

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTRUTURA DE TESTES PARA UMA MICROCERVEJARIA: CONCEPÇÃO,
DIMENSIONAMENTO E CONSTRUÇÃO

por

Rafael Calegari

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Dezembro de 2013

ESTRUTURA DE TESTES PARA UMA MICROCERVEJARIA: CONCEPÇÃO,
DIMENSIONAMENTO E CONSTRUÇÃO

por

Rafael Calegari

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof^ª. Dr^ª. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Prof. Paulo Smith Schneider

Comissão de Avaliação:

Prof. Bardo E. Joseff Bodmann

Prof. Francis H. Ramos França

Prof. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 06 de Dezembro de 2013.

DEDICATÓRIA

- Dedico esse trabalho a minha família. Pai, Mãe e irmãos. Que estiveram sempre ao meu lado, não somente durante o trabalho de conclusão de curso, mas durante toda a minha vida. Todas minhas conquistas são por eles e para eles.

- Dedico também a minha futura esposa Fernanda, que já faz parte da minha vida. Obrigado pela compreensão e carinho sempre que precisei. Sem seu incentivo e apoio, nem teria começado o curso de graduação na UFRGS.

AGRADECIMENTOS

- Agradeço ao Professor Paulo Smith Schneider que se mostrou sempre disposto a contribuir com o trabalho. Com seu conhecimento e experiência, foi muito presente e prestativo ao longo de todo projeto.

- Agradeço também ao Batista, técnico do LETA, que com seu conhecimento e disponibilidade foi de grande importância em toda parte experimental do projeto.

CALEGARI, R. **Estrutura de Testes Para uma Microcervejaria: Concepção, Dimensionamento e Construção**. 2013. 21 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

RESUMO

O presente trabalho apresenta a concepção, projeto e construção de uma microcervejaria com capacidade de produção de 50 litros por batelada. A etapa de concepção envolve a escolha do arranjo da microcervejaria, posteriormente é feito o dimensionamento dos equipamentos, cálculos de transferência de calor para a determinação da potência dos aquecedores e então a definição dos materiais. A estrutura do equipamento é feita em tubos quadrados de aço 1020 e sustentará quatro tanques, sendo três deles aquecidos e um somente para filtragem. Para reduzir os custos de instalação, não é utilizado nenhum tipo de bomba para o transporte dos líquidos, somente a força da gravidade. O resultado do projeto é uma estrutura compacta e de fácil montagem e transporte, com resistências elétricas de 9kW sendo necessários misturadores a fim de evitar diferenças de temperaturas muito altas nos tanques.

PALAVRAS-CHAVE: Microcervejaria, Dimensionamento, Transferência de Calor.

CALEGARI, R. **Structure for Experiments on a Microbrewery: Conception, Dimensions and Construction**. 2013. 21 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ABSTRACT

This project presents the conception, design and construction of a microbrewery with a production capacity of 50 liters per batch. The stage of conception involves selection of the microbrewery arrangement, we then dimension the equipment, calculate heat transfer to determine the power of the heaters and finally define the materials to be used. The equipment's structure is made of squared tubes made of 1020-type steel to support four tanks—three of which are heated and one used only for filtering. To reduce installation costs, the force of gravity is used to transport liquids instead of a pump. The project's result is a compact structure that is easy to assemble and transport, in which 9kW heaters and mixers are necessary to avoid large temperature differences in the tanks.

KEYWORDS: Microbrewery, Design, Heat Transfer.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
4. PROJETO DA MICROCERVEJARIA	3
4.1 – CONCEPÇÃO DA MICROCERVEJARIA	3
4.2 – TRANSFERÊNCIA DE LÍQUIDOS ENTRE TANQUES.....	5
4.3 – CÁLCULO DA TAXA DE AQUECIMENTO	5
4.3.1 – TANQUE DE MOSTURA.....	5
4.3.2 – TANQUE DE FERVURA.....	8
5. MONTAGEM DA BANCADA	9
6. ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	10
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	11
8. CONCLUSÕES	13
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
ANEXO I	15

1. INTRODUÇÃO

Existem registros do consumo da cerveja em períodos anteriores a 8000a.C por diversos povos que tinham cereais como base de sua alimentação, entre eles os Assírios e os Babilônicos (Santos, 1985). No Brasil, define-se a cerveja como: "...a bebida obtida pela fermentação alcoólica do mosto cervejeiro oriundo do malte de cevada e água potável, por ação da levedura, com adição de lúpulo..." (BRASIL, 2009). O mercado cervejeiro brasileiro está em plena expansão. Já em 2011 o Brasil ocupava o terceiro lugar em quantidade anual de fabricação, com 12,4 bilhões de litros por ano, ficando atrás somente de China e Estados Unidos, com 45 e 35 bilhões de litros anuais respectivamente (REINOLD, 2011).

Devido ao fato do poder aquisitivo do brasileiro ter crescido visivelmente nos últimos anos, apreciadores de cerveja estão procurando cada vez mais cervejas de estilos especiais. E por essa razão, o setor de microcervejarias cresce em média 15% ao ano no país (REINOLD, 2011). Isso se deve ao fato de os processos de produção em microcervejarias serem mais flexíveis, sendo assim capazes de alterar os estilos de cerveja a serem produzidos a cada série de fabricação. Segundo o mesmo autor, o Rio Grande do Sul ocupa a segunda colocação em números de microcervejarias no Brasil, tendo um montante de 17%, ficando atrás de São Paulo, com 24%.

A definição de microcervejaria, varia de acordo com as legislações, relacionadas a produção de cerveja, vigentes em cada país. No Brasil ainda não existe uma diferenciação pelo volume máximo de produção, entre microcervejarias e cervejarias de grande porte. Nos EUA, onde o mercado é mais desenvolvido, denomina-se microcervejaria o estabelecimento que produz no máximo 1.788.410 litros por ano, fabricados e distribuídos em uma região determinada (WISEGEEK, 2013).

Com base nisso, novos conceitos para cervejarias de pequeno porte, devem ser criados com o intuito de desenvolver ainda mais o crescente mercado. E dentro disso o dimensionamento dos equipamentos e controle de processos são critérios muito importantes. Por essa razão, escolher e calcular corretamente as formas de aquecimento do sistema de produção evitam desperdício de energia. Da mesma forma, a escolha correta do material para a fabricação da estrutura evita perda de matéria-prima e gastos desnecessários. Outro aspecto a ser considerado em produções em pequena escala, ou até mesmo artesanais, é o manuseio de equipamentos em temperaturas acima da ambiente, comuns nesses processos. Sendo assim, o desenvolvimento de uma estrutura, facilmente replicável, que traz mais segurança para quem realiza essa atividade é muito importante.

