



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



Protótipo de equipamento para controle de temperatura para cervejeiros artesanais

Autor: Pedro Holderbaum de Abreu

Orientador: Profa. Lígia Damasceno Ferreira Marczak

Porto Alegre, 21 Junho de 2012.

Sumário

Sumário	ii
Agradecimentos	iv
Resumo	v
Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	vii
Lista de Símbolos	viii
Lista de Abreviaturas e Siglas	x
1 Introdução e contexto	1
2 Motivação	2
3 Revisão bibliográfica	6
3.1 A cerveja	6
3.2 Processo cervejeiro	6
3.2.1 Mosturação	6
3.2.2 Fervura	7
3.2.3 Fermentação	7
3.2.4 Envelhecimento ou maturação	8
3.3 Tipos de cerveja	9
3.3.1 Lagers	9
3.3.2 Ales	10
3.3.3 Lambic	10
3.4 Tecnologia de refrigeração	10
4 Fundamentos Teóricos	12
4.1 Calor interno	13
4.2 Calor externo	14
4.3 Calor gerado	15
5 Metodologia de cálculo	16
5.1 Fermentação	16
5.1.1 Cálculo do calor interno na fermentação	16
5.1.2 Cálculo do calor externo na fermentação	17
5.1.3 Cálculo do calor gerado na fermentação	18
5.1.4 Cálculo do calor retirado na fermentação	18
5.2 Maturação	18
5.2.1 Cálculo do calor interno na maturação	18
5.2.2 Cálculo do calor retirado na maturação	19
6 Resultados e Discussão	20
6.1 Fermentação	20
6.2 Maturação	21
6.3 Fermentação x maturação	21
6.4 Isolamento	22

6.5	Protótipo	22
7	Conclusões e Trabalhos Futuros	25
8	Referências	26

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a minha mãe, pelo apoio e por acreditar em mim quando eu estava quase desistido de ser engenheiro. Ao meu irmão que apesar me incomodar as vezes ele é um cara legal.

À minha orientadora, Lígia, por todo o conhecimento transmitido ao longo do curso e pela ajuda na elaboração deste trabalho.

Ao cervejeiro e autor do livro *Microcervejarias e cervejarias: a história, a arte e a tecnologia*, Egon Carlos Tschope, que me enviou uma cópia do seu livro e que serviu como fonte para parte deste trabalho.

Ao pessoal do grupo Cervejaartesanalpoa que preencheu minha enquete, direcionando este estudo.

Aos meus familiares e amigos que me ajudaram durante o período da faculdade, com conselhos, motivação, risadas e cervejas; em especial ao meu primo Tiago que me incentivou neste projeto.

À minha namorada, pelo romântico final de semana em Gramado sentado à lareira escrevendo estas folhas.

Resumo

O presente trabalho visa projetar e desenvolver um protótipo capaz de suprir as necessidades dos cervejeiros artesanais em controlar a temperatura do processo de fermentação e maturação de forma econômica e compacta, através da substituição de materiais tradicionais como o aço inox, por outros de baixo custo. A carga térmica foi analisada utilizando equações de transferência de calor tradicionalmente empregadas para este tipo de cálculo, de forma a obter um protótipo com o tamanho reduzido sem perder as funcionalidades desejadas, conforme a pesquisa de opinião realizada junto ao público alvo. Definidas as variáveis e os parâmetros a serem analisados, determinaram-se os diâmetros e a altura mínima para o equipamento. Em uma etapa futura, os dados obtidos neste trabalho podem ser utilizados, junto com uma análise de custo, para a construção deste protótipo.

Lista de Figuras

Figura 2.1 Pesquisa: preferência por estilo.....	2
Figura 2.2 Pesquisa: faz controle de temperatura.....	2
Figura 2.3 Pesquisa: considera importante o controle de temperatura.....	3
Figura 2.4 Pesquisa: equipamento deve ser compacto.	3
Figura 2.5 Equipamento da WilliamsWarn.	4
Figura 2.6 Fermentador cilindro-cônico.....	4
Figura 2.7 Método alternativo de controle.....	5
Figura 3.1 Perfil de fermentação. Adaptado de Hardwick, 1994.....	7
Figura 3.2 Relação entre açúcares fermentáveis durante a fermentação. Adaptado de Hardwick, 1994.	8
Figura 4.1 Esquema do problema proposto para a fermentação.	12
Figura 4.2 Esquema do problema proposto para a maturação.	13
Figura 6.1 Unidade Condensadora tipo UCB. Fonte: Multifrio Refrigeração.....	22
Figura 6.2 Vista do protótipo.	23
Figura 6.3 Vista superior com painel controlador.....	24

Lista de Tabelas

Tabela 5.1 Propriedades físicas	16
Tabela 5.2 Dimensões do balde.....	17
Tabela 5.3 Valores das condutividades térmicas dos isolantes	17
Tabela 5.4 Dimensões do protótipo	17
Tabela 5.5 Dados para cálculo do calor gerado.....	18
Tabela 5.6 Propriedades físicas	19
Tabela 6.1 Números adimensionais calculados para a fermentação	20
Tabela 6.2 Valores de resistência térmica condutiva.....	20
Tabela 6.3 Resultados para a fermentação	21
Tabela 6.4 Números adimensionais calculados para a maturação	21
Tabela 6.5 Resultados para a maturação	21
Tabela 6.6 Taxas de calor externo dos isolantes	22

Lista de Símbolos

- Gr_c : número de Grashoff, [adimensional]
- Pr_c : número de Prantdl, [adimensional]
- Ra_c : número de Rayleigh, [adimensional]
- Nu_c : número de Nusselt, [adimensional]
- h_i : coeficiente convectivo interno, [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]
- h_e : coeficiente convectivo externo, [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]
- Rt_{conv_i} : resistência térmica convectiva interna, [$^\circ C/W$]
- Rt_{conv_e} : resistência térmica convectiva externa, [$^\circ C/W$]
- Rt_{cond} : resistência térmica condutiva, [$^\circ C/W$]
- g : aceleração da gravidade, [m/s^2]
- ρ_c : massa específica da cerveja/água, [kg/m^3]
- β : coeficiente de expansão térmica, [K^{-1}]
- T_{wi} : temperatura inicial do mosto, [$^\circ C$]
- T_i : temperatura do meio de resfriamento, [$^\circ C$]
- T_∞ : temperatura do meio externo, [$^\circ C$]
- L : comprimento característico molhado, [m]
- μ_c : viscosidade dinâmica da cerveja/água, [$N/s \cdot m^2$]
- Cp_c : calor específico da cerveja/água, [$J/kg \cdot ^\circ C$]
- k_c : condutividade térmica de cerveja/água, [$W/m \cdot ^\circ C$]
- r_1 : raio do balde interno, [m]
- r_2 : raio interno protótipo, [m]
- r_3 : raio externo protótipo, [m]
- h : altura do balde, [m]
- L_2 : altura interna do protótipo, [m]
- L_3 : altura externa do protótipo, [m]
- k_{isol} : condutividade térmica do isolante, [$W/m \cdot ^\circ C$]
- t_f : tempo de fermentação, [h]

$E\%$: redução de extrato, [adimensional]

T_g : taxa de geração de calor, [$kcal/h$]

C_g : calor produzido por quilograma de extrato, [$kcal/kg$ extrato]

V_u : volume cerveja, [L]

A_t : atenuação na redução do extrato, [adimensional]

q_{ret_f} : taxa de calor retirado na fermentação, [W]

$q_{interno_f}$: taxa de calor interno na fermentação, [W]

$q_{externo}$: taxa de calor externo, [W]

q_{gerado} : taxa de calor gerado, [W]

q_{ret_m} : taxa de calor retirado na maturação, [W]

$q_{interno_m}$: taxa de calor interno na maturação, [W]

Lista de Abreviaturas e Siglas

HB. *Homebrewers* (cervejeiros caseiros)

LV. Lã de Vidro

PE. Poliestireno Expandido

PU. Espuma de Poliuretano

VDK. Diketona Vicinal

1 Introdução e contexto

Consumida desde a época dos faraós, acredita-se que a cerveja tenha surgido no Oriente Médio a aproximadamente 6.000 a.C., logo após o nascimento da agricultura. A ascensão dos métodos modernos de produção de cerveja ocorreu em locais com clima temperado no norte da Europa durante a época medieval, principalmente em abadias e monastérios que ganharam a reputação como centros de excelência cervejeira e que vêm produzindo a bebida desde então (Boulton, 2001).

