelo termopar. Localização do ponto médio de medição da temperatura no copo (a). Gráfico gerado a partir da medição da temperatura (b).

4.2.3. Variação do Teor de Sólidos Solúveis

O propósito de se medir a variação do teor de sólidos solúveis da bebida logo depois de retirada da máquina, foi de verificar se o processo de mistura da água carbonatada com o xarope da cápsula foi efetivo e, portanto, estava de acordo com o padrão estabelecido pela empresa.

Para este procedimento, foi utilizado um aparelho “Refratômetro Analógico Portátil para Açúcar” modelo K52-032 – KASVI, com faixa de medição de 0 a 32 °Brix. O aparelho foi calibrado com água destilada antes do início das análises.

Em cada rodada, depois de produzida a bebida, foi realizada duas medições do teor de sólidos solúveis. A primeira no topo do copo, um centímetro abaixo da superfície do líquido, e a segunda no fundo do copo, um centímetro acima da base do copo. Foram utilizadas pipetas descartáveis para a coleta das alíquotas analisadas (Figura 4.7).

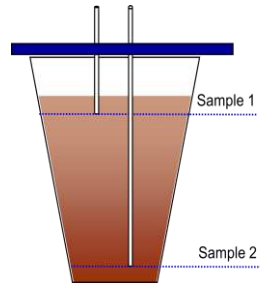


Figura 4.7 – Pontos de coleta das alíquotas analisadas em refratômetro.

A variação do teor de sólidos solúveis foi obtida pela medida do fundo do copo subtraída da medida do topo.

4.3. Análises Estatísticas

Foi realizada uma análise estatística descritiva contendo a média, o desvio-padrão, os valores mínimo e máximo, a amplitude total e o coeficiente de variação, para cada variável-resposta Y_i ($i = 1, 2, 3$), a fim de possibilitar uma visão geral dos resultados e servir para comparação com as especificações de cada Y .

De acordo com os 16 tratamentos ensaiados no experimento (Tabela 4.2), foram obtidas as estimativas dos seguintes contrastes a partir das observações individuais para cada variável-resposta Y :

$$\hat{C}_A = -y_e - y_d - y_c - y_{cde} - y_b - y_{bde} - y_{bce} - y_{bcd} + y_a + y_{ade} + y_{ace} + y_{acd} + y_{abe} + y_{abd} + y_{abc} + y_{abcde}; \quad (\text{equação 10})$$

$$\hat{C}_B = -y_e - y_d - y_c - y_{cde} + y_b + y_{bde} + y_{bce} + y_{bcd} - y_a - y_{ade} - y_{ace} - y_{acd} + y_{abe} + y_{abd} + y_{abc} + y_{abcde}; \quad (\text{equação 11})$$

$$\hat{C}_C = -y_e - y_d + y_c + y_{cde} - y_b - y_{bde} + y_{bce} + y_{bcd} - y_a - y_{ade} + y_{ace} + y_{acd} - y_{abe} - y_{abd} + y_{abc} + y_{abcde}; \quad (\text{equação 12})$$

$$\hat{C}_D = -y_e + y_d - y_c + y_{cde} - y_b + y_{bde} - y_{bce} + y_{bcd} - y_a + y_{ade} - y_{ace} + y_{acd} - y_{abe} + y_{abd} - y_{abc} + y_{abcde}; \quad (\text{equação 13})$$

$$\hat{C}_E = +y_e - y_d - y_c + y_{cde} - y_b + y_{bde} + y_{bce} - y_{bcd} - y_a + y_{ade} + y_{ace} - y_{acd} + y_{abe} - y_{abd} - y_{abc} + y_{abcde}; \quad (\text{equação 14})$$

$$\hat{C}_{AB} = +y_e + y_d + y_c + y_{cde} - y_b - y_{bde} - y_{bce} - y_{bcd} - y_a - y_{ade} - y_{ace} - y_{acd} + y_{abe} + y_{abd} + y_{abc} + y_{abcde}; \quad (\text{equação 15})$$

$$\hat{C}_{AC} = +y_e + y_d - y_c - y_{cde} + y_b + y_{bde} - y_{bce} - y_{bcd} - y_a - y_{ade} + y_{ace} + y_{acd} - y_{abe} - y_{abd} + y_{abc} + y_{abcde}; \quad (\text{equação 16})$$

$$\hat{C}_{AD} = +y_e - y_d + y_c - y_{cde} + y_b - y_{bde} + y_{bce} - y_{bcd} - y_a + y_{ade} - y_{ace} + y_{acd} - y_{abe} + y_{abd} - y_{abc} + y_{abcde}; \quad (\text{equação 17})$$

$$\hat{C}_{AE} = -y_e + y_d + y_c - y_{cde} + y_b - y_{bde} - y_{bce} + y_{bcd} - y_a + y_{ade} + y_{ace} - y_{acd} + y_{abe} - y_{abd} - y_{abc} + y_{abcde}; \quad (\text{equação 18})$$

$$\hat{C}_{BC} = +y_e + y_d - y_c - y_{cde} - y_b - y_{bde} + y_{bce} + y_{bcd} + y_a + y_{ade} - y_{ace} - y_{acd} - y_{abe} - y_{abd} + y_{abc} + y_{abcde}; \quad (\text{equação 19})$$

$$\hat{C}_{BD} = +y_e - y_d + y_c - y_{cde} - y_b + y_{bde} - y_{bce} + y_{bcd} + y_a - y_{ade} + y_{ace} - y_{acd} - y_{abe} + y_{abd} - y_{abc} + y_{abcde}; \quad (\text{equação 20})$$

$$\hat{C}_{BE} = -y_e + y_d + y_c - y_{cde} - y_b + y_{bde} + y_{bce} - y_{bcd} + y_a - y_{ade} - y_{ace} + y_{acd} + y_{abe} - y_{abd} - y_{abc} + y_{abcde}; \quad (\text{equação 21})$$