Pela percepção do crescente mercado microcervejeiro, do possível desperdício de energia e material, pela falta de segurança dos operadores de produções artesanais e também pela possibilidade de utilização da bancada em futuros experimentos é que a microcervejaria projetada nesse trabalho será desenvolvida. Também pela possibilidade da contribuição ao setor microcervejeiro utilizando os conhecimentos de engenharia como, transferência de calor e massa, para o dimensionamento das potências de aquecimento, e metodologia de projeto para desenvolvimento da concepção da microcervejaria.

O trabalho visa conceber, projetar e construir uma microcervejaria com capacidade de produção de 50 litros por batelada que possa ser replicado para pequenas escalas de produção.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Microcervejeiros, ou cervejeiros artesanais, são todos aqueles produtores que normalmente produzem pequenas quantidades de cerveja e controlam, manualmente ou não, ativamente todos os estágios do processo de fabricação (PALMER, 2006).

As microcervejarias são estudadas em diversos âmbitos da engenharia. Na área de automação, por exemplo, (FERNANDES e FRENZEN, 2011) desenvolveram linguagens de programação para testar o controle de cada processo da produção. Já na área de análise de

energia (SLAWITSCH, et al, 2011) desenvolveram uma “cerveja verde” que utiliza energia renovável no processo de fabricação, além de reutilizar o calor gerado em uma fase do processo para o aquecimento em outro.

No mercado existem empresas que vendem projetos prontos de microcervejaria como, por exemplo, a Engetecnico (<http://www.engetecnico.com.br/agr72.htm>), que adequa o projeto ao volume de produção desejado. Outras empresas projetam as estruturas e constroem a microcervejaria completa (<http://www.microcervejarias-dragonbier.com/meu-projeto.php>). Como são empresas privadas, os cálculos de dimensionamentos não se encontram disponíveis para visualização.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A microcervejaria concebida nesse trabalho realiza a chamada parte quente do processo de fabricação de cerveja, que consiste na mosturação, filtragem e fervura. O fluxograma destes processos é mostrado na Figura 3.1, baseado nas informações da literatura (Vieira, 2009; Palmer, 2006).

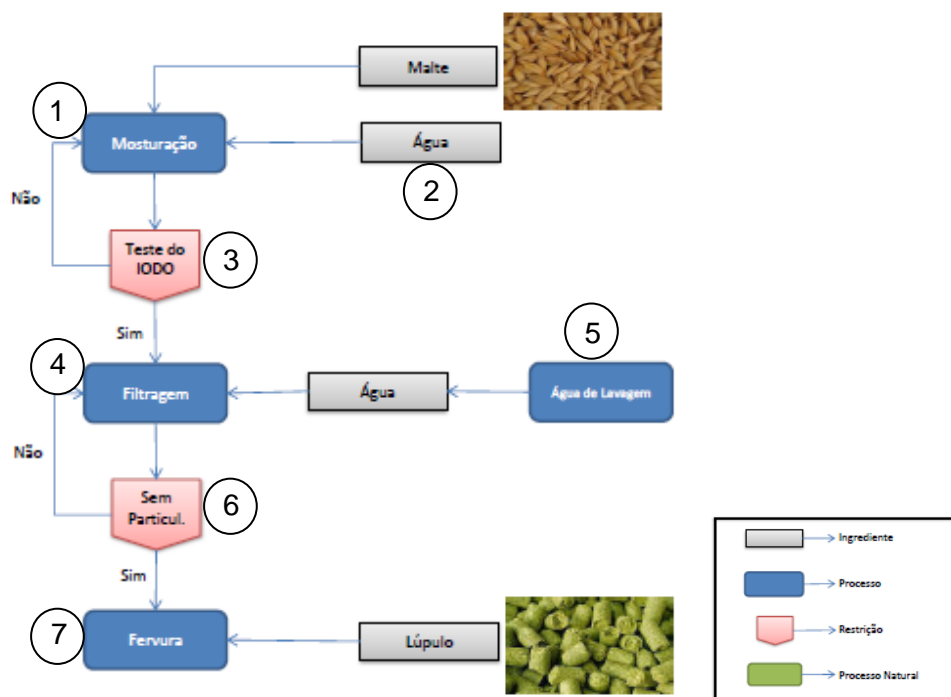


Figura 3.1: Fluxograma da parte quente da fabricação de cerveja

O processo inicia com a mistura de água com malte, idealmente na proporção de 2,5 litros de água por quilograma de malte (Vieira, 2009). A mosturação (ponto 1 da Figura 3.1) dessa mistura consiste em aquecê-la até que esta atinja níveis de temperaturas que favoreçam a atuação de enzimas específicas. No princípio, a mistura é formada apenas por amido e no final, após a atuação das enzimas, obtém-se açúcares pequenos fermentáveis e não fermentáveis. Na maioria dos estilos de cerveja, utilizam-se até 12 quilogramas de malte para 50 litros de cerveja, o que determinou o volume escolhido para o presente projeto. Prevê-se a adição de água aquecida (ponto 2 da Figura 3.1) nessa fase do processo, com um volume máximo de 30 litros. Sendo assim, um tanque de 60 litros atenderia às necessidades dessa operação.

Após inativar as enzimas do processo de mosturação, deve-se filtrar (ponto 4 da Figura 3.1) o mosto. Esse processo ajuda a deixar a cerveja menos turva e também evita que cascas de malte passem para a etapa seguinte, de fervura. Basicamente essa etapa do processo consiste em uma filtração utilizando os próprios grãos de malte, que formam um filtro natural. Para isso, é necessário prever um tanque com dimensões iguais ou superiores ao da mostura. Para o presente trabalho, projetou-se um fundo falso no tanque de filtração, composto por uma chapa circular de 400 milímetros de diâmetro, com aproximadamente 4 furos, de 2 milímetros, por centímetro quadrado, o que acarreta aproximadamente 5026 furos no fundo falso.

