



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE GARANHUNS**  
**ENGENHARIA DE ALIMENTOS**

**ISABELLE CRISTINE PROHMANN TSCHOEKE**

**MODELAGEM CINÉTICA DA BRASSAGEM DE CERVEJA**  
**ARTESANAL**

**GARANHUNS - PE**  
**FEVEREIRO - 2018**

**ISABELLE CRISTINE PROHMANN TSCHOEKE**

**MODELAGEM CINÉTICA DA BRASSAGEM DE CERVEJA  
ARTESANAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Curso de Engenharia de Alimentos, para obtenção do título de Bacharela em Engenharia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. Thibério Pinho Costa Souza

Coorientador: Prof. Dr. André Felipe de Melo Sales Santos

**GARANHUNS - PE**

**FEVEREIRO - 2018**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE  
Biblioteca **Ariano Suassuna**, Garanhuns - PE, Brasil

T879m Tschoeke, Isabelle Cristine Prohmann  
Modelagem cinética da brassagem de cerveja artesanal  
/ Isabelle Cristine Prohmann Tschoeke.– 2018.  
64 f. : il.

Orientador: Thibério Pinho Costa Souza.  
Coorientador: André Felipe de Melo Sales Santos  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia  
de Alimentos) – Universidade Federal Rural de Pernambuco,  
Departamento de Engenharia de Alimentos, Garanhuns, BR - PE,  
2018.

Inclui referências e apêndice(s).

1. Cerveja - fabricação 2. Cerveja artesanal 3. Brassagem  
I. Souza, Thibério Pinho Costa, orient. II. Santos, André Felipe de  
Melo Sales, coorient. III. Título

CDD 663.42

# **MODELAGEM CINÉTICA DA BRASSAGEM DE CERVEJA ARTESANAL**

Monografia apresentada à Unidade Acadêmica de Garanhuns – UFRPE/UAG, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Alimentos.

## **BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Thibério Pinho Costa Souza**  
**Unidade Acadêmica de Garanhuns - UFRPE**  
**(Orientador)**

---

**Prof. Dr. André Felipe de Melo Sales Santos**  
**Universidade Federal de Pernambuco – UFPE**  
**(Coorientador)**

---

**Mr. Leandro Santos de Oliveira**  
**Ind. Beb. Garanhuns Ltda.**  
**(Examinador)**

**Garanhuns, 22 de fevereiro de 2018.**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à Deus, por ter me dado forças, sabedoria e ter guiado meu caminho durante essa etapa.

Aos meus pais, por terem acreditado em mim e sempre me incentivado a estudar e ir em busca dos meus sonhos. Por me apoiarem e por sempre estarem do meu lado.

Aos meus irmãos por todo carinho, apoio e troca de conhecimentos.

Aos meus avós, tios, tias, primos e primas que mesmo distantes sempre torceram por mim.

Ao meu namorado, pela dedicação, por sempre estar ao meu lado, me apoiar, me fazer sentir uma pessoa especial e me ajudar em tudo.

Aos meus orientadores pela paciência, atenção e carinho durante a elaboração do trabalho.

Aos meus professores, por todo ensinamento passado.

A minha turma da faculdade, por toda troca de conhecimento e momentos de descontração.

A todos que direta e indiretamente me ajudaram e torceram por mim.

## DEDICATÓRIA

*Aos meus pais, por sempre apostarem em mim,  
investirem nos meus estudos e por todo o apoio durante  
essa minha caminhada! Dedico a vocês esse trabalho.  
Amo vocês!*

*“A persistência é o caminho do êxito”.*  
*Charles Chaplin.*

## RESUMO

As cervejas artesanais são caracterizadas pela qualidade superior, atrelada a características sensoriais diferenciadas. O seu processo produtivo é dividido em várias etapas. A primeira fase é o processo de brassagem. Nessa etapa ocorre a ação das enzimas para converter o amido em açúcares sendo influenciada por vários parâmetros durante este processo, tais como a temperatura, a acidez do meio, o tempo de mosturação, a constituição do malte moído, além da presença da água no processo. Devido a estes fatores, é interessante realizar estudos que descrevam o processo de brassagem, de acordo com a variação dos principais parâmetros que o influenciam. Tendo em vista que a modelagem cinética é considerada uma das ferramentas mais utilizadas para descrever os processos, decidiu-se utilizar dessa técnica para realização deste trabalho. Diante disso, o objetivo desse trabalho foi realizar um estudo do comportamento das variáveis que influenciam o processo de mosturação do malte durante a etapa de brassagem. Para atingir tal objetivo, foi necessário realizar uma análise estatística do comportamento das variáveis, sendo estas inseridas na modelagem cinética de uma cerveja artesanal. Os experimentos realizados nesse trabalho foram feitos adotando um planejamento fatorial  $3^4$  em que as variáveis escolhidas para o estudo foram o pH, a temperatura, a granulometria e a diluição, sendo a variável resposta o brix da cerveja. Para a análise estatística foi utilizado o programa Statistica® no qual pôde ser avaliado a significância das variáveis escolhidas. Já o ajuste do modelo cinético aos resultados foram feitos com o auxílio do software MathLab®, sendo criada uma programação específica para o problema proposto. Os resultados mostraram que o modelo proposto se ajustou bem aos dados experimentais e pode ser utilizado pela comunidade científica para estudos mais aprofundados e projetos voltados à área industrial.

**Palavras Chave:** Brassagem; Cerveja artesanal; Cinética; Modelos cinéticos.



## **ABSTRACT**

*Craft beers are known by its superior quality tied to its different sensorial characteristics. Its productive process is divided into several stages and the mashing process is one of the most important phase. During this step the enzymes are influenced by many parameters such as temperature, acidity, mashing time, ground malt composition and humidity, convert starch into sugar. Due to the variety of parameters, it is fundamental that the studies can describe the mashing process based on the variation of the main parameters of this process. Since kinetic modeling is considered to be the most common used tool to describe the process, it was decided to apply this technique to carry on the study. Therefore, the main purpose of this paper was to verify the influence of the main variables that influence the mashing process during the mashing phase. Furthermore, it was necessary to perform a statistical study about the behavior of the likely variables of the kinetic model of a craft beer. The carried experiments of this study were based on a 3<sup>4</sup> factorial planning, which had pH, temperature, granulometry and dilution as dependant variables and brix of the beer as independant variables. For the statistical study, it was used the Statistics® software to evaluate the significance of the chosen variables. Furthermore, a kinetic modelling was developed in MathLab® software by programming a specific model for the proposed problem. The results showed that the proposed model represented adequately the experimental data and can be used by the scientific community for deeper studies and industrial projects.*

**Keywords:** *Mashing; Craft Beer; Kinetics; Kinetic models.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Total de cervejarias artesanais por ano no Brasil.....	6
Figura 2: Distribuição de cervejarias por região no Brasil.....	7
Figura 3: Lúpulo.....	11
Figura 4: Moagem e peneiramento do malte <i>Pilsen</i> .....	26
Figura 5: Seleção da granulometria do malte conforme o <i>mesh</i> .....	26
Figura 6: Pesagem do malte em balança analítica.....	27
Figura 7: Experimentos sendo preparados em paralelo para a mesma temperatura (a). Controle da temperatura da chapa antes de se iniciar os experimentos (b).....	28
Figura 8: Experimentos por grupos de mesma temperatura 50°C (a), 60°C (b) e 70°C (c).....	29
Figura 9: Modelo do refratômetro usado (a) e medição feita nas amostras (b).....	29
Figura 10: Gráfico de Pareto para as variáveis estudadas.....	34
Figura 11: Gráfico de superfície da temperatura e pH em relação ao Brix (a). Gráfico das condições de ativação de enzimas pelo pH e temperatura (b).....	35
Figura 12: Gráfico de superfície do Brix em relação à diluição e o pH (a). Quadro da razão água/malte para a densidade do mosto (b).....	36
Figura 13: Gráfico de superfície do Brix em relação à granulometria e o pH (a). Reações Sólido/Fluido com conversão alta para partículas porosas (b).....	36
Figura 14: Expressões para o tempo de conversão para várias formas de partículas.....	37
Figura 15: Gráfico de superfície para o Brix em função dos fatores: Temperatura e Granulometria (a). Gráfico do comportamento da Energia de Ativação para a reação (b).....	38
Figura 16: Gráfico de superfície para o Brix em função da diluição e da temperatura (a). Gráfico de superfície para o Brix em função da diluição e da granulometria (b).....	39
Figura 17: Gráfico de superfície para o ajuste cinético do modelo proposto (pH de 5,0, granulometria de 2mm e diluição de 75%).....	40
Figura 18: Gráfico de superfície para o ajuste cinético do modelo proposto (pH de 5,5, granulometria de 2mm e diluição de 75%).....	41
Figura 19: Gráfico de superfície para o ajuste cinético do modelo proposto (pH de 6,0, granulometria de 2mm e diluição de 75%).....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características da água para a produção da cerveja. ....	9
Tabela 2: Composição do grão de cevada e do malte.....	10
Tabela 3: Valores de pH ótimos para a atuação de determinadas enzimas chaves no processo de mosturação. ....	14
Tabela 4: Temperaturas de atuação das enzimas durante o processo de brassagem. ....	15
Tabela 5: Planejamento fatorial para a brassagem da cerveja. ....	24
Tabela 6: Resultado do planejamento fatorial (Continua).....	31
Tabela 7: Resultado do planejamento fatorial (Continuação). ....	32
Tabela 8: Resultado do planejamento fatorial (Conclusão).....	33
Tabela 9: Resultados para os parâmetros cinéticos do modelo com o pH igual a 5,0.....	41
Tabela 10: Resultados para os parâmetros cinéticos do modelo com o pH igual a 5,5.....	42
Tabela 11: Resultados para os parâmetros cinéticos do modelo com o pH igual a 5,5.....	43

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
2.1	<b>Geral.....</b>	3
2.2	<b>Específicos.....</b>	3
<b>3</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>4</b>
3.1	<b>Breve histórico da cerveja .....</b>	4
3.2	<b>Mercado da cerveja artesanal.....</b>	5
3.3	<b>Matéria-prima .....</b>	7
3.3.1	<b>Água .....</b>	8
3.3.2	<b>Malte de cevada .....</b>	9
3.3.3	<b>Lúpulo.....</b>	11
3.3.4	<b>Levedura.....</b>	12
3.4	<b>Processo produtivo.....</b>	12
3.4.1	<b>Produção do mosto ou brassagem.....</b>	12
3.4.1.1	<b>Moagem do malte.....</b>	13
3.4.1.2	<b>Mosturação ou brassagem.....</b>	13
3.4.1.3	<b>Clarificação ou filtração.....</b>	16
3.4.1.4	<b>Fervura.....</b>	17
3.4.1.5	<b>Resfriamento.....</b>	17
3.4.2	<b>Processo Fermentativo .....</b>	18
3.4.2.1	<b>Fermentação.....</b>	18
3.4.2.2	<b>Maturação.....</b>	19
3.4.3	<b>Acabamento.....</b>	19
3.4.3.1	<b>Clarificação.....</b>	19

3.4.3.2	Carbonatação.....	19
3.4.3.3	Envase.....	20
3.4.3.4	Pasteurização.....	20
3.5	Estudo da cinética .....	20
3.6	Planejamento fatorial .....	21
3.7	Programa Statistica® .....	22
3.8	Software MathLab® .....	23
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
4.1	Planejamento fatorial .....	24
4.2	Processo de brassagem .....	25
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	31
5.1	Análise estatística .....	31
5.2	Modelagem cinética .....	39
6	CONCLUSÃO .....	44
7	REFERÊNCIAS .....	46
8	APÊNDICE.....	52

## 1 INTRODUÇÃO

Dentro do segmento de bebidas alcoólicas, a cerveja é a mais consumida no mundo. Ela é definida como a bebida obtida pela fermentação alcoólica do mosto cervejeiro, preparado com malte de cevada, água e lúpulo pela ação de levedura (BRASIL, 2009). A grande variedade de cervejas existentes pelo mundo é resultado da variação de um ou mais componentes existentes no processo (BRUNELLI, 2012). A sua produção possui uma importante posição estratégica na indústria alimentícia mundial, uma vez que totalizou 200 bilhões de litros produzidos no ano de 2015, com quase 92% sendo produzidos em quarenta principais países produtores (BOUCKLEY, 2015).

Nas últimas décadas o mercado brasileiro de cerveja aumentou gradativamente. No ano de 2015 o Brasil produziu cerca de 13,8 milhões de litros dessa bebida e atualmente ocupa o terceiro lugar no ranking de produção mundial, superado apenas pela china e pelos Estados Unidos (SICOBÉ, 2016). No ano de 2016, as companhias produtoras de cerveja foram responsáveis por 1,6% do PIB nacional, gerando um faturamento de mais de R\$ 77 bilhões, o que ressalta a grande importância da indústria cervejeira para a economia brasileira (ABRABE, 2017; CERVBRAIL, 2017).

Em relação ao consumo per capita, o Brasil ainda ocupa a 27ª posição mundial, com consumo de 68 litros por pessoa, porém o mercado brasileiro possui um grande potencial de crescimento. Em que a cerveja tipo *Pilsen* é líder absoluta de preferência entre o consumidor brasileiro, correspondendo a 98% do total do consumido (SEBRAE, 2017).

A tendência do mercado cervejeiro brasileiro é a segmentação, pois os consumidores estão cada vez mais interessados em experimentar produtos diferenciados. Devido a isso as cervejas artesanais, estão ganhando cada vez mais espaço, conquistando e agradando públicos mais requintados e apreciadores da arte de fabricar cerveja (SICOBÉ, 2016). Segundo dados da Abrabe (2013) as microcervejarias nacionais possuem uma escala de produção na média de 4.160 litros por mês, aproximadamente 1% da produção nacional é de responsabilidade dessas microempresas, que se concentram principalmente nas regiões sul e sudeste do Brasil. As cervejas artesanais são caracterizadas pela qualidade superior, atrelada a características sensoriais diferenciadas, e o aumento do seu consumo se deu pelo crescimento da demanda de brasileiros, que passam a consumir produtos com maior valor agregado (ABRABE, 2014; SICOBÉ, 2016).

O processo de produção da cerveja pode ser dividido em três etapas: produção do mosto, fermentação e processo de acabamento. A etapa de mosturação ou brassagem é a primeira operação unitária de todo o processo, é onde são definidas as composições de açúcares e nutrientes que irão compor o perfil sensorial do produto (SPERB, 2012).

As principais enzimas que atuam na brassagem são as proteases, as amilases e as glucanases. As proteases produzem peptídeos e aminoácidos pela digestão das proteínas sendo responsáveis pela quebra das cadeias peptídicas em nitrogênio livre e proteínas, que servirão de nutriente para a levedura durante a fermentação e definirão a consistência da espuma, respectivamente. A reação de hidrólise do amido é catalisada pelas amilases, e a atividade das mesmas definirá a proporção de açúcares fermentescíveis ou não fermentescíveis. E as glucanases são responsáveis pela degradação dos beta-glucanos, que conferem a viscosidade ao mosto, influenciando na filtrabilidade do mesmo (AQUARONE, 2013).

As enzimas presentes no malte, que agirão nessa etapa do processo, necessitam de certos fatores físico-químicos para que atuem perfeitamente, como: a temperatura, a acidez do meio, o tempo, a constituição do malte moído, além da presença de água no meio (VENTURINE-FILHO, 2010). Logo, essa etapa é de grande importância, pois o sucesso dela proporcionará uma boa fermentação e uma cerveja de qualidade. Tornando-se assim interessante fazer estudos que descrevam o processo de brassagem, de acordo com a variação de parâmetros.

Atualmente existem várias ferramentas utilizadas para estudar os processos, uma delas é a cinética ou modelagem cinética. Através do uso desse instrumento é possível entender os fenômenos que ocorrem durante o processo e usá-los para *scale-up* e otimização das condições de operação. Fazendo com que essa ferramenta seja de grande importância, por isso foi a escolhida para estudar o processo de brassagem na produção de cerveja artesanal.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Geral

Realizar um estudo do comportamento das variáveis que influenciam o processo de mosturação do malte durante a etapa de brassagem desenvolvendo uma cinética própria para a cerveja artesanal.

### 2.2 Específicos

- Elaborar um planejamento experimental para estudar as variáveis do processo;
- Avaliar o efeito dos parâmetros: granulometria, pH, temperatura e diluição na conversão do amido em açúcares;
  - Medir a evolução do Brix ao longo do tempo em função dos parâmetros estabelecidos;
  - Verificar quais variáveis do processo irão influenciar mais na quantidade de açúcares produzidos utilizando ferramentas estatísticas;
  - Desenvolver um modelo cinético próprio para a brassagem que represente a formação de açúcar em função do tempo.



### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Breve histórico da cerveja

A história da cerveja inicia-se há milhares de anos atrás, essa bebida já era conhecida entre muitas civilizações, sendo difícil dizer com exatidão o momento em que ela surgiu pela primeira vez (BETRAMELLI, 2012). Entretanto, a prova arqueológica mais concreta que se tem em relação a produção de cerveja foi encontrada em inscrições rupestres vindas da Mesopotâmia (mais precisamente da Suméria), referentes a um cereal chamado *emmer* (*Triticum dicoccum*) que se utilizava para produzir pão e uma bebida alcoólica similar à cerveja. Os pedaços de pães eram imersos em água e deixados para fermentar espontaneamente, através da ação de leveduras selvagens. Esta civilização foi ainda capaz de repetir o processo, sendo, por isso, considerada a primeira cultura civilizada produtora de cerveja (CERVEJAS DO MUNDO, 2016; EBLINGER; NARZIB, 2012).