$$\hat{C}_{CD} = +y_e - y_d - y_c + y_{cde} + y_b - y_{bde} - y_{bce} + y_{bcd} + y_a - y_{ade} - y_{ace} + y_{acd} + y_{abe} - y_{abd} - y_{abc} + y_{abcde}; \quad (\text{equação 22})$$

$$\hat{C}_{CE} = -y_e + y_d - y_c + y_{cde} + y_b - y_{bde} + y_{bce} - y_{bcd} + y_a - y_{ade} + y_{ace} - y_{acd} - y_{abe} + y_{abd} - y_{abc} + y_{abcde}; \quad (\text{equação 23})$$

$$\hat{C}_{DE} = -y_e - y_d + y_c + y_{cde} + y_b + y_{bde} - y_{bce} - y_{bcd} + y_a + y_{ade} - y_{ace} - y_{acd} - y_{abe} - y_{abd} + y_{abc} + y_{abcde}; \quad (\text{equação 24})$$

De posse das estimativas dos contrastes, os efeitos principais e os das interações duplas dos cinco fatores foram estimados pela equação:

$$\hat{e}_i = \frac{\hat{C}_i}{2^{5-1}}, \quad (\text{equação 25})$$

para $i = A, B, C, D, E, AB, AC, AD, AE, BC, BD, BE, CD, CE, DE$.

Em cada variável-resposta Y, foi utilizado o método de Lenth (1989) para testar as hipóteses de significâncias dos cinco efeitos principais e dos dez efeitos das interações duplas ao nível de 5% de significância. Posteriormente, construíram-se os gráficos de probabilidade normal e de Pareto com as estimativas dos efeitos testados para cada variável analisada, separadamente.

Neste caso, as hipóteses estatísticas testadas foram:

$$H_0: e_i = 0; e$$

$$H_1: e_i \neq 0; \text{ para } i = A, B, C, D, E, AB, AC, AD, AE, BC, BD, BE, CD, CE, DE.$$

Para as três variáveis-resposta (Y_1, Y_2, Y_3), foi adotado, como completo, o seguinte modelo estatístico ajustado, de acordo com o método de mínimos quadrados:

$$\hat{y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 a_i + \hat{\beta}_2 b_i + \hat{\beta}_3 c_i + \hat{\beta}_4 d_i + \hat{\beta}_5 e_i + \hat{\beta}_6 a_i b_i + \hat{\beta}_7 a_i c_i + \hat{\beta}_8 a_i d_i + \hat{\beta}_9 a_i e_i + \hat{\beta}_{10} b_i c_i + \hat{\beta}_{11} b_i d_i + \hat{\beta}_{12} b_i e_i + \hat{\beta}_{13} c_i d_i + \hat{\beta}_{14} c_i e_i + \hat{\beta}_{15} d_i e_i, \text{ em que:}$$

\hat{y}_i é o valor ajustado da variável-resposta Y na combinação $a_i b_i c_i d_i e_i$;

$\hat{\beta}_0$ é a estimativa da constante de regressão;

$\hat{\beta}_1 \dots \hat{\beta}_{15}$ são as estimativas dos coeficientes de regressão; e

i pode assumir os sinais - ou +, para os fatores A, B, C, D, E.

Para a seleção da melhor equação de regressão ajustada, separadamente, às variáveis-resposta Y_1, Y_2 e Y_3 , foram considerados apenas os efeitos determinados como significativos pelo método de Lenth (1989) a 5% de probabilidade, e adicionados os termos não significativos caso haja necessidade de compor a equação com os efeitos principais.

Realizou-se também uma análise de desejabilidade, para qual foi utilizada a metodologia de otimização simultânea proposta por Derringer e Suich (1980). As variáveis-resposta foram otimizadas com base nas especificações da empresa estabelecidas para a bebida. Na Tabela 4.3 são apresentados os limites inferior (LI) e superior (LS), valor-alvo (A) e as taxas de variação da desejabilidade (s e t), necessários à aplicação do método.

Tabela 4.3 – Parâmetros utilizados na otimização simultânea das respostas

Variável-resposta	LI	A	LS	s	t
Y ₁ - Nível de carbonatação	3,5	4	-	1	1
Y ₂ - Temperatura	-	6	7,5	1	1
Y ₃ - Variação do teor de sólidos solúveis	-1	0	3,5	1	1

Após definidos os parâmetros do método, as estimativas das desejabilidades foram obtidas, conforme apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Estimativas dos intervalos das desejabilidades de acordo com as estimativas para cada resposta em função do modelo estatístico utilizado

Desejabilidade	Variável-resposta		
	Y ₁	Y ₂	Y ₃
d = 0	$\hat{y} \leq 3,5$	$\hat{y} \geq 7,5$	$\hat{y} \leq -1$ ou $\hat{y} \geq 3,5$
0 < d < 1	$3,5 < \hat{y} < 4$	$6 < \hat{y} < 7,5$	$-1 < \hat{y} < 0$ e $0 < \hat{y} < 3,5$
d = 1	$\hat{y} \geq 4$	$\hat{y} \leq 6$	$\hat{y} = 0$

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para Y₁, a estimativa da desejabilidade, dado $3,5 < \hat{y} < 4$, foi obtida por:

$$d = \left(\frac{\hat{y}-3,5}{4-3,5} \right)^1$$

Para Y₂, a estimativa da desejabilidade, dado $6 < \hat{y} < 7,5$, foi obtida por:

$$d = \left(\frac{\hat{y}-7,5}{6-7,5} \right)^1$$

Para Y₃, as estimativas das desejabilidades, dado $-1 < \hat{y} < 0$ e $0 < \hat{y} < 3,5$, foram obtidas, respectivamente, por:

$$d = \left(\frac{\hat{y}-(-1)}{0-(-1)} \right)^1 \text{ e } d = \left(\frac{\hat{y}-3,5}{0-3,5} \right)^1$$

Em função do resultado da análise foi possível conhecer o valor da desejabilidade global (D) associada às três respostas, bem como os valores individuais da função desejabilidade (d) de cada uma delas. Também foi possível definir os níveis que cada fator deve apresentar (solução global) para alcançar a condição ótima, além de conhecer os valores otimizados das respostas.

