

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

SISTEMA DE RESFRIAMENTO DE MOSTO DE CERVEJA EM PROCESSOS ARTESANAIS

por

Rodrigo Prestes Limberger

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, Julho de 2013



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

SISTEMA DE RESFRIAMENTO DE MOSTO DE CERVEJA EM PROCESSOS ARTESANAIS

por

Rodrigo Prestes Limberger

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
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof. Paulo Smith Schneider

Comissão de Avaliação:

Prof^a. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi

Prof. Dr. Paulo Otto Beyer

Prof. Dr. Bardo Ernst Josef Bodmann

Porto Alegre, 21 de Junho de 2013

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Marilez e Geraldo por todo o carinho, segurança, confiança e apoio. Sem isso, nada seria possível.

Agradeço ao pessoal do LETA pelo apoio, disponibilidade e pelos momentos de descontração. Agradecimento especial para o Prof. Dr. Paulo Smith Schneider pela orientação e pelas bergamotas, e ao Tec. João Batista da Rosa pelo esforço e companheirismo.

Agradeço aos meus colegas, especialmente Bruno Streb Vieira, Markus Vinícius Bonzanini, George Porto Haeffner e Thomas Kollman.

Agradeço também à Janaina Fontanive, por todo o suporte, conforto e amor.

LIMBERGER, R. P. SISTEMA DE RESFRIAMENTO DE MOSTO DE CERVEJA EM PROCESSOS ARTESANAIS. 2013. 22 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 visa conceber, projetar e construir um equipamento para resfriamento do mosto de cerveja utilizando um sistema de termoacumulação. Um sistema de refrigeração mecânico é usado para reduzir a temperatura de um volume de 120 litros de água em um reservatório, que passa a ser a fonte fria de um segundo circuito, dedicado ao resfriamento do mosto, que deve ter sua temperatura reduzida a partir de 80 °C até 24 °C, em um período menor do que meia hora. Essa estratégia é comparada com o uso de água não refrigerada, captada diretamente da rede de distribuição. O emprego do termoacumulador permite resfriar o mosto em cerca de 18 minutos, enquanto que a opção com água não resfriada foi de 23 minutos. Conclui-se que o sistema refrigerado deve ser reprojetoado para atingir um melhor desempenho de sua taxa de resfriamento.

PALAVRAS-CHAVE: Cerveja artesanal, Termoacumulação, Mosto, Trocadores de Calor

LIMBERGER, R. P. **COOLING SYSTEM FOR WORT IN CRAFT BEER PROCESS.** 2013. 22 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

The present work aims to conceive, design and build a device for cooling wort using a thermal storage system. A mechanical refrigeration system is used to reduce the temperature of a volume of 120 liters of water in a reservoir, which becomes the source of a secondary cold circuit. This circuit is dedicated to cooling the wort from 80 oC to 24 oC, within less than half an hour. This strategy is compared to the use of water at ambient temperature, taken up directly from the distribution network. The refrigerated water enables to cool the wort at about 18 minutes, while the option with ambient temperature water is performed in 23 minutes. Conclusions point out that the cooling system must be redesigned to achieve better performance of its cooling rate.

KEYWORDS: Craft Beer, Thermal accumulation, Wort, Heat Exchangers

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABELAS.....	VII
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
3.1 FABRICAÇÃO DE CERVEJA ARTESANAL.....	2
3.2 – RESFRIAMENTO DE CERVEJAS.....	3
3.3 - MODELAGEM DOS SISTEMAS DE RESFRIAMENTO	4
3.4 - TROCADOR DE CALOR TIPO SERPENTINA.....	4
3.5 - TERMOACUMULAÇÃO	5
3.6 – MÉTODO DA CAPACITÂNCIA GLOBAL	6
4 – MONTAGEM DO SISTEMA DE RESFRIAMENTO DE MOSTO.....	6
4.1 – PROPOSTAS DE MÉTODOS DE RESFRIAMENTO	7
4.2 - FONTES DE FLUIDO DE RESFRIAMENTO PARA A SERPENTINA.....	8
4.3 – BANCADA DE TESTES	8
5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	10
6 – CONCLUSÕES.....	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15

Lista de Figuras

	Pag.
Figura 3.1 - Fluxograma do processo de fabricação de cerveja	2
Figura 3.2 - Trocador de Calor tipo Serpentina	4
Figura 3.3 – Trocador de Calor tipo Serpentina Dupla	4
Figura 4.1 – Fluxograma do processo de resfriamento do mosto	7
Figura 4.2 – Sistema de resfriamento utilizado	8
Figura 4.3 – Serpentina de cobre com os espaçadores instalados	9
Figura 4.4 – Disposição dos termopares na panela de resfriamento	9
Figura 4.5 – Termoacumulador e sistema de refrigeração industrial	10
Figura 4.6 – Termoacumulador 2 e bomba responsável pelo recalque do líquido a serpentina de resfriamento	10
Figura 5.1 – Resfriamento através do processo 1	11
Figura 5.2 – Resfriamento através do processo 2	12

Lista de Tabelas

	Pag.
Tabela 4.1: Especificações da serpentina de cobre utilizada.	9
Tabela 5.1: Propriedades do mosto	12
Tabela 5.2 – Temperatura média, viscosidade, número de Prandtl e Reynolds da água dos processos.	12
Tabela 5.3 – Número de Nusselt para os processos.	13
Tabela 5.4 – Coeficiente de convecção interna.	13
Tabela 5.5 – Coeficientes globais de temperatura.	13

1. Introdução

A produção de cerveja artesanal vem crescendo na última década, como pode-se observar nas prateleiras dos supermercados onde se encontram muitos rótulos dos mais variados estilos. A vantagem de se produzir a própria cerveja é que se pode adicionar especiarias e torná-la única conforme o gosto do produtor.

Sua produção envolve pequenos volumes e com menores custos de investimento, diferentemente de cervejarias industriais.

Uma das etapas mais importantes do processo de fabricação de cerveja é o resfriamento de uma mistura chamada de mosto, que deve ser processado dentro de limites de tempo e temperatura que variam conforme o tipo de cerveja produzido. O resfriamento é responsável por inibir atividades enzimáticas, contribuindo com sabor e cor à cerveja. Se não controlado, o resfriamento pode inutilizar o mosto e estragar a produção inteira.

