

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

ANÁLISE DO CONSUMO ENERGÉTICO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CERVEJA
ARTESANAL POR BATELADAS.

por

Paulo Rodolfo Buffon Ortiz

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, Novembro e 2014



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE DO CONSUMO ENERGÉTICO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CERVEJA
ARTESANAL POR BATELADAS.

por

Paulo Rodolfo Buffon Ortiz

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. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

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

Orientador: Prof. Paulo Smith Schneider

Comissão de Avaliação:

Prof. Nattan Roberto Caetano

Prof. Horácio Antônio Vielmo

Prof. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, Novembro de 2014.

DEDICATÓRIA

- Dedico este trabalho à minha família, minha avó Marlene e ao meu avô Edmor, que sempre foram muito presentes na minha educação e no meu crescimento, e em especial à minha mãe que sempre batalhou muito para me proporcionar todas as oportunidades e conquistas até agora.
- Dedico também à Bruna, minha futura esposa. Que me dá forças todos os dias para continuar a caminhada e me motiva sempre a buscar novos desafios.

AGRADECIMENTOS

- Agradeço ao professor Paulo Smith Schneider por incentivar a pesquisa em diversas áreas, sempre fomentando o desejo pelo conhecimento, incentivando atividades ligadas à pesquisa e trazendo uma visão esclarecedora sobre os assuntos.

- Agradeço ao Batista, técnico do LETA, com sua experiência e disponibilidade trouxe soluções para problemas na montagem da bancada.

- Agradeço à Letícia que sempre esteve disposta a ajudar, trazendo soluções e argumentando melhorias.

- Agradeço também à Barbara por trazer os conhecimentos de outra área de conhecimento, assim como auxiliar no desenvolvimento de atividades relacionadas a este trabalho.

ORTIZ, P. R. **Análise do Consumo Energético do Processo de Produção de Cerveja Artesanal por Bateladas**. 2014. 21. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

RESUMO

O consumo de cervejas artesanais aumentou significativamente nos últimos anos, com isso surge a oportunidade de novas microcervejarias se estabelecerem. Este trabalho apresenta uma análise experimental do consumo energético envolvido em um processo de produção de uma batelada de cerveja artesanal. Descreve as etapas da concepção da bancada, define os materiais, o método de mosturação e o fluxograma de processos. A bancada é composta de 3 tanques feitos em aço inox 304 com capacidade de 65 litros, montados em uma estrutura metálica em forma de degraus que permite a atuação da energia potencial nas transferências dos líquidos. A análise de consumo é feita pela medição das temperaturas do processo, seguido da leitura das potências reais dos dispositivos de aquecimento e os tempos de utilização para cada fase operação. A mosturação e a fervura são processadas com o auxílio de dois conjuntos de três resistências elétricas de 3 kW de potência nominal. O trabalho mostra que para a produção de 50 litros de cerveja em processo de batelada é necessário 7 horas e 30 minutos, seguidos de 14 dias para a fermentação e maturação. A energia total necessária para o caso analisado é de aproximadamente 198 MJ (3,96 MJ/L), dividida entre energia elétrica (96%) e dispêndio físico humano (4%). Para a mosturação e fervura o consumo é de aproximadamente 59 MJ e para a fermentação e maturação 147 MJ.

PALAVRAS-CHAVE: Microcervejaria, Mosturação, Energia Elétrica.

ORTIZ, P. R. **Energy Analysis for Brewing in Batches**. 2014. 21. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

ABSTRACT

The consumption of craft beers has increased significantly in last years, with that comes the opportunity for new microbreweries to settle. This work presents an experimental analysis of the energy consumption involved in the brewing process in batches. Describes the steps of the bench design, select materials, define the method and the mashing process flowchart. The bench consists in three tanks made of stainless steel 304 with a capacity of 65 liters, mounted on a metal frame forming steps which allows the usage of potential energy to transfer the liquids. The consumption analysis is made by measuring the process temperature, followed by reading the real power of the electric resistance heaters and usage times for each operation phase, as well as the other devices consumption. For mashing is used an electric resistance heater of 5359 W and another resistance heater of the same value to boil. The study shows that to brew 50 liters in a batch process is taken 7 hours and 30 minutes, also 14 days for fermentation and maturation. The analyzed case requires a total energy of 198 MJ, approximately, consisting of electricity (96%) and human energy (4%). Mashing and boiling consumption is about 59 MJ and for fermentation and maturation 147 MJ.

KEYWORDS: Microbrewery, Mashing, Electric Energy.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
3.1 – Processos de Fabricação de cerveja	2
3.2 – Consumo Elétrico	3
3.3 – Energia Humana.....	3
4. METODOLOGIA.....	4
4.1 – Concepção da Bancada	4
4.1.1 – Seleção do Processo de Mosturação.....	4
4.1.2 – Seleção dos Equipamentos	4
4.1.3 – Montagem da Bancada	5
4.1.4 – Elaboração do Mapa de Processos	6
4.1.5 – Instrumentação para Controle dos Processos.....	8
4.2 – Instrumentação dos Ensaios.....	8
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	9
6.1 – Perfil de Temperatura Parte Quente	9
6.2 – Inventário Energético de Equipamentos	10
6.3 – Inventário Energético de Trabalho Humano.....	11
7. CONCLUSÕES	12
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13

1. INTRODUÇÃO

As origens da cerveja estão perdidas nas raízes da pré-história. Possivelmente algum nômade descobriu acidentalmente, há cerca de 10.000 anos, que a cevada selvagem quando embebida em água transformava-se numa espécie de mosto. No período em que as cidades da mesopotâmia estavam sendo edificadas, a fabricação da cerveja era uma atividade bem estabelecida e já dispunha de algumas leis [Slemer, 1996]. Em 1516 foi publicada na Bavária, região meridional da Alemanha, a lei de pureza da cerveja – *Reinheitsgebot* – estabelecendo que essa bebida deveria ser produzida exclusivamente com malte, lúpulo e água, sem qualquer aditivo.