Em todas as análises estatísticas foi utilizado o software Minitab 16.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Das características de qualidade avaliadas (Y_1 , Y_2 e Y_3), o nível de carbonatação foi a única que apresentou, no experimento como um todo, média que se adequou à especificação. Os resultados da estatística descritiva realizada para cada variável-resposta em estudo são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Estatísticas descritivas das variáveis-resposta avaliadas

Variáveis-resposta	Média	DP	Mínimo	Máximo	AT	CV (%)
Y_1 - Nível de carbonatação	4,6	0,35	4,2	5,3	1,1	7,51
Y_2 - Temperatura	9,0	2,39	5,3	11,8	6,5	26,72
Y_3 - Variação do teor de sólidos solúveis	2,6	1,63	0,6	6,4	5,8	62,89

DP – Desvio-padrão, AT – Amplitude Total, CV – Coeficiente de Variação.

Como pode ser observado, não somente a média satisfaz a especificação (≥ 4 Vols) estabelecida para a variável nível de carbonatação, mas todos os dados observados no experimento estavam dentro dessa especificação, uma vez que o valor mínimo observado foi de 4,2 Vols. Portanto, embora possa existir algum fator significativo que cause variação no nível de carbonatação, essa variação não seria capaz de deixar a bebida fora do padrão de qualidade especificado. Isso implica que o nível de carbonatação foi, provavelmente, a variável-resposta que menos sofreu variação em função das mudanças propositais dos fatores estudados, conforme se observa pelo menor desvio-padrão e menor coeficiente de variação.

Quando a temperatura foi analisada, percebeu-se que embora a média não tenha ocorrido dentro da especificação (≤ 6 °C), alguns valores observados apresentaram-se dentro dessa especificação visto que o mínimo observado foi de 5,3 °C. Sendo assim, alguns tratamentos conseguiram atender ao padrão de qualidade desejado para a bebida. Essa variação sofrida no experimento é confirmada pelos maiores desvio-padrão e amplitude total, e intermediário coeficiente de variação, quando comparado aos das outras duas variáveis-resposta.

Já quando a variação do teor de sólidos solúveis foi analisada, observou-se que além da média não ter satisfeito o valor-alvo (0 °Brix), nenhum dado observado atingiu exatamente este valor especificado, já que o valor mínimo registrado foi de 0,6 °Brix. Contudo, os dados obtidos não indicam ausência de tratamentos que podem ser considerados satisfatórios. Limites superior e inferior de aceitação devem ser atribuídos às variáveis estudadas para definir quais tratamentos, embora não tenham atingido o alvo, ainda assim podem ser considerados como satisfatórios para o cliente. Observou-se também, que embora a variação do teor de sólidos solúveis tenha apresentado desvio-padrão intermediário em relação aos das demais variáveis-resposta, o coeficiente de variação foi consideravelmente maior, o que indica a possibilidade de seleção de um melhor tratamento.

As significâncias dos efeitos principais e dos efeitos das interações duplas dos fatores estudados sobre o nível de carbonatação da bebida, foram apresentadas por meio dos gráficos de probabilidade normal (Figura 5.1a) e de Pareto (Figura 5.1b).

Pelo gráfico de probabilidade normal construído a partir das estimativas dos efeitos, observou-se que somente o efeito principal do fator D (temperatura da cápsula) caiu ligeiramente distanciado dos demais pontos que se aproximaram entre si ao longo da reta. Observa-se também que foi o único efeito que possuiu valor absoluto maior do que a margem de erro ($ME = 0,3856$), conforme mostra o gráfico de Pareto. Portanto, somente o efeito negativo de D foi diferente de zero ($p < 0,05$). Embora a variação causada por D não tenha afetado a especificação (≥ 4 Vols) estabelecida para o nível de carbonatação, mas caso seja de interesse aumentar a média do nível de carbonatação ainda mais, deve-se escolher os tratamentos com o nível baixo para o fator D, ou seja, deve-se utilizar a cápsula da bebida a uma temperatura de 5 °C, independentemente dos níveis dos outros quatro fatores. Isso equivale a orientar o consumidor a armazenar a cápsula sob refrigeração na geladeira.