Antigamente, a cerveja possuía uma qualidade inferior devido ao pouco ou total desconhecimento sobre a função de algumas matérias-primas e do agente modificador das transformações bioquímicas (fermento). A bebida possuía sabor bastante diferente do que conhecemos hoje, pois o comportamento do fermento no processo era pouco conhecido. Usualmente, eram adicionados fermentos selvagens, que produziam cervejas intragáveis. A utilização do lúpulo como agente estabilizante e conservante também era desconhecido (GARCIA, 2012).

Desde o surgimento da cerveja, os antigos já se preocupavam em melhorar a qualidade da bebida, mais especificamente, o aroma e o sabor através do uso de aditivos, tais como: o mel, a canela, anis, gengibre, rúcula, alecrim, cravo e raízes em geral. Tornou-se também usual, após o século VII, a utilização de uma mistura de ervas na produção da bebida chamada de gruit, que continha alecrim, artemísia, aquílea, urze e gengibre (BETRAMELLI, 2012).

Grandes desenvolvimentos na sua técnica de fabricação foram feitos na era Medieval, em que a fabricação de cerveja era realizada por vários mosteiros. Nesta produção eram empregadas diversas ervas, com o intuito de aromatizar a bebida, como, mística, rosmarinho, louro, sálvia, gengibre e o lúpulo. A adição de lúpulo no processo cervejeiro teve sua introdução entre os anos 700 e 800 pelos monges do mosteiro de San Gallo na Suíça (EBLINGER; NARZIB, 2012; ROSA; AFONSO, 2015). As variações relacionadas à proporção dos ingredientes (água, malte, lúpulo e leveduras) e do processo de fabricação resultavam em diferentes tipos de cerveja (ROSA; AFONSO, 2015).

A era Contemporânea teve seu início na revolução francesa que ocorreu nas últimas décadas do século XVIII (1789 -1799) e neste período o modo de produção de cerveja sofreu mudanças decisivas durante a revolução industrial. Uma ampla variedade de cervejas apareceu durante o século XVII, sendo que cada variedade era definida pelos diversos ingredientes que eram incorporados, bem como pela qualidade da água presente na sua elaboração (EBLINGER; NARZIB, 2012).

Além disso a ocorrência de diversas descobertas e acontecimentos permitiu uma melhoria na técnica e processo de fabricação da cerveja e na sua difusão pelo Mundo. Algumas dessas descobertas passam pela invenção da máquina a vapor por James Watt, a descoberta da refrigeração artificial por Carl Linde, o desenvolvimento dos caminhos-de-ferro permitindo assim a expansão deste produto, a invenção do método de pasteurização por Louis Pasteur, e por último a descoberta da levedura de fermentação baixa por Emil Christian Hansen (ESTEVINHO, 2015).

No Brasil o hábito do consumo de cerveja foi trazido pela família real portuguesa no início do século XIX quando a realeza instalou-se no país. Toda bebida consumida na época era importada da Europa (GARCIA, 2012).

A cultura cervejeira apresentou um processo evolutivo bastante notório nos séculos XX e XXI devido ao desenvolvimento tecnológico, ao renascimento da produção caseira de cerveja (*homebrewing*) e à nova geração de microcervejarias pelo mundo, que trazem inovações aos consumidores através da oferta de produtos de qualidade e diversificados (FERREIRA et al., 2011).

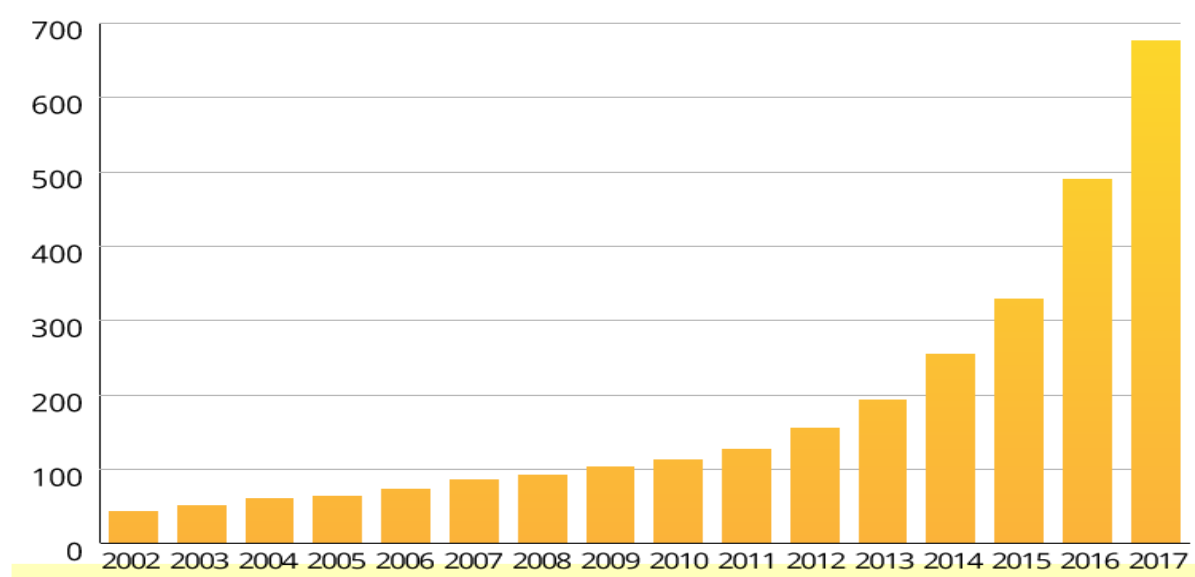
### **3.2 Mercado da cerveja artesanal**

As cervejas artesanais são caracterizadas pelo aroma, sabores marcantes e qualidade diferenciados. O reconhecimento da qualidade dessa bebida aumenta a cada dia. É um mercado que está em franca expansão. O setor ainda necessita de dados estatísticos, como o total faturado e produzido, mas calcula-se que entre 1 e 1,5% do mercado cervejeiro nacional esteja concentrado nas artesanais. Os dados do último levantamento feito pelo Ministério da Agricultura, Abastecimento e Pecuário (MAPA), comprovam a tendência de expansão desse setor com a multiplicação de rótulos. Em 2017 o total de produtos registrados de cervejarias, cervejas e chopes, chegou a 8.903 produtos (ABRACERVA, 2017).

De acordo com o Ministério da Agricultura, Abastecimento e Pecuário (MAPA), até junho de 2017 eram 610 cervejarias nesta categoria no país responsáveis pela produção de 7,5

mil produtos diferentes. Apenas no primeiro semestre, 91 novos registros foram aprovados. Um levantamento realizado pela Associação Brasileira das Cervejarias Artesanais (Abracerva), mostra que em apenas cinco meses aumentou em 10% o número de cervejarias, foram realizados 65 novos registros, totalizando 675 novas empresas nessa categoria. A Figura 1 evidencia a tendência de crescimento exponencial do número de cervejarias no Brasil, que se iniciou em meados de 2010 e continua com seu ritmo de avanço (ABRACERVA, 2017; MAPA, 2017).

Figura 1: Total de cervejarias artesanais por ano no Brasil.

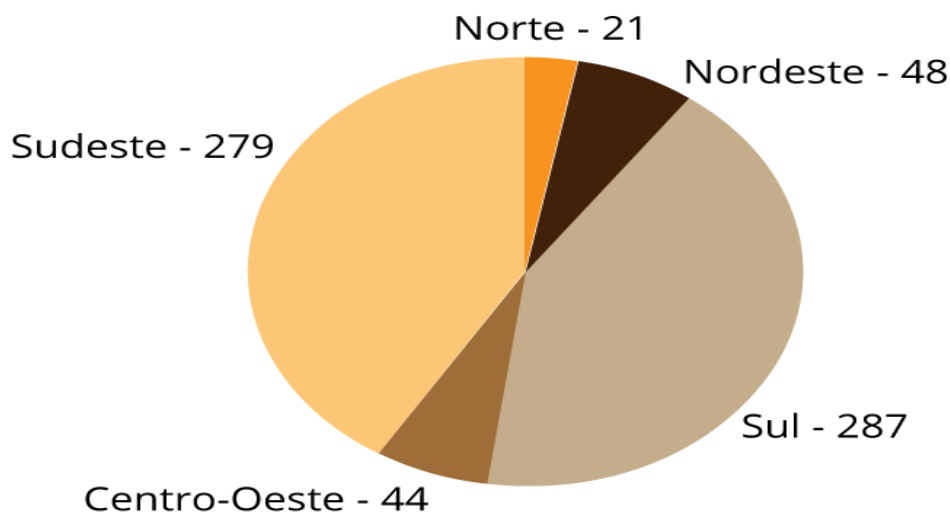


Fonte: MAPA (2017).

Esse aumento mostra que o mercado está amadurecendo e a demanda do consumidor aumentando. O consumidor, antes acostumado a beber apenas cervejas de rótulos comerciais, está descobrindo que os sabores da bebida vão além disso. A busca por produtos diferenciados mostra que a exigência do cliente reflete na qualidade dos fabricantes. Isso faz com que se queira investir mais nesse mercado, e o que antes era “*hobby*” para muitos está se tornando um negócio rentável. O que torna cada vez mais interessante, realizar estudos sobre o processo dessa bebida.

A maior parte das produtoras da bebida estão concentradas no Sul (42%) e no Sudeste (41%) do país. Porém, todas as regiões do Brasil estão investindo nesse tipo de produção. Entre os estados, o maior número de cervejarias está em São Paulo (122), seguido de Rio Grande do Sul (119) e Santa Catarina (72). A Figura 2 mostra a quantidade de cervejarias por região (MAPA, 2017).

Figura 2: Distribuição de cervejarias por região no Brasil.



Fonte: MAPA (2017).

Em relação à economia, o setor cervejeiro representou no ano de 2016 1,6% do PIB do país, e fechou o ano com um faturamento de R\$ 77 bilhões. É um dos setores mais empregadores do Brasil, com mais de 2,2 milhões de pessoas empregadas ao longo da cadeia produtiva, as cervejarias se tornam o 12º maior gerador de empregos de acordo com o BNDES (CERVBRASIL, 2017).

### 3.3 Matéria-prima

As matérias-primas utilizadas para a elaboração da cerveja são: a água, o malte de cevada, o lúpulo e a levedura, podendo também utilizar adjuntos. Os adjuntos utilizados em cervejarias são um suplemento ao malte de cevada. Sua utilização se deve por serem na maioria das vezes, produtos mais baratos que o malte e por poderem aumentar a capacidade de produção com o seu emprego. Mas, com a adição de adjuntos como trigo, arroz, entre outros, a cerveja deixa de ser puro malte, característica essa que os consumidores procuram ao obterem o produto (OLIVEIRA, 2011). A seguir serão descritas as matérias-primas utilizadas para a produção de cervejas artesanais.

### 3.3.1 Água

A água é o principal constituinte da cerveja e corresponde a pelo menos 90% de sua composição. A sua qualidade é um fator determinante na qualidade do produto final. Assim, a água a ser utilizada durante a fabricação da cerveja deve satisfazer os requisitos de uma água potável (limpa, sem cheiro, sem cor e também não pode ter nenhum microrganismo nocivo à saúde) (BARROS; BARROS, 2010).

Os parâmetros de qualidade mais importantes dessa matéria-prima para produção de cerveja são a dureza, o pH e a alcalinidade (MATOS, 2011). A dureza da água está relacionada com a quantidade de íons de cálcio e magnésio presentes, e é balanceada, em grande parte, pela alcalinidade. O nível de cálcio na água é importante para a estabilidade e sabor da cerveja. O cálcio estimula a ação enzimática das proteases e amilases, aumentando assim o teor de carboidratos fermentáveis e compostos nitrogenados no mosto (RIO, 2013). O magnésio, que provem principalmente do malte, na maioria das vezes está presente em quantidade suficiente na bebida e atua como co-enzima durante a etapa de fermentação (BERNSTEIN; WILLOX, 1977).

O pH ideal que este ingrediente deve apresentar é entre 5,1 e 5,7, para que, quando seja feita a mistura entre malte e água, o pH ideal das enzimas do malte possa ser atingido. Além disso o pH adequado do mosto durante a mosturação, promove a extração adequada os componentes químicos, responsáveis pelo aroma e o amargor contidos no lúpulo, e boa coagulação proteica durante a fervura, além de influir ainda na cor, no aroma e no sabor do tipo de cerveja a ser fabricada. Se a água apresentar alta alcalinidade, sua mistura com o malte resultará em um pH acima do normal (MATOS, 2011; MORAIS, 2015). A Tabela 1 mostra alguns parâmetros da água e seus respectivos padrões para utilização na fabricação de cerveja.

Tabela 1: Características da água para a produção da cerveja.

<i>Parâmetro</i>	<i>Unidade</i>	<i>Especificação</i>
<i>Sabor</i>	-	Insípida
<i>Odor</i>	-	Inodora
<i>pH</i>	pH	6,5 - 8,0
<i>Turbidez</i>	NTU	menor que 0,4
<i>Matéria Orgânica</i>	mg O <sub>2</sub> /L	0 - 0,8
<i>Sólidos Totais Dissolvidos</i>	mg/L	50 – 150
<i>Dureza Total</i>	mgCaCO <sub>3</sub> /L	18-79
<i>Sulfatos</i>	mgSO <sub>4</sub> /L	1 – 30
<i>Cloretos</i>	mgCl/L	1 – 20
<i>Nitratos</i>	mgNO <sub>3</sub> /L	Ausente
<i>Cálcio</i>	mgCa <sup>2+</sup> /L	5 – 22
<i>Magnésio</i>	mgMg <sup>2+</sup> /L	1 – 6
<i>CO<sub>2</sub> livre</i>	mgCO <sub>2</sub> /L	0,5 – 5

Fonte: Varnam; Sutherland (1997).

### 3.3.2 Malte de cevada

O malte é o produto obtido pela germinação e secagem da cevada (*Hordeum vulgare L.*) (BRASIL, 2009). De acordo com Hough (1985), ele é a principal matéria-prima da cerveja, qualitativamente, responsável por fornecer as enzimas e substrato apropriado para produção do mosto. A boa fermentação, o sabor, o aroma, a cor, o corpo, e a estabilidade do produto acabado dependem da composição do mosto.

O grão da cevada tem uma estrutura complexa, devido a essa característica, ele deve passar por um processo chamado de malteação, que dará origem ao malte de cevada. O amido presente no grão maltado de cevada encontra-se em cadeias menores, tornando-o menos duro e mais solúvel, fazendo com que na etapa de moagem do malte e adição de água, os carboidratos

presentes nos grãos sejam facilmente dispersados na solução (KREISZ, 2009). A Tabela 2 mostra a composição média do grão de cevada em comparação ao malte.

Tabela 2: Composição do grão de cevada e do malte.

<i>Características</i>	<i>Cevada</i>	<i>Malte</i>
<i>Massa do grão (mg)</i>	32 -36	29 – 33
<i>Umidade (%)</i>	10 – 14	4 – 6
<i>Amido (%)</i>	55 – 60	50 – 55
<i>Açúcares (%)</i>	0,5 – 1,0	8 – 10
<i>Nitrogênio Total (%)</i>	1,8 – 2,3	1,8 – 2,3
<i>Nitrogênio solúvel (% de N total)</i>	10 – 12	35 – 50
<i>Poder diastásico (º Lintner)</i>	50 – 60	100 – 120
<i>Alfa-amilase (Unidades de dextrina)</i>	Traços	30 – 60
<i>Atividade proteolítica</i>	Traços	15 - 30

Fonte: Adaptado de: Cereda (1983).

O processo de malteação consiste na umidificação do grão, em que as pequenas raízes começam a se desenvolver e ocorre a sintetização das enzimas responsáveis pela degradação do amido, das proteínas e de outras macromoléculas. Seguida da secagem em estufa, na qual ocorre a queda das radículas. Através dos diferentes graus de secagem, controlados com temperatura e umidade, são produzidos os diferentes tipos de malte. Para o malte de tipo *Pilsen*, a secagem é feita com temperaturas mais amenas, suficiente para retirar a água e preservar as enzimas. Por outro lado, secagens mais rigorosas produzem maltes mais escuros, responsáveis pela coloração mais escura de alguns tipos de cervejas, bem como aromas tostados como chocolate e café (BOULTON, 2013).

Além da cevada existem outros cereais que podem ser malteados para a produção de cerveja, no entanto, a cevada é o principal grão, devido às menores dificuldades técnicas, quantidade proteica satisfatória para a nutrição da levedura durante a fermentação, alto teor de amido, sabor, aroma e corpo característicos, geralmente esperados em uma cerveja de melhor qualidade, bem como a quantidade ideal de amilases que se desenvolvem durante a germinação e que são de suma importância para os processos seguintes (CEPPI; BRENNAN, 2010).

### 3.3.3 Lúpulo

O lúpulo (*Humulus lupulus L.*) é uma espécie de planta trepadeira, dióica, ou seja, que apresenta flores masculinas e femininas. Pertence ao grupo das Urticáceas e da família *Cannabaceae* (Figura 3). Na cerveja o lúpulo tem a função de atribuir aroma e sabor característicos, e é considerado um dos mais significativos componentes na sua fabricação, utilizado pelos mestres cervejeiros na diferenciação dos produtos (CERVESIA, 2010; MEGA; NEVES; ANDRADE, 2011).

Figura 3: Lúpulo.



Fonte: Charles (2010).

A característica aromática é proveniente dos óleos essenciais e a característica do amargor é oriunda das resinas amargas. Estes componentes estão presentes nas glândulas de lupulina que só são encontradas nas flores femininas e nos frutos recorrentes (OETERRER; REGITANO-D'ARCE; SPOTO, 2006).

Grande parte do amargor da cerveja, ácidos iso-alfa, que são misturas de seis componentes principais, equivalentes a três pares de estereoisômeros de compostos derivados de cada um dos três  $\alpha$ -ácidos do lúpulo. Durante a fervura do lúpulo no mosto, as moléculas de alfa-ácidos são isomerizadas para formar alfa-iso-ácidos (BORZANI, 2001).