Com a Revolução Industrial, o modo de produção e distribuição sofreu mudanças decisivas, estabelecendo-se fábricas cada vez maiores. Porém, apenas nos últimos 80 a 100 anos formaram-se as bases de uma tecnologia cervejeira, mediante a análise dos processos biológicos e químicos que tem lugar no curso de elaboração da cerveja e permite o uso mais racional das matérias-primas. A este respeito destaca-se a importância dos conhecimentos obtidos sobre os aspectos biológicos e bioquímicos da fermentação e maturação da cerveja [Brigido, 2006; Netto, 2006].

A cerveja é a quinta bebida mais popular do mundo, ficando atrás somente do chá, do refrigerante, do leite e do café, com um consumo médio *per capita* de 9,6 litros por ano [Olajire, 2012 apud OECD *Health Data*, 2005]. Segundo a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura, em 2002 foram produzidos mais de 1,34 bilhões de hectolitros de cerveja no mundo todo, mantendo uma posição economicamente estratégica na indústria alimentícia.

No Brasil e no mundo o setor cervejeiro continua em plena expansão, tornando o mercado cada vez mais amplo e permitindo o surgimento de microcervejarias, que acabam roubando uma fatia de consumidores das grandes cervejarias. Isto porque apresentam produtos diferenciados utilizando matérias-primas de alta qualidade e métodos de mosturação específicos para o estilo de cerveja proposto. Para atingir preços competitivos e diminuir o impacto ambiental, cada vez mais tem-se a preocupação em reduzir o consumo energético das indústrias, e esta preocupação também se reflete na indústria cervejeira. Neste caso, já foram feitos estudos de “cervejarias verdes” [Muster-Slawitsch *et al.*, 2010] e estocagem de água quente em tanques [Majosi *et al.*, 2009].

Segundo Fadare *et al.*, 2010, as principais alternativas de redução do impacto ambiental e do consumo de energia na produção de bebidas podem vir do aumento da eficiência nas conversões energéticas, utilizando-se sistemas de cogeração, intensificação dos processos e integração da geração de calor, setores administrativos e prédios utilizando projetos que visam mínimo custo energético, troca das fontes energéticas para energias renováveis, e a integração energética dos processos.

As microcervejarias levam certa vantagem em relação às grandes cervejarias, pois as possibilidades de redução no consumo são maiores, por possuírem equipamentos e tanques menores. O processo de adaptação a um modelo mais eficiente se torna viável e, devido ao volume da produção ser menor, o interesse em reduzir este consumo cresce ainda mais. Para tanto, inicialmente é preciso conhecer a quantidade de energia utilizada na produção de cerveja por um equipamento artesanal.

Devido à expansão do setor cervejeiro no Brasil, bem como o crescente número de microcervejarias e cervejeiros artesanais, este trabalho visa determinar o consumo energético de uma bancada com capacidade de produzir bateladas de 50 litros. E seu objetivo é quantificar a energia necessária para cada etapa do processo de fabricação de cerveja artesanal.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A partir da análise energética dos processos de fabricação de uma cervejaria localizada no sudoeste da Nigéria, com capacidade de produzir 1.700.000,00 hl/ano, foi determinado que as principais fontes de energia para a produção são a elétrica, a térmica e a humana [Fadare *et*

al., 2010]. Os locais considerados, e os respectivos processos, foram os seguintes: no silo (pesagem, carregamento, limpeza de impurezas e moagem dos grãos), na mosturação (cozimento do mosto, conversão enzimática, filtragem pelos grãos, fervura, resfriamento e decantação), no acabamento (filtragem por diatomito, ajuste final de densidade, carbonatação) e o envase e empacotamento (despaletização, desencaixotamento, lavagem e inspeção das garrafas, envase do líquido, pasteurização, colocação de rótulos, encaixotamento e paletização). O estudo refere-se a uma batelada de 9,8 toneladas de grãos maltados produzindo 563 hectolitros de cerveja. Neste caso, o consumo foi de 261,63 MJ/hl.

O estudo de um projeto de “Cervejaria Verde” levantou dados de duas cervejarias de médio porte e uma de pequeno porte, utilizando o método de rede de trocadores de calor (*Heat Exchange Network*, HEN). Esta consideração foi possível, pois se tratam de cervejarias de produção contínua, que apresenta pouca variação de tempo nas correntes quente e fria dos trocadores de calor. Este estudo ateu-se apenas aos processos térmicos como o de pré-aquecimento e cozimento do mosto, aquecimento da água para filtragem e lavagem dos grãos, para o empacotamento e lavagem de garrafas, condensadores de vapor, e outros. As cervejarias de médio porte com produção entre 800.000 a 1.000.000 hl/ano apresentaram consumo médio de 60 MJ/hl, enquanto a cervejaria de pequeno porte, com produção de 20.000,00 a 50.000,00 hl/ano, utilizou 104,5 MJ/hl [Muster-Slawitsch *et al.*, 2011].

Na Alemanha uma cervejaria considerada grande, com produção anual maior que 500 mil hectolitros, apresenta consumo médio de 250,20 MJ/hl, enquanto uma cervejaria pequena, com produção anual de menor que 20 mil hectolitros, apresenta consumo médio de 428,40 MJ/hl [Worrell *et al.*, 2003].

3. FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

3.1 Processos de Fabricação de Cerveja

O fluxograma de produção industrial da cerveja, mostrado na Figura 1, é detalhadamente apresentado por Kunze, 2007, e detalha os processos praticados na indústria de forma geral. A produção inicia no recebimento e estocagem da matéria-prima em local adequado, limpeza do malte, seguido de moagem e pesagem. Então, é adicionado água quente a uma temperatura de 48 a 50°C. A seguir, a temperatura é elevada para a chamada mosturação, com o objetivo de ativar algumas enzimas específicas.

Após a mosturação, o mosto é filtrado utilizando o próprio malte, o qual é lavado para aumentar o rendimento do processo, extraindo o mosto restante aprisionado nos grãos. Estes grãos podem ser reaproveitados para fabricação de ração animal, por exemplo. O mosto filtrado é submetido à fervura, momento em que é adicionado o lúpulo. Então, o mosto passa por um decantador, cujo objetivo principal é retirar proteínas coaguladas e bagaço do lúpulo, esta mistura é conhecida como *TRUB*.