O procedimento preferido pelos cervejeiros artesanais é feito com o auxílio de serpentinas de imersão, empregado em bateladas de 20 a 60 litros sem comprometer a qualidade do produto. Sua escolha é justificada pelo baixo custo inicial do material quando comparados a outros trocadores de calor, pelo manuseio e instalação, e pela limpeza, que é necessária apenas na sua superfície externa. Sua operação mais comum dá-se com a serpentina alimentada pela água da rede como fluido de resfriamento, imediatamente descartado após o processo, sem reaproveitamento do fluido.

Objetivo do presente trabalho é de construir um equipamento para resfriamento acelerado ou assistido do mosto composto por trocadores de calor em conjunto com um banco de acumulação de água fria. Sua operação foi analisada e comparada com o procedimento convencional, que opera com água a temperatura da rede de abastecimento.

2. Revisão Bibliográfica

Cervejarias que têm cuidado com os seus ingredientes em cada brassagem e controlam o processo manualmente são chamadas artesanais, mesmo as que possuem equipamentos mais sofisticados. Elas normalmente produzem pequenos volumes de cerveja por batelada, podendo utilizar especiarias como canela, açúcar de beterraba, entre outros, para atingir sabores inovadores [PALMER, 2006].

O mosto é uma mistura que resulta do cozimento dos ingredientes básicos, descrito mais adiante, e seu resfriamento pode ser feito através do uso de recipientes contendo uma solução de água e gelo [COSSUN e COSSUN (2011)] com trocadores de calor de imersão de cobre ou aço inox do tipo serpentina, ou ainda através de trocadores de placas [KUNZE, 2004].

Joye e Smith (2000) estudaram diferentes modelos de trocadores de calor de imersão para resfriamento do mosto em cervejarias artesanais em regime de convecção natural, e verificaram que o espaçamento entre as suas espiras deve ser de no mínimo uma vez o diâmetro externo do seu tubo. Também foi verificado que, para o resfriamento, é desejável que a primeira espira da serpentina fique acima do líquido a ser resfriado, pois se forma uma camada mais quente de mosto na superfície e essa camada ajuda a retirá-la.

Em escala industrial, são utilizados trocadores de calor tipo placas, cuja área de contato entre o fluido de resfriamento e o mosto proporciona uma troca de calor mais eficiente, porém seu custo aumenta em cerca de 10 vezes quando comparado com as serpentinas de 10 m de comprimento comumente utilizadas em cervejarias artesanais, portanto seu investimento não se torna interessante em um primeiro momento para pequenas bateladas [www.weconsultoria.com.br]

No uso de serpentinas em cervejarias artesanais, o fluido de resfriamento mais utilizado é a água, que pode ser reaproveitada na saída do trocador, onde sua carga térmica é maior, para a fabricação de uma nova batelada, evitando o desperdício [PALMER, 2006]. Para evitar seu descarte são utilizados termoacumuladores desde a década de 1930 em instalações com cargas térmicas elevadas, onde era necessário um resfriamento rápido em curto espaço de tempo, como auditórios e principalmente, indústrias alimentícias na área de laticínios com a

implementação da pasteurização. [IBRAHIM e ROSEN, 2011]. Na indústria cervejeira, termoacumuladores de gelo e etanol são utilizados para armazenamento de frio e posterior resfriamento do mosto e pasteurização, armazenando e reutilizando o fluido após o uso.

3. Fundamentação Teórica

3.1 Fabricação de Cerveja Artesanal

O processo de fabricação de cervejaria artesanal é semelhante ao processo industrial, mas não inclui a etapa de pasteurização. Este é realizado ao final do processo, propiciando maior tempo de armazenamento ao líquido pois reduz as bactérias responsáveis pela sua degradação. A cerveja sem pasteurização é chamada popularmente de Chopp, que é então o que os cervejeiros artesanais produzem. O Chopp tem validade de o máximo 3 meses, enquanto a cerveja industrial pasteurizada dura em média 1 ano e meio. (www.sociedadecerveja.com.br)

As etapas de fabricação da cerveja são: a moagem do malte, a mostura, a filtração, a lavagem, a fervura, o resfriamento, a fermentação, a maturação, o armazenamento, a pasteurização (na cerveja industrial) e o envase [KUNZE, 2004], como pode-se observar na Figura 3.1.

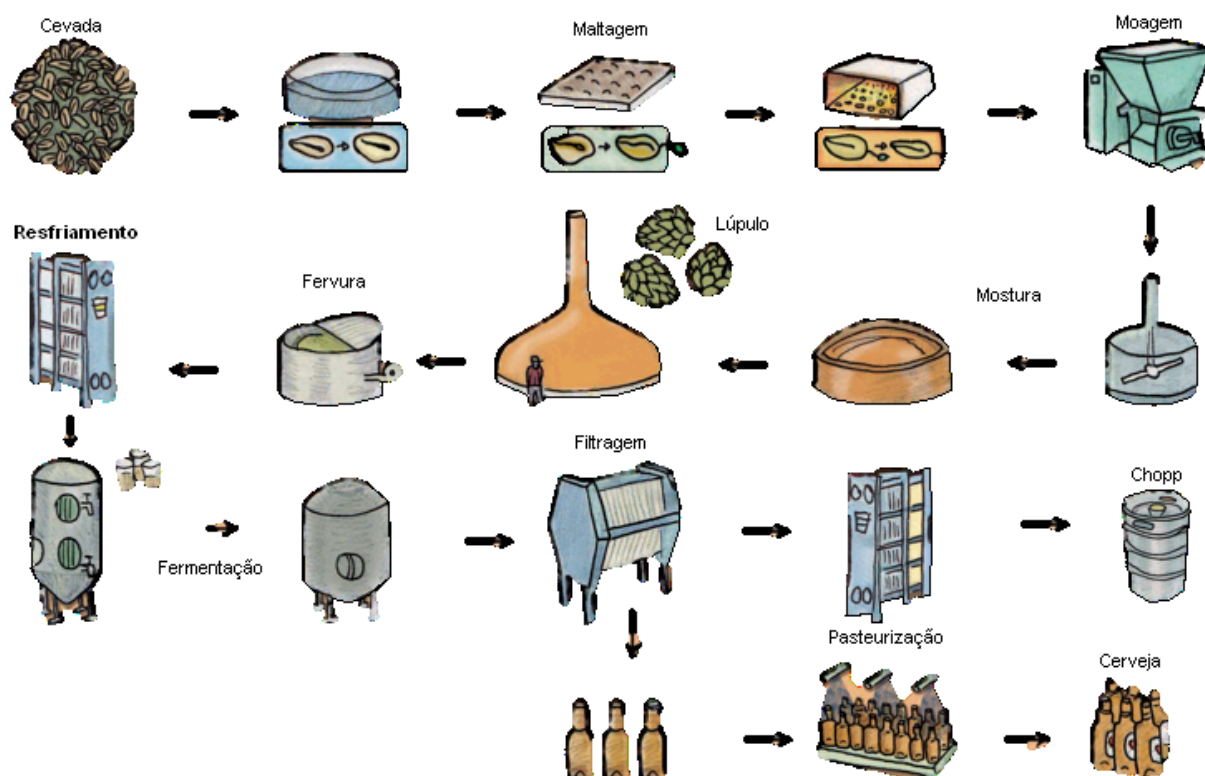


Figura 3.1 – Fluxograma do processo de fabricação de cerveja.
(adaptado de www.britannica.com)