Paralelamente à filtração, em um tanque auxiliar, aquece-se água para um processo chamado de lavagem (ponto 5 da Figura 3.1), que consiste em passar essa água aquecida, normalmente a 76°C, novamente pelo filtro natural de grãos para que ocorra a extração do açúcar ainda presente no malte. A quantidade de água aquecida deve ser 3,6 litros por quilograma de malte. Como para a cervejaria desenvolvida nesse projeto utiliza-se no máximo 12 quilogramas de malte, calculou-se 43,2 litros de água.

O processo de fervura (ponto 7 da Figura 3.1), como o próprio nome já diz, consiste em levar a ebulição o líquido resultante da filtração, e mantê-lo nessa condição por um tempo determinado, que depende da receita escolhida. Os três principais objetivos dessa parte do processo são: esterilizar e evaporar substâncias indesejadas que causam sabores e aromas desagradáveis; concentrar o mosto, ocasionado pela evaporação de água; e ativar lúpulos e especiarias, que geram aromas e sabores característicos da cerveja.

O controle aplicado na saída da mosturação do líquido é o teste do iodo (ponto 3 da Figura 3.1), que consiste em misturar duas gotas de iodo com duas gotas do mosto. Caso a mistura fique com tonalidade clara, quando comparada à tonalidade do iodo puro, todo o amido presente nos grãos de malte foi convertido em açúcares e pode-se avançar para o estágio da filtração. Posteriormente, é verificada a qualidade do processo de filtração do mosto, que consiste em retirar uma pequena quantidade da cerveja filtrada e verificar a existência de partículas sólidas (ponto 6 da Figura 3.1), caso ainda haja, deve-se filtrar novamente até que o líquido se encontre cristalino e sem nenhum particulado.

4. PROJETO DA MICROERVEJARIA

As principais ações para um bom projeto de uma microervejaria são: a) dimensionamento dos tanques e da estrutura de sustentação, b) modos de transferência dos ingredientes entre tanques, c) cálculo da taxa de aquecimento dos ingredientes.

4.1. CONCEPÇÃO E DIMENSIONAMENTO DA MICROERVEJARIA

Para a concepção da microervejaria algumas premissas de projeto deveriam ser respeitadas. Além de produzir 50 litros de cerveja por batelada, a microervejaria deve ter uma concepção favorável a futuras instrumentações, para que posteriormente sejam realizadas experiências na área de engenharia. Sua estrutura deveria ser vertical e compacta, para minimizar a ocupação do espaço do laboratório onde será instalada. Além disso, não deveria utilizar bombas para transporte dos líquidos. A estrutura que atende as premissas propostas é a mostrada na Figura 4.1.

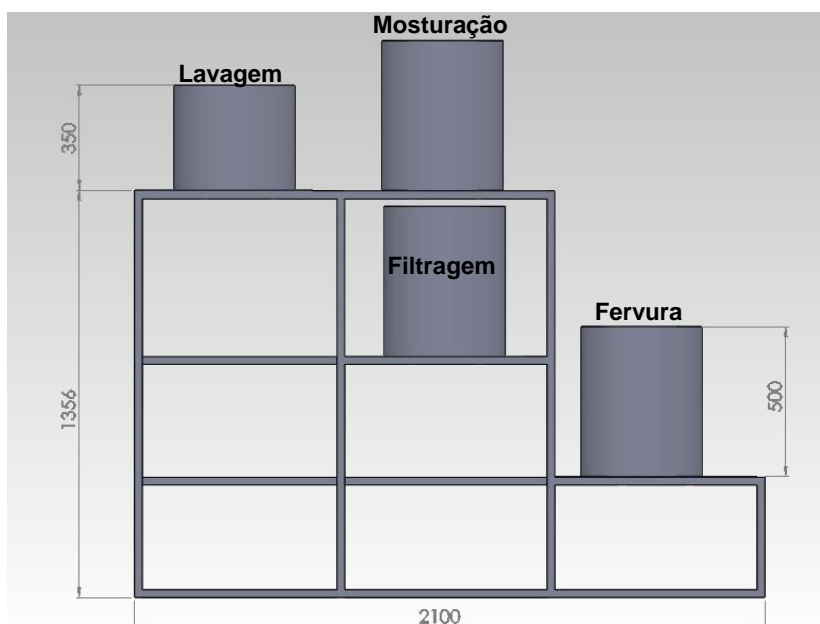


Figura 4.1: Concepção da microcervejaria

Analisando cada etapa de fabricação da cerveja, determinou-se as seguintes dimensões de tanques:

Tanque de mosturação: 30 litros de água mais 12 quilogramas de malte moído, resultando em um tanque de 60 litros, que foi suficiente para a realização dessa etapa do processo. O tanque projetado tem diâmetro de 400 milímetros e altura de 500 milímetros, o que gerou um volume de 62,8 litros.

Tanque de filtragem: Esse tanque deve possuir no mínimo o mesmo volume que o de mosturação, pois armazenará todo ingrediente vindo da primeira etapa do processo, e ainda descontar o volume ocupado pelo fundo falso. Mantendo-se o mesmo diâmetro e altura do anterior, consequentemente obteve-se o mesmo volume.

Tanque da água de lavagem: Esse tanque deve aquecer 43,2 litros de água. Sendo assim projetou-se um tanque de 400 milímetros de diâmetro e altura de 350 milímetros, o que gerou um volume de 43,98 litros.

Tanque de fervura: Recebe o material vindo da mosturação mais a água utilizada para a lavagem. Entretanto, nessa fase da produção da cerveja já não estão mais presentes os resíduos sólidos do malte. Deve-se ferver 21,6 litros de água da lavagem mais 15 litros de água da mosturação. Dessa forma, um recipiente de 400 milímetros de diâmetro e 500 milímetros de altura atende as necessidades dessa etapa, com um volume de 62,8 litros. Dessa forma, pode-se padronizar os tamanhos dos tanques de mosturação, filtragem e fervura. Todos os tanques foram feitos em inox 304 de 2 milímetros de espessura. Para a fabricação dos tanques, foram adquiridas chapas posteriormente cortadas, calandradas e soldadas.

A estrutura foi dimensionada com 2,1 metros de largura, 1,356 metros de altura e 0,9 metros de profundidade. Possui 4 compartimentos de suporte para os tanques e espaços disponíveis para futuras instrumentações. Os tanques de mosturação e aquecimento da água para lavagem se posicionam na parte superior, o de filtração a 0,8 metros de altura e o de fervura a 0,4 metros. A estrutura foi projetada em tubos quadrados de aço 1020, com 30 milímetros de largura e 2 milímetros de espessura.