Especialistas da área acreditam que o Brasil vive hoje uma revolução cervejeira semelhante à ocorrida nos Estados Unidos na década de 80, na qual as pessoas passaram a buscar cervejas diferenciadas, com pequenos volumes de produção e alto valor agregado ao produto. Segundo o Sindicerv (Sindicato Nacional de Indústria da Cerveja) o mercado brasileiro de cervejas especiais apresentou crescimento de aproximadamente 12 % em 2007, um crescimento significativo se comparado à taxa de crescimento do mercado de cervejas, que, em geral, foi de 6,7 %.

Com a descoberta de novas possibilidades e o fácil acesso à informação em sites, blogs (apenas no Brasil existem mais de 200 blogs dedicados à produção de cerveja) e fóruns, muitos consumidores passaram de simples consumidores para produtores de cerveja caseira. Segundo o dono de uma das empresas líderes no mercado de insumos para microcervejarias e pequenos produtores, estima-se que existam, apenas em Porto Alegre, cerca de 1000 pessoas fabricando sua própria cerveja. Com base em pesquisa realizada junto a este público, percebe-se a carência de uma forma efetiva de controle de temperatura para a produção em pequena escala, visto que equipamentos com funcionalidade semelhante possuem um valor muito elevado e ocupam muito espaço.

Este trabalho visa projetar e desenvolver um equipamento compacto e de baixo custo capaz de suprir as necessidades de controle de temperatura no processo de fermentação e maturação da produção cervejeira em escala artesanal, utilizando sistema de refrigeração por compressão e isolamento. Propõe-se, também, a substituição de materiais tradicionais, como o aço inox, por outros com custo mais reduzido, sem que se perca a funcionalidade do equipamento.

2 Motivação

A fim de se conhecer a opinião de pessoas que fabricam cervejas artesanalmente e, desta forma, conhecer suas expectativas em relação a um protótipo que pudesse ser utilizado na confecção das cervejas, realizou-se uma pesquisa e onde se percebe a carência de uma forma efetiva de controle de temperatura para a produção em pequena escala, visto que equipamentos com funcionalidade semelhante possuem um valor muito elevado e ocupam muito espaço. O questionário foi preenchido por membros do grupo de discussão virtual Cervejaartesanalpoa que possui atualmente 650 integrantes; o espaço amostral da pesquisa foi de 50 pessoas.

Os principais resultados da pesquisa foram transformados em gráficos e são apresentados nas Figuras 2.1 a 2.4. . Pela análise da Figura 2.1 percebe-se que mais de 60% dos HB (*Homebrewers* – cervejeiros caseiros) preferem cervejas do tipo *Ale*; no entanto, 37 % preferem cerveja do tipo *Lager* ou ambas, demonstrando que o fermentador precisa ser versátil para poder produzir ambos os estilos de cerveja.

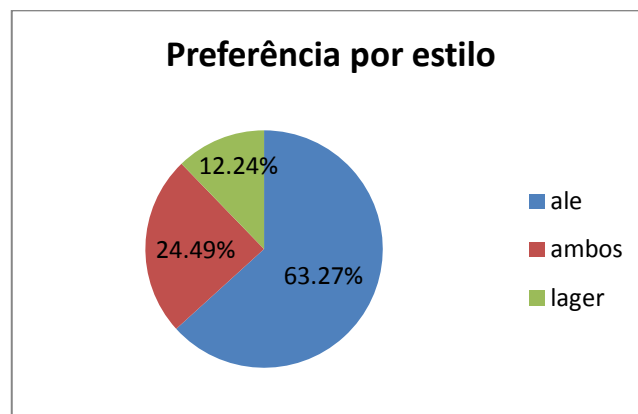


Figura 2.1 Pesquisa: preferência por estilo.

Na Figura 2.2 observa-se que aproximadamente 70 % dos HB já utilizam algum tipo de controle de temperatura, geralmente algum aparelho doméstico modificado, como geladeira ou frigobar. Além disto, na Figura 2.3 nota-se que aproximadamente 94 % consideram importante o controle de temperatura; este resultado mostra o grande potencial que um equipamento para esta finalidade possui no nicho para o qual ele será desenvolvido.

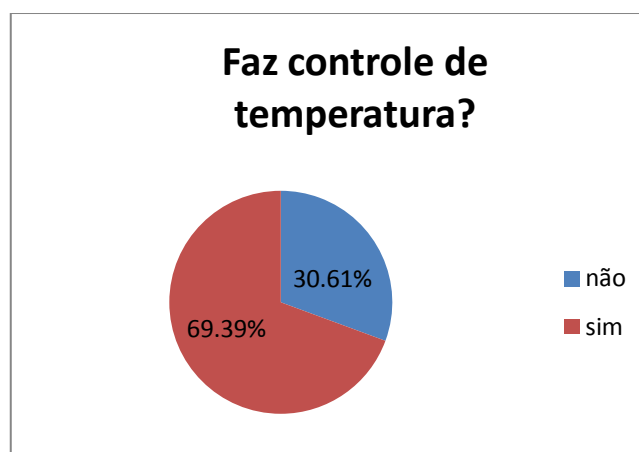


Figura 2.2 Pesquisa: faz controle de temperatura.

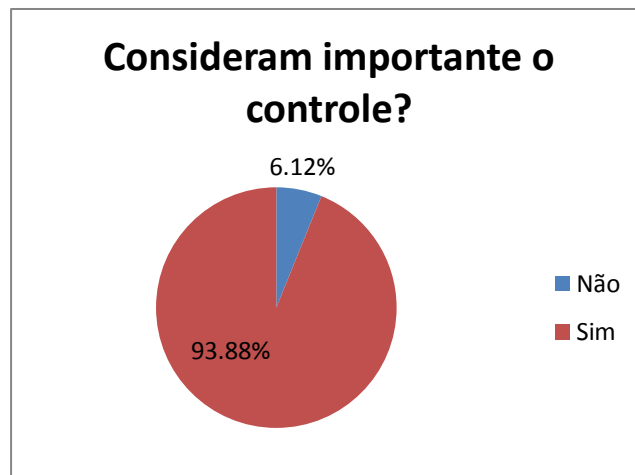


Figura 2.3 Pesquisa: considera importante o controle de temperatura.

Conforme indicado pela Figura 2.4, percebe-se que uma fração expressiva considera importante que o equipamento seja compacto, justificando a escolha por desenvolver um protótipo com dimensões reduzidas.