O mosto é resfriado por um trocador de calor de placas até a temperatura ideal de inoculação da levedura. Ao atingir a temperatura especificada pelo cervejeiro, o mosto é aerado e é adicionado o fermento. Nesta etapa ocorre a fermentação, e a temperatura deve ser mantida sob controle, o que é feito pelo sistema de resfriamento dos tanques. Ao final da fermentação, a temperatura do mosto é diminuída e a levedura decanta no fundo do fermentador, sendo retirada pelo fundo e transferida a outro tanque. Como ainda existem células mortas na cerveja, ela passa por um processo de centrifugação sendo transferida para o tanque maturador.

Em um segundo momento, a cerveja passa por uma filtragem, utilizando dois filtros sendo um de terra infusória e outro de polivinilpirrolidona (PVPP). Nesta etapa, a cerveja pode estar com densidade diferente daquela esperada. Então, é feita blendagem em linha através de um equipamento chamado *High Density Blend*, esta prática é muito utilizada para ajustar a densidade do mosto poupando tempo e volume nos tanques.

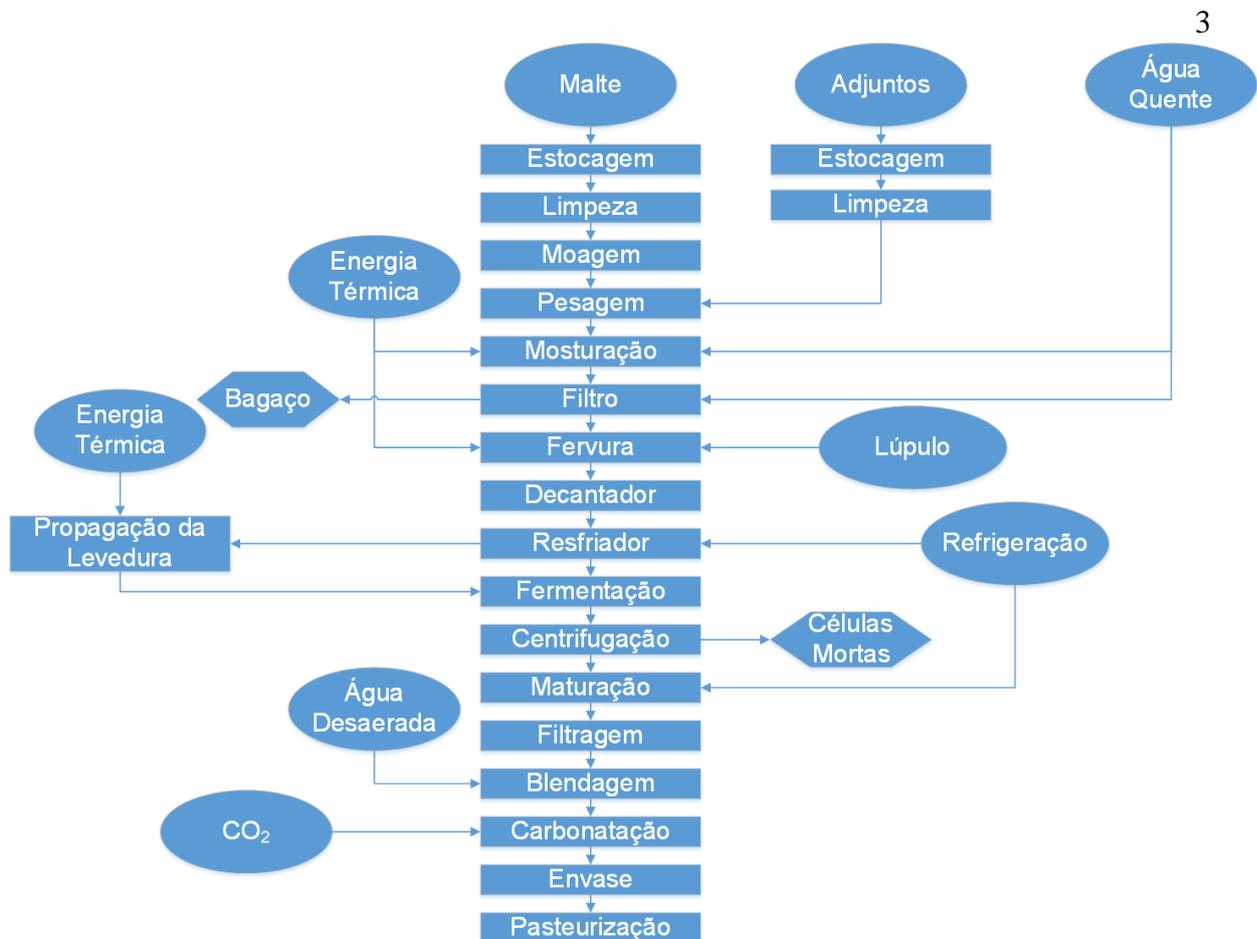


Figura 1 - Fluxograma de processamento de cervejaria (Adaptado de KUNZE, 2007)

Antes do envase, a cerveja é armazenada e mantida à temperatura baixa em tanques de alta pressão com adição de CO_2 até que o gás seja incorporado na bebida. O envase normalmente é feito em garrafas retornáveis de 600 ml, 1 l, *long neck* ou ainda em latas. Após, passa pelo processo de pasteurização, que consiste em aspersão de água aquecendo o líquido a aproximadamente 65 °C. As garrafas ou latas são embaladas, paletizadas e estocadas até a distribuição. Maiores detalhes podem ser visualizados no Anexo 1.

3.2 Consumo de Energia Elétrica

A avaliação do consumo elétrico dos equipamentos utilizados neste trabalho segue recomendações da ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. A energia E_p (J) é dada por

$$E_p = Pt \quad (1)$$

na qual, P a potência (Watt) e t o tempo (segundos). A potência P é determinada por

$$P = UI \quad (2)$$

na qual, U é a tensão aplicada no equipamento (Volt) e I a corrente consumida (Ampere).

3.3 Energia Humana

Segundo Farinatti, 2003, o dispêndio físico humano é calculado a partir do gasto calórico de uma atividade. O resultado do cálculo é dado em kcal e é facilmente convertido para Joule,

sabendo-se que 1 caloria equivale a 4,184 J. Assim, para estimar a energia humana E_H (MJ) é utilizada a expressão

$$E_H = \frac{4,184 \text{ MET } m t}{1000} \quad (3)$$

na qual MET é o equivalente metabólico da atividade (Tabela 1), m é o massa corporal do indivíduo (kg) e t o tempo (horas).