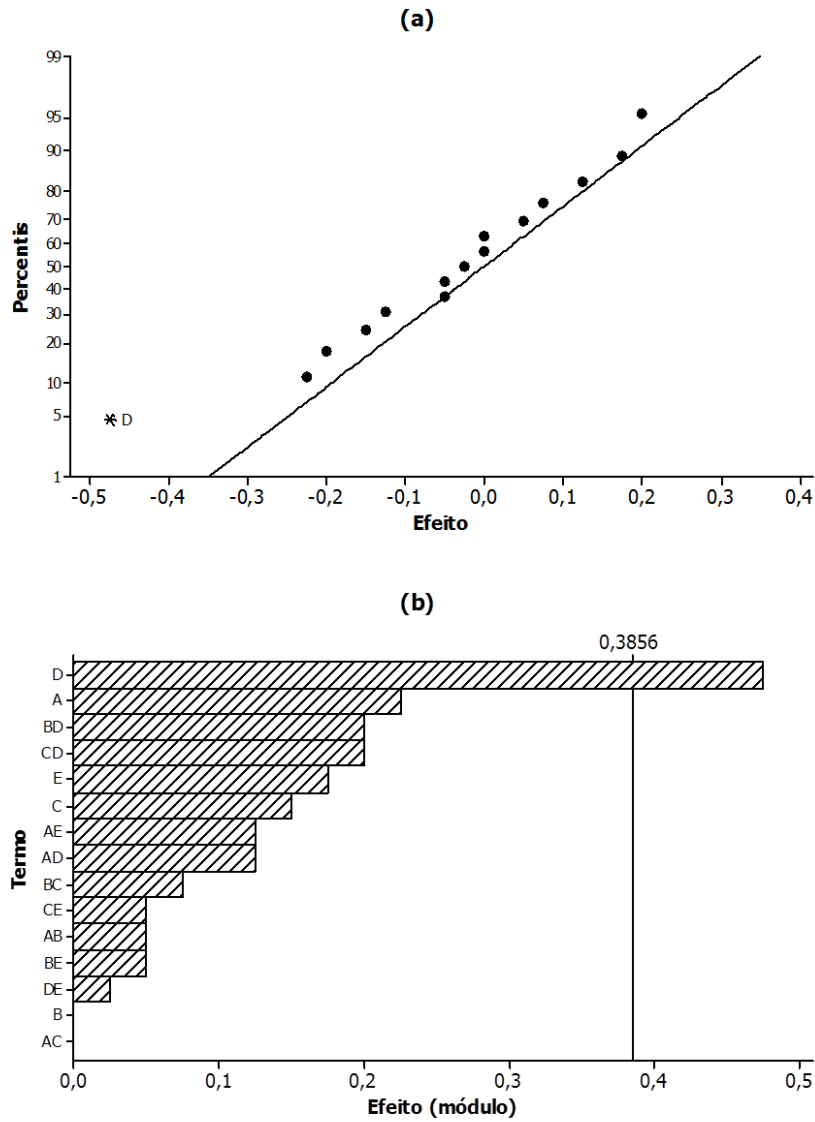


Figura 5.1 – Gráficos de probabilidade normal (a) e de Pareto (b) dos efeitos sobre a variável-resposta Y_1 (nível de carbonatação), de acordo com o método de Lenth (1989).

Na Figura 5.2a, b são apresentados os resultados da avaliação de significância dos efeitos dos fatores sobre a temperatura.

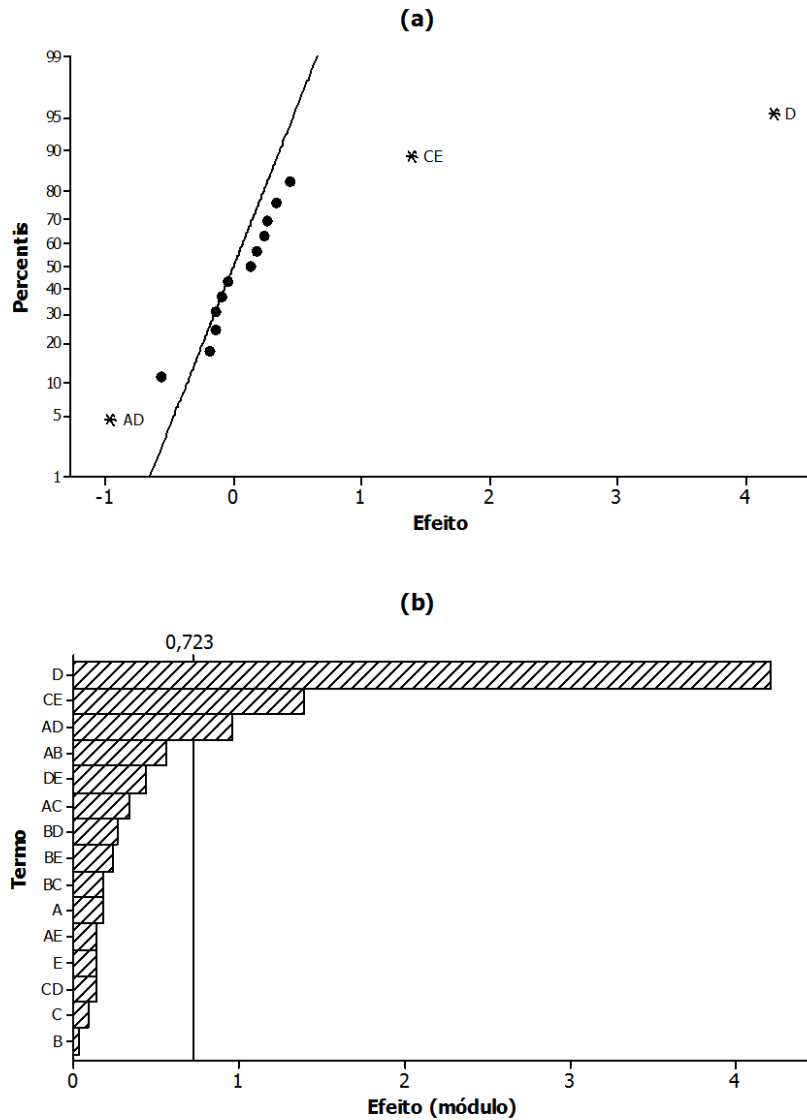


Figura 5.2 – Gráficos de probabilidade normal (a) e de Pareto (b) dos efeitos sobre a variável-resposta Y_2 (temperatura), de acordo com o método de Lenth (1989).