4.2. TRANSFERÊNCIA DE INGREDIENTES ENTRE TANQUES

A transferência do líquido entre os tanques que compõem o processo pode ser feita com o auxílio de bombas, como nas cervejarias de porte maior, porém optou-se por aproveitar a ação da gravidade, o que reduziu o custo de instalação e principalmente de operação. Como os líquidos nos tanques se encontram em temperaturas acima da ambiente, sua transferência de um tanque para outro é um procedimento que merece atenção para garantir a segurança de quem o opera. Para evitar que haja qualquer tipo de movimentação de tanques durante a transferência de líquidos, o que é muito comum em produções artesanais, foram previstos tanques adicionais ligados por tubulações com válvulas de esfera de inox, indicadas para processos alimentícios. Para a passagem do mosto para a panela de filtração, a válvula deve possuir um diâmetro maior que o dos outros tanques, pois nessa etapa todos os grãos de malte devem ser transferidos juntamente com a água. Sendo assim uma válvula com diâmetro de 38,1 milímetros (1,5 polegadas) realiza o trabalho adequadamente. Para a passagem da água de lavagem para o tanque de filtração uma válvula de 19,05 milímetros (0,75 polegadas) é suficiente, pois somente água é transferida. O mesmo acontece com a transferência do tanque de filtração para o de fervura. A válvula é mostrada na Figura 4.2.



Figura 4.2: Válvula de esfera

4.3. CÁLCULO DA TAXA DE AQUECIMENTO (INCROPERA, et al, 2008)

Os aquecimentos de todas as fases do processo serão realizados por resistências elétricas tubulares, por permitirem a instrumentação e o controle do processo. O cálculo da potência de cada resistência elétrica é a fase mais importante do processo, por essa razão a parte experimental desse trabalho procurou determinar se os cálculos desenvolvidos foram suficientemente precisos para a produção da cerveja artesanal.

4.3.1. Tanque de mostura

No processo de mosturação são necessárias rampas de temperaturas de aquecimento, que consistem em elevar a temperatura do mosto e mantê-la durante tempos determinados, o que é conhecido como patamar de temperatura. Tanto as rampas como os patamares variam de acordo com a receita da cerveja escolhida. Para a receita elaborada nesse trabalho, cerveja de trigo (ou *Weissbier*), as rampas e os patamares podem ser vistas na Figura 4.3.

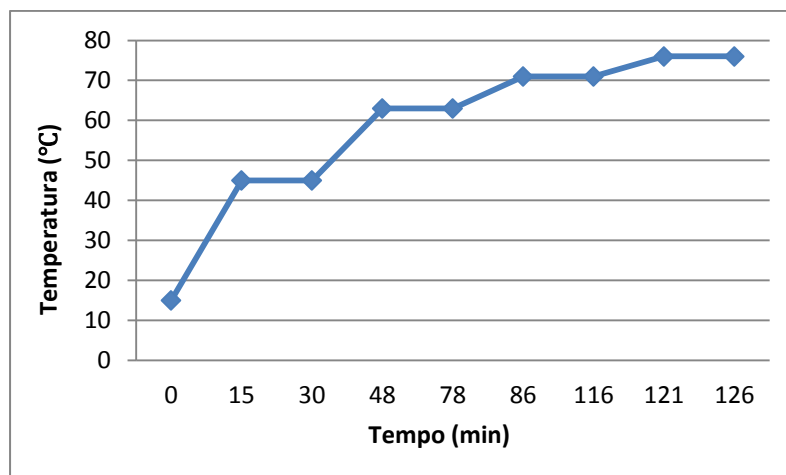


Figura 4.3: Rampas e patamares de temperatura em função do tempo no processo de mosturação

A primeira rampa de aquecimento, que vai dos 15°C aos 45°C e do 0 aos 15 minutos, é a parte do processo que exigirá mais potência das resistências elétricas, pois possui a maior variação de temperatura em função do tempo. Sendo assim, os cálculos de dimensionamento dos aquecedores serão baseados nessa fase específica do processo.

Para a determinação da potência das resistências elétricas \dot{E}_g (W) que realizarão o aquecimento do mosto, partiu-se do balanço de energia mostrado na Equação abaixo:

$$\dot{E}_{ac} = \dot{E}_e - \dot{E}_s + \dot{E}_g \quad (4.1)$$

onde \dot{E}_{ac} é a taxa de energia acumulada no processo \dot{E}_e é a taxa de energia que entra no volume de controle \dot{E}_s é a taxa energia perdida para o exterior. Para a modelagem matemática desenvolvida nesse trabalho a taxa de energia acumulada é a necessária para aquecer o volume do líquido, a taxa que entra no volume é zero, e a perda é a por convecção e radiação.

A variação da taxa de energia acumulada na Equação 4.1 foi calculada para um volume de controle que soma o líquido e o tanque de mosturação. As propriedades do líquido foram aproximadas as da água, devido a sua similaridade (FONTANA, 2009). Admitiu-se que a temperatura da água encontrava-se uniforme em todo seu volume, assim como a temperatura do tanque. Seu equacionamento é dado como segue:

$$\overline{\dot{E}_{ac}} = \left(\rho V C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \right)_{\text{água}} + \left(\rho V C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \right)_{\text{tanque}} \quad (4.2)$$

onde $\rho_{\text{água}}$ é a massa específica da água e vale 1000 kg/m^3 , ρ_{tanque} massa específica do tanque e vale 7900 kg/m^3 , $V_{\text{água}}$ volume máximo de água no tanque que é $0,06283 \text{ m}^3$, V_{tanque} volume de material do tanque que é $0,001758 \text{ m}^3$, $C_{p_{\text{água}}}$ calor específico da água e vale 4180 J/kgK , e o $C_{p_{\text{tanque}}}$ calor específico do tanque e vale 486 J/kgK .

A rampa de temperatura, considerada igual para o líquido e para o tanque, $\Delta T/\Delta t$ é de $0,0333 \text{ }^\circ\text{C/s}$, que corresponde a variação de $30 \text{ }^\circ\text{C}$ em 15 minutos. Com isso, calculou-se uma taxa de variação de energia acumulada de aproximadamente 8970 W .