Além de conferir sabor e aroma o lúpulo também possui propriedade biocida natural, desfavorecendo a contaminação bacteriana e apresenta a característica de diminuir/evitar a



ocorrência da formação de espuma durante a fervura, contribuindo para a estabilidade da espuma da cerveja, além da estabilização do sabor (LUNKES, 2013; MATOS, 2011).

### **3.3.4 Levedura**

As leveduras mais utilizadas no processo cervejeiro são as *Saccharomyces cerevisiae*, para produção de cervejas do tipo *Ale* (alta fermentação) e a *Saccharomyces uvarum* utilizada na fabricação de cervejas do tipo *Lager* (baixa fermentação). Elas têm como função principal a conversão de açúcares fermentescíveis (como glicose, frutose, sacarose, maltose e maltotriose) em etanol e gás carbônico e em menor quantidade em outros subprodutos (como glicerol, acetaldeído, butilenoglicol, além de ácidos orgânicos como o succínico, acético e pirúvico). Além disso, elas são determinantes nas características de aroma e sabor de qualquer cerveja (LIMA; FILHO, 2011; VENTURINI-FILHO, 2010).

## **3.4 Processo produtivo**

A produção de cerveja artesanal é realizado de forma mais simples, e não precisa, necessariamente, de equipamentos modernos. Além disso, a qualidade dos ingredientes é melhor (MATTOS, 2011).

O processo produtivo pode ser dividido em três etapas fundamentais: produção do mosto ou brassagem, a fermentação e, por último, o acabamento da cerveja (NOVOZYMES, 2013). A seguir serão descritas as etapas do processo produtivo de cervejas artesanais.

### **3.4.1 Produção do mosto ou brassagem**

A produção do mosto ou brassagem envolve a moagem do malte, a mosturação, clarificação, fervura e resfriamento do mosto. Essa etapa é essencial, uma vez que vai produzir os nutrientes essenciais para a fermentação. A sua composição é rica em açúcares, aminoácidos, vitaminas, íons inorgânicos e lipídios (COSTA, 2014).

### **3.4.1.1 Moagem do malte**

O início da produção de cerveja se dá pela moagem do malte. Ela é um dos fatores que vai determinar a velocidade com que as transformações físico-químicas ocorrem, o tempo de filtração do mosto, a ação das enzimas, como também, o rendimento do processo produtivo da cerveja. Nessa etapa, o malte é colocado em moinhos para que ocorra a quebra do mesmo. O principal objetivo é expor o endosperma. Isso facilitará a hidrólise do amido pela maior superfície de contato do substrato amiláceo com as enzimas do malte no processo de mosturação (BORTOLI; SANTOS; STOCCO, 2013).

Um malte moído de forma adequada não deve apresentar grãos inteiros, a maioria das cascas devem estar despedaçadas de forma longitudinal e o endosperma exposto e quebrado em partículas menores uniformemente. Os grãos moídos não podem ficar muito finos, pois isto dificultará no processo de filtração. Além disso, acarretará problemas pela presença dos taninos, que constituem a casca e causam adstringência na cerveja. Por outro lado, a moagem também não pode ser grosseira, pois assim não haverá a exposição do seu conteúdo, e será necessária uma quantidade maior de malte para se obter o rendimento esperado (NOVOZYMES, 2013).

### **3.4.1.2 Mosturação ou brassagem**

A mosturação ou brassagem, é a transformação das matérias-primas (água e malte) em mosto (uma solução, em água potável, de carboidratos, açúcares simples, proteínas, aminoácidos e sais minerais), por meio de uma curva de aquecimento, que é definida de acordo com a cerveja que se deseja produzir, levando em consideração o quanto de açúcares fermentescíveis deseja-se ou o quanto de substâncias proteicas de alto peso molecular almeja-se para o “corpo” da cerveja e consistência da espuma. Seu objetivo é solubilizar as substâncias solúveis em água e também as insolúveis, estas com auxílio de enzimas diferentes que atuam em temperaturas específicas, transformando o amido em açúcar e solubilizando as proteínas. É uma das etapas mais complexas, devido ser necessário o controle rigoroso da temperatura e de outros parâmetros para que as enzimas possam atuar de maneira ótima (CARVALHO, 2007; VENTURINI-FILHO, 2010).

Vários fatores interferem na brassagem da cerveja, entre eles podem ser destacados o grau de acidez e concentração do meio, a temperatura, o tempo, a qualidade do malte e a

constituição do produto da moagem, uma vez que todo o processo enzimático depende desses fatores (BOULTON, 2013).

Quando é realizada a mistura do malte com a água é preciso utilizar a diluição correta, uma vez que isso afetará na eficiência desse processo. Se a concentração estiver abaixo do indicado, as enzimas ficarão dispersas na água, e sua conversão de amido em açúcar poderá ser prejudicada, já se a concentração estiver muito elevada, as enzimas sentirão dificuldades na conversão, afetando assim a eficiência. Além disso, a proporção água /malte é utilizada para calcular a densidade do mosto, em que o mesmo influencia no tipo de cerveja que se quer produzir. O pH inicial da solução também deve ser ajustado para o pH ideal no qual ocorre a atividade da enzima que se quer ativar. A Tabela 3 apresenta valores de pH ótimos para a atuação de determinadas enzimas chaves no processo de mosturação.

Tabela 3: Valores de pH ótimos para a atuação de determinadas enzimas chaves no processo de mosturação.

<b>ENZIMAS</b>	<b>PH ÓTIMO</b>	<b>SUBSTRATO</b>
Hemicelulares	4,5 a 4,7	Hemicelulose
Exopeptidases	5,2 a 8,2	Proteínas
Endopeptidases	5,0	Proteínas
Dextrinase	5,1	Amido
Beta-amilase	5,4 a 5,6	Amido
Alfa-amilase	5,6 a 5,8	Amido

Fonte: Adaptado de: JANJAR (2007).

O ajuste é feito a partir da utilização do ácido lático, ou do ácido fosfórico. Nessa etapa a granulometria do malte também é fundamental, uma vez que ela afetará na exposição do amido para a ação das enzimas. Durante este processo enzimático é fundamental um controle rigoroso do tempo e da temperatura. O tipo de mosturação e o programa de tempo e temperatura utilizados durante a atuação enzimática são definidos a partir da composição e o tipo de cerveja a ser produzida (VENTURINI-FILHO, 2010).

A atuação enzimática normalmente é iniciada com a temperatura relativamente baixa (45 a 50°C) a fim de ativar as enzimas mais termolábeis, como aquelas que degradam qualquer

polissacarídeo encontrado na parede celular (BAMFORFTH, 2003). Entre as temperaturas de 45 e 55° C, ocorre a atuação das proteases sobre as proteínas, dando origem a aminoácidos, importantes para a nutrição da levedura, e peptídeos, importantes para a formação e retenção da espuma na cerveja. Já a sacarificação do amido tem início em temperaturas mais altas (60 a 75°C), ocorrendo a transformação de amidos em açúcares fermentescíveis, sendo os principais a maltose e as dextrinas (não fermentáveis). Mais especificamente, em temperaturas de 60 a 65°C, atuam as beta-amilase, e nas temperaturas de 70 a 75°C; as alfa-amilases (SANTOS 2010). As enzimas  $\alpha$ -amilases convertem parte do amido em açúcares não fermentáveis gerando uma cerveja menos alcoólica e mais encorpada/doce, já as beta-amilase convertem o amido em açúcares fermentáveis, que serão utilizados pela levedura e levarão a produção do álcool, resultando em uma cerveja mais alcoólica e menos encorpada/doce. Devido à ação das enzimas amilases sobre as ligações alfa-1,4 do amido, origina-se a maltose, que durante a fermentação, devido à ação da enzima maltase, será convertida em glicose. Já as dextrinas com ligações alfa-1,6 permanecerão sem se degradar, propiciando assim corpo à cerveja, colaborando também com o sabor e aroma (OETERRER; REGITANO-D'ARCE; SPOTO, 2006; VENTURINI-FILHO, 2005). Durante esse processo a mistura é aquecida a uma dada temperatura, que é mantida durante algum tempo, depois a mesma é elevada novamente, e assim por diante até a temperatura final ser alcançada. A Tabela 4 mostra as temperaturas de atuação de determinadas enzimas que agem nesse processo.

Tabela 4: Temperaturas de atuação das enzimas durante o processo de brassagem.

<b>ENZIMAS</b>	<b>TEMPERATURA</b>	<b>SUBSTRATO</b>
Hemicelulares	40 a 45 °C	Hemicelulose
Exopeptidases	40 a 50 °C	Proteínas
Endopeptidases	50 a 60 °C	Proteínas
Dextrinase	55 a 60 °C	Amido
Beta-amilase	60 a 65 °C	Amido
Alfa-amilase	70 a 75 °C	Amido

Fonte: Adaptado de: JANJAR (2007).

Atualmente, devido às modificações dos maltes vendidos é possível simplificar o processo de mosturação, controlando a brassagem de acordo com a atuação das enzimas alfa-amilases e beta-amilase utilizando assim uma rampa de aquecimento para aproveitar melhor a atuação de cada enzima durante o processo de sacarificação do amido. Um exemplo bastante genérico que funcionaria para a maioria das cervejas com resultados aceitáveis é trabalhar em apenas 1 uma rampa (meio termo) a uma temperatura de 67°C a 68°C. Nessa temperatura tanto a  $\alpha$ -amilases como a beta-amilases acabam atuando na conversão do amido.

No final do processo da brassagem são extraídos aproximadamente 65 % dos sólidos totais do malte, que em suspensão em água constituirão o mosto para a fermentação da cerveja. O ponto final da mosturação é quando ocorre a sacarificação, que consiste na completa degradação do amido pela ação da alfa-amilase e da beta-amilase, que se hidrolisa a açúcares fermentescíveis como maltose, glicose e maltotriose, além de formar dextrinas (SIQUEIRA et al., 2008). Durante a rampa de aquecimento, para saber se todo o amido foi convertido em açúcar é realizado o teste de iodo, que aponta o final da hidrólise quando o iodo não sofre mais alteração para a cor roxo-azulada, característica da reação do amido com o iodo (a temperatura ambiente). Em seguida é feito um aquecimento em torno de 76 °C para inativar as enzimas presentes (VENTURINI-FILHO, 2010).

### **3.4.1.3 Clarificação ou filtração**

Nesse processo realiza-se a filtração do mosto, em que ocorre a separação das partículas sólidas do líquido desejado. O principal objetivo dessa etapa é separar o mosto dos grãos e das cascas e filtrá-lo. Ela ocorre logo após a mosturação. O mosto é transferido para um tanque de fundo falso, que retém os grãos e permite a passagem do líquido clarificado para a próxima etapa. A própria casca e os grãos exauridos do malte servem como meio filtrante (ESTEVINHO, 2015).

Em seguida realiza-se a recirculação e lavagem do mosto. Na recirculação utiliza-se o líquido do próprio mosto, até que o mesmo fique límpido. Já na lavagem é utilizada água aquecida (aproximadamente 75°C) para que a temperatura do mosto permaneça elevada. A lavagem é realizada a fim de se extrair o máximo de açúcares (extrato) responsáveis por dar corpo à cerveja (ANNEMÜLLER; MANGER, 2013).

Esse processo de filtração permite a clarificação, o que deixa a cerveja mais translúcida e evita que a casca do malte passe para o processo de fervura liberando taninos no mosto (ROSA; AFONSO, 2015).

#### 3.4.1.4 Fervura

A etapa de fervura ocorre em um período de aproximadamente 60 a 90 minutos, e utiliza-se altas temperaturas. O principal objetivo é esterilizar o mosto para receber a levedura., além disso ocorrem várias outras transformações (ESTEVINHO, 2015).

Nesta fase há precipitação de proteínas, resinas e taninos, desnaturação de enzimas, aromatização e ocorre a evaporação da água, concentrando assim os extratos fermentescíveis do mosto. Nessa etapa também ocorre a formação de compostos que conferem cor e sabor característicos da cerveja, devido a reações entre aminoácidos e carboidratos (reações de Maillard), caramelização de açúcares e oxidação de polifenóis. Como também ocorre a liberação de compostos voláteis indesejados, sendo que o principal é o dimetil sulfeto (DMS), que confere sabor e aroma de milho em conserva (ANNEMÜLLER; MANGER, 2013).

Nesta etapa adiciona-se o lúpulo e adjuntos de interesse. Os ácidos  $\alpha$  do lúpulo são transformados em ácidos iso-  $\alpha$ , que é responsável pelo amargor da cerveja. Quanto maior o tempo de fervura do lúpulo maior o amargor conferido a cerveja e menor o aroma do lúpulo na mesma (ALMEIDA, 2014). Existe uma variedade de lúpulos, sendo que a adição de cada um varia com o tipo de aroma e sabor característico da cerveja de interesse. Normalmente o lúpulo é adicionado em dois estágios da fervura em forma de pellets. A primeira vez ocorre no início da fervura e é responsável por conferir amargor, e a última é adicionada faltando 15 minutos para o término da fervura, e confere o aroma à cerveja (DA ROCHA, 2014).

Após a fervura completa, o lúpulo usado e os materiais coagulados, que são chamados de *trub*, devem ser separados do mosto. Quando não separado, o *trub* pode prejudicar a fermentação, causando aparecimento de película ao redor da parede celular das leveduras e sedimentação, conseqüentemente, o grau de fermentação será reduzido e serão conferidos à cerveja coloração escura, sabor áspero e uma pobre estabilidade da espuma. Então é realizado um movimento giratório, conhecido como *whirlpool*. A técnica de *whirlpool*, consiste em girar o mosto na panela e deixa-lo em repouso por alguns minutos, de forma que os sólidos em suspensão se sedimentem e fiquem no fundo, facilitando a separação do mosto no momento da transferência para o fermentador (ASANTE, 2008).

#### 3.4.1.5 Resfriamento

O resfriamento é realizado para que a temperatura de inoculação de leveduras esteja adequada. Os níveis de queda da temperatura vão depender do tipo de cerveja que se vai

produzir, estando diretamente relacionadas com os tipos de fermentação: alta fermentação com temperaturas usuais de 7 C° a 10 C°, do tipo *Ale*, e as de baixa fermentação, com temperaturas em média de 18 C° a 22 C°, do tipo *Lager*. O processo deve ser realizado rapidamente e sob condições assépticas para interromper as reações químicas, assim como minimizar as possibilidades de crescimento de qualquer microrganismo contaminante (DRAGONE; ALMEIDA; SILVA, 2010).

Normalmente o resfriamento é realizado em trocadores de calor, ou fazendo o uso de serpentina em que a água fria passa por dentro.

### **3.4.2 Processo Fermentativo**

Nesta fase ocorre a transformação dos açúcares fermentescíveis em etanol e gás carbônico sob condições anaeróbicas, além da síntese de compostos de aroma e sabor característicos da cerveja. Esta etapa, é considerada a mais lenta da produção e abrange a fermentação do mosto, e a maturação (BETRAMELLI, 2012).

#### **3.4.2.1 Fermentação**

A fermentação é caracterizada pelo processo na qual as leveduras consomem os açúcares fermentescíveis, obtidos na etapa de mosturação, em álcool e gás carbônico. Os microorganismos responsáveis por essa etapa são do gênero *Saccharomyces*, sendo a principal espécie *Saccharomyces cerevisiae* (ALMEIDA, 2014).

Durante esse processo é preciso controlar a temperatura de acordo com o tipo de cerveja que se quer obter (*Lager* ou *Ale*). Nas microcervejarias o controle da temperatura ocorre em geladeiras e algumas técnicas se diferenciam das grandes cervejarias. O objetivo central desta etapa é conferir a cerveja características sensoriais, químicas e físico-químicas desejadas (ESTEVINHO, 2015).

A quantidade de levedura a ser adicionada no meio deve resultar numa concentração de 5 a 15 milhões de células por mililitro de mosto, sendo considerado como nível ótimo a grandeza de  $10^7$  cel/mL. As leveduras inoculadas catabolizam todos os açúcares disponíveis no extrato (glicose, frutose, sacarose, maltose e maltotriose), levando a formação de duas moléculas de etanol, duas moléculas de dióxido de carbono e energia (2ATP), a cada molécula simples de açúcar (BORTOLI; SANTOS; STOCCO, 2013).

Durante a fermentação o pH decresce pelo menos em uma unidade devido aos ácidos orgânicos produzidos, na cerveja ele varia entre 4,3 a 4,6. Esse processo dura em torno de 7 a 12 dias, e como produto se obterá a chamada cerveja “verde” (EBLINGER; NAZIBER, 2012).

### **3.4.2.2 Maturação**

A maturação é um repouso prolongado da cerveja realizado a temperaturas baixas (0 a 3°C) durante um período de 15 a 60 dias, que contribui para a clarificação da cerveja e melhoria do sabor final. O seu objetivo é refinar o sabor e o aroma da cerveja pela redução do teor de diacetil, acetaldeído e ácido sulfídrico, além do aumento do teor de éster; carbonatar parcialmente o produto (por meio da fermentação secundária); evitar a ocorrência de oxidações que comprometam sensorialmente a bebida; e clarificar o líquido através de deposição do fermento e outros materiais em suspensão (DRAGONE; ALMEIDA; SILVA, 2010).

### **3.4.3 Acabamento**

O acabamento é a fase final da produção, envolve os processos de clarificação, carbonatação, envase e pasteurização da bebida.

#### **3.4.3.1 Clarificação**

O objetivo dessa etapa é a remoção de componentes em suspensão, tais como: leveduras, resinas do lúpulo e complexos taninos-proteicos. Esse processo ocorre a temperaturas que podem variar entre 0 a 5°C, e além da sedimentação de leveduras e proteínas, neta etapa também acontece a degradação lenta ou estabilização de compostos como o diacetil, produzidos na 1ª fermentação (BORTOLI; SANTOS; STOCCO, 2013). Existem três técnicas básicas de clarificação que são utilizadas individualmente ou combinadas: substâncias clarificantes, centrifugação e filtração (MUNROE, 2006).