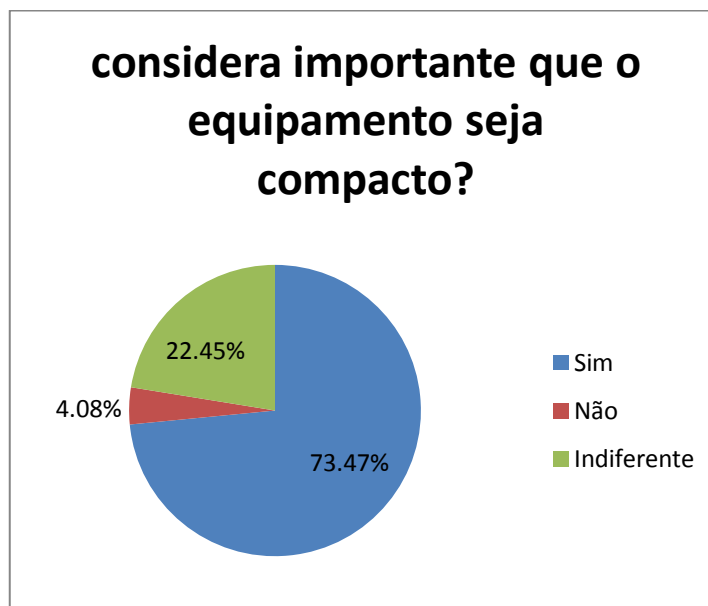


Figura 2.4 Pesquisa: equipamento deve ser compacto.

Não existe no mercado um aparato que supra a necessidade de controle de temperatura para uma escala de produção artesanal. Os equipamentos que possuem a finalidade de produzir cerveja que mais se aproximam do protótipo proposto neste trabalho, ou são muito caros e possuem muitos recursos, ou são muito baratos mas muito simples, ou, ainda, são adaptações realizadas pelos próprios cervejeiros em equipamentos domésticos. Exemplos destes equipamentos são mostrados a seguir.

A Figura 2.5 mostra um equipamento da empresa WiliamWarns, fabricado em aço inox e que realiza, além da fermentação e da maturação, a fervura do mosto a partir de extrato de malte; possui uma válvula extratora e diversos controles e indicadores de temperatura. Este equipamento além de refrigerar, também possui um sistema de aquecimento e tem um custo de, aproximadamente, cinco mil dólares, não sendo vendido no Brasil.



Figura 2.5 Equipamento da WilliamsWarn.

A Figura 2.6 apresenta uma fotografia de um fermentador cilindro cônico de polipropileno com suporte e tampa em aço inox desenvolvido por uma empresa do Rio Grande do Sul. Este equipamento não possui nenhum tipo de controle de temperatura e custa em torno de quinhentos reais.



Figura 2.6 Fermentador cilindro-cônico.

A Figura 2.7 mostra um exemplo de adaptação de uma geladeira doméstica para produzir cerveja. O fermentador foi adaptado utilizando uma bambaona de água de 25 litros e pode-se observar um indicador de temperatura e isolantes térmicos feitos de tecido.



Figura 2.7 Método alternativo de controle.

Dentro deste contexto, insere-se a motivação deste trabalho: propor o desenvolvimento de um equipamento compacto e eficiente para produção de cerveja caseira.

3 Revisão bibliográfica

3.1 A cerveja

A definição da cerveja pode variar conforme o país no qual ela é produzida; de uma perspectiva internacional define-se cerveja como uma bebida produzida pela fermentação de um líquido que contém açúcares provenientes, principalmente, de cereais (Hardwick, 1994).

Segundo a Lei de Pureza Alemã (*Reinheitsgebot*) publicada na Bavária em 1516 ficou estipulado que a cerveja deve ser produzida apenas com cevada maltada, lúpulo e água; como não havia sido descoberto o fermento àquela época, este ingrediente não foi incluído na lei original. Os cervejeiros caseiros seguem esta lei, pois esta é uma forma de garantir uma cerveja com alta qualidade.

Alguns aditivos são permitidos na fabricação da cerveja: ácido ascórbico e seus sais que atuam como antioxidantes; dióxido de carbono, dióxido de enxofre e hidrossulfito de sódio que servem como agente conservador; além de agentes tamponantes como bicarbonatos, carbonatos, cloretos, citratos, etc. (Tschope, 2001).

3.2 Processo cervejeiro

O processo tradicional de fabricação de cerveja pode ser dividido em quatro etapas fundamentais: mosturação, fervura, fermentação e maturação (Tschope, 2001). Estas etapas serão descritas de forma sucinta a seguir. Além destas, outras etapas como moagem, filtração, resfriamento e aeração também ocorrem no processo de produção da cerveja, mas constituem apenas procedimentos com transformações físicas.

3.2.1 Mosturação

A etapa de mosturação é aquela na qual o malte moído é adicionado à água em temperaturas que variam de 45 °C a 72 °C com o intuito de quebrar as moléculas de amido em açúcares fermentáveis como a glicose, a frutose, a maltose e a maltotriose. Estas reações ocorrem devido à presença das enzimas proteolíticas, a α -amilase e a β -amilase presentes no malte (Emmel, 2009).

O processo de decomposição do amido, que ocorre durante a mosturação, desenvolve-se em três fases: o intumescimento e gelatinização, a liquefação e a sacarificação. Durante o intumescimento e gelatinização as moléculas do amido absorvem a água e aumentam de volume rompendo a amilopectina, liberando, desta forma, fragmentos de amido. A liquefação é a fase em que as longas cadeias de amilose são quebradas em cadeias menores, reduzindo a viscosidade do líquido. A sacarificação é a etapa em que a β -amilase atua nas pontas da molécula de glicose, originando, preferencialmente, moléculas de maltose (Tschope, 2001).

O amido necessita ser totalmente transformado em açúcares, pois, caso contrário, a cerveja poderá se tornar turva e gelatinosa. Os fatores que influenciam a degradação do amido são as temperaturas de mosturação, o tempo, o pH da mistura, a quantidade de sais presentes na água, a qualidade do malte e a composição da moagem (Briggs, 2004).

3.2.2 Fervura

Nesta etapa, o mosto adocicado proveniente de mosturação é transferido para uma tina de fervura onde a temperatura se eleva até o ponto de ebulição e o lúpulo é adicionado. O lúpulo é uma planta trepadeira em que apenas a sua flor, em formato cônico, proveniente das plantas fêmeas, é utilizado. Este ingrediente pode ser vendido comercialmente inteiro, moído, na forma de pellets ou como extrato (Briggs, 2004).

A fervura consome aproximadamente metade da energia gasta em todo o processo de produção e dura, convencionalmente, de 90 a 100 minutos, resultando numa taxa de evaporação total de 8 a 10% do volume do mosto (Briggs, 2004). Esta etapa possui diversas finalidades, destacando-se a concentração dos açúcares através da evaporação da água excedente, a inativação do sistema enzimático para evitar a ação das polifenoloxidasas, a esterilização do mosto, a floculação e precipitação de proteínas. Além disto, forma e evapora voláteis indesejados como compostos de enxofre responsáveis pelo aroma e paladar de vegetal cozido e solubiliza os aromas e sabores do lúpulo através da isomerização dos α -ácidos (Tschope, 2001).

3.2.3 Fermentação

Esta etapa consiste na transformação de açúcares fermentáveis do mosto em álcool, dióxido de carbono, calor e subprodutos tais como ésteres, compostos sulfurosos, acetaldeído, diacetil e dimetilsulfeto. Este processo ocorre através de uma série de reações bioquímicas no interior das leveduras, sendo que ao final das reações os produtos são excretados para o meio. Esta etapa dura aproximadamente sete dias. A Figura 3.1 mostra a representação das mudanças relativas que ocorrem durante a fermentação (Hardwick, 1994) (Emmel, 2009).