O fluxograma da figura 3.1 mostra as etapas da fabricação, que são explicadas a seguir (www.acerveja.com.br).

- 1- Escolha da Cevada – A cevada é a gramínea responsável por gerar o malte após o processo de Maltagem
- 2- Maltagem – Processo onde a Cevada é germinada artificialmente para liberar amido e dessecada em seguida para que não germine totalmente, assim obtém-se o Malte.

- 3- Moagem do Malte - O malte, que pode ser armazenado em silos ou sacarias, é moído em moinhos de rolos ou martelos para que o amido contido em seu interior fique exposto para ser transformado durante o processo
- 4- Mostura - O malte moído é misturado com água em temperaturas pré-estabelecidas para que se inicie a ação de enzimas, que quebrarão as cadeias de amido em cadeias menores de açúcares como glicose, maltose entre outros. Na mostura ocorre também a filtração do mosto, onde as cascas e o bagaço são separados do líquido açucarado, que agora é chamado de mosto.
- 5- Fervura - O mosto é levado à ebulição e fervido durante algum tempo (60 a 90 minutos) para que substâncias não desejáveis se volatilizem, proteínas coagulem e o mosto seja esterilizado. Nesta etapa também é adicionado o lúpulo, responsável por fornecer amargor e aroma característico à cerveja. Após a fervura, o mosto decanta na própria panela, onde as proteínas coaguladas são depositadas no fundo do equipamento, enquanto o mosto límpido é retirado pela parte superior.
Os processos de mostura, fervura e filtragem constituem o conhecido como Brassagem.
- 6- Resfriamento – O mosto é resfriado a temperaturas baixas que dependem do tipo de fermento a ser utilizado. Após resfriado, a levedura é inoculada e a mistura é colocada em um tanque para ser fermentada.
- 7- Fermentação – Os açúcares do mosto são consumidos pelo fermento, produzindo álcool e CO₂, além de calor. Os tanques fermentadores possuem temperatura controlada para que a fermentação seja sempre homogênea. Dependendo da levedura utilizada, a fermentação pode ocorrer entre 8 e 24°C, levando de 2 a 20 dias, dependendo da cerveja a ser fabricada.
- 8- Maturação – O mosto, após fermentado, chama-se cerveja verde. Ela é maturada em baixas temperaturas por períodos que podem levar dias ou semanas. Ainda há ação das leveduras já decantadas, incorporando CO₂ e retirando alguns gases formados durante a fermentação.
- 9- Filtração – A cerveja é então filtrada para que ganhe o aspecto que conhecemos, retirando o fermento. Pode-se adicionar mais CO₂ conforme a necessidade, ou pode-se adicionar prime, constituído de açúcar, que ao entrar em contato com o restante da levedura presente forma CO₂.
- 10- Pasteurização – Serve para garantir a validade da cerveja por mais tempo, geralmente realizado em cervejas industriais.

3.2 – Resfriamento de Cervejas

O resfriamento é fase que se enquadra após a fervura e antes da fermentação e é responsável por cessar as atividades enzimáticas e bacterianas presentes no mosto [PALMER, 2006], também servindo para controlar os compostos sulfurados que continuam surgindo quando o mosto está em temperaturas elevadas, como o dimetil sulfeto, responsável por sabores indesejáveis na cerveja [KUNZE, 2004]. A aeração também é condenada nessa parte do processo, por contribuir para a formação desses mesmos compostos.

A preocupação com o controle do resfriamento do mosto data do ano de 1826 [SCOTSMAN, 1826], onde foram introduzidas pás rotatórias na parte externa superior do reservatório onde se encontrava o mosto recém fervido para criar um fluxo de ar que o resfriava por meio da convecção forçada.

O objetivo em geral é resfriar o mosto antes que ocorra oxidação e contaminação até a temperatura de fermentação, a qual varia conforme o tipo da cerveja, sendo de 8°C a 14°C para Lagers e de 18°C a 24°C para Ales. Ainda é benéfico para a cerveja evitar a formação de partículas de proteínas, chamadas de “cold break” ou “cold trub”, que começam a se formar a partir dos 60°C e são responsáveis pela aglomeração de células proteicas e bolhas de ar, diminuindo a superfície de contato com as células de fermento, quando este é adicionado na fase seguinte, reduzindo a taxa de fermentação. Esses particulados se formam ao longo do resfriamento, portanto deve-se atentar que um resfriamento muito brusco é danoso para a

produção da cerveja, pois também não se deve remover essas partículas completamente, com o perigo de tornar a cerveja sem gosto. Um nível ideal é entre 120 e 160 mg/l [EILS e HERBERG, 1998].

O controle do resfriamento é muito importante para o processo de fabricação da cerveja, apesar de não existirem um consenso sobre os valores ou faixas para a sua taxa de resfriamento, assumindo que quanto menor tempo, menor a chance de contaminação e melhor a qualidade da cerveja artesanal produzida, porém sem resfriá-la bruscamente.

Há divergências entre os cervejeiros artesanais sobre onde deve ser realizado o processo de resfriamento, pois após a fervura, geralmente realizado em painéis de aço inox, o mosto é transferido para o fermentador, feito de plástico. O resfriamento pode ser iniciado tanto na própria panela, após a fervura, quanto no fermentador, porém, o plástico quando aquecido pode liberar substâncias tóxicas, causando possíveis danos à saúde ainda não comprovados. No presente trabalho, o mosto foi resfriado na panela de inox.