#### **3.4.3.2 Carbonatação**

Como a quantidade de CO<sub>2</sub> existente na cerveja ao final do processo não é suficiente para atender as necessidades do produto (espuma, formação de bolha), realiza-se a carbonatação da mesma. Na fabricação artesanal esse processo pode ser realizado de duas maneiras: *priming*



e a carbonatação forçada (MATTOS, 2011). O *priming* consiste em adicionar açúcares fermentescíveis na cerveja imediatamente antes do envase, e as leveduras presentes na cerveja farão uma segunda fermentação liberando CO<sub>2</sub>. Para que seja possível fazer o *priming* não se pode utilizar a centrifugação nem a filtração como técnica de clarificação, já que é necessária uma pequena concentração de levedura no meio. Já a carbonatação forçada, consiste em injetar gás carbônico na cerveja (que está em um barril) usando um cilindro, um conjunto de mangueiras e uns conectores. Esse processo permite um maior controle de gás adicionado à cerveja que o *priming* (KUNZE, 2010).

### 3.4.3.3 Envase

O envase pode ser realizado em barris, garrafas de vidro ou latas de alumínio. Normalmente para cervejas artesanais são utilizados os barris e as garrafas. Antes do envase o recipiente deve ser bem esterilizado para evitar a contaminação da cerveja. Outro cuidado que se deve tomar é a exposição da cerveja ao oxigênio. Ao realizar a transferência para as garrafas o líquido deve escorrer, sem muita turbulência, para dentro da garrafa, até que a mesma esteja quase totalmente preenchida (MATOS, 2011).

### 3.4.3.4 Pasteurização

A pasteurização é realizada com o intuito de manter a estabilidade da cerveja, destruindo microorganismos que a deterioram e, deste modo, aumentando sua vida de prateleira (validade). O procedimento consiste em manter, por alguns minutos (cerca de 20 min.), a cerveja sob a temperatura de 60°C a 65°C, através do banho maria ou a vapor, e em seguida, esfriá-la com água fria. Ao fim desse processo, a cerveja está pronta para o consumo e é acondicionada em local seco e arejado até que seja distribuída e então comercializada (DA ROCHA, 2014).

## 3.5 Estudo da cinética

Modelos cinéticos são importantes ferramentas para avaliar determinadas condições de um processo e elaborar estratégias para elevar ao máximo a formação do produto de interesse. Devido à sua importância, o desenvolvimento de modelos matemáticos que descrevam acontecimentos naturais torna-se indispensável para evitar gastos desnecessários e perda de

tempo de produção dentro de uma empresa. Uma vez que a partir de modelos matemáticos de é possível se obter resultados apenas utilizando a equação (THILAKAVATHI et al., 2007).

Modelos descrevendo as principais variáveis de um processo de brassagem serão úteis para a otimização e controle das atuais operações de produção. Realizar o ajuste dos dados experimentais e a modelagem cinética proporciona interpretações coerentes dos resultados experimentais e podem ser úteis para analisar novos aspectos do processo. Além disso, os modelos podem ser utilizados para planejar experimentos mais específicos, buscando um maior rendimento dos produtos de interesse (ANDADRE, 2012).

Para construir as equações que irão representar um processo de interesse, é necessária a compreensão e conhecimento dos principais componentes que influenciam o comportamento do processo. No caso da brassagem, as variáveis que influenciam são a granulometria, o pH, a diluição, a temperatura e o tempo, como descrito anteriormente.

### **3.6 Planejamento fatorial**

O planejamento fatorial de experimentos é constituído de um conjunto de técnicas estatísticas que proporcionam um método sistemático para planejar, executar e analisar experimentos. Partindo de um planejamento fatorial é possível, por exemplo, determinar se uma variável influencia significativamente a resposta de um experimento. A influência de diversos fatores pode ser facilmente avaliada por um planejamento fatorial, o que um estudo de uma única variável, mais comum, não permite avaliar a influência de diversos fatores simultaneamente (BARROS; SCARMINIO; BRUNS, 2010).

Além disso, ele permite estimar os efeitos de diversos fatores, assim como as interações entre os mesmos sobre a variável de resposta. Nos mais diversos ramos do conhecimento humano, há a necessidade de se conhecer quais variáveis são importantes em um processo, para que se tenha um domínio sobre o mesmo, assim como a que faixa de valores estas variáveis estão limitadas, e para se obter a otimização de um processo deve-se escolher um valor máximo e mínimo das variáveis durante a execução dos experimentos. O planejamento fatorial é uma técnica que vem sendo amplamente utilizada nos últimos tempos. Seu emprego possibilita conhecer as variáveis ou a combinação de variáveis que exercem uma maior influência sobre a resposta de um processo; com isso é possível reduzir tempo e o custo operacional, melhorando o rendimento a partir das respostas obtidas no planejamento fatorial (CUNICO et al., 2008).

Os métodos de otimização surgiram da necessidade de se aproveitar melhor o desempenho dos mais diversos sistemas, sendo a ideia de otimização correspondente a obter o melhor resultado possível de uma dada situação. Cientificamente as instruções para se obter um ótimo são expressas através de métodos matemáticos que procuram maximizar ou minimizar alguma propriedade específica do sistema em estudo. É na escolha da propriedade a ser otimizada e das condições de controle onde que se aplica o maior esforço. Com isto é possível obter o conjunto de variáveis que leva o processo a ter um desempenho otimizado (BARROS et al., 2010).

Para se realizar um planejamento fatorial, escolhem-se as variáveis a serem estudadas e se realizam experimentos para diferentes valores das variáveis estudadas. De forma geral, o planejamento fatorial pode ser representado por  $b^a$ , onde “a” é o número de fatores e “b” é o número de níveis escolhido para cada fator (CUNICO et al., 2008).

### 3.7 Programa Statistica®

Dentre os programas utilizados para se analisar os resultados do planejamento fatorial se tem o Statistica®, produzido pela STATSOFT®. O Statistica® fornece o mais abrangente conjunto de ferramentas para análise, gestão e visualização de bases de dados e Data Mining. As suas metodologias incluem as mais variadas opções de modelagem preditiva, agrupamentos (clustering) e ferramentas exploratórias. O Statistica® é uma plataforma verdadeiramente analítica e testada, com mais de duas décadas de experiência no fornecimento de resultados confiáveis, com uma comunidade mundial superior a 1 milhão de usuários, segundo dados da própria STATSOFT® (BARROS et al., 2010).

Através do uso do Statistica® é realizada a análise estatísticas de dados experimentais. Um dos modelos estatísticos muito utilizados é o modelo quadrático, sendo os coeficientes determinados pelo método de ajuste dos mínimos quadrados (95% de confiança) por uso do Statistica®. O método dos mínimos quadrados consiste em diminuir ao máximo a diferença existente entre os valores experimentais obtidos ( $a_i$ ) e os valores preditos pelo modelo matemático ( $\hat{a}_i$ ), tornando mínimo o resíduo ( $e_i$ ), ou seja, a diferença entre o valor observado e o valor predito ( $e_i = a_i - \hat{a}_i$ ). Além de calcular os coeficientes da equação do modelo estatístico, através dessa ferramenta pode-se realizar um estudo dos efeitos provocados pelos fatores na variável resposta, através do gráfico de Pareto, que indicará quantitativamente esta influência das variáveis (CUNICO et al., 2008).

### 3.8 Software MathLab®

O MathLab® (do inglês *Matrix Laboratory*) é um software de computação numérica de análise e visualização de dados conhecido mundialmente. Ele foi criado como um programa para operações matemáticas sobre matrizes, mas ao longo dos anos transformou-se em um sistema computacional bastante útil e flexível (BECKER et al., 2010).

É um software com um ambiente de trabalho fácil de ser utilizado, uma vez que os problemas e soluções são escritos em linguagem matemática e não na linguagem de programação tradicional, como muitos outros softwares utilizam. Sendo uma excelente ferramenta para soluções de problemas matemáticos, científicos e tecnológicos, que possui comandos muito próximos da forma como escrevemos as expressões matemáticas, pode ser utilizado como prancheta de rascunhos para avaliar expressões digitadas nas linhas de comando, ou para executar programas grandes previamente escritos, pois ele possui um ambiente de desenvolvimento integrado embutido, um depurador de informações (HANSELMAN; LITTLEFIELD, 2004).

O MathLab® possui uma vasta biblioteca de funções predefinidas, com mais de 1.000 funções, entre elas algumas matemáticas, tais como: Matemática elementar; Funções especiais; Matrizes elementares; Matrizes especiais; Decomposição e fatorização de matrizes; Análise de dados; Polinômios; Solução de equações diferenciais; Equações não-lineares e otimização; Integração numérica; Processamento de sinais entre outras. Neste artigo será apresentado apenas funções do MathLab® relativos à álgebra linear e algumas tarefas técnicas básicas para o uso deste software (TRINDADE; SAMPAIO, 2002).

Assim o MathLab® é uma ferramenta e uma linguagem de programação de alto nível, e tem como principais funções: construção de gráficos e compilação de funções, manipulação de funções específicas de cálculo e variáveis simbólicas. Além disso, essa ferramenta possui uma grande quantidade de bibliotecas auxiliares (“*Toolboxes*”) que otimizam o tempo gasto para realizar tarefas, uma vez que, o usuário poderá utilizar muitas funções já definidas, poupando o tempo de criá-las (BECKER et al., 2010).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada foi dividida em três tópicos, sendo eles planejamento fatorial, processo de brassagem e modelagem cinética.

### 4.1 Planejamento fatorial

Os experimentos realizados nesse trabalho foram feitos adotando o planejamento fatorial segundo a Tabela 5, em que estão representadas as variáveis escolhidas para o estudo (pH, temperatura, granulometria e diluição). O planejamento levou em conta o ponto central sendo assim um planejamento  $3^4$ .

Tabela 5: Planejamento fatorial para a brassagem da cerveja.

Variável	Nível mínimo (-)	Ponto central (0)	Nível máximo (+)
Ph	5,0	5,5	6,0
Temperatura	50°C	60°C	70°C
Diluição (água)	70%	75%	80%
Granulometria do malte	1,19 mm	2,00 mm	4,00 mm

Fonte: O autor (2018).

A variável resposta foi o teor de açúcar medido em Brix. Esta variável foi medida em todos os planejamentos ao longo do tempo no intervalo de 10 minutos até o final da brassagem (60 minutos).

As faixas de variação entre os limites dos parâmetros de temperatura e pH, foram estabelecidos de acordo com as faixas de ativação das principais enzimas que atuam no processo, a alfa-amilase e a beta-amilase. Para a diluição levou-se em conta a faixa média adotada pelos mestres cervejeiros para produção de cerveja tipo *Pilsen*. Essa faixa corresponde de 70 a 80% de água na mistura água/malte dependendo da receita utilizada, por isso esta faixa teste foi escolhida (HUGHES, 2014; MILLER, 1990).

Em relação a granulometria do malte, para a escolha das peneiras foi levado em consideração o *mesh* maior possível a fim de que este representasse a granulometria usada em

moagens de malte por moinhos de rolos. O *mesh* 5,0 foi o que apresentou a abertura “limite máxima”. De posse dessa informação, procurou-se adotar como “limite mínimo” do grão a peneira que apresentasse o menor *mesh*. Com isso, foi feita a escolha do *mesh* 16,0 como menor grão a ser usado. A fim de que o planejamento estivesse completo, foi adotado um *mesh* intermediário. Para isso escolheu - se a peneira com *mesh* 10,0. Foram utilizadas as peneiras da marca Bertel®.

Vale ressaltar que a escolha de todas as faixas foi feita levando em consideração as faixas que são utilizadas na fabricação de cervejas. Uma vez que o modelo matemático a ser proposto é para ser usado por mestres cervejeiros como também por empresas, não sendo interessante nesse caso, fazer estudos com outros valores das variáveis.

## 4.2 Processo de brassagem

Os experimentos foram realizados no laboratório de física da Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica de Garanhuns (UFRPE-UAG) em parceria com o laboratório de Simulação e Dinâmica de Processos Químicos da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

Inicialmente, os maltes foram triturados a seco em moedor manual de discos. O malte moído foi do tipo *Pilsen* da marca Agrária®, adquirido na *CiBrew* localizada em Recife /PE. Esse processo foi realizado com o objetivo de expor a parte interna do malte, o endosperma, o que facilita a ação das enzimas sobre o mesmo no processo da brassagem, não comprometendo a hidrólise do amido (PAIVA, 2011). Em seguida, o malte moído foi peneirado em peneiras com *mesh* de 5,0 (4,00 mm de abertura); 10,0 (2,00 mm de abertura) e 16,0 (1,19 mm de abertura), como pré-estabelecido no planejamento fatorial. A Figura 4 mostra a moagem do malte *Pilsen* e a seleção dos grãos em peneira de *mesh*.

Figura 4: Moagem e peneiramento do malte *Pilsen*.



Fonte: O autor (2018).

A Figura 5 mostra as seleções dos maltes após a moagem conforme a especificação *mesh* usada neste trabalho.

Figura 5: Seleção da granulometria do malte conforme o *mesh*.



Fonte: O autor (2018).

Após a moagem e seleção de acordo com a granulometria, foi realizada a pesagem do malte. Para isto utilizou-se uma balança analítica, e foram pesadas amostras de 10g do grão moído para cada experimento. A Figura 6 mostra o procedimento de pesagem realizado.

Figura 6: Pesagem do malte em balança analítica.

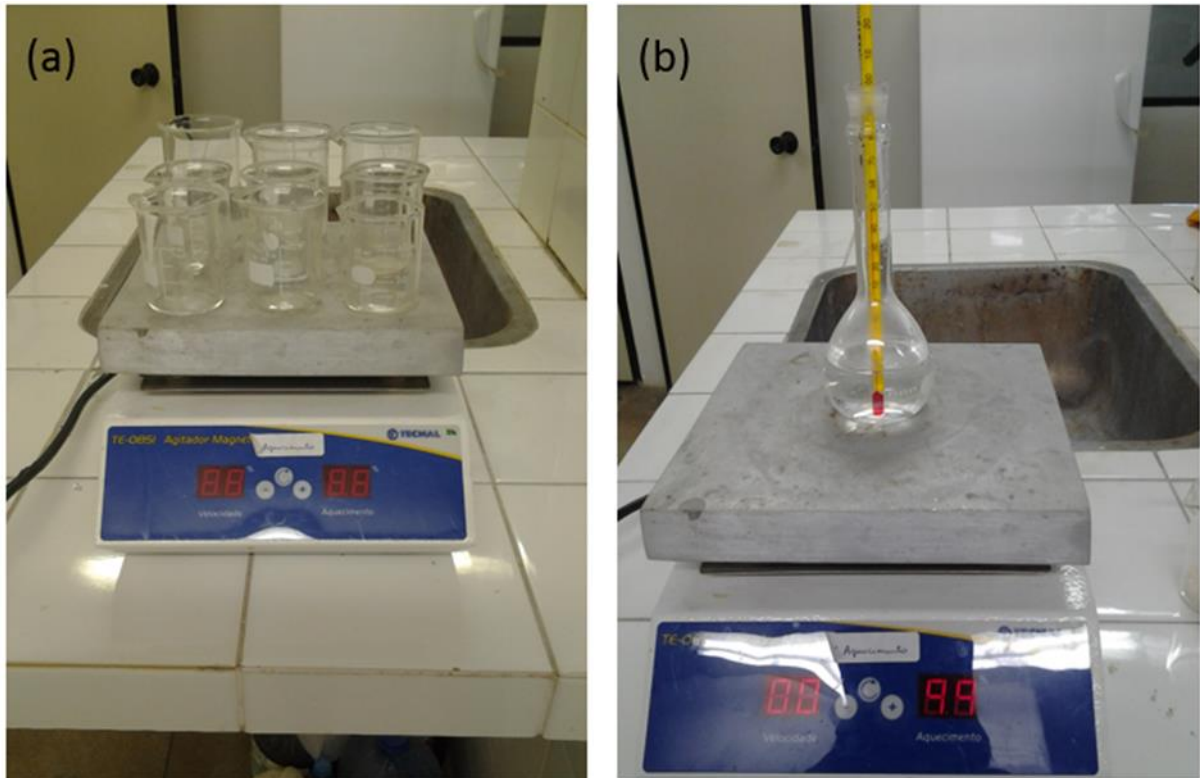


Fonte: O autor (2018).

Após a pesagem deu-se início ao processo de brassagem. Para essa etapa foram utilizados béqueres de 100 mL, chapa de aquecimento e dois termômetros para medir a temperatura durante os ensaios. A fim de se otimizar a realização dos experimentos, foram realizados 9 experimentos em paralelo com aqueles que apresentassem a mesma temperatura conforme montado no planejamento. Dessa forma, pôde-se obter os resultados mais rápidos e com maior confiabilidade no controle da temperatura para vários experimentos, pois estes estariam compartilhando o mesmo momento de aquecimento (Figura 7-a). Além disso, antes de iniciar os experimentos, foi realizado um controle de aquecimento prévio (Figura 7-b) da chapa para que a água em cada experimento estivesse na temperatura devida no início do ensaio. Dessa forma, evitou-se que a reação de sacarificação iniciasse antes levando a falsos resultados. Também se teve atenção especial para a correção do pH antes de iniciar o processo, seguindo o planejamento pré-estabelecido.



Figura 7: Experimentos sendo preparados em paralelo para a mesma temperatura (a). Controle da temperatura da chapa antes de se iniciar os experimentos (b).