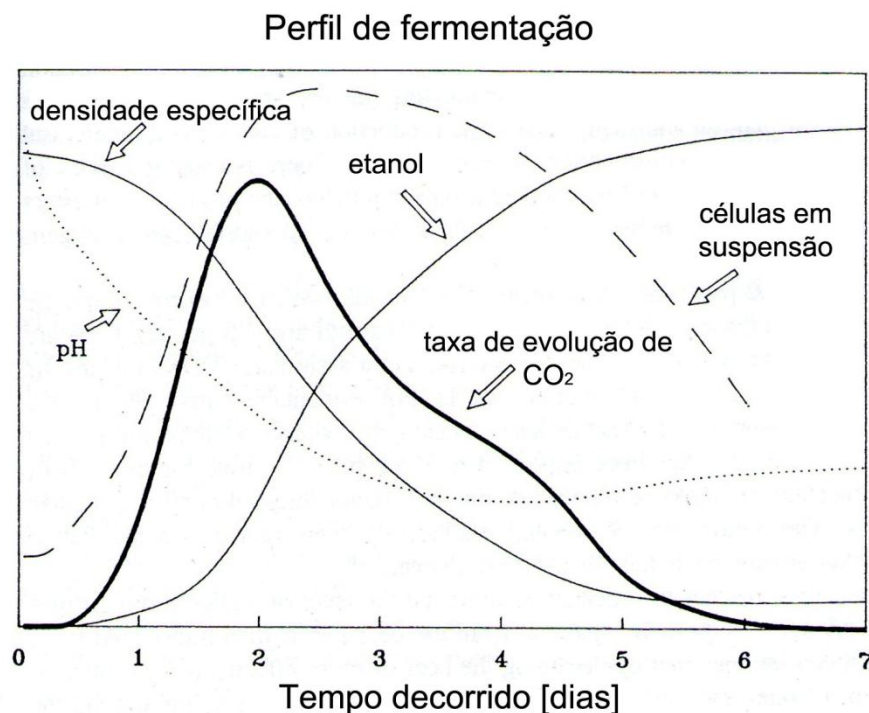


Figura 3.1 Perfil de fermentação. Adaptado de Hardwick, 1994.

Observa-se que, ocorre um crescimento contínuo da produção de etanol e que a taxa de evolução de CO₂ e as células em suspensão possuem um máximo no segundo dia de

fermentação, seguido de um declínio expressivo. As leveduras em suspensão devem ser reduzidas ao menor valor possível para evitar que a cerveja fique turva. O controle da temperatura é necessário para o crescimento constante das leveduras minimizando a possibilidade de variação do processo. A taxa de fermentação aumenta proporcionalmente com a temperatura, pois o metabolismo das leveduras é acelerado nessas condições. Altas temperaturas aceleram a conversão dos precursores do VDK (Dicetona Vicinal), diminuindo o tempo necessário para reduzir os potenciais sabores indesejados do VDK.

Altas taxas de fermentação aumentam a demanda por um sistema de refrigeração. Se existe uma temperatura máxima especificada, o excesso de calor deve ser retirado resfriando o fermentador. A influência quantitativa da mudança de temperatura vai ser diferente para cada reação bioquímica, alterando as características sensoriais, químicas e físicas da cerveja. Segundo Hardwick (1994), resfriar rapidamente o final do processo de fermentação se mostrou uma forma efetiva de produzir cerveja sem sabores indesejados.

A Figura 3.2 apresenta o perfil de assimilação de açúcares durante o processo da fermentação. Conforme pode ser observado, a maltose e a maltotriose não são assimiladas em quantidades significativas até que a maior parte de glicose tenha sido consumida; de fato, as leveduras passam a consumir os demais açúcares somente quando a concentração de glicose presente é inferior à metade do seu valor inicial.

Perfil de assimilação de açúcares

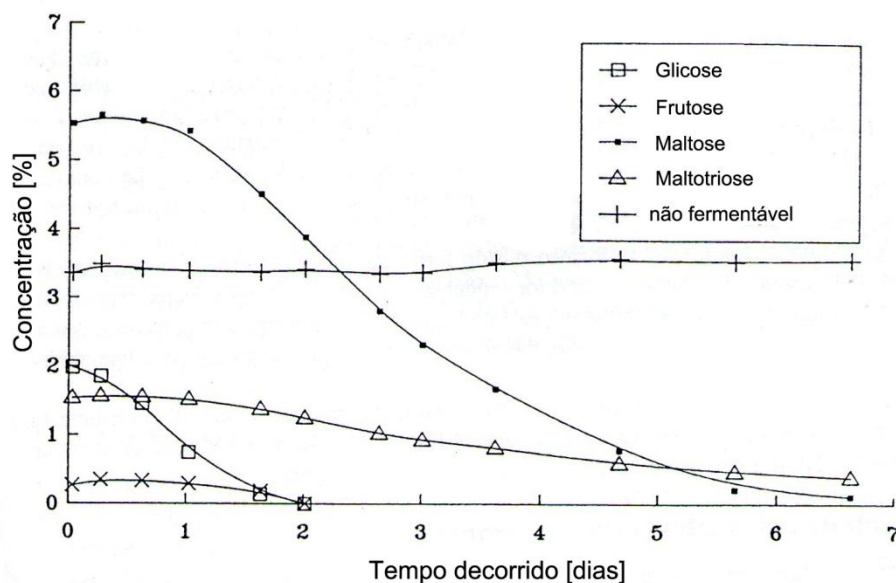


Figura 3.2 Relação entre açúcares fermentáveis durante a fermentação. Adaptado de Hardwick, 1994.

3.2.4 Envelhecimento ou maturação

Este processo refere-se à maturação do sabor da cerveja; no final da fermentação, muitos sabores indesejados e aromas “verdes” ou “imatuross”, provenientes de substâncias aromáticas, encontram-se presentes e concedem à cerveja um paladar seco e agressivo. O processo de envelhecimento reduz os níveis desses componentes indesejados para produzir um produto maduro. A prática moderna é o envelhecimento

ou “lagering” a frio onde a cerveja é mantida a baixas temperaturas, aproximadamente 4 °C, por um período de 20 dias. Na maturação ocorre também a saturação do dióxido de carbono e a sedimentação das leveduras (Hardwick, 1994) (Emmel, 2009).

Segundo Emmel (2009), todos os fenômenos necessitam de um tempo fixo para ocorrer, porém, não é aconselhável permitir que a cerveja mature por um período muito longo, pois pode ocorrer autólise das leveduras originando um produto final com sabor afiado, gosto amargo e um aroma de fermento.

No final da maturação espera-se atingir um grau de fermentação mais próximo do grau de fermentação final, evitando, assim, os problemas resultantes de cervejas com açúcar residual elevado, ou, ainda, o oposto, a autólise de leveduras devido à permanência em um meio sem a quantidade de nutrientes adequada (Tschope, 2001).

3.3 Tipos de cerveja

Não existe uma classificação satisfatória para os tipos de cerveja; elas podem ser caracterizadas de acordo com sua densidade original, grau de atenuação ou quantidade de álcool, cor, acidez, sabor, aroma, através do seu corpo, da sensação à boca ou através das características da espuma (Briggs, 2004). De forma simplificada, é possível separar as cervejas de acordo com o seu tipo de fermento em três grandes famílias: *Lagers*, *Ales* e *Lambics*.

3.3.1 *Lagers*

Surgiram na Alemanha, por volta do ano de 1400 e foram descobertas por acidente, quando a cerveja era estocada em frias cavernas, por longos períodos, de onde veio o seu nome da palavra germânica "lagern" (armazenar). Como a temperatura nessas cavernas era muito inferior a 20 °C, houve uma mutação no fermento utilizado que passou a se adaptar melhor a temperaturas mais baixas. Como resultado, foram obtidas cervejas mais límpidas e menos complexas que as existentes até então.

As *Lagers* são conhecidas como cervejas de baixa fermentação devido ao comportamento do fermento que se acomoda no fundo do fermentador à medida que a fermentação vai diminuindo. A cepa característica deste tipo de fermentação é a *Saccharomyces uvarum* ou *Saccharomyces carlsbergensis* que migra para o fundo do fermentador quando a produção de dióxido de carbono fica mais lenta tornando a agitação insuficiente para manter o fermento em suspensão. A temperatura tradicional de fermentação das *Lagers* varia de 7 a 14° C (Hardwick, 1994).