Tabela 1 – MET por atividade (Adaptado de Farinatti, 2003)

Atividade	MET
Sentado, trabalho leve	1,5
Em pé, leve	2,3
Em pé, leve/moderado	3,0
Em pé, moderado	3,5
Em pé, moderado/pesado	4,0

4. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para calcular o consumo energético segue o modelo proposto por Fadare *et al.*, 2010. Primeiro, são definidas as principais fontes de energia, em seguida são selecionadas as operações e os parâmetros necessários para os cálculos energéticos em cada operação. A partir destes dados, é montado um inventário da classificação de potência dos equipamentos envolvidos. As potências são calculadas a partir da corrente, da tensão e do tempo de utilização.

4.1. Concepção da Bancada

A concepção da bancada de ensaios partiu das seguintes premissas. Primeiramente, ter a mínima necessidade de mão-de-obra, de equipamento, de energia e de tempo. As etapas de desenvolvimento são apresentadas nas subseções a seguir.

4.1.1 Seleção do Processo de Mosturação

Segundo Wolfe *et al.*, 2012, o processo de mosturação, que requer menor quantidade de energia, de tempo, de mão-de-obra e de equipamento é aquele por infusão simples, salientando que ele tem como desvantagem a não utilização de adjuntos e maltes pouco modificados. Com pequenas modificações neste processo é possível aumentar a aplicabilidade, passando a ser chamado de “infusão com rampas de temperatura”, e permitindo ao cervejeiro desenhar um perfil de temperaturas para a mosturação de receitas mais elaboradas, assim como a utilização de adjuntos e maltes pouco modificados.

O processo de mosturação por infusão com rampas de temperaturas também apresenta mais uma vantagem significativa: a fonte de calor não fica em contato com os grãos de malte, evitando a torra dos grãos que trazem adstringência à cerveja. Desta forma são necessários três tanques para o processo de mosturação. O primeiro para fazer o aquecimento da água de infusão, o segundo para a mistura da água e dos grãos moídos e um último para a fervura.

4.1.2 Seleção dos Equipamentos

A seleção partiu da utilização de equipamentos disponíveis no laboratório, realizando as modificações necessárias. O trabalho de Calegari, 2013, resultou no dimensionamento e construção de três tanques de 65 litros e um de 30 litros, feitos a partir de chapas de aço inox

304. Além disso, foi construída uma estrutura metálica propondo o uso da energia potencial para as trasfegas e 3 resistências elétricas de aquecimento com 9000 W de potência nominal. Para a conexão dos tanques foram adquiridas no presente trabalho válvulas de esfera, também em aço inox 304. A mosturação, conforme o processo selecionado, necessita de dois tanques, um para o aquecimento da água e outro para a mosturação. Para o tanque de aquecimento foi utilizado um dos tanques de 65 litros, que teve o fundo perfurado e foi instalada uma válvula de esfera.

Partindo da análise feita sobre o posicionamento da resistência dentro do tanque por Calegari, 2013, foi proposto um novo posicionamento para a resistência, desta vez horizontal instalada na parede do tanque a 10 mm do fundo. No tanque de mosturação, foi utilizado mais um dos tanques de 65 litros e desenvolvido um fundo falso, para que os grãos ficassem assentados 30 mm acima do fundo do tanque. Este último foi perfurado e foram instaladas duas válvulas esfera, uma para receber o líquido do tanque de aquecimento e outra para a trasfega do mosto para o tanque de fervura. Para o tanque de fervura foi utilizado o terceiro tanque de 65 litros e instalada outra resistência e outra válvula esfera no fundo. A mangueira utilizada para ligar o tanque de aquecimento (primeiro) ao tanque de mosturação (segundo) foi a Plicord Brewline 250 da Goodyear que foi desenvolvida especialmente para cervejarias, suportando temperaturas de até 120 °C.

4.1.3 Montagem da Bancada

Com os equipamentos e o processo definidos a bancada foi montada conforme a Figura 2.