3.3 - Modelagem dos sistemas de resfriamento

No centro de qualquer processo de resfriamento está o trocador de calor. Conforme Kakaç e Liu (2002), os trocadores podem ser classificados em grupos conforme sua geometria, os mecanismos de transferência de calor, a direção e o sentido das correntes dos fluidos e o tipo do processo, se é direto ou indireto. Os mais comuns utilizados em cervejarias artesanais são os trocadores de calor de imersão, que são mergulhados no líquido a ser resfriado e através de seu interior flui o fluido de resfriamento. O tipo mais comum desse trocador é chamado de serpentina, em formato de espiral (figura 3.2). Também são utilizados trocadores de calor externos à panela, do tipo jaqueta, porém esses além de terem custo elevado quando comparado ao de imersão, também perde eficiência por não ter a superfície de contato totalmente aproveitada como o trocador de imersão [KUNZE, 2004].

O uso de trocadores de calor de imersão facilita sua instalação, pois é necessário apenas conectá-los a rede, que geralmente possui pressão suficiente para atender a demanda do resfriamento do mosto em cervejarias artesanais. Trocadores de calor do tipo placas, casco-tubo e duplo tubo, entre outros, necessitam o auxílio de bombas alimentícias.

3.4 - Trocador de Calor tipo Serpentina

Existem variações do trocador de calor tipo serpentina, como a serpentina dupla, vista na figura 3.3, que consiste em duas espiras, uma externa de maior diâmetro e outra interna, construídas com o mesmo tubo, e serpentinas duplo-tubo, que possuem um tubo de menor diâmetro internamente, por onde passa outro fluido. Também existem serpentinas assimétricas, em formato cônico ou com tubulação vertical, porém são menos comuns e menos eficientes [JOYE e SMITH, 2002].



Figura 3.2 – Trocador de Calor tipo Serpentina
(fonte: www.lamasbrewshop.com.br)



Figura 3.3 – Trocador de Calor tipo Serpentina Dupla
(fonte: www.weconsultoria.com.br)

Segundo Incropera et al.(2008), para trocadores de calor tubulares não-aletados têm-se o coeficiente global de transferência de calor U ($W m^{-2}K^{-1}$), dado pela equação 3.1:

$$\frac{1}{UA_e} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R''_{d,i}}{A_i} + \frac{\ln(D_e/D_i)}{2\pi k L} + \frac{R''_{d,e}}{A_e} + \frac{1}{h_e A_e} \quad 3.1$$

Onde A é a área de troca de calor (m^2), h é o coeficiente de transferência de calor por convecção ($W m^{-2}K^{-1}$), D e L são o diâmetro do tubo e o comprimento do tubo (m), R_d a resistência devido à incrustação ($m^2 K W^{-1}$) e k a condutividade do material ($W m^{-1} K^{-1}$). Os subíndices i e e representam as superfícies internas e externas, respectivamente.

Para tubulação helicoidal é necessário atentar para a relação entre o diâmetro da espira e o diâmetro do tubo. Quando o diâmetro da espira ultrapassar 20 vezes o diâmetro do tubo, pode-se desprezar o efeito do escoamento secundário gerado no interior do tubo, assim como o mesmo efeito é desprezado na presença de um escoamento turbulento plenamente desenvolvido [INCROPERA et al., 2008].

No interior do tubo, o número de Reynolds Re_D adimensional, vale:

$$Re_D = \frac{4 \dot{m}_f}{\pi D_i \mu} \quad 3.2$$

onde \dot{m}_f é a vazão do fluido que escoar no interior do tubo em kg/s e μ é a viscosidade em $kg/s m$.

O coeficiente convectivo no interior do tubo h_i é dado a partir do conhecimento do número de Nusselt Nu , expresso por:

$$h_i = \frac{k Nu}{D_i} \quad 3.3$$

O Número de Nusselt é dependente do número de Reynolds, que determina se o regime é laminar ou turbulento. Nu pode ser calculado através da correlação de Gnielinski [INCROPERA et al., 2008], válida para $3000 < Re < 5 \times 10^5$ e $0,5 < Pr < 2000$, apresentada na equação 3.4. O número de Prandtl, Pr , é a relação entre a taxa de difusão viscosa e a taxa de térmica.

$$Nu_D = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (Re_D - 1000) Pr}{1 + 12,7 \left(\frac{f}{8}\right)^{0,5} (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad 3.4$$

onde f é o fator de atrito no interior do tubo, que para tubos lisos e número de Reynolds entre 3000 e 5×10^5 é obtido pela correlação de Petrukov, apresentada na equação 3.5.

$$f = (0,790 \ln Re_D - 1,64)^{-2} \quad 3.5$$

3.5 - Termoacumulação

A termoacumulação consiste em disponibilizar um reservatório com baixo nível de temperatura com capacidade de resposta maior do que um sistema pode disponibilizar diretamente [IBRAHIM e ROSEN, 2011]. Através de capacitores térmicos atinge-se à redução de custo e maior eficácia do sistema, reduzindo consumo de energia em cerca de 35% e amortecimento da curva energética em 8%, medido em sistemas de ar condicionado em plantas industriais por Rismanchi et al. (2011). Também são utilizados para casos de emergência em centrais de computadores, garantindo a temperatura de operação havendo

falta de energia. Conforme MacCracken, 2003, a energia térmica armazenada é mais barata que o armazenamento de eletricidade equivalente para gerar a mesma quantidade de frio. Através dessas vantagens, o sistema de termoacumuladores se adapta a necessidade do trabalho proposto.

Os termoacumuladores de gelo [POTTER et al., 1995] utilizando o calor latente da água de cerca de 334 kJ/kg a 0°C, enquanto que os acumuladores de água gelada utilizam o calor sensível do líquido de 4,18 kJ/kg.K [ASHRAE, 2003]. Por este motivo, o tamanho dos tanques de armazenamento de água é muito maior que os de gelo para a mesma carga térmica, embora a manutenção dos tanques de gelo requeira uma mão-de-obra mais especializada quando comparada com os tanques de água.