Quando se observou o gráfico de probabilidade normal das estimativas dos efeitos para a temperatura, percebeu-se que o efeito principal do fator D e os efeitos das interações CE e AD ficaram distanciados dos demais pontos que estavam mais próximos entre si ao longo da reta. Além disso, estes mesmos efeitos possuíam valores absolutos que ultrapassaram a margem de erro ($ME = 0,723$), conforme mostra o gráfico de Pareto. Sendo assim, concluiu-se que os efeitos positivos D e CE juntamente com o efeito negativo AD foram diferentes de zero ($p < 0,05$). Isso significa que para se obter a bebida à temperatura conforme padrão estabelecido (≤ 6 °C), deve-se escolher tratamentos com nível baixo para o fator D ($d = 5$ °C), assim

como ao de A ($a_+ = 18\text{ °C}$) e níveis de sinais contrários para CE ($c_- = \text{plástico}$ e $e_+ = \text{presente}$ ou $c_+ = \text{vidro}$ e $e_- = \text{ausente}$). Portanto, a variável-resposta temperatura é minimizada quando os tratamentos possuem níveis baixos para os fatores A e D e níveis com sinais contrários para os fatores C e E, independentemente dos níveis de B. Em termos práticos, a temperatura é minimizada em duas situações: I) com copo de plástico inclinado à temperatura de 18 °C e com cápsula à temperatura de 5 °C e; II) com copo de vidro não inclinado à temperatura de 18 °C e com cápsula à temperatura de 5 °C . Em ambos os casos, o pH da água utilizada para a bebida pode assumir qualquer valor dentro do intervalo estudado (6,0 a 9,5).

Os resultados da avaliação de significância dos efeitos dos fatores sobre a variação do teor de sólidos solúveis são apresentados na Figura 5.3a, b.

O gráfico de probabilidade normal construído a partir das estimativas dos efeitos, indicou que somente o efeito principal do fator B (pH da água) caiu ligeiramente distanciado dos demais pontos que se aproximaram entre si ao longo da reta. Este mesmo efeito também é o único que possuiu valor absoluto maior do que a margem de erro ($ME = 1,639$), conforme mostra o gráfico de Pareto. Portanto, somente o efeito positivo de B foi diferente de zero ($p < 0,05$). Isso significa que para se obter a bebida com menor variação do teor de sólidos solúveis, conforme padrão estabelecido (próximo de 0 °Brix), deve-se escolher tratamentos com o nível baixo para o fator B, ou seja, a água com pH igual a 6,0 apresenta menor variação do teor de sólidos solúveis e, portanto, produz uma bebida mais homogênea, independentemente dos níveis dos demais fatores estudados. Além da água alcalina não se misturar bem com o conteúdo da cápsula, essa água, com pH elevado, apresenta carbonatos e bicarbonatos que interagem com ácidos orgânicos, como ácido ascórbico e cítrico, presentes na formulação do xarope, alterando o sabor do refrigerante, pois reduzem sua acidez e provocam perda de aroma (LIMA e AFONSO, 2009).

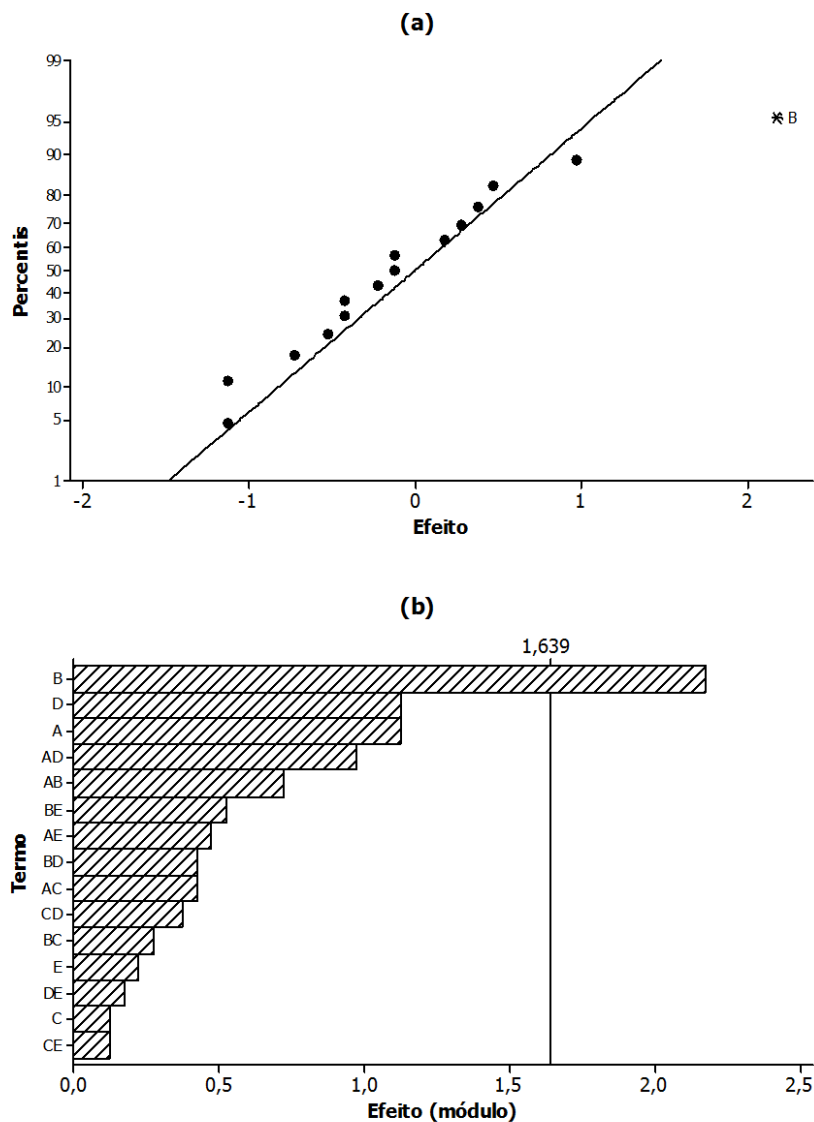


Figura 5.3 – Gráficos de probabilidade normal (a) e de pareto (b) dos efeitos sobre a variável-resposta Y_3 (variação do teor de sólidos solúveis), de acordo com o método de Lenth (1989).

Após analisar as significâncias dos fatores para as três variáveis-resposta Y_1 , Y_2 e Y_3 , concluiu-se que para se obter uma bebida o mais próxima dos padrões de qualidade desejados, dois tratamentos são recomendados: a.b.c.d.e₊ (temperatura do copo em 18 °C, pH da água igual a 6,0, copo de plástico, temperatura da cápsula em 5 °C e com inclinação do copo) e a.b.c₊d.e. (temperatura do copo em 18 °C, pH da água igual a 6,0, copo de vidro, temperatura da cápsula em 5 °C e sem inclinação do copo).