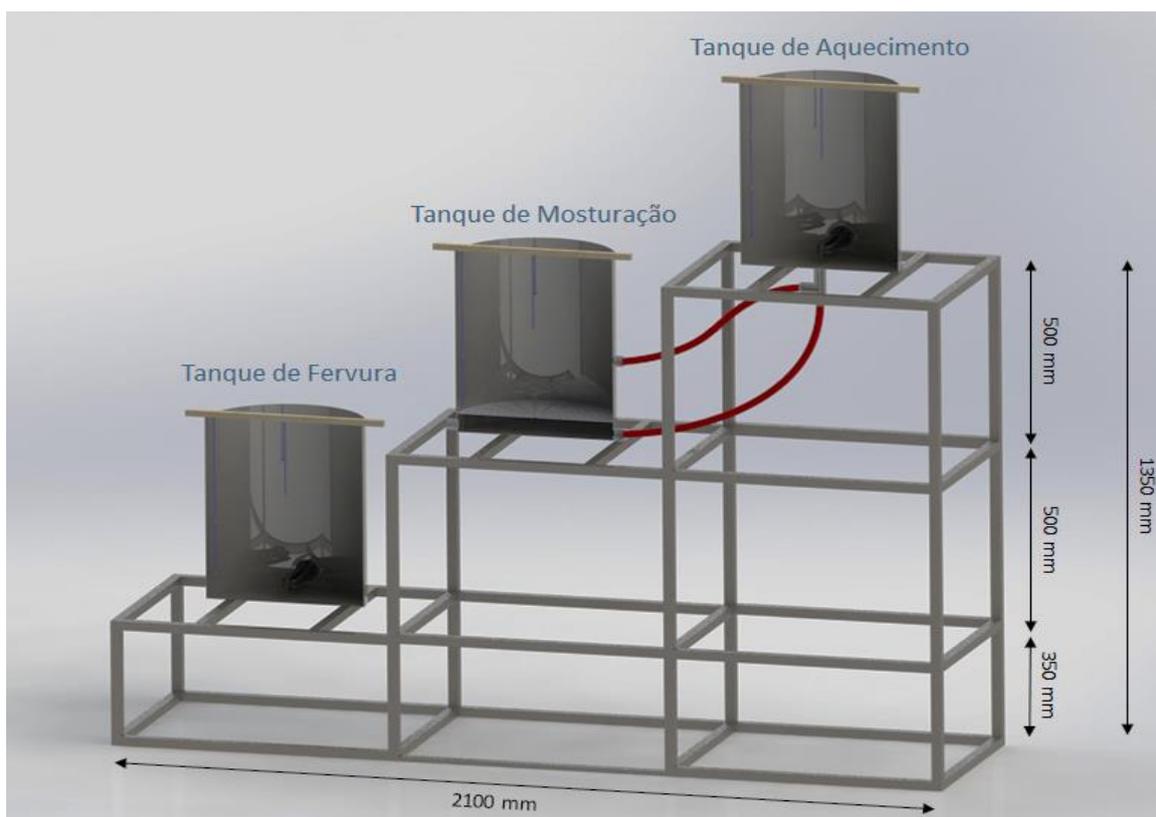


Figura 2 – Montagem da bancada de produção por bateladas

A estrutura foi feita em degraus e seu ponto mais alto está a 1,35 metros de altura, onde foi colocado o tanque de aquecimento. No degrau intermediário foi colocado o tanque de mosturação, o operador necessita ter acesso a este tanque para fazer a adição de malte, bem como agitar a mistura para promover a homogeneização das temperaturas.

4.1.4 Elaboração do Mapa de Processos

A Figura 3 apresenta o fluxograma em ordem cronológica da esquerda para a direita e de cima para baixo, dividindo cada processo por equipamento.

O processo de produção inicia-se enchendo o tanque de aquecimento com 50 litros de água da rede, aquecendo-se até 60 °C. Enquanto isso, o moedor é montado e os grãos de malte são moídos. Ao atingir a temperatura, é feita a trasfega 1 de 20 litros para o tanque de mosturação, onde os grãos são misturados com o auxílio de uma pá cervejeira. Ao homogeneizar a água e os grãos, a temperatura da mistura baixa até aproximadamente 50 °C. Neste ponto, a mistura é deixada em repouso durante 20 minutos. Esta etapa é chamada de parada proteica e tem a finalidade de quebrar as proteínas presentes nos maltes menos modificados.

Durante a parada proteica, a água restante dentro do tanque de aquecimento é aquecida até 100 °C, e ao final dos 20 minutos é feita a trasfega 2, que transfere mais 20 litros de água para o tanque de mosturação, elevando a temperatura da mistura para 70 °C. Neste ponto, inicia-se a conversão enzimática (ou sacarificação) do mosto através da ativação das enzimas presentes nos grãos. A etapa de conversão enzimática dura 40 minutos, ao longo do tempo a temperatura diminui até a faixa de 63 °C, passando pelas temperaturas ótimas de atuação das duas principais enzimas, a Beta Amilase e a Alfa Amilase.

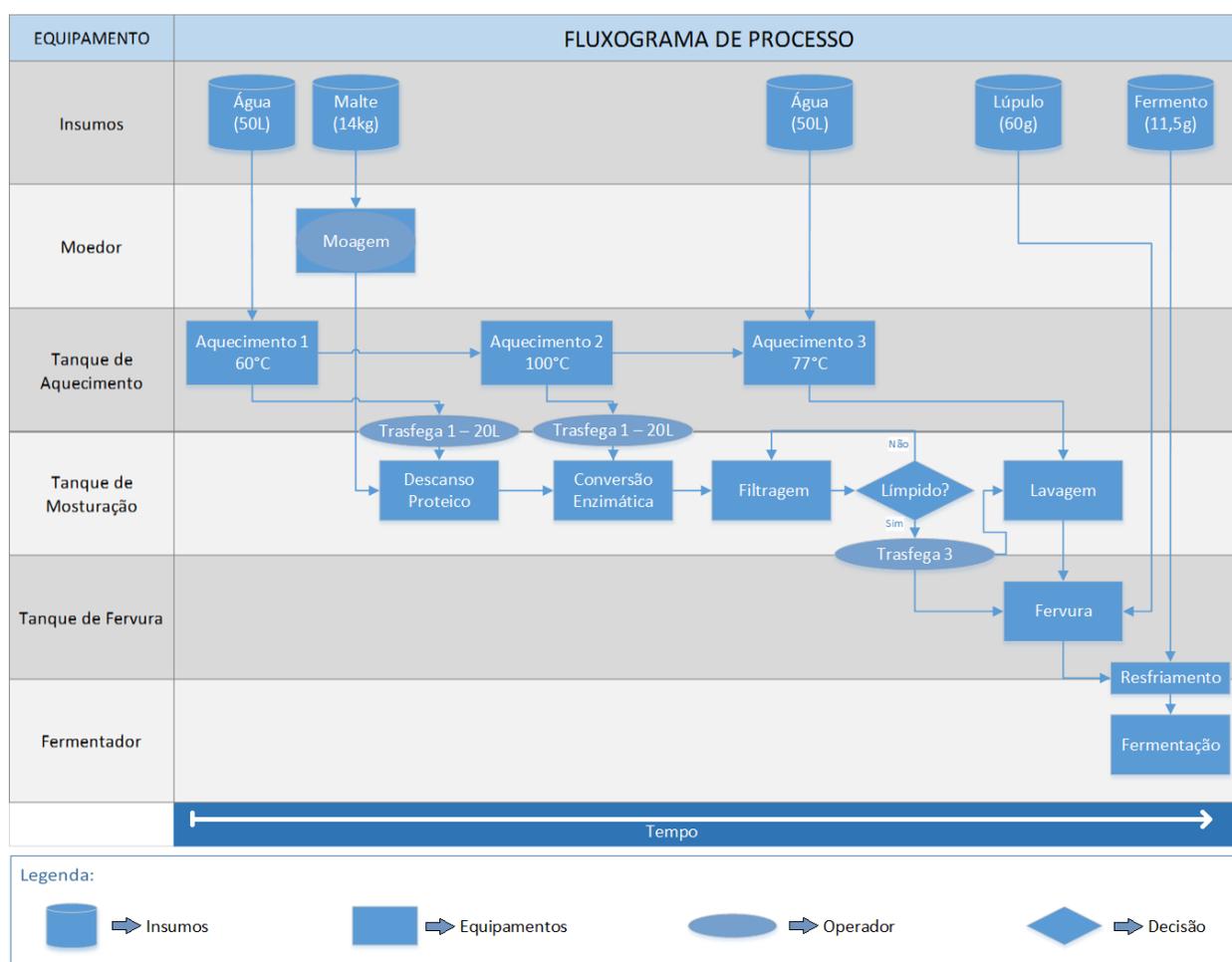


Figura 3 – Fluxograma do Processo de Fabricação.