A seguir são listados alguns tipos de *Lagers*:

- Pilsen: é a cerveja mais consumida no mundo. Possui coloração dourada e sabor leve. Seu teor alcoólico é baixo, geralmente, entre 3 e 5 % . É originária na cidade de Pilsen, na República Tcheca. No Brasil, o consumo de cerveja Pilsen, representa aproximadamente 98 % do mercado;
- Dunkel: são cervejas escuras produzidas com malte de cevada torrado;
- Bock: são cervejas escuras com coloração avermelhada e encorpadas. O teor alcoólico varia de 6,8 % a 8,75 % elas têm origem em Einbock, na Alemanha;

- Rauchbier: cervejas defumadas típicas da cidade de Bamberg, na Alemanha.

3.3.2 Ales

Cerveja de alta fermentação durante o qual o fermento *Saccharomyces cerevisiae* sobe para o topo do tanque no momento em que a fermentação diminui; com a redução da temperatura no final da etapa fermentativa é possível decantar o fermento. A temperatura ideal para a fermentação é de aproximadamente 20 °C, sendo que o resultado deste tipo de fermentação é uma cerveja geralmente mais frutada e que apresenta sabores e aromas mais complexos (Hardwick, 1994).

Alguns tipos de Ales são:

- Weissbier: cerveja produzida com até 50 % de malte de trigo e, geralmente, não são filtradas, conservando, desta forma, o fermento utilizado no processo de fabricação; como resultado tem-se uma cerveja turva que chama a atenção pela presença de aroma de banana e cravo provenientes da sepa de fermento utilizada;
- Amber Ale: é uma cerveja de origem americana produzida com grande quantidade de malte caramelo. O teor de lúpulo pode variar bastante e podem ser levemente adocicadas;
- Altbier: possui cor cobre e alta lupulagem, típica da cidade de Düsseldorf na Alemanha;
- Kölsch: é uma cerveja dourada e de baixo amargor e refrescante originada na cidade de Colônia na Alemanha;
- Stouts: produzida a partir de malte torrado este estilo é originário da Irlanda e caracteriza-se por ser amarga e seca ao paladar.

3.3.3 Lambic

Este estilo é produzido em uma região específica da Bélgica sendo que as cervejas feitas por este método são chamadas de fermentação espontânea, pois a fermentação ocorre devido a leveduras selvagens e bactérias que são encontradas apenas naquela região. As Lambic possuem um sabor muito distinto, seco, avinhado e com um retrogosto azedo. Os principais tipos de lambic são: *Gueuze*, *Kriec*, *Faro* e *Mars*.

3.4 Tecnologia de refrigeração

Por definição, refrigeração é o processo de redução e manutenção da temperatura de um material abaixo da temperatura na qual este se encontra. A tendência natural do calor é passar de um corpo quente para um corpo frio e, desta forma, para manter um sistema refrigerado é necessário criar um fluxo de calor no sentido contrário ao gradiente natural de transferência de calor. O sistema de refrigeração mais utilizado é a compressão mecânica, que se constitui de um evaporador, um compressor, um condensador e um dispositivo de expansão, que estão representados esquematicamente na Figura 3.3.

O compressor possui a finalidade de comprimir o fluido refrigerante causando baixa pressão no evaporador e alta pressão no condensador. O condensador é o responsável por rejeitar o calor do ciclo: nele, o fluido que se encontra no estado de gás saturado é condensado ao passar pelo trocador de calor que se encontra à temperatura ambiente. No elemento de controle (válvula de expansão ou tubo capilar) ocorre uma redução brusca da pressão entre o condensador e o evaporador, sendo que o fluido permanece no estado líquido. No evaporador tem-se um ambiente de baixa pressão e o fluido refrigerante passa do estado líquido para o estado gasoso, absorvendo o calor do ambiente interno refrigerado (Althouse et.al., 2003).

4 Fundamentos Teóricos

A análise térmica do problema proposto para avaliar a carga térmica necessária e manter a cerveja na temperatura desejada será realizada através dos diferentes mecanismos de troca de calor. Estes fundamentos teóricos estão baseados na referência Incropera *et al.* (2008).

A taxa de calor que deve ser retirada deve ser igual à soma de todas as taxas de calor representativas, são elas: a taxa de calor interno, a taxa de calor externo e a taxa de calor gerado na reação (considerada apenas durante a etapa de fermentação). As equações utilizadas para as etapas de fermentação e maturação são, respectivamente,

$$q_{ret_f} = q_{interno_f} + q_{externo} + q_{gerado} \quad (1)$$

$$q_{ret_m} = q_{interno_m} + q_{externo} \quad (2)$$

onde q_{ret_f} representa a taxa de calor que deve ser retirada durante a fermentação, $q_{interno_f}$ é a taxa de calor interno na fermentação, $q_{externo}$ a taxa de calor externo e q_{gerado} a taxa de calor gerada durante a fermentação. A taxa de calor retirado e a taxa de calor interno da maturação são representadas por q_{ret_m} e $q_{interno_m}$, respectivamente. As Figuras 4.1 e 4.2 representam um esquema do problema proposto para a fermentação e maturação, respectivamente.

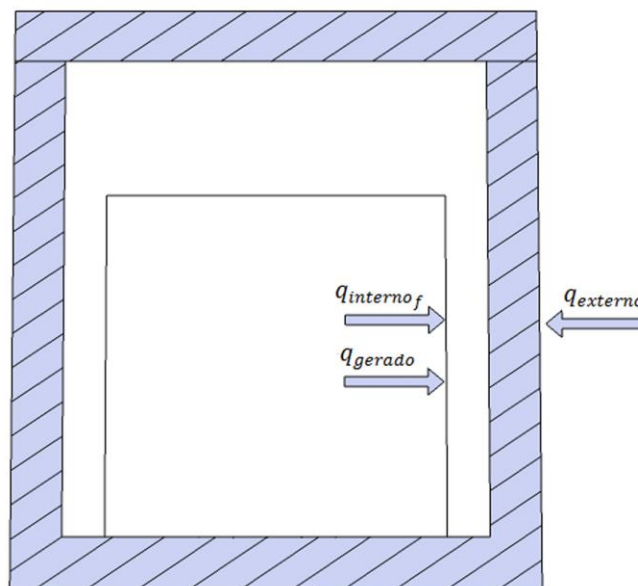


Figura 4.1 Esquema do problema proposto para a fermentação.

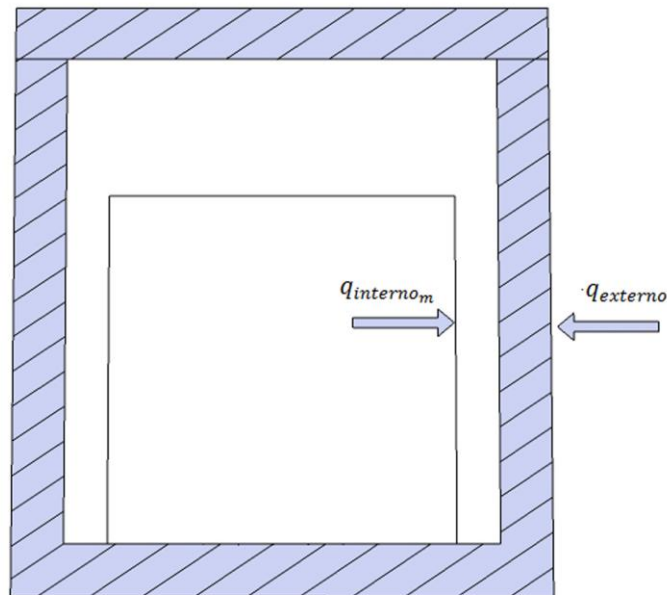


Figura 4.2 Esquema do problema proposto para a maturação.

Como a composição da cerveja é de aproximadamente 95 % de água os valores das propriedades termofísicas utilizadas nos cálculos serão os da água saturada.