A taxa de transferência de calor \dot{E}_s da Equação 4.1 é dada por:

$$\dot{E}_S = \dot{E}_{convecção} + \dot{E}_{radiação} \quad (4.3)$$

Por apresentarem áreas maiores para troca de calor, todas as equações basearam-se especificamente nas laterais do tanque. Para a determinação do comportamento do escoamento ao redor do volume de controle foi utilizado o número de Rayleigh, que considera escoamento laminar para $Ra < 10^9$, e pode ser determinado pela Equação 4.4:

$$Ra = Gr_{x_c} Pr \quad (4.4)$$

onde Gr_{x_c} é o número de Grashof para a situação mais crítica e pode ser calculado pela Equação (4.5). Pr é o número de Prandtl e varia insignificamente no intervalo de temperatura, por isso foi considerando constante e valendo 0,7.

$$Gr_{x_c} = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) (x_c)^3}{\nu^2} \quad (4.5)$$

onde g é a força gravitacional e vale $9,81m/s^2$, β o coeficiente de expansão volumétrica e vale $3,472 \cdot 10^{-3} 1/K$, T_s é a temperatura superficial e para o pior caso vale $318K$, T_∞ é a temperatura ambiente e vale $288K$, x_c é o comprimento crítico que é $0,5m$ e ν é a viscosidade cinemática que vale $1,49 \cdot 10^{-5} m^2/s$. Sendo assim $Gr_{x_c} = 5,75 \cdot 10^8$ e conseqüentemente $Ra = 4,02 \cdot 10^8$, o que demonstra que poderíamos considerar o escoamento como sendo laminar. Porém, devido à proximidade com a região de transição entre o regime laminar e turbulento, optou-se pelo método proposto por (Churchill e Chu, 1975), que abrange ambos os regimes em uma superfície vertical com convecção natural. Ele pode ser visto na Equação abaixo:

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}L}{k} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (4.6)$$

onde Pr é constante e igual a 0,7, k_{ar} é o coeficiente de condutividade térmica do ar, que varia pouco no intervalo podendo ser considerado constante e valendo $0,02534W/m.K$, L é o comprimento da superfície vertical, que vale $0,5m$ e $Ra = 4,02 \cdot 10^8$.

$$\bar{h} = \frac{k_{ar}}{L} \left\{ 0,825 + \frac{0,387Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (4.7)$$

Dessa forma, pela Equação 4.7, $\bar{h} = 4,7W/m^2K$. Determinou-se as perdas por convecção pela Equação abaixo:

$$q_{convecção} = \bar{h} A (T_s - T_\infty) = 88,77W \quad (4.8)$$

onde $A = 0,63m^2$, $T_s = 318K$ e $T_\infty = 288K$.

Para as perdas por radiação, utiliza-se o intervalo com maior diferença de temperatura entre a superfície do tanque e as superfícies ao redor. Isso ocorre no tempo de 15 minutos, com T_s valendo 318K, T_{viz} 288K. Como a variação de temperatura é pequena, pode-se considerar a emissividade, ε , do tanque constante e valendo $\varepsilon = 0,22$, assim como a área lateral A valendo $0,63m^2$ e a constante de Stefan Boltzmann $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$. Assim:

$$q_{radiação} = \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_{viz}^4) = 26,29W \quad (4.9)$$

Na análise da transferência de calor por condução considerou-se a transferência de calor unidirecional onde a resistência térmica de condução é dada pela Equação 4.10:

$$R_{t,condução} = \frac{E}{kA} = 2,13 \cdot 10^{-4} \frac{K}{W} \quad (4.10)$$

onde E é a espessura do tanque e vale $0,002m$, k_{innox} é a condutividade térmica do inox e vale $14,9W/m.K$, e $A = 0,6283m^2$. Percebe-se que a resistência à condução de calor é muito pequena, dessa forma ela não influencia relevantemente na taxa de transferência de calor total, podendo assim ser considerada aproximadamente zero.

4.3.2. Tanque de fervura

O dimensionamento da resistência elétrica que atua na panela de fervura foi baseado na quantidade de cerveja que deve ser evaporada durante um intervalo determinado de tempo, mais as perdas por convecção e radiação. Para a receita demonstrada nesse trabalho deve-se evaporar 20% da quantidade de líquido da panela em 70 minutos. O balanço de energia é o mesmo que para o tanque de mosturação, porém agora deve-se levar em conta a energia para troca de fase. A energia acumulada depende da entalpia de mudança de fase, e é mostrada na Equação 4.11:

$$\dot{E}_{ac} = \left(\frac{h_{lg} m_{evaporada}}{t_{evaporação}} \right)_{\text{água}} \quad (4.11)$$

onde h_{lg} é a entalpia de troca de fase da água e vale $2430 kJ/kgK$, $m_{evaporada}$ é a massa de água a ser evaporada que é $12kg$, e o tempo de evaporação é de 70 minutos que são 4200 segundos. Sendo assim, a taxa de energia necessária para a troca de fase desejada é de aproximadamente $6943W$.

A análise da perda por convecção no tanque de fervura foi similar à do tanque de mosturação. Utilizou-se a Equação 4.5 para encontrar o valor de Gr_L , onde o único parâmetro a ser alterado é a T_s que agora vale $373K$ para o pior caso. Dessa forma determinou-se $Gr_L = 1,25 \cdot 10^9$. Sendo assim, pela Equação 4.4, $Ra = 8,8 \cdot 10^8$, o que significa novamente um escoamento com comportamento laminar, porém próximo à região de mudança de regime. Pela Equação 4.7, agora com k_{ar} $0,0319 W/mk$, encontrou-se $\bar{h} = 7,42 W/m^2K$. Dessa forma, pela Equação 4.8, a perda de calor por convecção é aproximadamente $397,7W$.

Para a análise das perdas por radiação no tanque de fervura, também utilizamos a mesma análise do de mosturação. Pela Equação 4.10, com $\varepsilon = 0,22$, $A = 0,63m^2$ constantes e $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ e $T_s = 373K$, $T_\infty = 288K$, $q_{radiação} = 98,05W$.

O processo de aquecimento da água de lavagem é o menos crítico da produção de cerveja, pois não é condicionado pelo tempo nem pela forma de aquecimento. O único objetivo desse processo é elevar a água a uma temperatura de 76°C, em paralelo aos outros processos.