Ao finalizar a etapa de conversão enzimática inicia-se a filtragem, com o auxílio de um recipiente pequeno. O mosto é retirado pela válvula do fundo do tanque de mosturação e colocado de volta por cima, evitando a agitação da mistura. O objetivo desta etapa é estabilizar uma cama de grãos que servirão de filtro para o mosto, que no início do processo de filtragem apresenta alta turbidez devido a presença de proteínas e partículas de grãos.

Enquanto é feita a filtragem, são misturados mais 15 litros de água da rede com a água quente presente no tanque de aquecimento, e este volume de água é aquecido novamente até 77 °C. Após encerrar a filtragem, é feita a trasfega 3, onde o mosto, já límpido, é transferido para o tanque de fervura. Inicia-se a lavagem da cama de grãos utilizando 25 litros de água a 77 °C para extrair o restante do mosto que ficou aprisionado pelos grãos, aumentando o rendimento da brassagem.

Ao finalizar a lavagem restam aproximadamente 56 litros de mosto no tanque de fervura. Neste momento, inicia-se a fervura. Esta etapa leva em torno de 95 minutos, sendo aproximadamente 35 minutos para o início da fervura, quando é adicionado o lúpulo, e mais 60 minutos com o líquido fervendo. Encerrada a fervura, o mosto é resfriado até a temperatura ambiente, adicionado o fermento e transferido para o fermentador dentro de uma geladeira, responsável pelo controle da temperatura de fermentação. O processo leva em torno de 7 dias, podendo durar até 10 dias dependendo da atividade e da atenuação de fermentos comuns. Fermentos especiais podem apresentar o período de fermentação estendido.

Ao encerrar a fermentação a cerveja é envasada, cujo fluxograma é apresentado a seguir.

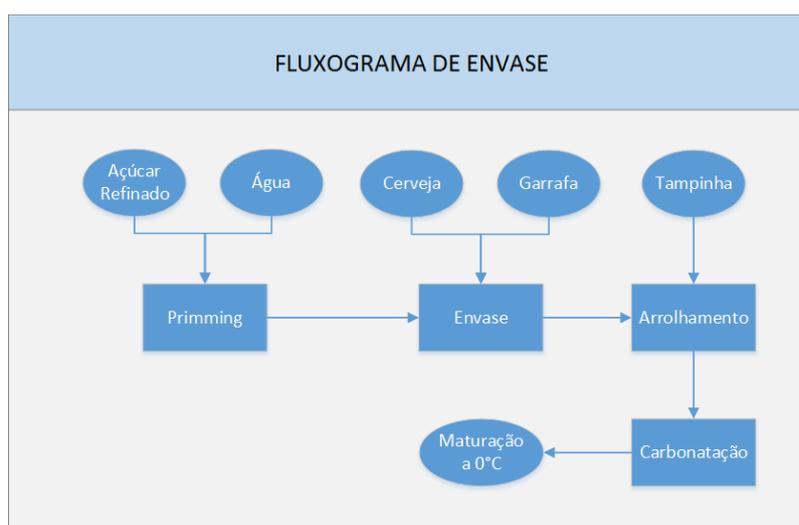


Figura 4 – Fluxograma do Processo de Envase.

O processo inicia-se medindo a quantidade necessária de açúcar refinado, em média 7 gramas de açúcar para cada litro de cerveja. O açúcar é misturado a uma pequena quantidade de água e esta mistura é aquecida até a fervura, tomando o cuidado para não caramelizar o açúcar. Este caldo de açúcar é chamado de *priming*, e é adicionado diretamente nas garrafas. Para garrafas de 600 ml a quantidade de açúcar a ser colocado em cada garrafa é de 4,3 gramas. Utiliza-se uma seringa para fazer a dosagem nas garrafas.

Ao dosar todas as garrafas, é acoplado um tubo de enchimento ao fermentador. Este tubo permite que as garrafas sejam enchidas pelo fundo evitando a agitação da cerveja, diminuindo a aeração que causará a oxidação da mesma.

Conforme as garrafas vão sendo enchidas de cerveja, elas já podem ser tampadas utilizando um arrolhador manual. Em seguida, são colocadas em um ambiente com temperatura controlada entre 17 e 25 °C. Durante os 7 dias, o fermento consome o extrato fermentável (*priming*) adicionado durante o envase, e produz gás carbônico e uma pequena quantidade de álcool. O gás produzido pressuriza a garrafa até 3 bar, e pela pressão o gás entra na cerveja, este processo é a carbonatação.

Ao atingir a pressão adequada a cerveja precisa ser maturada para eliminação de sabores indesejáveis produzidos durante a carbonatação, para isso as garrafas são colocadas na geladeira a 0 °C durante, pelo menos, 7 dias. Após este período a cerveja está pronta para o consumo.

4.1.5 Instrumentação para Controle dos Processos

Os processos dependem basicamente da temperatura, do tempo e do volume de água de infusão. Para controle da temperatura é utilizado apenas um sensor de temperatura, devidamente calibrado, instalado horizontalmente na parede do tanque de aquecimento a uma distância de 10 mm do fundo da panela, medindo a temperatura aproximada da saída do líquido. A monitoração do tempo é feita com um cronômetro e o volume de água é feita através do nível instalado na panela de aquecimento.