4.1 Calor interno

Representa a parcela de calor trocada pela convecção na parte interna do balde fermentativo. Esta taxa de calor é função da resistência térmica convectiva interna. Para este cálculo é necessário se determinar o coeficiente convectivo interno, obtido através das correlações clássicas para a convecção natural, escritas em termos de números adimensionais. O primeiro valor que deve ser calculado é o número de Grashoff que representa a razão entre as forças de empuxo e as forças viscosas:

$$Gr_c = \frac{(\rho_c^2) \cdot (g) \cdot (\beta) \cdot (T_{wi} - T_i) \cdot (L^3)}{\mu_c^2} \quad (3)$$

Na equação (3) ρ_c é a massa específica da cerveja, g é a aceleração da gravidade, β é o coeficiente de expansão térmica, T_{wi} é a temperatura inicial do mosto, T_i é a temperatura do meio de resfriamento, L é o comprimento característico molhado e μ_c a viscosidade dinâmica da cerveja.

O número de Prandtl, que relaciona as difusividades de quantidade de movimento e térmica, é avaliado na temperatura média entre as temperaturas T_{wi} e T_i .

$$Pr_c = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{c p_c \cdot \mu_c}{k_c} \quad (4)$$

onde Cp_c é o calor específico da cerveja e k_c a condutividade térmica. Com os valores de Gr e Pr determina-se o número de Rayleigh:

$$Ra_c = Gr_c \cdot Pr_c \quad (5)$$

Para uma placa vertical, o número de Nusselt é dado por:

$$Nu_c = \left[0.825 + \frac{(0.387) \cdot (Ra_c)^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr_c} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{1}{4}}} \right]^2 \quad (6)$$

Com o número de Nusselt, o coeficiente convectivo de transferência de calor (coeficiente de película) é determinado por:

$$h_i = \frac{Nu_c \cdot k_c}{L} \quad (7)$$

A resistência térmica convectiva interna é, então, calculada pela equação (8), onde r_1 e h correspondem ao raio e a altura do balde interno, respectivamente; a taxa de calor interna é calculada pela equação (9).

$$Rt_{conv_i} = \frac{1}{h_i \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot h} \quad (8)$$

$$q_{interno_f} = \frac{T_{mosto} - T_i}{Rt_{conv_i}} \quad (9)$$

4.2 Calor externo

A taxa de calor externo avaliada para este protótipo é resultado da resistência térmica condutiva oferecida pelo material isolante e pela resistência térmica convectiva externa do ar ambiente. A resistência à condução na parede cilíndrica é determinada por:

$$Rt_{cond} = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2 \cdot \pi \cdot k_{isol} \cdot L_3} \quad (10)$$

Na equação (10) k_{isol} representa a condutividade térmica dos diferentes isolantes testados, r_2 e r_3 correspondem ao raio interno e externo do protótipo respectivamente e L_3 é a altura externa.

Utilizando o coeficiente convectivo do ar externo, neste trabalho assumido igual a 9 ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) determinado a partir da mesma correlação usada para o cálculo do coeficiente convectivo interno, e a área lateral do protótipo, a resistência convectiva externa é calculada por:

$$Rt_{conv_e} = \frac{1}{h_e \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_3 \cdot L_3} \quad (11)$$

A taxa de calor trocado com o meio externo é calculada através da equação (12) que leva em conta as duas resistências térmicas em série (equações (10) e (11)):

$$q_{externo} = \frac{T_\infty - T_i}{Rt_{cond} + Rt_{conv_e}} \quad (12)$$

T_∞ representa a temperatura do meio externo.

4.3 Calor gerado

Durante o processo de fermentação, o calor não é gerado a uma taxa constante e, desta forma, o mesmo não deve ser removido a uma taxa constante. A maior necessidade de resfriamento ocorre após as primeiras 24-48 horas.

A equação (13) fornece a taxa de conversão de extrato, através da divisão do valor de redução de extrato ($E\%$) pelo tempo de fermentação, t_f .

$$E = (E\%) \cdot \left(\frac{100}{t_f}\right) \quad (13)$$

A taxa de geração do calor corresponde ao produto do calor gerado na fermentação (C_g), da taxa de conversão de extrato (E) e do volume de mosto (V_u), ou seja:

$$T_g = C_g \cdot E \cdot V_u \quad (14)$$

O calor gerado é obtido pelo produto da taxa de geração de calor pelo valor de atenuação na redução do extrato:

$$q_{gerado} = (T_g) \cdot (A_t) \quad (15)$$

onde A_t representa a atenuação na redução de extrato, ou seja, a quantidade de extrato que se transforma em cerveja.

5 Metodologia de cálculo

Para determinar a quantidade de calor que deve ser retirada do sistema, a carga térmica será avaliada nas duas etapas da produção que ocorrem dentro dos recipientes fermentadores: a fermentação e a maturação. Esta distinção entre as etapas é motivada pela diferença de temperatura em cada uma delas bem como pela geração de calor na reação de quebra dos açúcares em álcool na etapa da fermentação. Os cálculos servem para determinar em qual situação o protótipo exige uma demanda maior de retirada de calor.

5.1 Fermentação

Durante a fermentação a energia que deve ser retirada do sistema para manter a temperatura do mosto constante deve ser igual ao calor oriundo da convecção interna do mosto somado à taxa de calor externo (com contribuição da resistência à condução no isolante e da convecção para o meio externo) somado à quantidade de calor gerada na reação de quebra dos açúcares em álcool, conforme apresentado na equação (1).

5.1.1 Cálculo do calor interno na fermentação

A transferência de calor convectiva que ocorre entre a cerveja, que se encontra dentro de um recipiente cilíndrico de polipropileno de espessura de dois milímetros, e o ar refrigerado no interior do protótipo será avaliada a seguir. O processo de transferência de calor que ocorre no interior do balde é a convecção natural que é originado a partir das diferenças de massa específica ocasionadas pela variação de temperatura.

Os números de Grashoff e de Prandtl são calculados utilizando as equações (3) e (4) respectivamente, onde os valores das propriedades físicas são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Propriedades físicas

Propriedade	Valor	Unidade
ρ_c	999	kg/m^3
g	9,807	m/s^2
β	$1,74 \times 10^{-4}$	K^{-1}
T_{wi}	17	$^{\circ}C$
T_i	-6	$^{\circ}C$
L	0,274	m
μ	$1,08 \times 10^{-3}$	$N/s.m^2$
Cp_c	4184	$J/kg.^{\circ}C$
k_c	0,598	$W/m.^{\circ}C$

Com os valores encontrados para Grashoff e Prandtl determina-se o número de Rayleigh e o número de Nusselt utilizando as equações (5) e (6), respectivamente.

O coeficiente convectivo interno (h_i) é calculado com a equação (7) multiplicando o número de Nusselt pela condutividade térmica e dividindo pelo comprimento característico molhado. Utilizando a fórmula (8), e as dimensões do balde fermentador, mostrados na Tabela 5.2, encontra-se a resistência térmica convectiva interna para a fermentação.

Tabela 5.2 Dimensões do balde

Dimensão	Valor	Unidade
r_1	0,20	<i>m</i>
h	0,40	<i>m</i>

A taxa de calor interno do processo fermentativo é obtida com a equação (9), nela a T_{wi} é 12 °C e a temperatura do meio de resfriamento (T_i) é -6 °C.

5.1.2 Cálculo do calor externo na fermentação

Para o presente estudo serão comparados três tipos de isolantes usualmente utilizados em equipamentos de troca térmica. Os materiais tipicamente utilizados para esta aplicação encontrados no mercado são a lã de vidro (LV), o poliestireno expandido (PE) e a espuma de poliuretano (PU). Utilizando os valores de condutividade térmica, apresentados na Tabela 5.3, e as dimensões sugeridas para o protótipo encontradas na Tabela 5.4 aplicados na equação (10) são calculados as resistências condutivas para os três possíveis materiais.