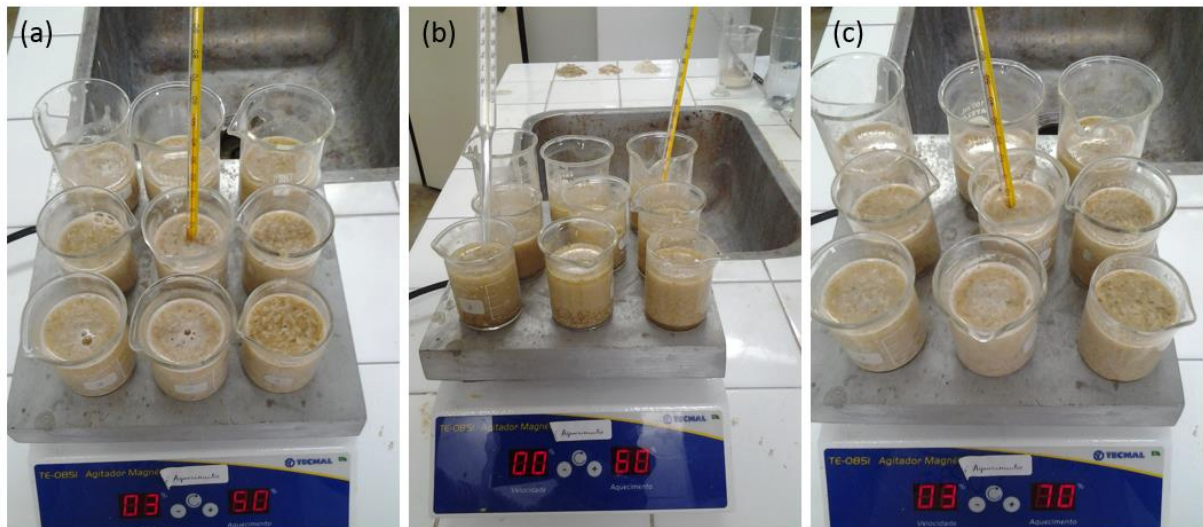


Fonte: O autor (2018).

Por fim deu-se início aos experimentos conforme o planejamento experimental. Primeiramente a água foi aquecida até que a temperatura atingisse o valor devido (de 2 a 3°C acima da temperatura desejada, já que com a adição do malte ela diminui), após o aquecimento da água foi adicionado o malte e corrigido o pH de cada amostra. A correção do pH foi realizada utilizando ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) para reduzir o pH e bicarbonato de sódio ( $NaHCO_3$ ) para aumentar a alcalinidade.

A Figura 8 mostra os experimentos sendo realizados por grupos. A regulagem da temperatura na chapa de aquecimento foi realizada através de um potenciômetro instalado na própria chapa, o qual varia de 0 até 100% da potência máxima da mesma. A chapa de aquecimento apresentou na sua regulagem um valor para a temperatura aproximadamente igual ao valor da regulagem em percentual selecionada pelo potenciômetro. Isto ajudou a manter a chapa regulada para o valor de temperatura a ser usado no experimento. Além disso, foi feito o uso de dois termômetros inseridos nas amostras a fim de que fosse possível medir o nível de aquecimento do experimento para manter a temperatura do experimento sob controle.

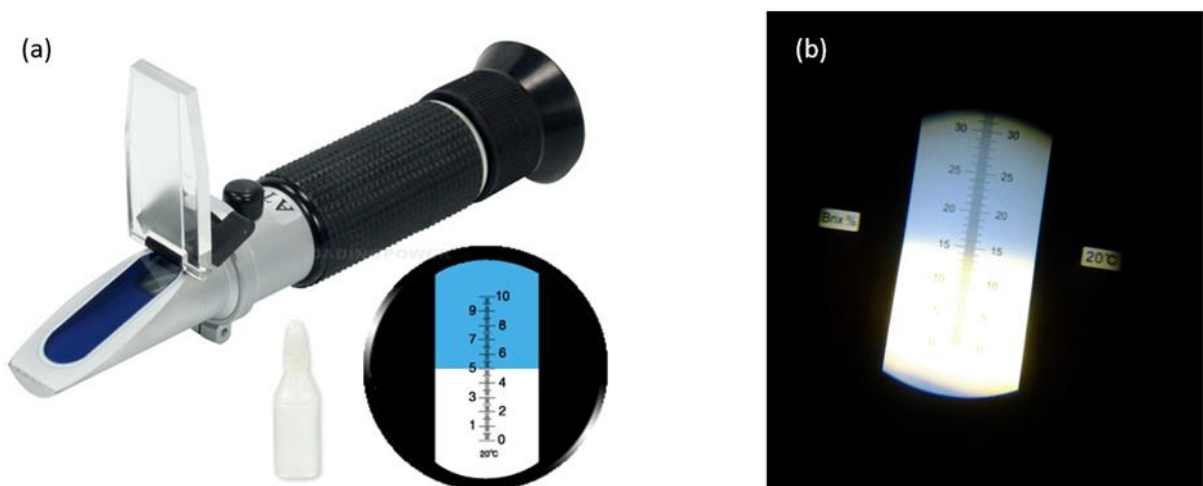
Figura 8: Experimentos por grupos de mesma temperatura 50°C (a), 60°C (b) e 70°C (c).



Fonte: O autor (2018).

Durante o procedimento foi retirada uma alíquota de cada amostra do grupo de 9 experimentos para a mesma temperatura e anotado o valor do Brix medido em um refratômetro. A Figura 9-a mostra um modelo do refratômetro usado (da marca Alla Brasil®), enquanto que a Figura 9-b mostra a leitura sendo realizado *in loco* pelo instrumento. Cada medição foi realizada no intervalo de tempo de 10 minutos. Sendo a primeira medição realizada nos primeiros 5 minutos para se ter uma noção da velocidade da reação.

Figura 9: Modelo do refratômetro usado (a) e medição feita nas amostras (b).



Fonte: Insmart Comércio de Equipamentos Ltda (2018) (a). O autor (2018) (b).

O experimento teve duração de aproximadamente 60 minutos (tempo de uma brasagem). Durante o procedimento foi realizado o teste de iodo a cada 10 minutos para

acompanhar o consumo do amido, finalizando quando o iodo parou de indicar a presença do mesmo.

O tratamento dos dados se deu pelo programa Statistica®. A partir dos resultados foram gerados os gráficos de resposta para a concentração em função das variáveis Diluição x Temperatura; Temperatura x pH; Temperatura x Granulometria; Diluição x pH; Granulometria x pH; Diluição x granulometria.

### **4.3 Modelagem cinética**

Para a elaboração do modelo cinético, acompanhou-se a evolução do Brix em função do tempo. Anotou-se o valor do Brix no intervalo de 10 minutos durante 1 hora representando um ciclo de brassagem. O ajuste do modelo cinético aos resultados foram feitos com o auxílio do software MathLab®, sendo criada uma programação específica para o modelo proposto. No Apêndice encontra-se o algoritmo utilizado neste trabalho para a estimação dos parâmetros.

O gráfico de superfície para o modelo cinético abrange os parâmetros de maior relevância (granulometria, temperatura e tempo). A modelagem cinética foi realizada para os três níveis de pH (5,0, 5,5 e 6,0), escolhendo-se para isso uma diluição de 75% (ponto central), uma vez que a mesma pode ser extrapolada para mais ou para menos pelo próprio modelo, e a granulometria de 2mm (ponto centro), que melhor representa a constituição do grão utilizado por mestres cervejeiros, segundo Hunghe (2014) e Miller (1990).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Análise estatística

As Tabelas 6, 7 e 8 mostram o planejamento com todos os níveis, e as variáveis dependentes anotadas durante os experimentos.

Tabela 6: Resultado do planejamento fatorial (Continua).

Experimento	Variáveis independentes				Brix - Variável dependente (minutos)						
	pH	Temperatura	Diluição	Granulometria	5	10	20	30	40	50	60
1	+	+	+	+	2,5	3,5	5,0	6,5	7,0	7,5	9,0
2	-	+	+	+	2,5	3,5	5,0	5,5	6,0	7,0	8,0
3	0	+	+	+	2,5	3,5	5,0	6,0	6,5	7,0	7,5
4	+	-	+	+	1,5	2,5	4,5	5,5	5,5	7,0	8,5
5	-	-	+	+	2,0	3,0	4,5	4,5	5,5	6,0	7,0
6	0	-	+	+	2,0	2,0	3,5	4,0	5,5	5,5	6,5
7	+	0	+	+	2,0	2,5	5,0	6,0	6,5	7,5	9,0
8	-	0	+	+	2,0	3,5	4,5	5,0	5,5	6,5	7,5
9	0	0	+	+	2,0	2,5	4,0	5,5	6,0	6,5	7,0
10	+	+	-	+	3,0	3,5	4,5	5,5	6,0	7,0	7,5
11	-	+	-	+	3,0	3,0	4,5	5,5	6,5	7,0	8,0
12	0	+	-	+	2,5	3,0	4,5	5,0	6,5	7,0	8,0
13	+	-	-	+	1,5	2,5	3,5	4,5	5,0	6,0	6,5
14	-	-	-	+	2,0	2,0	3,5	4,0	5,0	6,0	7,0
15	0	-	-	+	1,5	2,0	3,5	4,0	5,0	5,5	7,0
16	+	0	-	+	2,0	3,0	4,0	5,0	5,5	6,5	7,0
17	-	0	-	+	2,5	2,5	4,0	5,0	5,5	6,5	7,5
18	0	0	-	+	2,0	2,5	4,0	4,5	5,5	6,0	7,0
19	+	+	0	+	2,0	3,0	4,0	5,0	5,5	6,0	6,5
20	-	+	0	+	2,0	2,5	3,5	4,5	5,0	5,5	6,0
21	0	+	0	+	2,0	2,5	3,0	4,0	4,0	4,5	5,0
22	+	-	0	+	1,0	2,0	3,5	3,5	4,0	5,0	5,5
23	-	-	0	+	1,0	1,5	2,5	3,0	4,0	4,5	5,5
24	0	-	0	+	1,5	1,5	2,0	2,5	2,5	3,0	4,0

Tabela 7: Resultado do planejamento fatorial (Continuação).

Experimento	Variáveis independentes				Brix - Variável dependente (minutos)						
	pH	Temperatura	Diluição	Granulometria	5	10	20	30	40	50	60
25	+	0	0	+	1,5	2,0	3,5	4,0	4,5	5,5	6,0
26	-	0	0	+	1,5	2,0	3,0	3,5	4,5	5,0	5,5
27	0	0	0	+	1,5	2,0	3,0	3,5	3,5	4,0	4,5
28	+	+	+	-	8,5	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	13,5
29	-	+	+	-	9,0	10,0	11,5	13,5	15,5	16,0	16,5
30	0	+	+	-	8,0	9,0	10,0	11,5	12,5	13,5	14,0
31	+	-	+	-	7,5	9,5	9,5	9,5	10,0	10,5	11,5
32	-	-	+	-	7,5	9,5	11,0	11,5	12,5	13,0	14,5
33	0	-	+	-	7,5	8,0	9,0	9,5	10,0	10,0	11,0
34	+	0	+	-	8,0	9,0	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0
35	-	0	+	-	8,5	10,5	12,0	13,0	14,5	15,5	15,5
36	0	0	+	-	8,0	8,5	9,0	10,0	11,5	11,5	12,0
37	+	+	-	-	8,0	9,5	11,5	13,0	14,0	15,0	15,5
38	-	+	-	-	8,5	10,0	12,5	14,5	16,0	17,5	18,0
39	0	+	-	-	8,5	10,5	15,5	17,0	18,5	20,5	21,5
40	+	-	-	-	11,0	11,0	11,5	12,0	12,5	12,5	13,0
41	-	-	-	-	11,5	12,5	13,5	14,5	15,0	15,0	17,0
42	0	-	-	-	13,5	14,5	15,5	16,5	17,0	17,0	18,5
43	+	0	-	-	8,5	10,0	11,5	12,0	13,0	13,5	14,0
44	-	0	-	-	9,0	11,5	14,0	15,5	16,0	17,0	17,5
45	0	0	-	-	9,5	12,0	14,5	16,0	17,0	18,5	19,0
46	+	+	0	-	9,0	10,5	12,0	12,5	13,5	13,5	14,0
47	-	+	0	-	12,0	14,0	15,0	16,5	17,5	17,5	18,0
48	0	+	0	-	9,5	11,5	13,0	14,0	14,5	15,0	15,0
49	+	-	0	-	8,5	9,5	10,5	11,0	11,0	11,0	11,5
50	-	-	0	-	10,5	10,5	13,5	14,5	15,0	15,5	16,0
51	0	-	0	-	8,0	9,5	11,5	11,5	12,0	12,0	12,5
52	+	0	0	-	9,0	10,5	11,0	11,5	12,0	12,0	12,5
53	-	0	0	-	11,0	13,5	15,0	16,0	16,5	17,0	17,0
54	0	0	0	-	9,5	11,0	12,0	13,0	13,5	13,5	13,5
55	+	+	+	0	7,5	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5	14,0

Tabela 8: Resultado do planejamento fatorial (Conclusão).

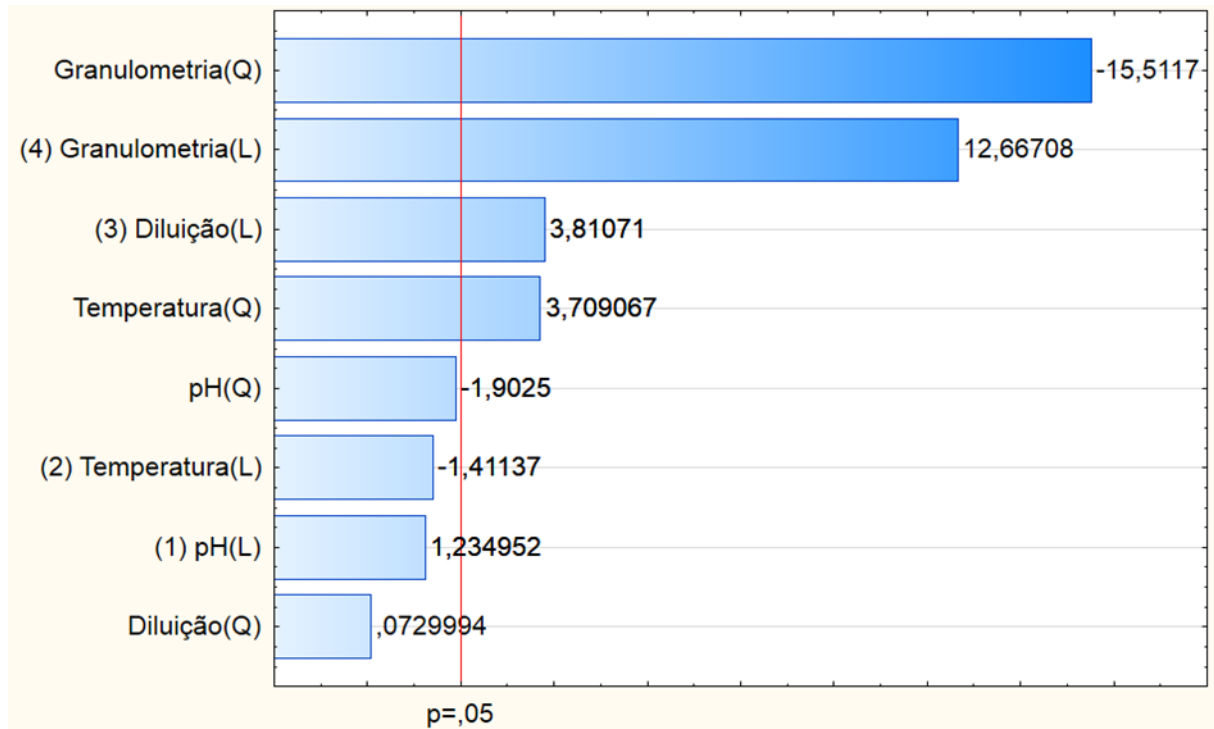
Experimento	Variáveis independentes				Brix - Variável dependente (minutos)						
	pH	Temperatura	Diluição	Granulometria	5	10	20	30	40	50	60
56	-	+	+	0	7,0	8,5	10,5	11,5	12,0	13,0	14,0
57	0	+	+	0	8,0	10,5	11,0	12,5	13,0	14,0	15,5
58	+	-	+	0	2,0	2,5	4,5	5,5	6,0	7,5	9,0
59	-	-	+	0	2,0	3,5	4,5	5,0	6,0	6,5	8,0
60	0	-	+	0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	6,5	7,5
61	+	0	+	0	3,0	5,5	6,5	7,0	8,0	9,5	10,5
62	-	0	+	0	4,0	5,0	6,0	7,5	8,5	9,0	10,0
63	0	0	+	0	4,5	5,5	6,5	7,0	8,5	9,5	10,5
64	+	+	-	0	3,0	3,5	4,5	5,0	6,5	7,5	8,0
65	-	+	-	0	3,0	3,5	4,0	5,5	6,0	7,5	8,0
66	0	+	-	0	3,0	4,0	4,5	5,5	6,5	7,0	8,0
67	+	-	-	0	2,0	2,5	4,0	5,0	6,0	6,5	7,0
68	-	-	-	0	2,0	3,0	4,0	4,5	5,5	6,5	7,5
69	0	-	-	0	2,0	3,0	4,0	4,5	6,5	7,0	8,0
70	+	0	-	0	2,5	3,0	4,0	5,5	6,5	7,0	7,5
71	-	0	-	0	2,5	3,5	4,0	5,0	6,0	7,0	7,5
72	0	0	-	0	2,5	3,5	4,5	5,0	7,0	7,5	8,0
73	+	+	0	0	2,5	3,0	4,0	4,5	5,5	6,5	7,0
74	-	+	0	0	2,5	3,0	4,5	5,0	6,0	6,5	7,0
75	0	+	0	0	3,0	3,5	4,0	4,5	5,5	6,0	6,5
76	+	-	0	0	1,5	2,5	3,5	4,0	5,0	5,5	6,0
77	-	-	0	0	1,5	2,0	3,0	3,5	4,5	5,0	6,0
78	0	-	0	0	2,0	2,0	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
79	+	0	0	0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	6,5	7,0
80	-	0	0	0	2,0	2,5	3,5	4,5	5,0	5,5	6,0
81	0	0	0	0	2,5	2,5	3,0	4,0	5,0	5,5	6,0

Fonte: O autor (2018)

O gráfico de Pareto (Figura 10) apresenta as variáveis que são mais significativas para o processo, bem como as interações entre as mesmas (análise de influência dos parâmetros em função das respostas). Percebeu-se que a granulometria é a variável com mais impacto para o teor de Brix final no processo de mosturação da cerveja. Isto pode ser justificado quando é analisado a superfície de reação. Grãos com *mesh* alto possuem um maior contato íntimo com o meio líquido. Como não foi levado em consideração a agitação na brassagem, um grão com

*mesh* baixo precisaria sofrer um processo de agitação para favorecer a difusividade do líquido no sítio ativo do grão. Este fator é de fundamental importância para o mestre cervejeiro uma vez que no processo de moagem não é fragmentado todo o grão, pois isto traria problemas em etapas posteriores a exemplo da filtração por reciclo do mosto.