5. MONTAGEM DA BANCADA

O conceito escolhido para a estrutura de sustentação dos tanques se mostrou bastante compacta e eficiente, pois atendeu bem às necessidades no momento da produção da cerveja e ainda com espaço para futuras instrumentações e automações. Os tanques também se mostraram eficientes, com bons acabamentos, principalmente no que diz respeito ao processo de soldagem, e com boas dimensões para a produção de 50 litros de cerveja. As válvulas de esfera, feitas em inox, também corresponderam ao esperado, conseguindo fazer as transferências dos líquidos sem nenhum tipo de entupimento. A bancada pode ser vista na Figura 5.1:



Figura 5.1: Microcervejaria construída

Com relação aos cálculos de transferência de calor, pela modelagem matemática apresentada encontrou-se as seguintes potências para cada tanque:

Tanque de Mosturação – para esse tanque calculou-se 8970W de taxa de aquecimento para elevar 30°C o volume, em 15 minutos, com 26,29W de perdas por radiação e 88,77W de perdas por convecção. Necessitando assim de uma resistência aproximada de 9005W de potência. Porém como comercialmente uma resistência de 9000W é mais facilmente encontrada, optou-se pela compra desse produto.

Tanque de Fervura – para o dimensionamento de potência na fervura, a receita determinou que 20% do volume do líquido deveria ser evaporado. Dessa forma encontrou-se a taxa de variação da energia de 6943W para o volume, com 98,05W de perdas por radiação e 397,7W de perdas por convecção. Necessitando assim de uma resistência aproximada de 7438,75W de potência. Porém, novamente, como comercialmente uma resistência de 9000W é mais facilmente encontrada, optou-se pela compra desse produto.

Tanque da Água de Lavagem – Como mencionado anteriormente, devido à baixa complexidade desse processo, essa fase não precisa ser detalhada e modelada. Dessa forma uma resistência de 9kW também pode ser usada para o aquecimento da água de lavagem.

6. ANÁLISE EXPERIMENTAL

O objetivo do experimento desenvolvido nesse trabalho foi determinar se a modelagem matemática realizada na concepção da microcervejaria atendeu às necessidades do projeto. Por essa razão, a observação da variação da temperatura durante o aquecimento, em diversos pontos do tanque de mosturação, permitiu analisar a distribuição do calor e conseqüentemente a qualidade do processo de aquecimento. Tendo em vista que o processo de mosturação é o mais complexo, onde as temperaturas devem variar em tempos pré-determinados e isso influencia diretamente o resultado final da produção, o experimento foi baseado nessa fase da produção.

Sendo assim, foi montado um experimento composto por uma resistência elétrica de 9 kW e por 9 termopares, montados em uma armação de madeira. Essa armação foi fixada na parte superior do tanque e mantém o equipamento de medição e aquecimento submerso durante o experimento. O experimento pode ser vista na Figura 6.1.



Figura 6.1: Armação de suporte da resistência e dos termopares

Os 9 termopares foram distribuídos na armação conforme Figura 6.2

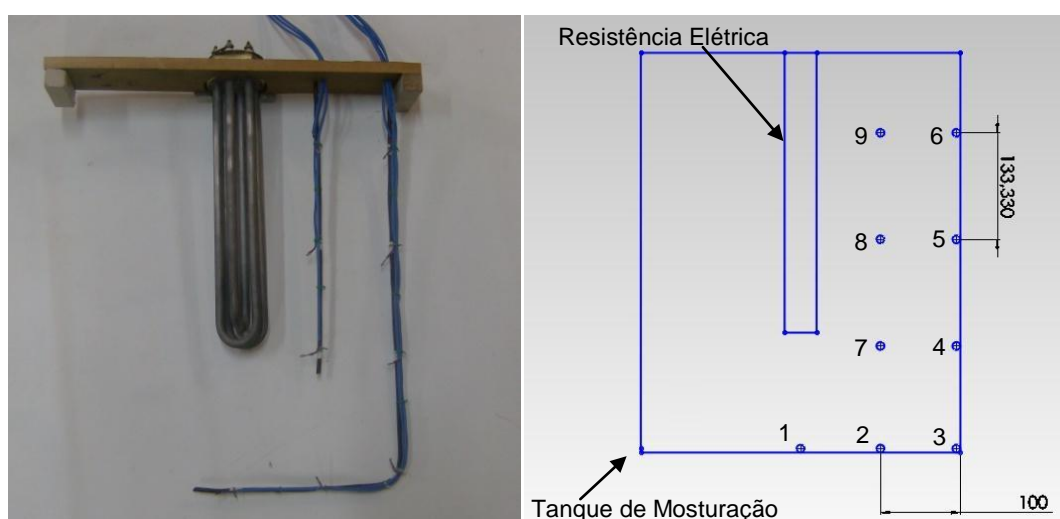


Figura 6.2: Disposição dos termopares na armação e no tanque

Para a realização das medições, primeiramente encheu-se o tanque de mosturação com água, o que gerou um volume de aproximadamente 62 litros, que é o pior caso em uma situação real de utilização. Após isso, os termopares foram ligados no magazine de captação de dados de temperatura.

O experimento se dividiu em duas etapas. Na primeira parte o aquecimento se deu com água parada para determinar qual seria o campo de temperaturas resultante. Na segunda fase, o aquecimento se deu desde o início com água em circulação. Essa divisão em duas partes no experimento deu-se pelo fato das grandes cervejarias utilizarem circuladores elétricos de água em seus tanques, tornando-se possível analisar a necessidade deste procedimento.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da primeira parte do experimento, com o fluido parado, podem ser vistos na Figura 7.1:

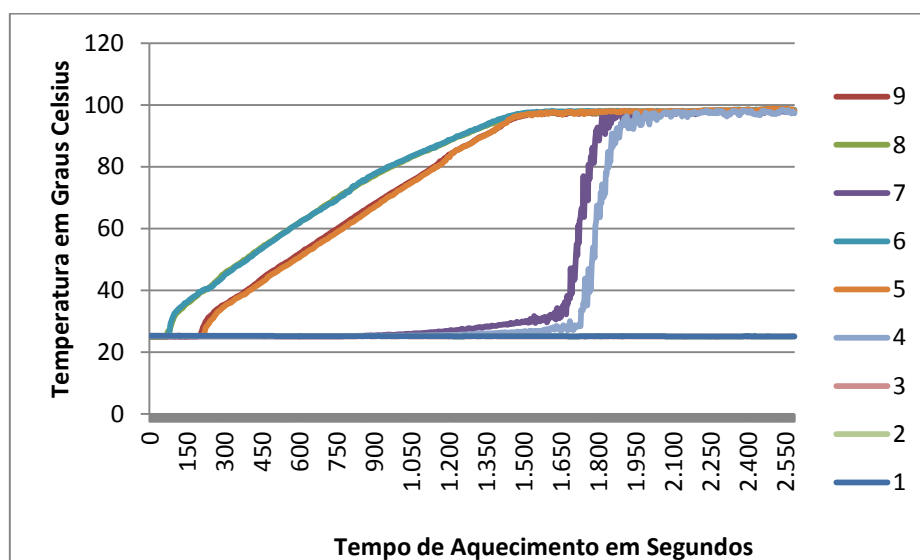


Figura 7.1: Evolução da temperatura, com o fluido parado, em nove pontos diferentes do tanque