De uma forma geral, os esquemas fatoriais são muito utilizados em experimentos de desenvolvimento de novos produtos. Aranda et al. (2008) utilizaram o fatorial fracionado 2^{5-1} de resolução V para desenvolver uma churrasqueira portátil a partir da reutilização de um botijão de gás. Já Camargo et al. (2009) desenvolveram uma formulação de detergente hospitalar através de um fatorial completo 2^3 que avaliou as concentrações dos ácidos peracético e acético e de peróxido livre.

A fim de confirmar a informação obtida através da análise de significância dos fatores para cada resposta, separadamente, e também confirmar a solução global para o experimento, foi realizada a análise de desejabilidade. Para a realização dessa análise, foi necessário definir os limites superior (LS) e inferior (LI) de aceitação para cada variável-resposta avaliada, sendo que estes foram definidos arbitrariamente. Os valores-alvos utilizados foram os mesmos definidos pela empresa, conforme a tabela 4.3. Também foi necessário definir as taxas de variação s e t da desejabilidade de cada variável-resposta avaliada, para as quais foram atribuídos o valor igual à unidade, o que representa uma variação linear da função de desejabilidade.

Para cada variável-resposta Y_i ($i = 1, 2, 3$), foram ajustadas, em função dos efeitos principais e das interações duplas entre os cinco fatores estudados, as seguintes equações de regressão, respectivamente:

$$\hat{y}_{1i} = 4,6375 - 0,2375*d_i \quad (R^2 = 0,50), \text{ para } d_i = -1 \text{ e } 1;$$

$$\hat{y}_{2i} = 8,9563 + 0,0937a_i - 0,0438c_i + 2,1063*d_i + 0,0688e_i - 0,4813*a_i*d_i + 0,6937*c_i*e_i \quad (R^2 = 0,96), \text{ para } a_i = c_i = d_i = e_i = -1 \text{ e } 1;$$

$$\hat{y}_{3i} = 2,5872 + 1,0875*b_i \quad (R^2 = 0,48), \text{ para } b_i = -1 \text{ e } 1;$$

*Significativo pelo teste t de Student ($P < 0,05$).

De posse das estimativas das variáveis-resposta Y_1 , Y_2 e Y_3 , foram obtidas as respectivas estimativas das desejabilidades individuais d_1 , d_2 e d_3 .

E por fim, obteve-se a desejabilidade global (D), como sendo a média geométrica de d_1 , d_2 e d_3 (Tabela 5.2).

Tabela 5.2 – Resultados da análise de desejabilidade

Rodada	Tratamento	Y ₁ (A = 4)			Y ₂ (A = 6)			Y ₃ (A = 0)			D
		y ₁	ŷ ₁	d ₁	y ₂	ŷ ₂	d ₂	y ₃	ŷ ₃	d ₃	
1	e	5,3	4,88	1	5,3	5,69	1	2,6	1,50	0,57	0,83
2	d	4,4	4,40	1	11,7	12,12	0	0,6	1,50	0,57	0
3	c	4,5	4,88	1	5,6	5,47	1	2,6	1,50	0,57	0,83
4	cde	4,7	4,40	1	11,8	12,17	0	1	1,50	0,57	0
5	b	5,2	4,88	1	7,3	6,94	0,37	6,4	3,68	0	0
6	bde	4,4	4,40	1	12	10,87	0	2,4	3,68	0	0
7	bce	5,2	4,88	1	6,9	6,99	0,34	5,2	3,68	0	0
8	bcd	4,3	4,40	1	10,3	10,64	0	4,4	3,68	0	0
9	a	4,8	4,88	1	8,6	8,09	0	1,4	1,50	0,57	0
10	ade	4,5	4,40	1	10,1	10,09	0	2,2	1,50	0,57	0
11	ace	4,5	4,88	1	8,5	8,14	0	0,8	1,50	0,57	0
12	acd	4,4	4,40	1	10,2	9,87	0	0,8	1,50	0,57	0
13	abe	4,9	4,88	1	6,1	6,84	0,44	3,2	3,68	0	0
14	abd	4,2	4,40	1	10,9	11,34	0	2,4	3,68	0	0
15	abc	4,6	4,88	1	6,5	6,62	0,59	3	3,68	0	0
16	abcde	4,3	4,40	1	11,5	11,39	0	2,4	3,68	0	0

De acordo com os resultados de desejabilidade, conclui-se que a qualidade da bebida satisfaz integralmente aos desejos da empresa, para Y₁ e Y₂, quando são selecionados os tratamentos a.b.c.d.e₊ (temperatura do copo em 18 °C, pH da água igual a 6,0, copo de plástico acrílico, temperatura da cápsula em 5 °C e com inclinação do copo) e a.b.c₊d.e. (temperatura do copo em 18 °C, pH da água igual a 6,0, copo de vidro, temperatura da cápsula em 5 °C e sem inclinação do copo). Porém, ele não atende, na mesma proporção, aos requisitos exigidos para Y₃.

Confirmando as recomendações dos tratamentos selecionados, foram estimados para ambos, desejabilidade global de 0,83. Para todos os demais, esta estimativa foi igual a zero. Isso implica que somente estes dois tratamentos podem ser indicados para o processo comercial. Tal conclusão implica que quaisquer erros associados ao preparo da bebida, poderão ocasionar perdas significativas na sua qualidade.

Os dois tratamentos selecionados conferem estimativas iguais para as variáveis-resposta nível de carbonatação (Y₁), temperatura (Y₂) e variação do teor de sólidos solúveis (Y₃). As estimativas são, respectivamente, iguais a: 4,88 Vols; 5,69 °C e 1,50 °Brix.