Figura 10: Gráfico de Pareto para as variáveis estudadas.

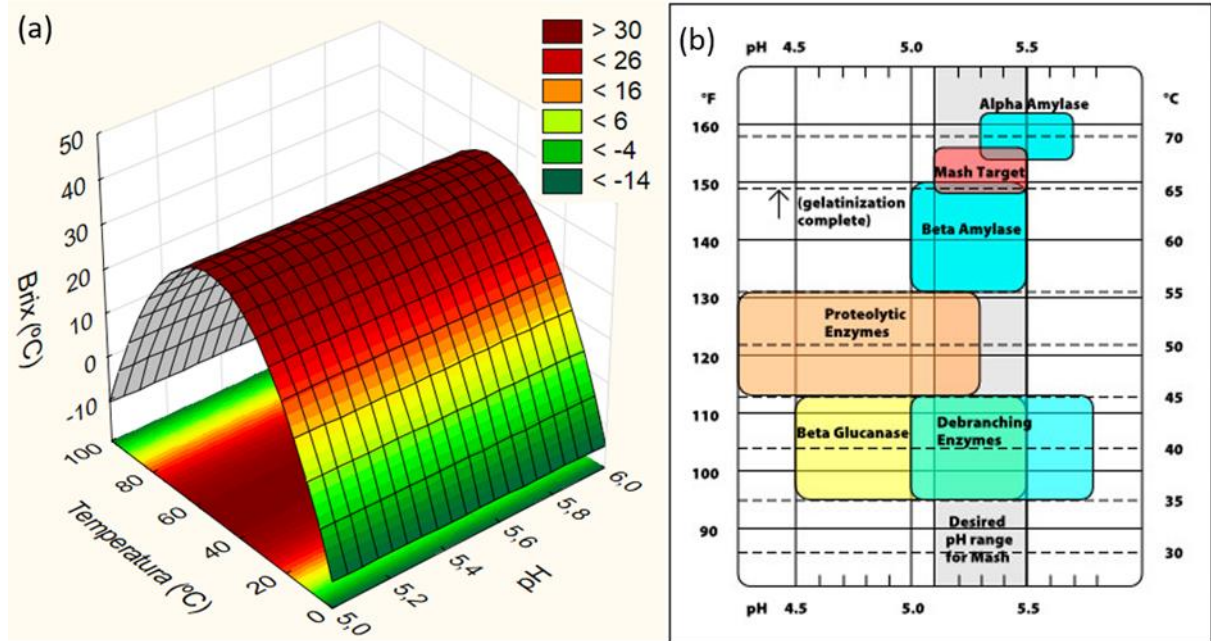


Fonte: O autor (2018).

É possível verificar no gráfico de Pareto que, as variáveis granulometria e temperatura (ambas no modelo quadrático) e as variáveis granulometria e diluição (ambas no modelo linear) se mostraram significativas. Observa-se ainda que a granulometria foi a variável mais relevante de todos os parâmetros.

Quando analisando a relação do Brix com a temperatura e o pH (Figura 11-a), percebe-se que a combinação destas duas variáveis, apresentam significância ao processo de sacarificação do mosto. Verifica-se que a temperatura ótima de operação dentro da faixa de pH (5,0 até 6,0) é em torno de 60°C. Isto é corroborado quando se faz um paralelo com a faixa de pH e temperatura ótima para a ativação das enzimas alfa-amilase e beta-amilase correspondente a formação de açúcares solúveis (Figura 11-b). O que evidencia a importância do controle desses parâmetros durante o processo de brasagem.

Figura 11: Gráfico de superfície da temperatura e pH em relação ao Brix (a). Gráfico das condições de ativação de enzimas pelo pH e temperatura (b).

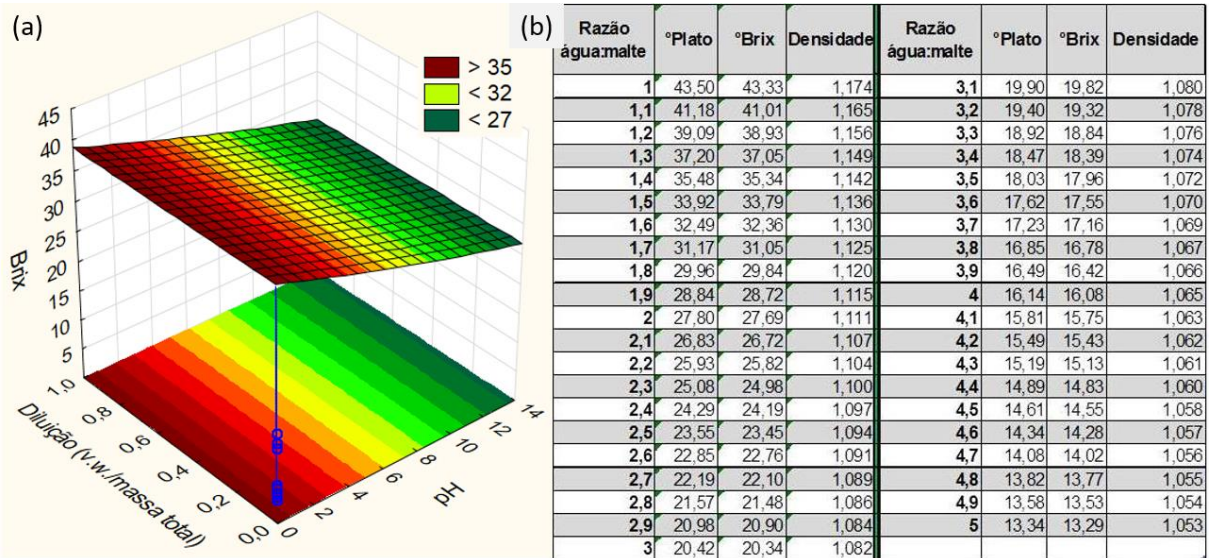


Fonte: (a) O autor (2018). (b) Adaptado de: PALMER (2006).

Quando avaliado a combinação de pH e diluição para a evolução do Brix (Figura 12-a), percebe-se que a faixa de pH ideal para a operação da brassagem está na região de pH mais ácido (abaixo de 7,0). Quando avaliado pelo quadro abaixo (Figura 12-b), observa-se que a diluição é fator importante para corrigir a densidade do mosto *Specific Gravity* (SG) antes de prosseguir com o processo. Porém, é importante ainda observar que pelo gráfico de superfície da Figura 12-a, o fator diluição terá mais força em pontos específicos de pH, sendo que este se mantém constante para qualquer nível de pH.



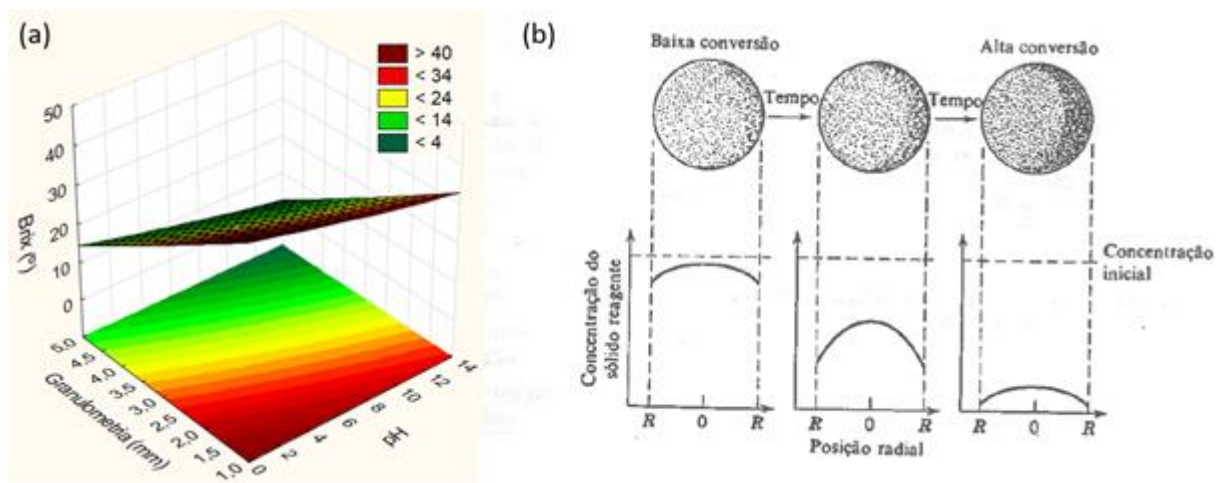
Figura 12: Gráfico de superfície do Brix em relação à diluição e o pH (a). Quadro da razão água/malte para a densidade do mosto (b).



Fonte: (a) O autor (2018). <http://duzbier.blogspot.com.br/2015/10/calculos-ervejeiros-parte-ii.html> (b).

No que tange a relação do Brix com a granulometria e o pH (Figura 13-a), nota-se que este fator é mais importante na faixa de pH ácido e com granulometria baixa. Isto é justificado devido a faixa de pH ser ideal para a ativação das enzimas (alfa-amilase e beta-amilase) e que grãos menores apresentam um maior contato íntimo entre a sua superfície com o líquido. A Figura 13-b apresenta perfis de conversão em função do raio da partícula.

Figura 13: Gráfico de superfície do Brix em relação à granulometria e o pH (a). Reações Sólido/Fluido com conversão alta para partículas porosas (b).



Fonte: O autor (2018) (a). Octave Levenspiel (1926). (b).

De acordo com Levenspiel (1926), o tempo de reação pode ser avaliado em função da forma e tamanho das partículas como visto na Figura 14 a seguir. Levando em consideração que a reação de sacarificação irá ocorrer na superfície do grão do malte, a geometria do mesmo tem fator decisivo para a reação.

Figura 14: Expressões para o tempo de conversão para várias formas de partículas.

	Difusão através da camada gasosa como controladora	Difusão através da camada de cinza como controladora	Reação como controladora	
Partículas de tamanho constante	Placa plana $X_B = 1 - \frac{l}{L}$	$\frac{t}{\tau} = X_B$ $\tau = \frac{\rho_B L}{bk_g C_{Ag}}$	$\frac{t}{\tau} = X_B^2$ $\tau = \frac{\rho_B L^2}{2b\mathcal{D}_e C_{Ag}}$	$\frac{t}{\tau} = X_B$ $\tau = \frac{\rho_B L}{bk_s C_{Ag}}$
	Cilindro $X_B = 1 - \left(\frac{r_c}{R}\right)^2$	$\frac{t}{\tau} = X_B$ $\tau = \frac{\rho_B R}{2bk_g C_{Ag}}$	$\frac{t}{\tau} = X_B + (1 - X_B) \ln(1 - X_B)$ $\tau = \frac{\rho_B R^2}{4b\mathcal{D}_e C_{Ag}}$	$\frac{t}{\tau} = 1 - (1 - X_B)^{1/2}$ $\tau = \frac{\rho_B R}{bk_s C_{Ag}}$
	Esfera $X_B = 1 - \left(\frac{r_c}{R}\right)^3$	$\frac{t}{\tau} = X_B$ (12-11) $\tau = \frac{\rho_B R}{3bk_g C_{Ag}}$ (12-10)	$\frac{t}{\tau} = 1 - 3(1 - X_B)^{2/3} + 2(1 - X_B)$ (12-18) $\tau = \frac{\rho_B R^2}{6b\mathcal{D}_e C_{Ag}}$ (12-17)	$\frac{t}{\tau} = 1 - (1 - X_B)^{1/3}$ (12-23) $\tau = \frac{\rho_B R}{bk_s C_{Ag}}$ (12-22)
Esfera diminuindo	Pequena partícula, Regime de Stokes	$\frac{t}{\tau} = 1 - (1 - X_B)^{2/3}$ (12-30) $\tau = \frac{\rho_B \nu R_0^2}{2b\mathcal{D}_e C_{Ag}}$ (12-29)	Não-aplicável	$\frac{t}{\tau} = 1 - (1 - X_B)^{1/3}$ $\tau = \frac{\rho_B R_0}{bk_s C_{Ag}}$
	Partícula grande, ( $u = \text{constante}$ )	$\frac{t}{\tau} = 1 - (1 - X_B)^{1/2}$ (12-31) $\tau = (\text{constante}) \frac{R_0^{3/2}}{C_{Ag}}$	Não-aplicável	$\frac{t}{\tau} = 1 - (1 - X_B)^{1/3}$ $\tau = \frac{\rho_B R_0}{bk_s C_{Ag}}$

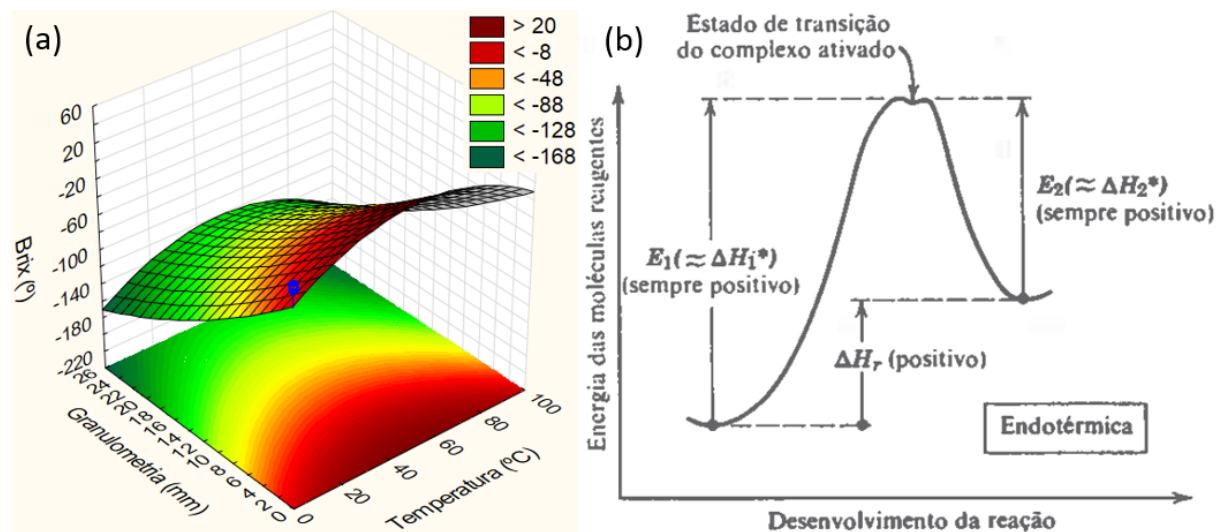
Fonte: Octave Levenspiel (1926).

Adotando a geometria esférica para o formato do grão do malte e considerando que este não diminui o seu tamanho visto que o material residual ainda é usado no processo posterior (filtração do mosto por reciclo), percebe-se que o tempo de reação ( $\tau$ ) aumenta com o aumento do raio do grão (Equação 12-22 do quadro da Figura 14). Desta forma, ao avaliar o gráfico de superfície da Figura 13-a, percebe-se que a granulometria tem um fator de impacto bem expressivo para o aumento do Brix. Partículas com baixa granulometria apresentam velocidades de reação maiores e consequentemente alcance do Brix mais rápido. Por outro lado, deve-se tentar encontrar um diâmetro ótimo para o tamanho do grão, visto que não se deve operar o processo de brassagem com grãos muito finos a fim de que isto não implique no processo de filtração em etapas seguintes.

Quando avaliamos a influência da temperatura e da granulometria para o aumento do Brix no mosto durante a brassagem, percebemos que a condição com maior influência para o

processo se dá na faixa de temperatura em torno de  $60^{\circ}\text{C}$  e com baixa granulometria como apresentado no gráfico de superfície da Figura 15-a. Temperaturas em torno de  $60^{\circ}\text{C}$  favorecem as reações de sacarificação, tanto pelas enzimas alfa-amilase, quanto pelas enzimas beta-amilase. O complexo enzimático favorece a diminuição da energia necessária para iniciar a reação (Energia de Ativação), porém estas enzimas só são ativadas na temperatura em torno de  $60^{\circ}\text{C}$  e com pH em torno de 5,3 como já descrito anteriormente. A Figura 15-b apresenta a contribuição da Energia de Ativação para o desenvolvimento da reação. Pode-se notar que o complexo enzimático ativado diminui a energia necessária para a formação de açúcares solúveis. Isto é importante, pois o controle da temperatura na brassagem da cerveja é fundamental, visto que temperaturas abaixo da especificada não ativarão as enzimas e Temperaturas acima da especificada desativarão as enzimas. Além do mais, é importante frisar que o aumento da temperatura para além dos parâmetros do processo podem contribuir para a polimerização influenciando no processo de clarificação por *whirlpool*.

Figura 15: Gráfico de superfície para o Brix em função dos fatores: Temperatura e Granulometria (a). Gráfico do comportamento da Energia de Ativação para a reação (b).