Tabela 5.3 Valores das condutividades térmicas dos isolantes

Isolante	Valor de k_{isol}	Unidade
LV	0,0605	<i>W/m.°C</i>
PE	0,0395	<i>W/m.°C</i>
PU	0,025	<i>W/m.°C</i>

Tabela 5.4 Dimensões do protótipo

Dimensão	Valor	Unidade
r_2	0,25	<i>m</i>
r_3	0,31	<i>m</i>
L_3	0,57	<i>m</i>

A resistência térmica convectiva externa é calculada através da equação (11), onde h_e é o coeficiente convectivo externo ($9 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$). Com os valores de resistência térmica condutiva e convectiva externa encontrados, a taxa de calor externo é calculada com (12), sendo a temperatura do meio externo (T_∞) é $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

5.1.3 Cálculo do calor gerado na fermentação

Para o cálculo da taxa de calor gerado para 100 % de extrato fermentado utilizam-se os valores da Tabela 5.5 nas equações (13) e (14).

Tabela 5.5 Dados para cálculo do calor gerado

Propriedade	Valor	Unidade
t_f	24	h
C_g	140	$kcal$
V_u	25	l
$E\%$	3%	[<i>adimensional</i>]

Uma vez que apenas $2/3$ do extrato é fermentado, a real redução (A_t) é de 65 %; assim, utilizando a equação (15) obtém-se o calor gerado. (KUNZE, 1999 *apud* SILVEIRA 2009).

5.1.4 Cálculo do calor retirado na fermentação

Conforme a equação (1) o calor retirado na fermentação é a soma da taxa de calor interno com a taxa de calor externo e a taxa de calor gerada, aplicando os valores calculados em 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3 encontra-se a quantidade de calor que deve ser retirado para manter a temperatura da cerveja.

5.2 Maturação

Durante a etapa de maturação da cerveja não existe calor gerado pelo processo; além disso, a taxa de calor externa mantém-se a mesma da fermentação. Deve-se calcular apenas a taxa de calor interno, visto que na maturação a temperatura que é mantida a cerveja é inferior à fermentação. A taxa de calor retirado é obtida pela fórmula (2).

5.2.1 Cálculo do calor interno na maturação

Este cálculo segue a mesma sequência de cálculo do calor interno para a fermentação alterando a temperatura que a cerveja é mantida no interior do balde para $4 \text{ }^\circ\text{C}$. Esta mudança de temperatura altera as propriedades físicas da cerveja e, conseqüentemente, o valor do coeficiente convectivo interno.

Os números de Grashoff e de Prandtl são calculados para a maturação utilizando as equações (3) e (4), respectivamente, onde os valores das propriedades físicas são apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 Propriedades físicas

Propriedade	Valor	Unidade
ρ_c	1000	kg/m^3
g	9,807	m/s^2
β	$3,27 \times 10^{-5}$	K^{-1}
T_{wi}	4	$^{\circ}C$
T_i	-6	$^{\circ}C$
L	0,274	m
μ	$1,65 \times 10^{-3}$	$N/s * m^2$
Cp_c	4221	$J/kg * ^{\circ}C$
k_c	0,574	$W/m * ^{\circ}C$

Com os novos valores encontrados para Grashoff e Prandtl calcula-se o número de Rayleigh e o número de Nusselt utilizando as equações (5) e (6), respectivamente.

O novo valor encontrado para o coeficiente convectivo interno (h_i) é calculado com a equação (7). Utilizando a fórmula (8), onde os valores de r_1 e h permanecem inalterados, encontra-se a resistência térmica convectiva interna para a maturação. A taxa de calor interno para esta etapa é obtida com a equação (9), sendo que nela a T_{wi} é $4^{\circ}C$ e a temperatura do meio de resfriamento (T_i) é $-6^{\circ}C$.

5.2.2 Cálculo do calor retirado na maturação

Utilizando a equação (2) com os valores calculados em 4.1.2 e 4.2.1 obtém-se a taxa de calor retirado.

6 Resultados e Discussão

Os resultados serão apresentados distinguindo as etapas de fermentação e maturação; posteriormente estes resultados serão comparados para se definir qual parte do processo requer mais energia.

6.1 Fermentação

Os valores dos números adimensionais calculados estão demonstrados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 Números adimensionais calculados para a fermentação

Número adimensional	Valor calculado
Grashoff	$6,91 \times 10^8$
Prantdl	7,56
Rayleigh	$5,22 \times 10^9$
Nusselt	$2,57 \times 10^2$

O coeficiente convectivo interno da cerveja é de $561,36 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{°C)}$, e a resistência térmica convectiva interna é de $3,54 \times 10^{-3} \text{ (°C/W)}$.

Os valores das resistências térmicas condutivas encontrados para os diferentes materiais propostos são apresentados na Tabela 6.2. A resistência térmica convectiva externa calculada é de $0,10 \text{ (°C/W)}$.

Tabela 6.2 Valores de resistência térmica condutiva

Isolante	Valor de Rt_{cond}	Unidade
LV	0,9928	°C/W
PE	1,5206	°C/W
PU	2,4025	°C/W

A taxa de calor interno, a taxa de calor externo e a quantidade de calor gerado calculados são apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 Resultados para a fermentação

Taxas calculadas	Valor	Unidade
Calor interno	5079,94	W
Calor externo	14,38	W
Calor gerado	330	W

O calor total que deve ser retirado durante a fermentação é de 5425,06 W.

6.2 Maturação

Os valores dos números adimensionais calculados para a maturação são apresentados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 Números adimensionais calculados para a maturação

Número adimensional	Valor calculado
Grashoff	$2,42 \times 10^7$
Prantdl	12,12
Rayleigh	$2,93 \times 10^8$
Nusselt	$1,07 \times 10^2$

O coeficiente convectivo interno da cerveja é 224,81 ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), a resistência térmica convectiva interna $8,85 \times 10^{-3}$ ($^\circ C/W$). A taxa de calor interno para a fermentação e a taxa de calor externo calculadas são apresentadas na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 Resultados para a maturação

Taxas calculadas	Valor	Unidade
Calor interno	1130,04	W
Calor externo	14,38	W

Logo a taxa total de calor que deve ser retirada durante a maturação é de 1144,42 W.

6.3 Fermentação x maturação

Comparando a quantidade de energia requisitada entre estas etapas da produção de cerveja pode-se concluir que a fermentação é aquela que necessita maior remoção, logo a etapa para a qual se deve projetar o sistema de refrigeração é a fermentação.

6.4 Isolamento

A espuma de poliuretano possui condutividade térmica menor se comparada à lã de vidro e ao poliestireno expandido, ou seja, é um isolante mais eficiente para um valor igual de espessura. Porém esta diferença não é significativa frente às outras taxas de calor, condicionando assim a escolha do isolamento conforme a facilidade de manuseio para a construção do equipamento e preço do produto. As taxas de calor externo de cada isolante são apresentadas na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 Taxas de calor externo dos isolantes

Isolante	Taxa de calor externa	Unidade
LV	32,94	W
PE	22,21	W
PU	14,38	W

6.5 Protótipo

O protótipo foi projetado de modo a ocupar o mínimo espaço possível, conforme a intenção de preferência dos HB apresentada na pesquisa realizada, levando-se em consideração o propósito inicial descrito nos objetivos e a eficiência de funcionamento do equipamento.

O volume total do aparato é de $1,23 m^3$, com volume interno útil de $0,80 m^3$. Pode-se descrevê-lo como possuindo uma parte inferior com $0,45 m$ de altura, onde se encontra o compressor, o elemento de controle (tubo capilar) e o condensador com um motoventilador acoplado, conforme apresentado na Figura 6.1.



Figura 6.1 Unidade Condensadora tipo UCB. Fonte: Multifrio Refrigeração.