6. CONCLUSÕES

O mapa de produto elaborado foi uma ferramenta útil e constituiu-se de uma etapa importante para o planejamento do experimento.

Dos cinco fatores estudados (temperatura do copo, pH da água, material do copo, temperatura da cápsula e inclinação do copo), todos foram importantes na relação com a qualidade da bebida, representada pelas variáveis nível de carbonatação, temperatura e variação do teor de sólidos solúveis.

Apenas os fatores temperatura do copo e temperatura da cápsula, e os fatores material do copo e inclinação do copo interagiram, por antagonismo e sinergismo, respectivamente.

Os melhores tratamentos para o preparo da bebida foram definidos pelas seguintes combinações: a.b.c.d.e₊ (temperatura do copo em 18 °C, pH da água igual a 6,0, copo de plástico acrílico, temperatura da cápsula em 5 °C e com inclinação do copo) e a.b.c₊d.e. (temperatura do copo em 18 °C, pH da água igual a 6,0, copo de vidro, temperatura da cápsula em 5 °C e sem inclinação do copo).

Os métodos de Lenth (1989) e a análise de desejabilidade convergiram para a escolha dos mesmos tratamentos.

O projeto se tornou viável em fornecer um produto adequado às exigências técnicas por apresentar desejabilidade global próxima de um. É importante ressaltar que algumas recomendações de preparo devem ser repassadas aos clientes do produto, com a finalidade de manter o padrão de qualidade desejado.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIR. Associação Brasileira das Indústrias de Refrigerantes e de Bebidas Não Alcoólicas. Dados de Mercado 2011. Disponível em: <http://abir.org.br/tags/dados-de-mercado/>. Acesso em: 05 de julho de 2014.

ACODEDEJI, E.C. Projective properties of screening designs in economic construction of modelisation or optimization designs. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, v. 67, n. 1, 2003.

ALMEIDA, S.H.; TOLEDO, C.T. Qualidade total do produto. *Revista Produção*. Rio de Janeiro, 1991.

ARANDA, M.H.; JUNG, C.F.; CATEN, C.S. Aplicação do projeto de experimentos para otimização de uma inovação tecnológica. *Revista Gestão Industrial*, v. 4, n. 2, 2008.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, IS.; BRUNS, R.E. Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria. 3. ed. Campinas: Editora UNICAMP, 2007.

BURGELMAN, R.A.; MAIDIQUE, M.A.; WHEELWRIGHT, S. *Strategic Management of Technology and Innovation*. New York: McGraw-Hill, 2013.

CAMARGO, L.F.R.; MOREIRA, V.; VACCARO, G.L. Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos no desenvolvimento de novos produtos em uma empresa de saneantes. *Estudos Tecnológicos*, v. 5, n. 3, 2009.

CHOWDHURY, S. *The Power of Six Sigma*. Dearborn Financial Publishing, New York, 2001.

COTTER, S. A screening for factorial experiments with interactions. *Biometrika*, v. 66, n. 2, 1979.

DANIEL, C. Use of half-normal plots in interpreting factorial two-level experiments. *Technometrics*, 1959.

DANIEL, C.R.A. Estudo do desempenho de métodos de Lenth na análise de planos do tipo Split-plot na ausência de réplicas. Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Estatística na Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2008.

DERRINGER, G.C.; SUICH, D. Simultaneous optimization of several response variables. *Journal of Quality Technology*, 1980.

FERNANDINO, J.A.; OLIVEIRA, J.L. Arquiteturas organizacionais para a área de P&D em empresas do setor elétrico brasileiro. RAC. Curitiba, 2010.

- GONÇALVES, C.L. Utilização da metodologia seis sigma para melhoria do processo de abastecimento de matéria prima para unidade fabril: estudo de caso em uma empresa da indústria de bens de capital. Simpósio de Engenharia de Produção, Brasil, 2009.
- GOVINDARAJAN, V.; TRIMBLE, C. Os 10 mandamentos da inovação estratégica: do conceito a implantação. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.
- HILD, C.R.; SANDERS, D. Factor Relationship Diagrams: a tool for experiments, Wiley's Encyclopedia of Reliability and Statistics, 2008.
- JIU, A.; TZU-YAO, C.; SID, G. Training for design of experiments. Work Study, v. 52, n. 7, 2003.
- JUNG, C.F. Metodologia para Pesquisa & Desenvolvimento aplicado a novas tecnologias, produtos e processos. Rio de Janeiro: Axcel Books do Brasil, 2004.
- KHUARANA, A. Strategies for global P&D. Research Technology Management, v.49, n. 2. Washington, 2006.
- KOHL, A.; ZONATTO, V. Importância e impacto do departamento de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) para a empresa Alfa S/A. VIII Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia. Resende, 2011.
- KOTLER, P. Administração de Marketing. São Paulo: Pretince Hall, 2010.
- LENTH, R.V. Quick and easy analysis of unreplicated factorials. Technometrics, v. 31, 1989.
- LIMA, A.C.S.; AFONSO, J.C. A química do refrigerante. Química Nova na Escola, v. 31, n. 3, 2009.
- MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Portaria nº 544, de 16 de novembro de 1998. Disponível em: <http://www.ibravim.org.br/public/upload/legislation/1399654366.pdf>. Acesso em: 05 de julho de 2014.
- MELO, G.H.N. Métodos de Lenth para análise de planos strip-block com estruturas fatoriais 2^k não replicadas. Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Estatística na Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2007.
- MOEN, R.D.; NOLAN, T.W.; PROVOST, L.P. Quality improvement through planned experimentation. McGraw-Hill, 1999
- MONTGOMERY, D.C. Design and Analysis of experiments. New York: John Wiley & Sons, 2009.

MONTGOMERY, D.C. Introdução ao controle estatístico da qualidade. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2004.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros. São Paulo: LTC Editora, 2009.