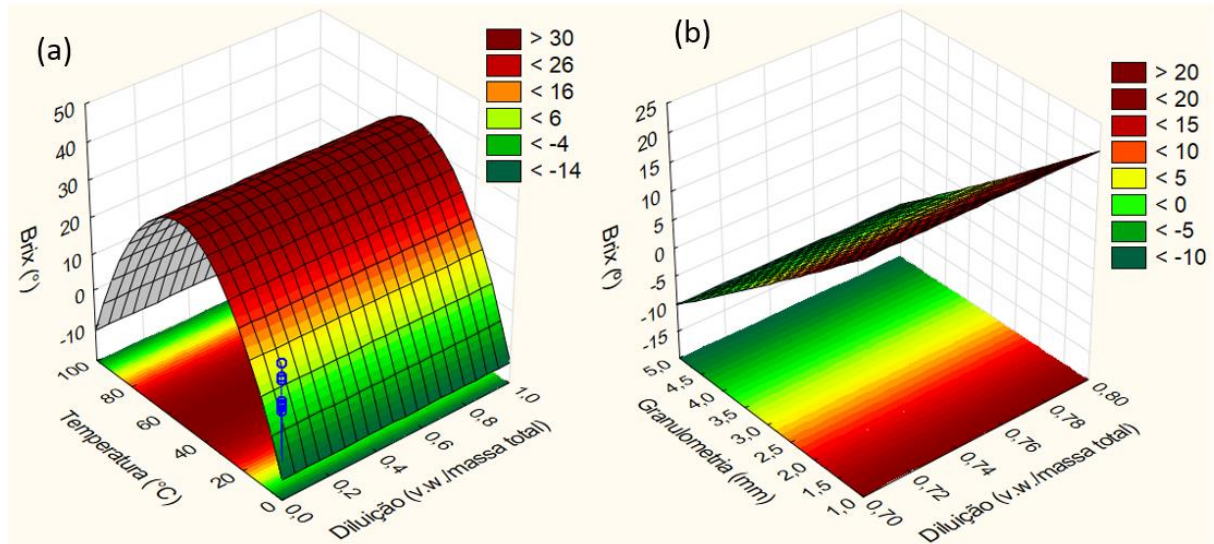
Fonte: O autor (2018) (a). Octave Levenspiel (1926) (b).

Com a temperatura em torno de  $60^{\circ}\text{C}$  e com os complexos enzimáticos atuando (alfa-amilase e beta-amilase), a diminuição do grão do malte expõe ainda mais material (amido) para a reação de sacarificação impulsionando o aumento do Brix no mosto.

No que tange a influência da diluição no processo, esta variável se mantém praticamente constante em sua contribuição. A Figura 16-a mostra o gráfico de superfície para o Brix em função da diluição e da temperatura, enquanto que a Figura 16-b apresenta o gráfico

de superfície para o Brix em função da diluição e da granulometria. Como a contribuição da diluição se mantém constante para cada uma dessas variáveis, a faixa ótima de operação para o processo é em torno de 60°C e com baixa granulometria (1,19 mm).

Figura 16: Gráfico de superfície para o Brix em função da diluição e da temperatura (a). Gráfico de superfície para o Brix em função da diluição e da granulometria (b).



Fonte: O autor (2018).

## 5.2 Modelagem cinética

O modelo cinético proposto para o processo está demonstrado na Equação 1. Este modelo é uma adaptação do modelo padrão para cinéticas (LEVENSPIEL, 1926) levando em consideração 3 parâmetros (2 variáveis manipuladas e 1 de controle) de análise para o gráfico de superfície.

$$\text{Concentração } (t) = (a * T + b) * \left( 1 - \exp \left( - \left( k_0 * \exp \left( \frac{-E_a}{R * T} \right) * t \right) \right) \right) \quad (1)$$

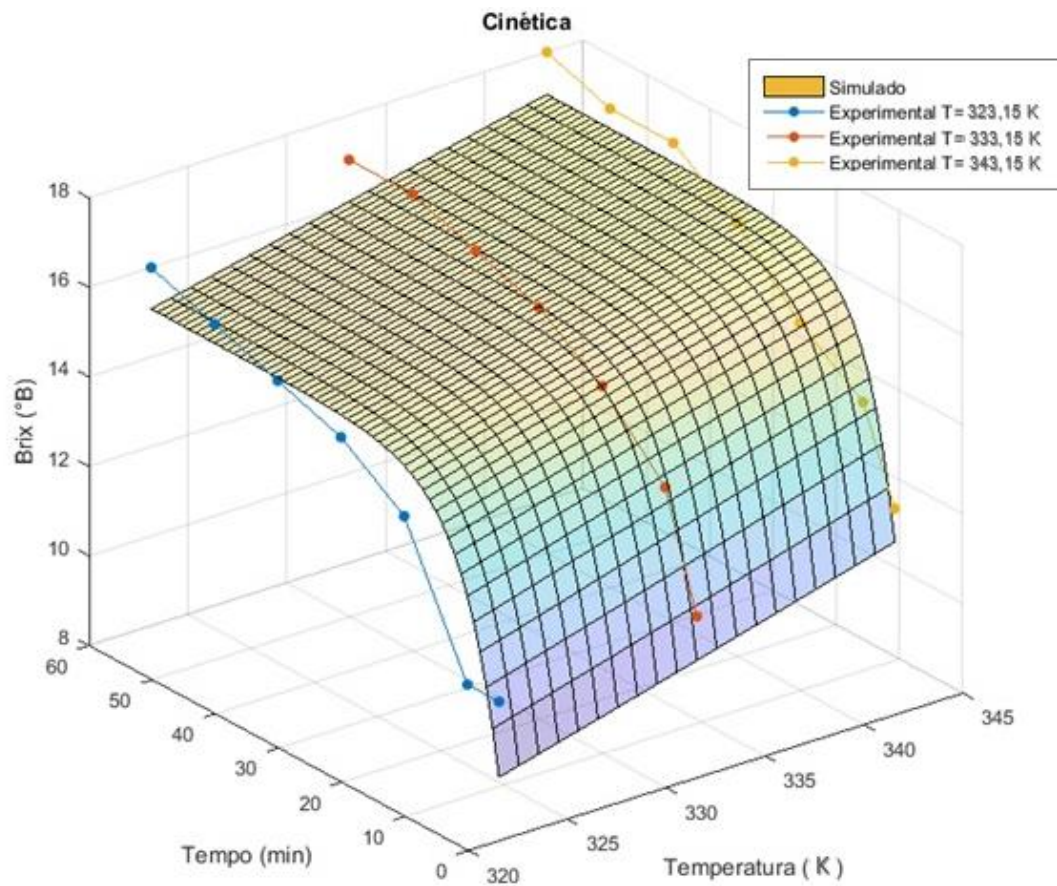
Onde:

- T = Temperatura [K];
- $E_a$  = Energia de ativação [J/mol];
- $K_0$  = Constante cinética [1/min];
- t = Tempo [min];
- R = Constante universal [8.3144 J/K·mol];
- a = Parâmetro cinético;
- b = Parâmetro cinético;



Foram realizados três estudos cinéticos para a variação do pH e plotados três gráficos de superfície com os ajustes realizados, onde em cada gráfico se observou o comportamento do Brix com o tempo (em minutos) em função das temperaturas 50°C (323,15 K), 60°C (333,15 K) e 70°C (343,15 K). Todos os ajustes foram realizados para um processo com diluição de 75% (água/malte) e para uma granulometria de 2,00 mm visto que esta representa melhor a moagem escolhida pelo mestre cervejeiro, de acordo com Hunghe (2014) e Miller (1990). A Figura 17 mostra o gráfico de superfície para o ajuste com o pH de 5,0.

Figura 17: Gráfico de superfície para o ajuste cinético do modelo proposto (pH de 5,0, granulometria de 2mm e diluição de 75%).



Fonte: O autor (2018).

Os valores para os parâmetros cinéticos referente a essas condições podem ser vistos na Tabela 9 a seguir. O  $R^2$  para o ajuste foi de 0,818.

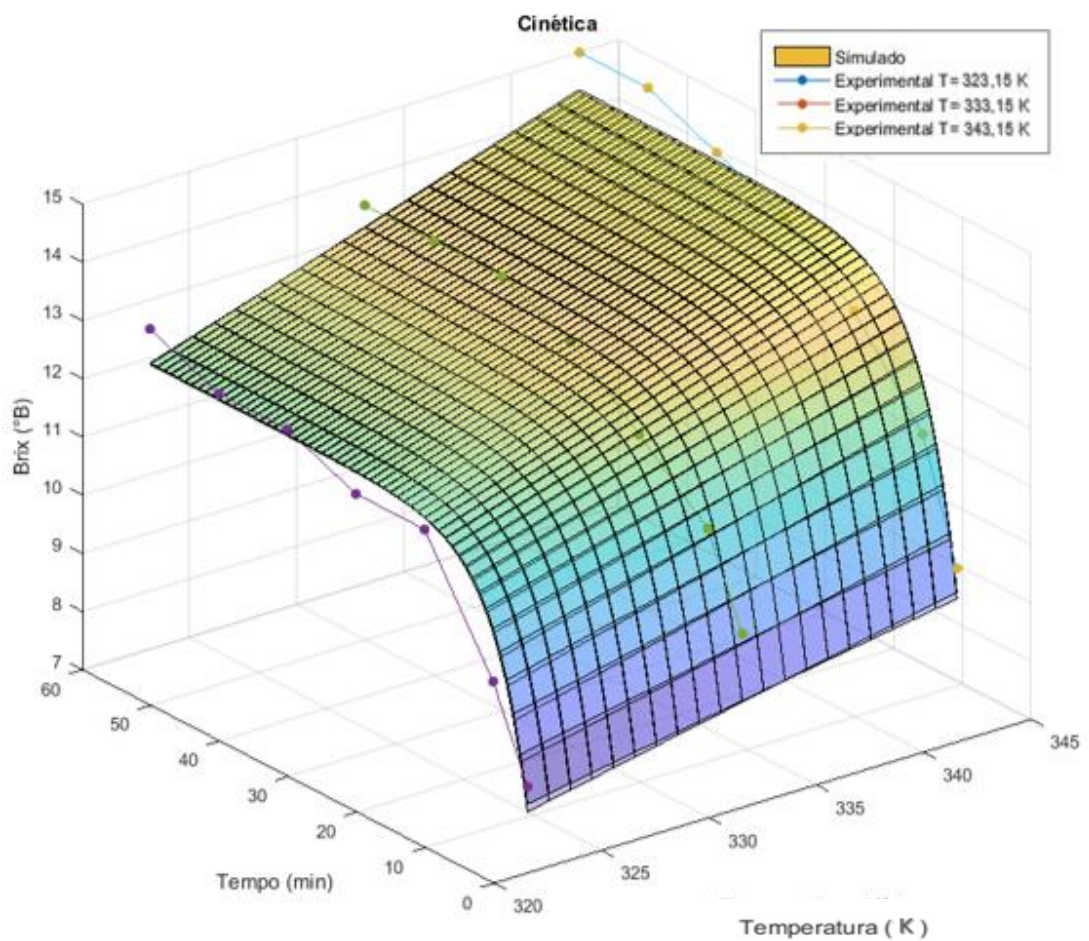
Tabela 9: Resultados para os parâmetros cinéticos do modelo com o pH igual a 5,0.

Parâmetro	Valor	Unidade
$E_a$	9,491	[J/mol]
$K_0$	6,012	[/min]
A	0,09883	---
B	-16,86	---

Fonte: O autor (2018).

Em seguida, a Figura 18 mostra o gráfico de superfície para o ajuste com o pH de 5,5.

Figura 18: Gráfico de superfície para o ajuste cinético do modelo proposto (pH de 5,5, granulometria de 2mm e diluição de 75%).



Fonte: O autor (2018).

Os valores para os parâmetros cinéticos referente a essas condições podem ser vistos na Tabela 10 a seguir. O  $R^2$  para o ajuste foi de 0,8997.

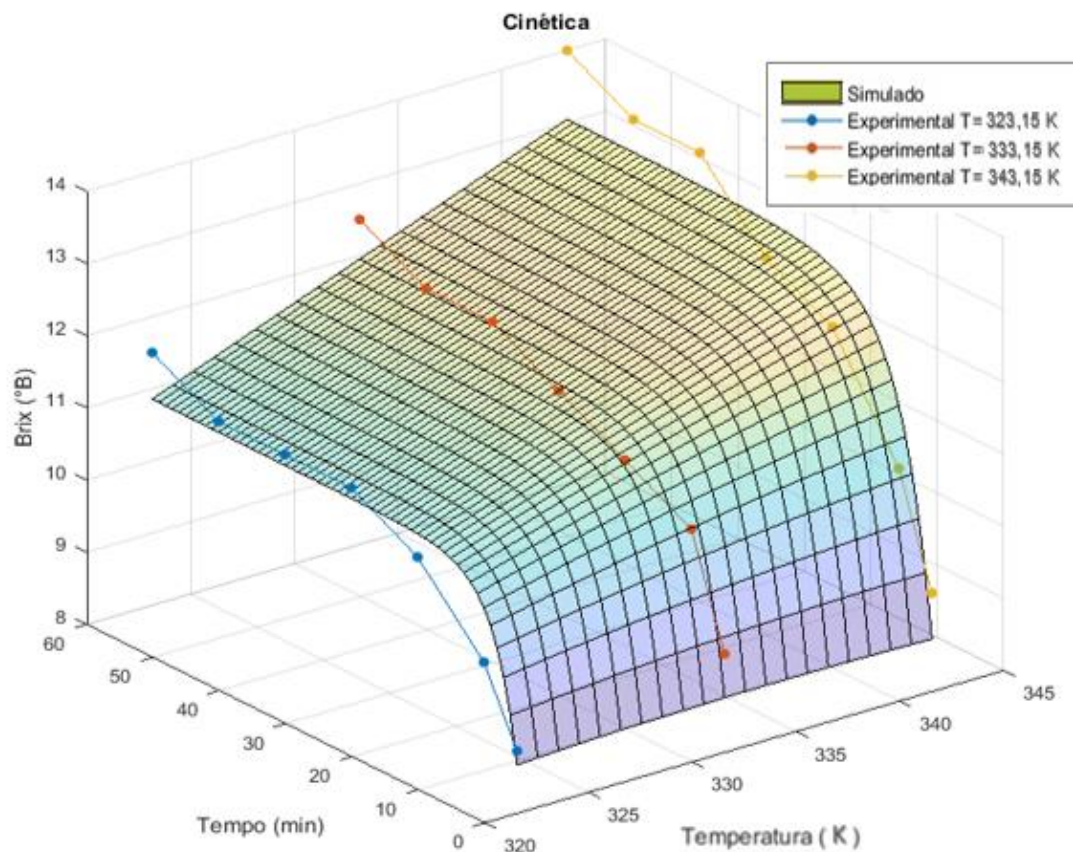
Tabela 10: Resultados para os parâmetros cinéticos do modelo com o pH igual a 5,5.

Parâmetro	Valor	Unidade
$E_a$	0,0001436	[J/mol]
$K_0$	0,2016	[/min]
A	0,1198	---
B	-26,8	---

Fonte: O autor (2018).

Em seguida, a Figura 19 mostra o gráfico de superfície para o ajuste com o pH de 6,0.

Figura 19: Gráfico de superfície para o ajuste cinético do modelo proposto (pH de 6,0, granulometria de 2mm e diluição de 75%).



Fonte: O autor (2018).

Os valores para os parâmetros cinéticos referente a essas condições podem ser vistos na Tabela 11 a seguir. O  $R^2$  para o ajuste foi de 0,8591.

Tabela 11: Resultados para os parâmetros cinéticos do modelo com o pH igual a 5,5.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
$E_a$	$-1,596 * 10^4$	[J/mol]
$K_0$	0,000763	[/min]
A	0,1095	---
B	-24,53	---

Fonte: O autor (2018).

De acordo com o que foi observado nas Figuras 17, 18 e 19, nota-se que o Brix aumenta com o aumento da temperatura independentemente do tempo verificado. Ou seja, para um determinado tempo de processo, o valor do Brix será maior para temperaturas maiores (dentro da escala de trabalho adotada). Também se pode perceber que a contribuição do pH é fator importante neste processo. Mesmo que o pH não tenha se apresentado como variável significativa pelo estudo do gráfico de Pareto, pode-se verificar pelos gráficos das Figuras 17, 18 e 19 que a inclinação da superfície de respostas da temperatura com o tempo para contribuição no Brix é mais acentuada com o aumento do pH. Isto sugere que o pH junto com a temperatura influencia no resultado final do Brix.

Esses parâmetros cinéticos encontrados (energia de ativação e constantes cinéticas) são de fundamental importância para o estudo das reações. O modelo proposto pode ser utilizado para prever resultados do Brix em função dos parâmetros adotados pelo estudo, sem a necessidade de se realizar experimentos.



## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, pôde-se verificar o comportamento das variáveis pH, granulometria do grão, diluição e temperatura como contribuintes para o Brix final do mosto no processo de brassagem de cervejas artesanais.