3.6 – Método da Capacitância Global

A transferência de calor entre a serpentina e o mosto de cerveja pode ser modelada pelo método da capacitância global [INCROPERA et al, 2008], assumindo-se que o mosto está bem misturada e não apresenta diferenças de temperaturas importantes em seu volume. Para avaliar a adaptação desse modelo, calcula-se o número de Biot (Equação 3.6), que relaciona a razão entre as resistências condutivas com a convectiva entre o mosto e a serpentina.

$$Bi = \frac{h L_c}{k} \quad 3.6$$

Caso o número de Biot for menor que 0,1, vale afirmar que a resistência à condução na interface da serpentina para o mosto é inferior à resistência convectiva pelo lado da serpentina. A expressão para a evolução da temperatura adimensional do mosto θ^* é dada por

$$\theta^* = \frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T_M - T_\infty}{T_i - T_\infty} = e\left[-\left(\frac{h A_s}{\rho V c}\right)t\right] \quad 3.7$$

onde θ é o excesso de temperatura, dado por

$$\theta = T_M - T_\infty \quad 3.8$$

T_M é a temperatura média do mosto, T_∞ e T_i as temperaturas final e inicial do mesmo mosto, os limites do processo. O coeficiente de transferência de calor por convecção h refere-se à serpentina, enquanto que o produto da massa específica ρ com o calor específico c e o volume V refere-se ao mosto.

O termo $\left(\frac{1}{h A_s}\right) (\rho V c)$ é chamado de constante de tempo térmica τ , em segundos.

O material mais utilizado para a construção da serpentina é o cobre, com condutividade térmica próxima de 400 W m⁻¹K⁻¹, enquanto que para aplicações alimentícias emprega-se o aço inox esse valor cai para cerca de 15 W m⁻¹K⁻¹.

O calor trocado entre o mosto e a serpentina pode ser calculado pela equação 3.9 [INCROPERA et al., 2008] em W.

$$Q = U A \overline{\Delta T} \quad 3.9$$

4 – Montagem do sistema de resfriamento de mosto

O resfriamento é atingido com a imersão de uma serpentina na panela de cozimento do mosto, seguindo duas opções de operação em respeito a temperatura com que o fluido de arrefecimento que escoar no interior da serpentina água é admitida na serpentina.

Em ambos os casos, sempre houve o reaproveitamento do fluido de resfriamento. Os casos estudados para o fluido de resfriamento foram:

a) água da rede de abastecimento a temperatura próxima do ambiente, e,

b) água fria proveniente de um banco de termoacumulação.

O termoacumulador foi montado em um tanque de vidro protegido com placas isolantes. No seu interior, foi colocada uma serpentina de cobre conectada a um segundo termoacumulador de menor capacidade, este refrigerado por um sistema de refrigeração mecânico.

4.1 – Propostas de métodos de resfriamento

Os diferentes processos de resfriamento podem ser verificados no diagrama da figura 4.1

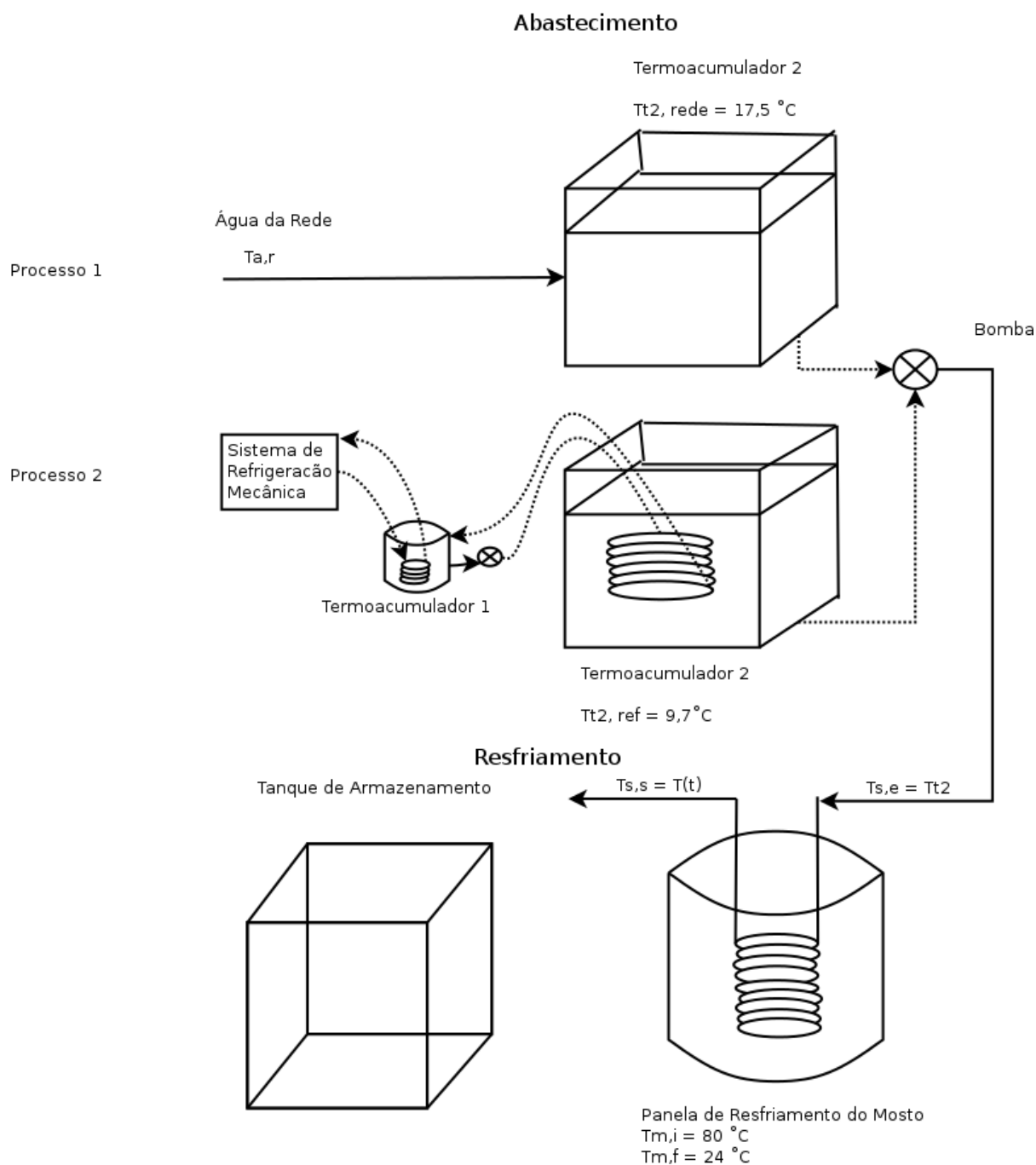


Figura 4.1 – Fluxograma do processo de resfriamento do mosto.

Os processos diferem apenas na parte de abastecimento. Após, ambos são conectados à bomba, que leva o líquido até a serpentina de resfriamento do mosto.