O evaporador utilizado será uma serpentina de cobre que se localiza na parte interna, entre o isolante e a chapa de aço carbono zincado. O fluido refrigerante é o Clorodifluorometano, comercialmente conhecido como Freon 22. A câmara refrigerada é isolada termicamente por uma parede de $0,06 m$ de isolante térmico (LV, PE ou PU) de

modo a reduzir a perda de calor para o ambiente externo. Na parte superior, há um espaço de $0,51\text{ m}$ de altura com um diâmetro de $0,5\text{ m}$, destinado ao balde alimentício onde a cerveja será produzida. O diâmetro total do protótipo é de $0,62\text{ m}$ e a sua altura é de aproximadamente um metro.

O material utilizado na parte externa é o aço carbono pintado e na área interna aço carbono zincado; estes materiais são tipicamente usados em equipamentos de refrigeração domésticos. O controle de temperatura será realizado por um controlador/indicador de temperatura com funcionamento liga-desliga e a temperatura será medida por termopar no interior do balde onde se encontra a cerveja, para se obter valores reais da temperatura durante a fermentação e a maturação. Na Figura 6.2 observa-se uma vista em três dimensões do protótipo com algumas medidas do mesmo e com o balde alimentício ao lado. Vale salientar que a capacidade do balde alimentício é de 30 litros, mas o volume necessário de recuo para a colocação da torneira e o espaço para o dispositivo que permite a saída do dióxido de carbono na parte superior é maior.

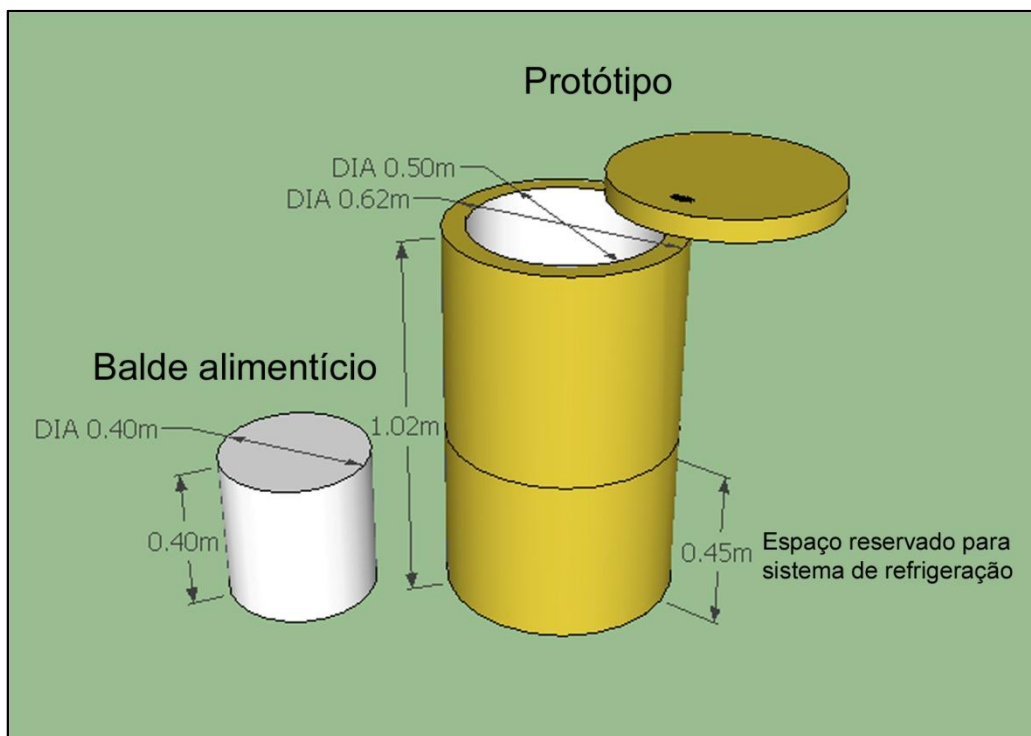


Figura 6.2 Vista do protótipo.

Na figura 6.3 é apresentada uma vista superior do protótipo com a tampa fechada e com o detalhe do painel controlador, localizado na parte superior da mesma.

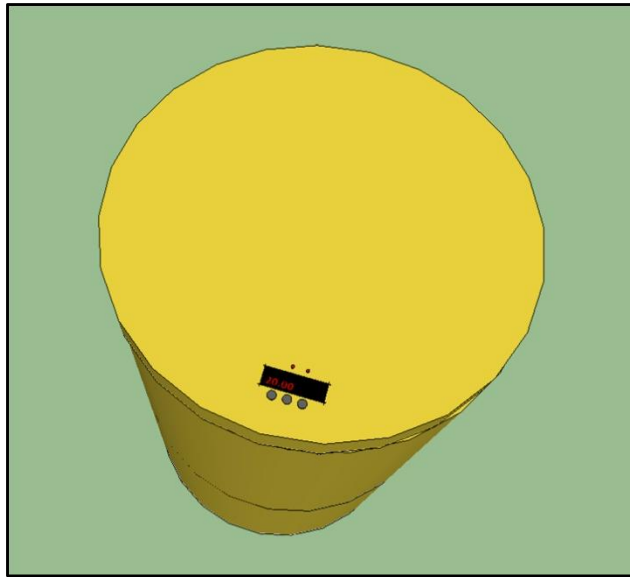


Figura 6.3 Vista superior com painel controlador.

7 Conclusões e Trabalhos Futuros

O presente trabalho teve por objetivo apresentar um protótipo compacto construído com materiais alternativos aos usualmente utilizados de forma a atender as necessidades dos cervejeiros caseiros de controlar a temperatura durante o processo de fermentação e maturação da cerveja. Apresentou-se uma rotina de cálculo para se estimar a taxa de calor necessária nas duas fases do processo de produção da cerveja: fermentação e maturação.

Para o processo de fermentação em uma temperatura do mosto de 17 °C foi encontrado o valor de 5425,06 *W* para a taxa de calor que deve ser retirada do sistema; na maturação, que ocorre a 6 °C, encontrou-se um valor de 1144,42 *W*.

Através da análise das variáveis deste projeto, pode-se concluir que o mesmo é viável em termos de montagem e de substituição de materiais nobres e tradicionais como o aço inox, por uma forma alternativa de produção cervejeira utilizando um balde de polipropileno e um equipamento com aço carbono e espuma isolante, sem comprometer a qualidade da cerveja ou causar algum dano à saúde.

Propõem-se para trabalhos futuros a análise de custos mais precisos dos materiais utilizados no protótipo junto aos fornecedores, além do desenvolvimento prático do mesmo, de forma a tornar o equipamento mais atrativo economicamente.

8 Referências

ALTHOUSE, Andrew D., Turnquist, Bracciano. **Modern Refrigeration and Air Conditioning**. 18 ed. Ed. Goodheart-Wilcox Publishing, 2003.

BOULTON, Chris, David Quain. **Brewing Yeast and Fermentation**. Editora Blackwell Science Ltd. Oxford, 2001.

BRIGGS, Dennis E., Chris Boulton, Peter A. Brookes and Roger Stevens. **Brewing Science and Practice**. Ed. Woodhead Publishing Ltd. Cambridge, 2004.

EMMEL, Reinardo Werner. **Curso de Produção de Cerveja Artesanal**. Porto Alegre, 2009.

HARDWICK, William A. **Handbook of Brewing**. New York, 1994.

INCROPERA, DeWitt, Bergnan, Lavine. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2008.

SILVEIRA, Ronan Gobbi da. **Análise térmica de Sistema de Refrigeração Direta em Fermentadores Cilindrocônicos**. Bauru, SP, 2009.

TSCHOPE, Egon Carlos. **Microcervejarias e Cervejarias: A história, a arte e a tecnologia**. 1ra Ed. São Paulo, 2001.