4.2 Instrumentação dos Ensaio

Para a medição dos dados necessários para os cálculos foram utilizados os seguintes equipamentos:

Tabela 2 – Relação dos equipamentos utilizados

Tabela de Equipamentos				
Identificação	Equipamento	Fabricante e Modelo	Resolução	Incerteza
1	Multímetro Digital	Politem - POL-777	0,01 V	$\pm(1,5\% + 30d)$
2	Alicate Amperímetro Digital	ICEL - AD-6900	0,01 A	$\pm(2,0\% + 5d)$
3	Balança Eletrônica de Precisão	Marte - AC10k	0,1 g	$\pm 1,1$ g
4	Termopares	Tipo J	68 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (Sensibilidade)	$\pm 0,75\%$
5	Data Logger	Agilent - 34970A	22 bits	$\pm 0,004\%$
6	Cronômetro Digital	Oregon Scientific	1/100 seg	$\pm 0,041$ s

Para calcular a potência real das resistências de aquecimento e do compressor da geladeira foram utilizados o multímetro digital (1) e o amperímetro de alicate (2). A partir da potência foi utilizado o cronômetro digital (6) para mensurar o tempo de utilização dos equipamentos. Os insumos já vêm previamente pesados em sacos de 1 kg, mas para realizar a produção as quantidades foram verificadas utilizando a balança (3).

O perfil de temperaturas da parte quente do processo foi definido utilizando o data logger (5) e 12 termopares (4), divididos entre os 3 tanques da parte quente do processo. Os termopares foram dispostos conforme a Figura 5, mostrada a seguir:

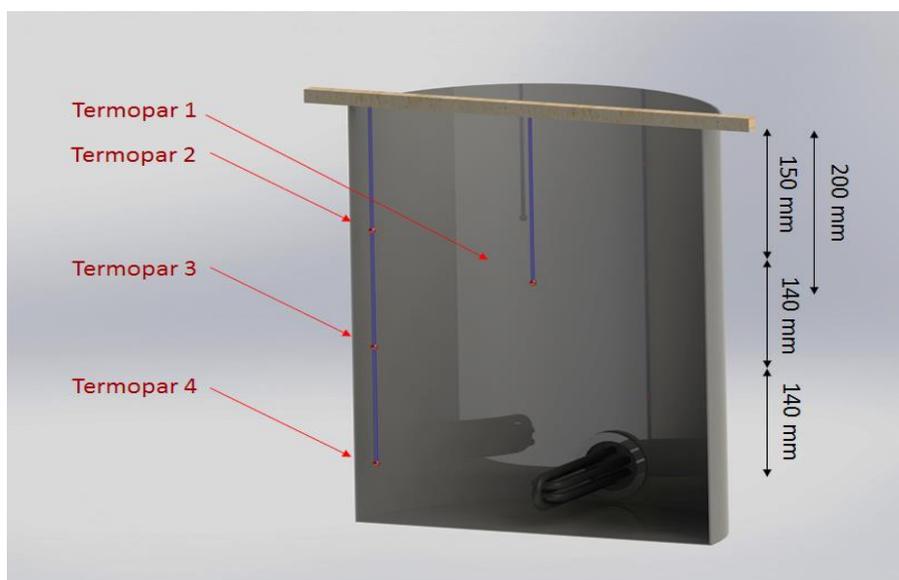


Figura 5 – Disposição dos termopares nos tanques.

Nesta disposição os termopares forneceram uma resposta confiável sobre a temperatura média do líquido no interior dos tanques e foi possível mapear todas as temperaturas ao longo da mosturação e fervura do mosto. O parâmetro tempo, utilizado para calcular o consumo elétrico da geladeira, foi mensurado através do estudo realizado por Lorenzini *et al.*, 2008. Além disso, foram feitas medições durante o período de 2 horas na geladeira utilizada, utilizando o cronômetro (6) para monitorar o tempo de funcionamento do compressor. O tempo medido foi extrapolado para o período de 24 horas, este tempo foi muito próximo ao encontrado pelo estudo de Lorenzini *et al.*, estimado em 13,5 horas por dia.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O processo completo de fabricação levou aproximadamente 6 horas e 30 minutos na brasagem, mais 60 minutos no envase e 14 dias de fermentação e maturação. Foram produzidos aproximadamente 50 litros de cerveja e para a fabricação foram utilizadas apenas energia elétrica e energia humana.

6.1 Perfil de Temperatura Parte Quente

As aquisições feitas pelos termopares resultaram no perfil térmico dos tanques de aquecimento, mostura e fervura, como pode ser visto na Figura 6. No gráfico é possível verificar que os termopares dos 3 tanques foram identificados utilizando cores diferentes. O tanque de aquecimento recebeu a cor azul, o tanque de mosturação a cor verde e o tanque de fervura a cor vermelha, bem como seus respectivos tons.

É possível verificar que os termopares do tanque de aquecimento e de mosturação trabalham em pares, devido às quantidades de água transferidas nas trasfegas 1 e 2. No Tanque de fervura só é possível ver este comportamento no início da trasfega 3 que transfere todo o mosto. Assim, todos os termopares apresentam o mesmo comportamento.