4.2 - Fontes de fluido de resfriamento para a serpentina

No processo 1, a água utilizada provém da rede de abastecimento do prédio, portanto sua temperatura pode variar conforme as condições climáticas, o horário no qual o processo se realiza e a tubulação. No período em que as medições ocorreram a temperatura da água da rede estava em torno de 17,5 °C, portanto essa foi a temperatura adotada para os cálculos do processo 1.

O segundo processo utiliza uma temperatura da água de entrada da serpentina em torno de 12 °C, após cerca de 5 horas de funcionamento.

Por se tratar de um termoacumulador, diferenças de temperatura são percebidas ao longo de sua altura, causadas pela estratificação do líquido devido à mudança da sua densidade em relação à temperatura. Para resolver o problema, uma bomba de máquina de lavar água é conectada no termoacumulador, fazendo com que a água do mesmo recircule e homogeneíze sua temperatura.

4.3 – Bancada de testes

A bancada de testes foi montada no LETA, Laboratório de Ensaio Térmicos e Aerodinâmicos localizado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Ela é composta por um tanque de termoacumulação, um sistema de refrigeração mecânica, uma bomba de deslocamento positivo, um fogareiro à gás, uma panela de aço inox AISI 304 com capacidade para 40 l, uma bomba alimentícia para recircular o mosto, uma serpentina de imersão, um medidor de vazão, um sistema de aquisição de dados HP e termopares tipo J, verificado na figura 4.2.



Figura 4.2 – Sistema de resfriamento utilizado.

Em ambos processos, a água utilizada foi armazenada no termoacumulador, para garantir vazão idêntica para fins de comparação. Do tanque de acumulação, a água é bombeada pela bomba, passa por um medidor de vazão, entra na serpentina e é armazenada após sua saída.

A serpentina com espaçadores instalados pode ser verificada na figura 4.3 e suas especificações constam na tabela 4.1.



Figura 4.3 – Serpentina de cobre com os espaçadores instalados.

Tabela 4.1: Especificações da serpentina de cobre utilizada.

L	D_e	D_i	e	k	$A_{contato}$
6,029 m	$10^{-2} m$	$7 \times 10^{-3} m$	$1,5 \times 10^{-3} m$	$398 W m^{-1} K^{-1}$	$0,189 m^2$

Foram utilizados termopares para instrumentar a panela e fornecer a temperatura em três diferentes pontos para que se possa realizar uma média dos dados adquiridos, tendo em vista que sempre há diferença de temperatura em diferentes zonas. A disposição dos termopares é vista na figura 4.4.



Figura 4.4 – Disposição dos termopares na panela de resfriamento.

A instalação da bomba alimentícia é justificada pela diferença de temperatura causada pela chama em contato com o inferior da panela, assim pode-se recircular o mosto, mantendo-o com temperatura homogênea.

O sistema de termoacumulação é apresentado na figura 4.5 e 4.6.



Figura 4.5 – Termoacumulador e sistema de refrigeração industrial.

O sistema possui um controlador do tipo liga e desliga que faz o ajuste da temperatura do termoacumulador 1 através de um PT100.

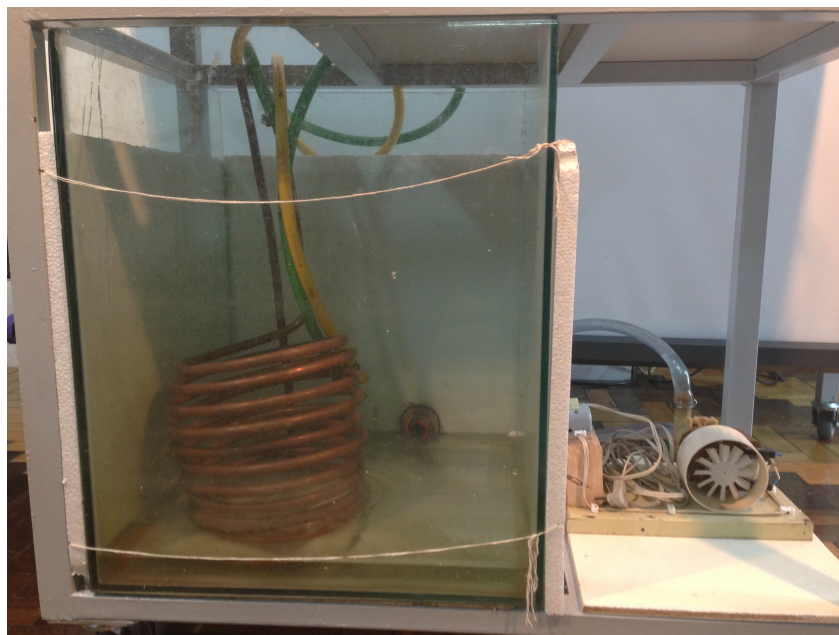


Figura 4.6 – Termoacumulador 2 e bomba responsável pelo recalque do líquido a serpentina de resfriamento.

5 – Resultados e Discussões

O processo se inicia com o aquecimento do mosto até uma temperatura de 80 °C, juntamente com a bomba alimentícia ligada. Ao atingir essa temperatura, desliga-se o

fogareiro. Então, liga-se a bomba responsável por enviar a água para a serpentina e aferem-se os dados do resfriamento até o momento que a temperatura do mosto atinge 24 °C.

Primeiramente, para a validação do método da capacitância global, calcula-se o número de Biot, dado pela equação 3.6, porém é necessário saber o coeficiente de transferência de calor por convecção no exterior da serpentina. Esse valor pode ser obtido experimentalmente através do resfriamento do mosto da cerveja.

No momento em que a constante de tempo atinge o mesmo valor do tempo decorrido, a equação 3.7 vale:

$$\theta^* = \frac{T_M - T_\infty}{T_i - T_\infty} = e^{-1} = 0,3678$$

Assim, calcula-se T_m , que nesse instante vale 44,6 °C.

O próximo passo, é realizar o resfriamento e adquirir as curvas.

Para o processo 1, foram encontradas as curvas do gráfico da figura 5.1.