O planejamento fatorial escolhido  $3^4$  mostrou através do gráfico de Pareto que as variáveis granulometria do grão, diluição e temperatura foram as variáveis com maiores níveis de significância estatística. Dentre essas variáveis, a granulometria do grão apresentou o maior grau de significância para o processo. Quando avaliado a superfície de contato do grão com a mistura líquida, percebe-se que grão com pequenos diâmetros apresentam melhores influências para a formação do Brix. Contudo é importante ressaltar que para o processo cervejeiro, deve-se fazer a escolha do tamanho do grão quebrando o mesmo de tal forma que isto não influencie negativamente em etapas posteriores como a filtração. A análise pelo gráfico de Pareto também mostrou que a diluição e a temperatura têm impactos parecidos para o Brix da mistura. Enquanto que misturas pouco diluídas tendem a apresentar um Brix maior, a relação desta variável em conjunto com a temperatura apresentou um nível de interação constante. Nota-se pelos resultados que a diluição não influencia na escolha da temperatura como fator de aumento do Brix, sendo a faixa ótima de temperatura para a contribuição do Brix em torno de  $60^{\circ}\text{C}$ . É importante destacar que a escolha da temperatura ideal para o processo vai depender da receita adotada. Embora o pH tenha se apresentando como variável não significativa neste estudo, o mesmo apresentou neste trabalho uma importância que deve ser levada em consideração, pois esta variável chegou perto do nível de significância. Isto abre o questionamento de que o pH como variável é importante na escolha do tipo de enzima que será ativada e não deve ser negligenciado sobre isto. De fato, o pH apresenta um nível de significância bem próximo dos 95%. Quando analisado o pH junto com a temperatura, percebe-se que o pH auxilia a temperatura para uma melhor contribuição do Brix. Sendo o pH uma variável que irá contribuir indiretamente para o Brix final.

Observando-se o ajuste do modelo matemático proposto para a cinética da brassagem da cerveja artesanal tipo *pilsen*, procurou-se acompanhar o Brix em função da temperatura com o tempo do processo. Devido a isto, foram apresentados três resultados para os parâmetros cinéticos que levassem em consideração a temperatura e o tempo como principais fatores, porém que estivessem em função do pH, da diluição e da granulometria. Com isso foi possível encontrar valores de Energia de Ativação e constantes cinéticas para o modelo proposto. Os ajustes do modelo aos resultados apresentaram um  $R^2$  acima de 0,8 para todos os gráficos de

superfície. É importante ressaltar que o ajuste foi realizado para uma superfície com duas variáveis independentes (tempo de processo e temperatura) e uma dependente (Brix) o que torna este tipo de ajuste bem mais complexo do que um ajuste feito para curvas com apenas uma variável. Diante disto, pode-se concluir que o modelo proposto é um dos mais completos já sugeridos na literatura.

## 7 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, N. E. C. DE. **Reatividade das lupulonas, terpenos, flavonoides prenilados e compostos contendo grupos tióis livre frente aos radicais formados durante o envelhecimento da cerveja.** 127 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo (USP), 2014.

ANDRADE, R. R. **Modelagem cinética do processo de produção de etanol a partir de hidrolisado enzimático de bagaço de cana-de-açúcar concentrado com melão considerando reciclo de células.** 2012. 284 f. Tese de doutorado – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

ANNEMÜLLER, G.; MANGER, H. J. **Processing of various adjuncts in beer production.** Alemanha: VLB Berlin, p. 150 - 152, 2013.

AQUARONE, E. 2013. **“Biotecnologia na Produção de Alimentos.”** P. 91-144 in Biotecnologia Industrial. 2013.

ASANTE, P. K. **Suitability of cassava starch as adjunct substitute for barley in the brewing of beer (stout beer).** 2008. 102 f. Master of Science - Department of Biochemistry, Kwame Nkrumah university of science and technology, Kumasi, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BEBIDAS - ABRABE. **Categoria de mercado: fermentados-cerveja.** 2013. Disponível em: <<http://www.abrabe.org.br/categorias/>> Acesso em: 10 set. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS CERVEJARIAS ARTESANAIS – ABRACERVA. **Setor cervejeiro.** Disponível em: <<http://abracerva.com.br/em-cinco-meses-brasil-registra-65-novas-cervejarias-artesanais/>>. Acesso em: 19 de dez. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA CERVEJEIRA - CERVBRAIL. **Setor econômico.** Disponível em: <<http://www.cervbrasil.org.br/paginas/index.php?page=dados-do-setor>>. Acesso em: 20 de dez. 2017.

BAMFORTH C. BEER: **Tap Into The Art of Science of Brewing.** 2. ed. Oxford University Press, 2003.

BARROS, A. A.; BARROS, E. B. P. **A química dos alimentos: produtos fermentados e corantes.** São Paulo: Sociedade Brasileira de Química. 88p. - (Coleção Química no cotidiano), v. 4 p. 30-32. 2010.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos. Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria.** Campinas. Editora Bookman, 4. Ed. 2010.

BECKER, A. J.; Silva, D. M. I.; Dias, F. H. S.; Pinheiro, L. K. **Noções Básicas de Programação em MATLAB.** Santa Maria, 2010.

BERNSTEIN, L., WILLOX, J.C. Água. Em: BRODERICK, H.M. **El cervecero en la practica.**Lima: **Asociación Latinoamericana de Fabricantes de Cerveza.** Cap. 4, p.53-82, 1977.

BETRAMELLI, M. **Cervejas, Brejas e Birras: um Guia Completo para Desmitificar a Bebida mais Popular do Mundo.** São Paulo: Leya, 2012.

BORTOLI, D. A. S.; SANTOS, F.; STOCCO, N. M. **Leveduras e produção de cervejas - Revisão.** Bioenergia em revista: diálogos, p. 45–58, 2013.

BORZANI, Walter. **Biotecnologia industrial.** São Paulo: E. Blücher, 2001. 4v, il.

BOUCKLEY, B. **Mintel: big brewers should target non-alcoholic beer sweet spot in Europe.** 2015. Disponível em: <<http://www.beveragedaily.com/Markets/Mintel-Big-brewersshould-target-non-alcoholic-beer-sweet-spot>>. Acesso em: 10 set. 2017.

BOULTON, C. **Encyclopedia of Brewing.** United Kingdom: Wilwy-Blackwell. 707 p. 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Decreto nº 6.871, de 04 de junho de 2009.** Regulamenta a Lei nº 8.918, de 14 julho de 1994. Dispõe sobre a padronização, a classificação, o registro, a inspeção, a produção e a fiscalização de bebidas. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 5 jun. 2009. Disponível em: <[http://gpex.aduaneiras.com.br/gpex/gpex.dll/infobase/atos/decreto/decreto6871\\_09/dec%206871\\_09\\_01.pdf](http://gpex.aduaneiras.com.br/gpex/gpex.dll/infobase/atos/decreto/decreto6871_09/dec%206871_09_01.pdf)>. Acesso em: 20 nov. 2017.

BRUNELLI, L. T. **Produção de Cerveja com Mel: Características Físico-Químicas, Energéticas e Sensorial.**2012. 103 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Energia na Agricultura). Faculdade Ciências Agrônômicas da Unesp. Botucatu-SP, 2012.

CARVALHO, L. G. **Produção de Cerveja.** Dossiê Técnico. REDETEC-Rede de Tecnologia do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <<http://www.respostatecnica.org.br/dossie-tecnico/downloadsDT/NTc>>. Acesso em: 29 nov. 2017.

CEPPI, E. L. M.; BRENNAN, O. V. **Brewing withh Rice Malt - A gluten-free Alternative.** Journal of the Institute of Brewing, v. 116, n. 3, p. 275-279, 2010.

CEREDA, M.P. Cervejas. In: AQUARONE, E.; LIMA, U.A.; BORZANI, W. **Alimentos e Bebidas Produzidos por Fermentação.** São Paulo, Edgar Blucher, p.3-78, 1983.

CERVEJAS DO MUNDO. **História Da Cerveja.** Disponível em: <[http://www.cervejasdomundo.com/Na\\_antiguidade.htm](http://www.cervejasdomundo.com/Na_antiguidade.htm)>. Acesso em: 03 nov. 2017.

CERVESIA. **Tecnologia cervejeira.** Disponível em: <[www.cervesia.com.br](http://www.cervesia.com.br)>. Acesso em: 17 dez. 2017.

CHARLESBRENSONBIER. **Do grão ao copo – Ingerdientes – Lúpulo.** 2010. Disponível em: <[http://Charles\\_brenson.blogspot.com/2010/08/do-grão-ao-copo-ingredientes-lupulo.html](http://Charles_brenson.blogspot.com/2010/08/do-grão-ao-copo-ingredientes-lupulo.html)>. Acesso em: 28 de nov. 2017.

COSTA, M. I. C. R. **Implementação e validação da nova sala de brassagem. Caso de estudo desenvolvido na Sociedade Central de Cervejas e Bebidas.** 87 p. Tese (Doutorado). 2014.

CUNICO, M. W. M.; CUNICO, M. M.; MIGUEL, O. G.; ZAWADZKI, S. F.; PERALTA-ZAMORA, P.; VOLPATO, N.; **Planejamento Fatorial: uma ferramenta estatística valiosa para a definição de parâmetros experimentais empregados na pesquisa científica.** Visão Acadêmica, v. 9, p. 23-32, 2008.

DA ROCHA, F. R. M. R. **Monitorização de parâmetros físico-químicos do grão de cevada / malte ao longo do processo de maltagem.** 111 p. Dissertação (Mestrado). Departamento de Química e Bioquímica. Universidade do Porto (FCUP), 2014.

DRAGONE, G.; ALMEIDA E SILVA, J. B. Cerveja. In: VENTURINI FILHO, W. G. (Coord.). **Bebidas alcoólicas: ciência e tecnologia.** São Paulo: Edgard Blücher, 2010. cap. 2, p. 15-50.

EBLINGER, H. M.; NARZIB, L. **Beer, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry.** Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH. v. 5, p. 178-220, 2012.

ESTEVINHO, L. M. **Leveduras e fermentações: O caso da cerveja. Jornadas de lúpulo e cerveja: novas oportunidades de negócio.** p. 10-16, 2015.

FERREIRA, R.H; VASCONCELO, M.C.R.; L; JUDICE, V.M. M.; NEVES, J.T. R, de. **Inovação na fabricação de cervejas especiais na região de Belo Horizonte**. Perspectivas em Ciência da informação, Belo Horizonte, vol.16, n.4, p.171-191, out./dez. 2011.

GARCIA, C.C. **Retórica e Cenário Microcervejeiro nas Regiões Sul e Sudeste. Faculdade de Tecnologia de Araçatuba**. Curso de Tecnologia em Biocombustíveis. Araçatuba, SP. 2012.

HANSELMAN, D.; LITTLEFIELD, B. “**Matlab 6.5: release 13 Curso Completo**”, Makron Books, 1ª Ed., 2004.

HOUGH, J. S. The biotechnology of malting and brewing. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. 159 p.

HUGHES, G. **Cerveja feita em casa: Tudo sobre os ingredientes, os equipamentos e as técnicas para produzir a bebida em vários estilos**. Greg Hughes – [Tradução Rosane Albert]. 1º ed. São Paulo. 2014.

JANJAR, Diniz. **A história da cerveja**. In: JANJAR, Diniz. Produção de cerveja. Teresina, 2007. CD-ROM.

KREISZ, S. Malting. In: EBLINGLER, H. M. **Handbook of brewing: Processes thechnology, markets**. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009.

KUNZE, W. **Technology: Brewing & Malting**. 4 ed. Alemanha: VLB Berlin, 2010, 1057 p.

LEVENSPIEL, O. **Engenharia das reações químicas – cálculo de reatores**. 7 ed. V.2. 1926.

LIMA, L.L.A. & FILHO, A.B.M. **Tecnologia de Bebidas**. Sistema Escola Técnica aberta do Brasil – e-Tec Brasil. Presidência da República Federativa do Brasil. UFRPE/CODAI. 2011.

MAPA. Ministério da agricultura, abastecimento e pecuária. **Anuário da cerveja no Brasil**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/inspecao/produtos-vegetal/a-cerveja-no-brasil>> Acesso em: 19 de dez. 2017.

MATOS, R. A. G. Cerveja: **Panorama do mercado, produção artesanal, e avaliação de aceitação e preferência**. 2011. 77 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrônoma) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2011.

MEGA, Jéssica Francieli; NEVES, Etney; ANDRADE, Cristiano José de. **A Produção de Cerveja no Brasil**. Revista Citino, Joinville, v. 01, n. 01, p.34-42, out. 2011.

MILLER, D. **Classic Beer Styles Séries – 2: Continental Pilsener**. Edited by Virginia Thomas Copyright. Colorado – USA. 1990.

MORAIS, J. S. **O Lúpulo: Cultivares e Extrato. Jornadas de lúpulo e cerveja: novas oportunidades de negócio**, p. 11-22, 2015.

MUNROE, J.H. Aging and Finishing. In: PRIEST, F.G.; STEWART,G.G. **Handbook of Brewing, Taylor & Francis Group**, 2006.

NOVOZYMES. **Brewing Handbook**, 1a ed., 2013.

OETTERER, M.; REGITANO-D'ARCE, M.A.B.; SPOTO, M.H.F. **Fundamentos de Ciência e Tecnologia de Alimentos**. Barueri, SP: Manole, 612p, 2006.

OLIVEIRA, N. A. M. **Leveduras utilizadas no processo de fabricação da cerveja**. 2011. 45f. Monografia (Pós-graduação em Microbiologia) – Instituto de Ciências Biológicas, UFMG, Belo Horizonte, 2011.

PAIVA, G. M. **Estudo do Processamento e Mercado de Cervejas Especiais no Brasil**.2011. 90 f. Monografia (Tecnólogo em Alimentos). Faculdade de Tecnologia Termomecânica. São Bernardo dos Campos - SP, 2011.

PALMER, J. **How to Brew: Everything You Need To Know To Brew Beer Right The First Time**. 1ª. ed. [S.l.]: Natl Book Network, v. I, 2006. 325 p. ISBN ISBN 0937381888. Disponível em: <<http://howtobrew.com/>>. Acesso em: 29 dez. 2017.

RIO, R. F. **Desenvolvimento de uma cerveja formulada com gengibre (*Zingiber officinalis*) e hortelã do Brasil (*Mentha arvensis*): avaliação de seus compostos bioativos e comparação com dois estilos de cerveja existentes no mercado**. Dissertação de Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Rio de Janeiro, 69 p., 2013.

ROSA, N. A.; AFONSO, J. C. **A Química da Cerveja**. Química Nova Escola, v. 37, n. 2, p. 98-105, 2015.

SANTOS, I. J., SANTOS, Y. L., OLIVEIRA, M. G. A., SILVA, P. H. A. **Expressão da alfa e beta amilase durante a germinação de cevada.** Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.12, n.1, p.67-73, 2010.

SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas – **Potencial de Consumo de Cervejas no Brasil**, 2017. Disponível em: <[http://www.sebraemercados.com.br/wpcontent/uploads/2015/12/2014\\_05\\_20\\_RT\\_Mar\\_Agr\\_n\\_Cerveja\\_pdf.pdf](http://www.sebraemercados.com.br/wpcontent/uploads/2015/12/2014_05_20_RT_Mar_Agr_n_Cerveja_pdf.pdf)> Acesso em: 10 set. 2017.

SISTEMA DE CONTROLE DE PRODUÇÃO DE BEBIDAS. SICOBÉ. **Produção de cervejas e refrigerantes:2014/2015**. 2016. Disponível em: <<http://www.r3ceita.fazenda.gov.br/PessoaJuridica/Bebidas/SistContrProdSicobe.htm>> Acesso em: 10 set. 2017.

SIQUEIRA, P.B.; BOLINI, H.M.A.; MACEDO, G.A.; **O processo de fabricação da cerveja e seus efeitos na presença de polifenóis.** Alim. Nutr., Araraquara. v.19, n.4, p. 491-498, out./dez. 2008.

SPERB, J. G. C. **Produção de Extrato Concentrado de Malte de Cevada para Uso em Cervejarias.**2012. 114 f. Monografia (Trabalho de Graduação em Engenharia Química). Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade Regional de Blumenau, Blumenau-SC, 2012.

THILAKAVATHI, M.; BASAK, T.; PANDA, T. Modeling of enzyme production kinetics. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 73, n. 5, p. 991 – 1007, 2007.

TRINDADE, M; SAMPAIO, R, “**Introdução ao Matlab**”, PUC-Rio, 2002.

VARNAM, A.H.; SUTHERLAND, J.P. **Bebidas: Tecnología, Química y Microbiología.** Espanha: Editorial Acribia, cap.7, p.307-375, 1997.

VENTURINI FILHO, W. G. **Tecnologia de Bebidas: Bebidas alcoólicas.** v.1. São Paulo: Blucher, 2010.

VENTURINI FILHO, W. G. [Coord.]. **Tecnologia de bebidas: matéria prima, processamento, BPF/APPCC, legislação e mercado.** São Paulo: E. Blucher, 2005. xiv, 550 p, il. 2005.



## 8 APÊNDICE

Algoritmo de ajuste usado no Matlab®.

---

```

clc
clear

C0 = 0;           %(mol/l) Concentração inicial
K0 = 0.95;        %/min  Constante cinética
Ea = 900;         %J/mol  Energia de ativação
T = 333;          %K      Temperatura
R = 8.3144;       %J/K·mol Constante universal
n = 1;           %       Ordem de reação
a=0.1198;
b=5.929;

[X,Y] = meshgrid(50:70,5:60);
%[Xe,Ye] = meshgrid(T,tempo);
Z = (a*X+b) .* (1-exp(-(K0.*exp(-Ea./(R.*X))).*Y));
s=surf(X,Y,Z)
alpha(s,0.3)

T=[50 60 70];
tempo=[5 10 20 30 40 50 60];
Ce=[8 9.5 11.5 11.5 12 12 12.5;
    9.5 11 12 13 13.5 13.5 13.5;
    9.5 11.5 13 14 14.5 15 15];

hold on
%surf(Xe,Ye,Ce)
[xx yy] = meshgrid(T,tempo);
plot3(xx,yy,Ce,'.-','MarkerSize',15);
%stem3(T,tempo,Ce')

title('Cinética');
xlabel('Temperatura (°C)') % x-axis label
ylabel('Tempo (min)') % y-axis label
zlabel('Brix (°B)') % z-axis label
legend('Simulado','Experimental T=50°C','Experimental T=60°C','Experimental T=70°C')

%nCao*(1-exp(-(K0*exp(-Ea/(8.3144*y)))*x))
%(-(n+1)*(Ca0+(K0.*exp(-Ea./(8.3144*y)))*x)).^(n+1)

```

---