Pela Figura 7.1, pode-se perceber que a parte superior do tanque atinge altas temperaturas, inclusive de troca de fase, enquanto a parte inferior não tem nenhuma alteração significativa. Isso ocorre pelo chamado efeito de difusão do calor. Devido a semelhança nas medições, as linhas dos termopares 1, 2 e 3 estão sobrepostas no gráfico, assim como as linhas dos termopares 6 e 8.

Esse fenômeno pode ser visualizado na Figura 7.2. Essa foto foi obtida com uma câmera termográfica especial para visualização de diferenças de temperatura, da marca FLIR, e nela pode-se perfeitamente visualizar uma linha de mudança drástica de temperatura que com o tempo foi se deslocando no sentido do fundo do tanque, o que mostra que a transferência de calor se deu realmente pelo fenômeno da difusão.

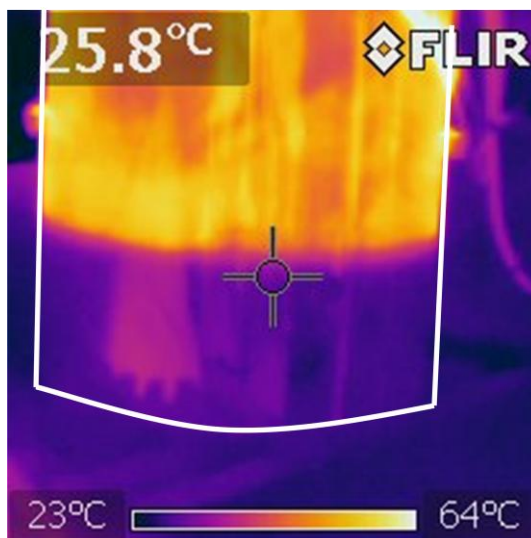


Figura 7.2: Linha de mudança de temperatura no aquecimento com o fluido parado

Esse tipo de concentração de altas temperaturas em alguns pontos não é favorável ao processo de produção da cerveja. Por essa razão o experimento foi repetido, porém agora, com uma pá cervejeira, foi imposta uma circulação contínua ao fluido. As variações de temperaturas podem ser vistas na Figura 7.3.

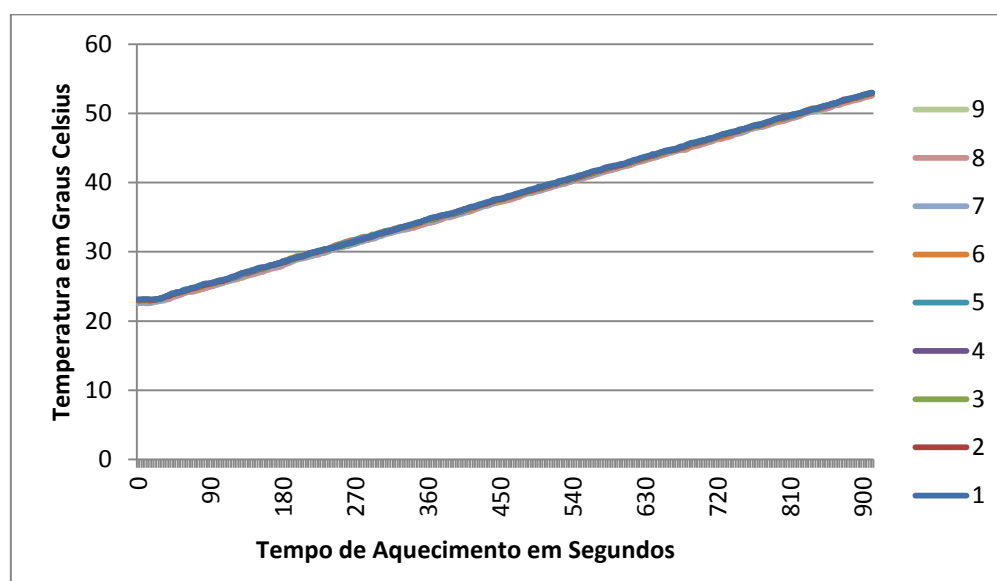


Figura 7.3: Evolução da temperatura, com o fluido em movimento, em nove pontos diferentes do tanque

Esse gráfico mostra todas as linhas representativas dos termopares sobrepostas. E isso demonstra que com uma pequena circulação induzida ao fluido, consegue-se uma distribuição de temperatura, no volume do tanque, bastante homogênea, o que é extremamente desejável na produção de cerveja. A Figura 7.4 mostra a foto tirada com a câmera termográfica, utilizada anteriormente, para o fluido em movimento:

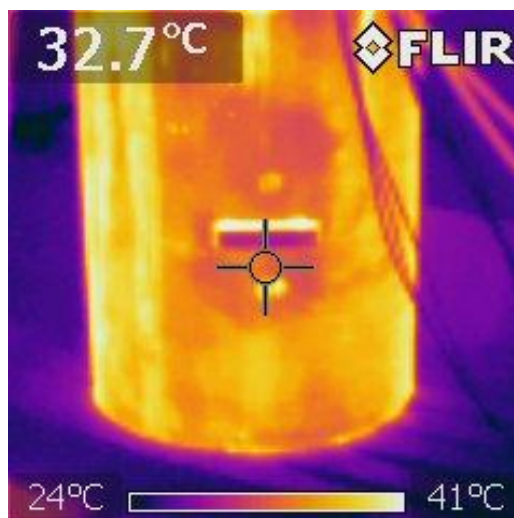


Figura 7.4: Foto da distribuição do calor para o fluido em movimento

Pela Figura 7.4, percebe-se a necessidade do movimento no fluido, pois dessa forma conseguiu-se a homogeneidade a fabricação de cerveja artesanal de qualidade.