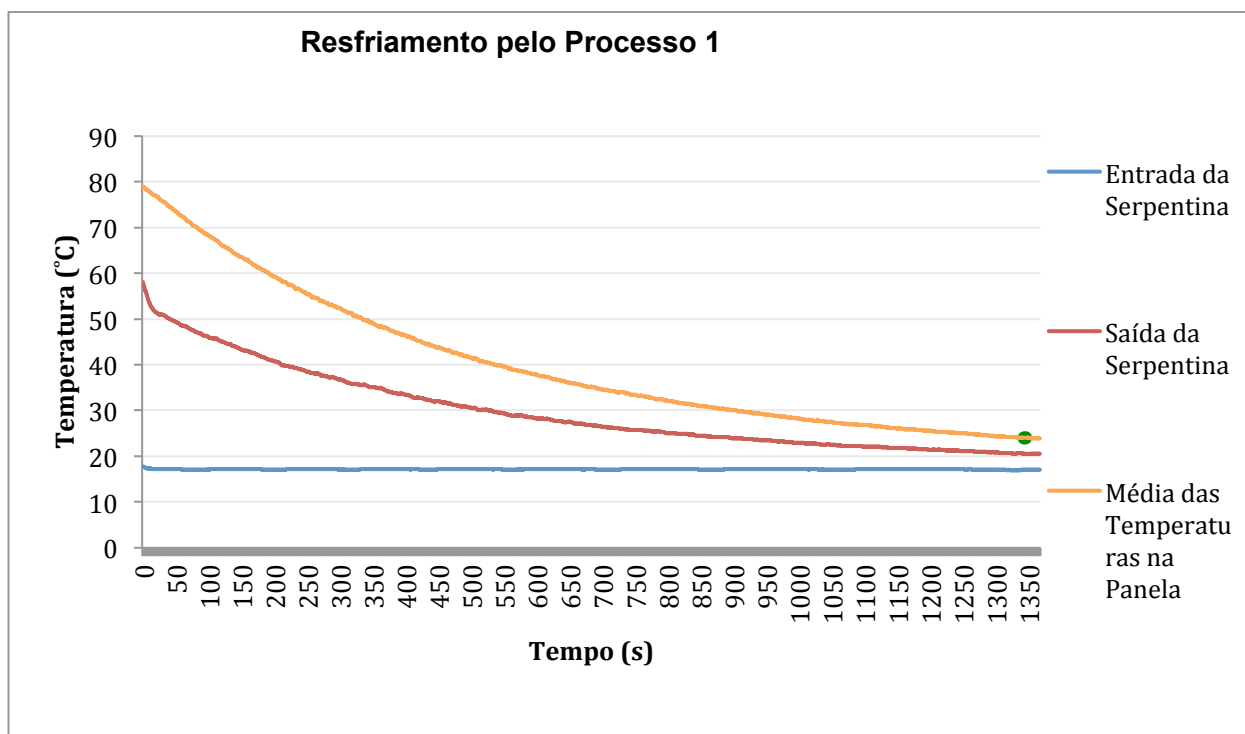


Figura 5.1 – Resfriamento através do processo 1.

As curvas da figura 5.2 foram traçadas ao longo do processo 2.

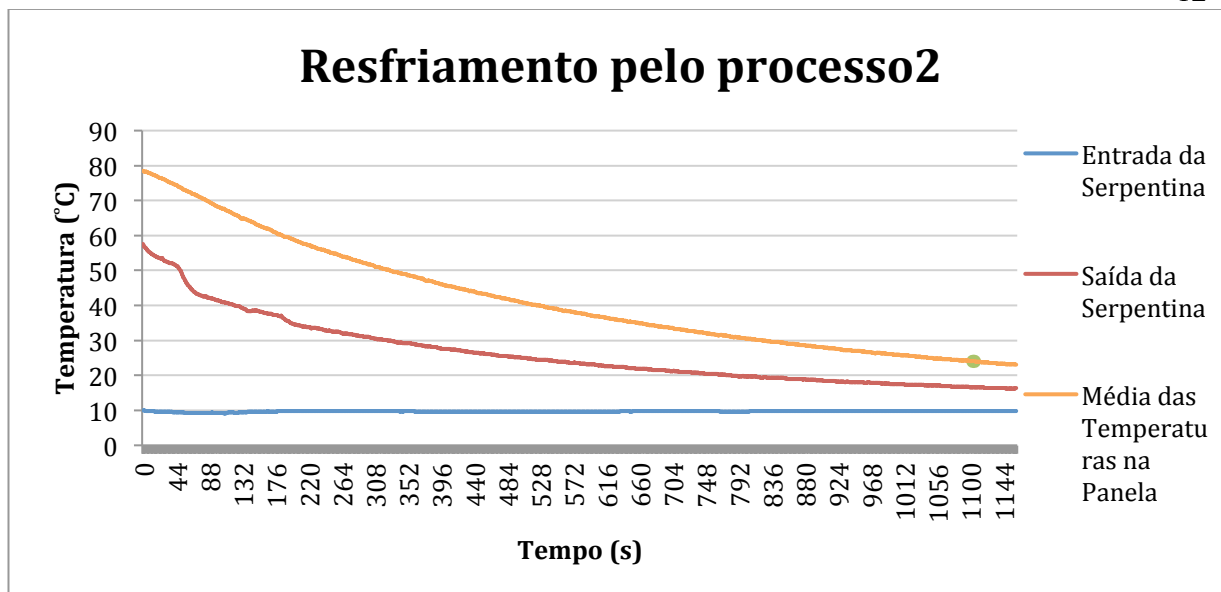


Figura 5.2 – Resfriamento através do processo 2.

Nos gráficos, o ponto em verde representa a temperatura alvo do processo, 24 °C juntamente com o momento que a temperatura média da panela a atinge.

No instante onde $T_m = 44,6\text{ }^\circ\text{C}$ e pode-se notar que esse valor é válido para ambos processos, pois T_∞ e T_i são os mesmos, t vale 426 segundos para o processo 1 e 430 segundos para o processo 2.

A tabela 5.1 fornece as propriedades do mosto no sistema.

Tabela 5.1: Propriedades do mosto

T inicial do mosto ($T_{m,i}$)	80°C
T final do mosto ($T_{m,f}$)	24°C
Volume do mosto (V_m)	20 l
Calor específico do mosto ($c_{p,m}$)	4,228 kJ / kg K
Vazão mássica no interior da serpentina (\dot{m}_a)	5 l/min = 0,0833 l/s
Viscosidade (com $T_{media} = 26^\circ\text{C}$)	$857 \times 10^{-6} \text{ N s / m}^2$
Densidade do mosto	1010 kg / m^3

Com esses valores, é possível calcular o coeficiente convectivo externo, através da equação 3.7 e dos dados da tabela 4.1 e 5.1.

$$h_e = 1083 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

São desprezados os efeitos de perda de calor pelas paredes da panela, de evaporação do mosto e as propriedades são consideradas constantes ao longo do tempo.