MOURA, G.L.; GALHANO, P.P.P.; FISCHMANN, A.A. Estratégia, estrutura organizacional e gestão do conhecimento. Simpósio de excelência em gestão e tecnologia. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

MS. Ministério da Saúde. Portaria nº 2914, de 12 de dezembro de 2011. Disponível em: http://www.cvs.saude.sp.gov.br/zip/Portaria_MS_2914-11.pdf. Acesso em: 08 de setembro de 2014.

OLIVEIRA, P.L. Avaliação de processos de medição no contexto da metodologia seis sigma em empresa industrial. Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre em metrologia na Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

PALADINI, E.P. Avaliação estratégica da qualidade. São Paulo: Editora Atlas, 2008.

PALHA, P.G. Tecnologia de refrigerantes. Rio de Janeiro: AmBev, 2005.

PARASURAMAN, A.; COLBY, C.L. Marketing para produtos inovadores. Porto Alegre: Bookman, 2002.

PINTO, S.H.B.; CARVALHO, M.M.; HO, L.L. Implementação de programas de qualidade: um survey em empresas de grande porte no Brasil. Gestão & Produção, v. 1, n. 2. São Carlos, 2006.

QUADROS, R. Aprendendo a Inovar: Padrões de Gestão da Inovação Tecnológica em Empresas Industriais Brasileiras. In: Relatório de pesquisa “Padrões de gestão da inovação tecnológica em empresas brasileiras” apresentado ao CNPq. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2008.

RAMM, A.J. Procedimento de calibração e otimização estrutural para um gabinete de refrigerador. Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica na Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

RIBEIRO JÚNIOR, J.I. Métodos estatísticos aplicados à melhoria da qualidade. Viçosa: Editora UFV, 2012.

RODRIGUES, M.I.; IEMMA, A.F. Planejamento de experimentos e otimização de processos: uma estratégia sequencial de planejamentos. Campinas: Editora UNICAMP, 2005.

RODRIGUES, M.V. Ações para a Qualidade: gestão estratégica e integrada para a melhoria dos processos na busca da qualidade e competitividade. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2010.

ROTONDARO, R.G.; RAMOS, A.W.; RIBEIRO, C.O.; MIYAKE, D.I.; MAKANO, D.; LAURINDO, F.J.B.; LEE HO, L.; CARVALHO, M.M.; BRAZ, M.A.; BALESTRASSI, P.P. Seis Sigma: estratégia gerencial para a melhoria de processos, produtos e serviços. São Paulo: Atlas, 2002.

SANDERS, D.; ROSS, W.; COLEMAN, J. The process map. Quality engineering, v. 11, n. 4, 2006.

SANTOS, S.R.S.; AZEVEDO, P.F. Concorrência no Mercado de Refrigerantes: impactos das novas embalagens. Departamento de Ciências Econômicas da UFRGS. Disponível em: http://www.ufrgs.br/decon/VIRTUAIS/eco02003a/ok_03.pdf. Acesso em: 04 de julho de 2014.

TAGUCHI, G. Introduction to quality engineering. Asian Productivity Organization. Tóquio, 1986.

TAVARES, D.; FACCIOCHI, A.; STAHELIN, R. Excelência Operacional: Treinamento Yellow Belt – OPEX. Joinville, SC: Six Sigma Associates, 2013.

TERRA, J.C.C. Gestão do conhecimento. O grande desafio empresarial: uma abordagem baseado no desafio e na criatividade. São Paulo: Ed. Negócio, 2010.

TERRIS CONSOLIDATED INDUSTRIES. Disponível em: <http://www.terriss.com/productDetail.aspx?ProductID=225#More>. Acesso em: 25 de julho de 2014.

THODUNTER, J. Inovação: maioria das empresas erra na hora de tratar o assunto. Disponível em: www.techoje.com.br/site/techoje/categoria/abrirPDF/766. Acesso em: 3 de setembro de 2014.

TOLEDO, J.C. Gestão da mudança da qualidade de produto. Gestão & Produção, v. 1, n. 2. São Carlos, 1994.

WERKEMA, M.C. Criando a Cultura Seis Sigma. Rio de Janeiro: Qualitymark Ed, 2002.

WERNKE, P.A. Melhoria da qualidade de um componente através da aplicação de ferramentas da metodologia seis sigma. Trabalho de graduação apresentado à Universidade do Estado de Santa Catarina. Santa Catarina, 2011.

Anexo

Anexo 1 - Tabela para a conversão dos valores de pressão (Psi) e temperatura (°F) em concentração de CO₂ (Vols).

		GAUGE PRESSURE [PSI]																				
		1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
TEMPERATURE [°F]	35	1,6	1,8	2,0	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,9	5,1	5,3	5,5	5,7	6,0
	36	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,3	3,5	3,7	3,9	4,1	4,3	4,5	4,7	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8
	37	1,5	1,7	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,9	5,1	5,3	5,5	5,7
	38	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7	3,9	4,1	4,3	4,5	4,7	4,9	5,1	5,3	5,5
	39	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7	3,9	4,0	4,3	4,5	4,7	4,9	5,1	5,3	5,5
	40	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4
	41	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7	3,9	4,1	4,3	4,5	4,7	4,9	5,1	5,2
	42	1,4	1,6	1,8	2,0	2,1	2,3	2,5	2,8	2,9	3,1	3,3	3,5	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2
	43	1,4	1,6	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,3	4,5	4,7	4,9	5,1
	44	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,1	3,3	3,5	3,7	3,9	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0
	45	1,3	1,5	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,3	4,5	4,7	4,9
	46	1,3	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,3	2,5	2,7	2,8	3,0	3,2	3,4	3,5	3,7	3,9	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8
	47	1,2	1,4	1,6	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,6	2,8	2,9	3,1	3,3	3,4	3,6	3,8	4,0	4,1	4,3	4,5	4,7

Fonte: Terris Consolidated Industries.