A modelagem matemática do tanque de mosturação se baseou principalmente na determinação de uma potência para uma resistência elétrica de aquecimento que conseguisse elevar a temperatura do volume dos 15°C aos 45°C em 15 minutos, ou seja, variar 30°C em 900 segundos. No experimento realizado nesse trabalho, os termopares indicavam que em temperatura ambiente o líquido no tanque se encontrava a aproximadamente 22°C, variando de 0,1°C a 0,2°C dependendo da posição do termopar no tanque. O segundo experimento demonstrou que para o volume presente no tanque variar sua temperatura dos 22°C para os 52°C levou 912 segundos, ou seja 15,2 minutos. Isso comprova que mesmo utilizando métodos simplificados de cálculos de transferência de calor, atingiu-se valores satisfatórios para a proposta do projeto.

8. CONCLUSÕES

O presente trabalho mostrou-se efetivo quanto ao cumprimento dos objetivos propostos. Além de construir uma bancada para a realização de experimentações ou produção de cerveja, foi bem sucedido nas modelagens matemáticas propostas. Mesmo que em alguns casos as equações utilizadas tenham sido simplificadas, obteve-se uma diferença de menos de 2% quando comparada ao experimento. Esse grau de aproximação é muito relevante para cervejarias de pequeno porte, pois permite um melhor controle das temperaturas desejadas na produção da cerveja, que é um fator extremamente difícil de ser controlado sem a utilização de controladores eletrônicos de alto custo presentes em grandes cervejarias.

Outro fator relevante é a facilidade de replicação do projeto. Isso evita o transporte manual de painéis em altas temperaturas, o que é frequentemente observado em produções em pequena escala. Tanto a concepção da estrutura, dimensões dos tanques, quanto modos de transferências dos líquidos são facilmente encontrados em lojas especializadas.

Por outro lado, observou-se como um aspecto negativo a altura dos tanques localizados na parte superior da estrutura, sendo necessária utilização de escadas para a visualização do líquido no interior do tanque. Mesmo isso sendo esperado, para um projeto futuro, o investimento em uma bomba especial para a indústria alimentícia, agregaria muito valor e qualidade ao projeto.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL, Leis, decretos, etc. **Decreto n. 6.871, 4 de junho de 2009**. Regulamenta a Lei no 8.918, de 14 de julho de 1994, que dispõe sobre a padronização, a classificação, o registro, a inspeção, a produção e a fiscalização de bebidas. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/decreto/d6871.htm> Acesso em 08 de novembro de 2013.

CHURCHILL, S.W; H.H.S. CHU; “**Int. J. Heat Mass Transfer**”, 18, 23, 1975

DRAGON BIER; <http://www.microcervejarias-dragonbier.com/meu-projeto.php>, Acessado em 30 de outubro de 2013.

ENGETECNICO; <http://www.engetecnico.com.br/agr72.htm>, Acessado em 28 de outubro de 2013.

FERNANDES, A.; FRENZEN, T.; “**Automação e Controle em uma Micro Cervejaria Artesanal**” VIII Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 2011

FONTANA, D.; “**Elaboração De Um Modelo Para O Controle do Processo de Pasteurização em Cerveja Envasada (In-Package)**”, Tese de defesa de mestrado, UFRGS, 2009.

INCROPERA, F. P.; Dewitt, D. P., Bergman; T. L., Lavine, A. S.; “**Fundamentos de Transferência de calor e de massa**”, LTC, 6ª edição, 2008.

PALMER, J. J., “**How to Brew**”, Brewers Publications, 3ª ed., 2006.

REINOLD, M.; “**O Mercado Brasileiro Cervejeiro Atual**”, Revista, Indústria Brasileira de Bebidas, 57ª edição, 2011.

SANTOS, J. A.; “**Como Fazer Cerveja**”. Três, São Paulo, 1985.

SLAWITSCH, B; WEISS, W; SCHNITZER, H; BRUNNER, C; “**The Green Brewery Concept, Energy Efficient and the Use of Renewable Energy Sources in Breweries**” Applied Thermal Engineering, 2011.

VIEIRA, A. W.; “**Apostila de Produção de Cervejas Artesanais, ACERVA Paulista**”; 2009.

WISEGEEK; <http://www.wisegeek.org/what-is-a-microbrew.htm>; Acessado em 02 de dezembro de 2013.



CERVEJA DE TRIGO

MATÉRIA PRIMA		QUANTIDADES
		Receita para 25 L (aprox.)
MALTES		
Pilsen	56%	2,8 Kg
Château Wheat Blanc	40%	2,0 Kg
Château Cara Blond	4%	0,2 Kg
LÚPULO		
Hallertau Hersbrucker	4,3% Alfa Ácido	30 g
FERMENTO		
WB-06		11,5 g
MOSTURA		
Relação água/ malte	3,6 L/ Kg	18 L
Arriar o malte	45 °C	
Repouso 45 °C	15 minutos	
Repouso 63 °C	30 minutos	
Repouso 71 °C	30 minutos ou até teste de iodo Ok	
Repouso 76 °C	05 minutos	
FILTRAÇÃO		
Densidade do mosto primário	1,069 g/L (16,83 °P)	
Relação água/ malte (mosto secundário)	4,2 L/ Kg ou até densidade de 1,041 g/L (10,2 °P) - panela cheia	21 L
Volume final de filtração	35 L	
FERVURA		
Densidade antes do início da fervura	1,041 g/L (10,2 °P)	
Dosagem do lúpulo	Início da fervura	
Tempo de fervura	70 minutos	
Evaporação	20 % do volume inicial (panela cheia)	7 L
Densidade do mosto após fervura	1,049 g/ L (12,15 °P)	
Volume de apronte	28 L	
DECANTAÇÃO		
Circulação (Whirlpool)	05 minutos	
Repouso	20 repouso	
Resfriamento	18 °C	
FERMENTAÇÃO		
Temperatura	23 °C	
Tempo	5 dias	
Densidade Final	1,012 g/ L (3,07 °P)	
Priming High Maltose (calda)	10 g/ L	
Pressão na garrafa	2,8 - 3,0 kg/ cm ²	
MATURAÇÃO		
Tempo	14 dias a 2 °C	
ASPECTOS GERAIS		
Volume envasado	23 L	
Álcool (v/v)	5,40%	
Amargor	16 BU	
Cor	19 EBC	