Para o cálculo do coeficiente global de transferência de calor, U , parte-se calculando o número de Reynolds no escoamento interno do tubo, que é dado pela equação 3.2, utilizando a vazão mássica vista na tabela 5.2, o diâmetro interno da serpentina, da tabela 4.1 e a viscosidade na temperatura média no interior da serpentina para os processos são:

Tabela 5.2 – Temperatura média, viscosidade, número de Prandtl e Reynolds da água dos processos.

Processo 1	Processo 2
T media = 39 °C	T media = 36,5 °C
Viscosidade = $674 \times 10^{-6} \text{ N s / m}^2$	Viscosidade = $699 \times 10^{-6} \text{ N s / m}^2$

Pr = 4,436	Pr = 4,62
k = 0,6304 W / m K	k = 0,6264 W / m K
Re = 22640	Re = 21810

Valor de Reynolds que caracteriza o escoamento interno como turbulento em ambos processos. A seguir, é calculado o número de Nusselt para o escoamento, utilizando o fator de atrito calculado através da equação 4.5, juntamente com o número de Reynolds calculado na tabela 5.3, obtém-se:

Tabela 5.3 – Número de Nusselt para os processos.

Processo 1	Processo 2
Nu = 136,5	Nu = 132,3

Utilizando a equação 3.3, para k presente na tabela 5.2 e D_i da tabela 5.1 e Nu calculado, tem-se:

Tabela 5.4 – Coeficiente de convecção interna.

Processo 1	Processo 2
$h_i = 12293 \frac{W}{m^2 K}$	$h_i = 11830 \frac{W}{m^2 K}$

O coeficiente de incrustação interna no tubo, R_d , é considerado como sendo 0,000176 $m^2 K/W$, segundo as normas da TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association), 1999.

Utiliza-se a equação 3.1 para determinar o coeficiente global de transferência, obtendo os valores presentes na tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Coeficientes globais de temperatura.

Processo 1	Processo 2
U = 746,5 W/m ² K	U = 745,6 W/m ² K

Para fins de análise de viabilidade dos processos, é calculado o gasto energético de ambos processos.

No processo 1, o resfriamento durou 1352 segundos. Através da vazão do sistema, 0,0833 l/s, calcula-se que foram gastos 112,6 litros de água. Sabendo que o custo do m^3 da água em Porto Alegre é de R\$ 2,50 para residências, tem-se um custo de R\$0,28 de água por batelada de 20 litros.

O sistema de refrigeração para resfriar água do termoacumulador foi utilizado durante 5 horas para baixar a temperatura da água ambiente, 17 °C para a temperatura desejada, 9,6 °C, e foram resfriados 120 litros de água, então, chega-se no valor de 200 W de potência. Sabendo que o kWh em Porto Alegre custa R\$ 0,41 e que ele ficará ligado 5 horas, obtém-se o valor de R\$ 0,41 por batelada.

Pode-se avaliar que ambos os casos resfriaram o mosto em um espaço de tempo apropriado para fins de produção de cerveja artesanal. Os processos 1 e 2 garantem o mecanismo que permite a formação de aglomerados de “cold break”, respeitando o decaimento da temperatura de forma não brusca. Pode-se averiguar também que ambos os processos se enquadram na faixa de resfriamento necessária para evitar a contaminação do mosto por substâncias contidas no ar.

6 – Conclusões

O objetivo do trabalho foi estudar o resfriamento do mosto da cerveja através do uso de um sistema de termoacumulação, para diminuir o tempo de resfriamento e aprimorar a qualidade da cerveja produzida.

O modelamento matemático por meio do método da capacitância global permitiu analisar o problema da troca de calor entre a serpentina, baseado na constante de tempo experimental do sistema.

O modelo proposto reduziu o tempo de resfriamento em 19,7%, porém o consumo de energia aumentou em R\$ 0,13 por batelada produzida. Esse custo é diminuído na medida em que a água da termoacumulação é reutilizada para resfriar novas bateladas.

Face a pequena diferença entre os dois processos propostos e ensaiados, conclui-se que o sistema refrigerado deve ser reprojetoado para atingir um melhor desempenho de sua taxa de resfriamento.

Referências Bibliográficas

- ASHRAE. “**Handbook—HVAC Applications**”, (SI). 2007.
- Cossun. F., Cossun L., “**Home Brewing and Wine making supplies, Comparison of the Direct Ice Addition Cooling Method to Heat Exchanger Wort Cooling**” October, 2011.
- Eils, H. G., Herberg, W. D., “**Brauwelt**”, vol. 14, pg. 601-607, 1998.
- Ibrahim, D., Rosen, M. A., “**Thermal Energy Storage: Systems and Applications**”, 2ª ed., John Wiley & Sons, West Sussex, Reino Unido, 2011.
- Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S., “**Fundamentos de Transferência de calor e de massa**”, John Wiley & Sons, 2008.
- Kakaç. S., Liu. H., “**Heat Exchangers – Selection. Rating and Thermal Design**”. 2ª ed., CRC Press, EUA. 2002.
- Kunze, W., “**Technology – Brewing and Malting**”, 3ª ed., Berlin, 2004.
- MacCracken MM. **Thermal energy storage MYTHS**. ASHRAE, 2003.
- “**Normas TEMA - Tubular Exchanger Manufacturers Association**”, EUA, 1988.
- Palmer, J. J., “**How to Brew**”, Brewers Publications, 3ª ed., 2006.
- Potter R.A., Weitzel D.P., King D.J., “**Study of operational experience with thermal storage systems**”. ASHRAE Trans, vol. 101, pg. 549-557, 1995.
- Rismanchi, B., Saidur, R., Masjuki, H.H., Mahlia, T.M.I., “**Cost-benefit analysis of using cold thermal energy storage systems in buidingg applications**”. Energy Procedia, 2011, Bangkok, Thailand
- Scotsman, E., “**An account of an improved method of cooling wort, in the operation of brewing**”, *Journal of the Franklin Institute, Volume 2, Issue 2, August 1826, Pages 108-110*
- www.britanicca.com, acessado em 10/06/2013.
- www.sociedadedacerveja.com.br acessado em 15/06/2013.
- www.weconsultoria.com.br acessado em 25/05/2013.