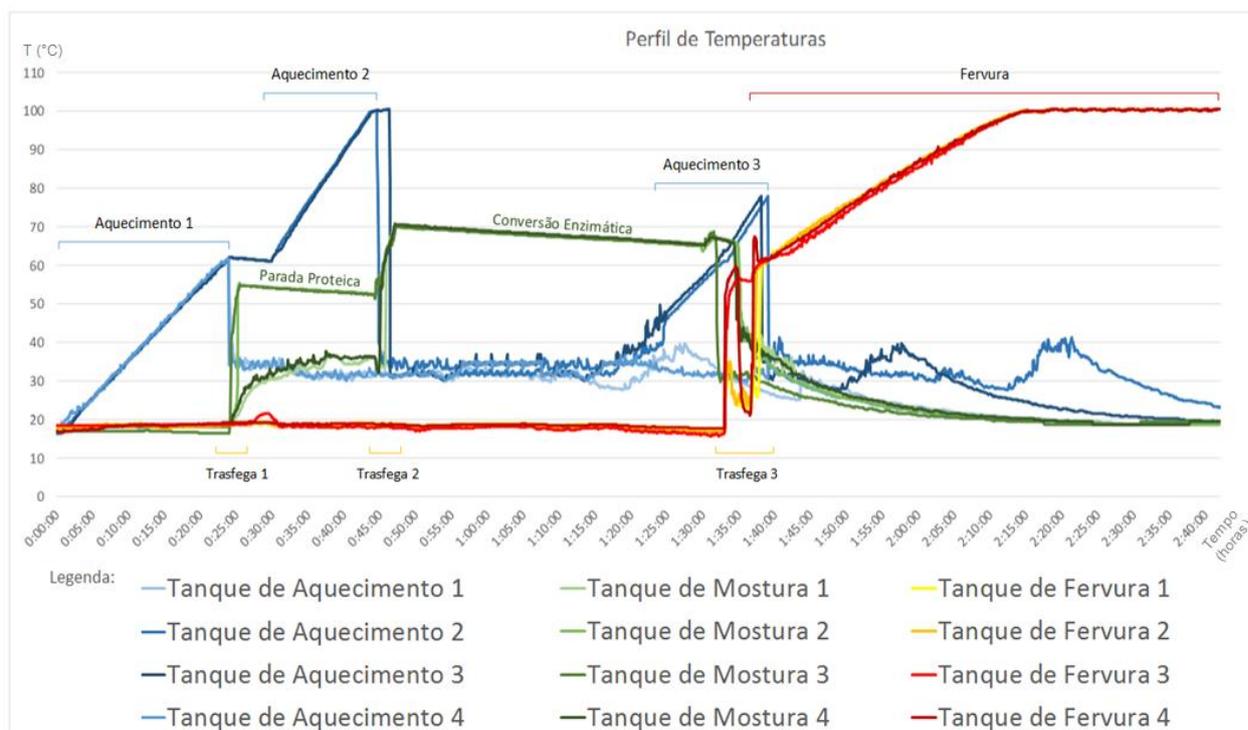


Figura 6 – Perfil térmico da fase quente do processo.

No aquecimento 1 foram necessários 25 minutos para elevar a temperatura de 17 °C para 61 °C. Os quatro termopares deste tanque apresentaram elevação de temperatura. Ao atingir a temperatura de 61 °C foi feita a trasfega 1. Dois termopares do tanque de aquecimento apresentaram queda de temperatura e dois termopares do tanque de mosturação apresentaram elevação de temperatura. É possível verificar um decréscimo na taxa de aquecimento dos termopares devido à adição do malte moído, iniciando a parada proteica.

Passados 5 minutos iniciou-se o aquecimento 2, e foram necessários 15 minutos para elevar a temperatura de 61 °C para 100 °C, como pode ser visto no comportamento dos termopares do tanque de aquecimento. Ao atingir a temperatura de 100°C foi feita a trasfega 2. Com isso, a temperatura do tanque de mosturação foi elevada até 70 °C, dando início à conversão enzimática, que dura 40 minutos. Faltando 22 minutos para o término da conversão enzimática, foram adicionados mais 15 litros de água no tanque de aquecimento e iniciou-se o aquecimento 3, levando 18 minutos para elevar a temperatura até 77 °C, quando foi feita a lavagem dos grãos e a trasfega 3.

Ao terminar a trasfega 3, com todo o mosto dentro do tanque de fervura, foi iniciada a etapa da fervura. O aquecimento levou 36 minutos e somando o tempo de fervura, o tempo total foi de 96 minutos.

6.2 Inventário Energético de Equipamentos

Na Tabela 3 é mostrado o inventário da classificação de potência dos equipamentos envolvidos de acordo com os processos.

Tabela 3 – Inventário energético de equipamentos.

Inventário Energético de Equipamentos							
Operação	Equipamento	Parâmetros	Valor	Energia (kWh)	Incerteza (kWh)	Energia (MJ)	Incerteza (MJ)
Aquecimento 1	Tanque de Aquecimento	Potência Elétrica (W)	5358,99	2,2329	0,0611	8,0385	0,2201
		Tempo (h)	0,42				
Moagem	Moinho com Furadeira	Potência Elétrica (W)	655,32	0,1966	0,0067	0,7077	0,0240
		Tempo (h)	0,30				
Aquecimento 2	Tanque de Aquecimento	Potência Elétrica (W)	5358,99	1,3397	0,0367	4,8231	0,1321
		Tempo (h)	0,25				
Aquecimento 3	Tanque de Aquecimento	Potência Elétrica (W)	5264,00	1,9301	0,0538	6,9485	0,1937
		Tempo (h)	0,37				
Fervura	Tanque de Fervura	Potência Elétrica (W)	5358,99	8,5744	0,2348	30,8678	0,8452
		Tempo (h)	1,60				
Fermentação	Geladeira	Potência Elétrica (W)	209,43	19,9377	1,0195	71,7758	3,6703
		Tempo (h)	95,20				
Maturação	Geladeira	Potência Elétrica (W)	209,43	20,7755	1,0624	74,7916	3,8245
		Tempo (h)	99,20				
Energia Total:				52,75	1,49	189,91	5,38

Com o inventário energético de equipamentos e o perfil térmico da fase quente foi possível obter o padrão de comportamento do consumo energético. A energia total consumida pelos equipamentos foi de 189,91 MJ. A energia consumida foi de 3,79 MJ/l, para futuras comparações este valor foi extrapolado para a produção de 100 litros, sendo estimado em 379,82 MJ/hl.

O consumo de energia por cada operação depende principalmente do tipo de operação, do estilo da cerveja, do tamanho e da idade dos equipamentos, e principalmente da quantidade de cerveja produzida. Na brassagem da cerveja, a operação que mais demanda energia é a fervura, pois é preciso manter 50 litros de mosto na temperatura de 100°C durante 60 minutos.

Na brassagem é possível reduzir um pouco o consumo alterando o estilo da cerveja, pois alguns precisam de temperaturas mais baixas de mosturação. Desta forma, durante a conversão

enzimática apenas um grupo de enzimas trabalha em sua temperatura ótima. No inventário energético pode ser visto que os processos de maior consumo foram a fermentação e a maturação, principalmente devido à idade da geladeira utilizada nos processos. A propagação dos erros de medição foi representada na coluna incerteza do inventário energético dos equipamentos. A incerteza propagada da energia total foi de 5,38 MJ.

6.3 Inventário Energético de Trabalho Humano

Conforme pode ser visto na Tabela 4, a energia total utilizada pelo trabalho humano foi estimada em 7,86 MJ e a intensidade de energia foi de 0,1578 MJ/l. Para comparações futuras, este valor foi extrapolado estimando esta mesma intensidade para a produção de 100 litros. Desta forma, o valor obtido foi de 15,78 MJ/hl.

Tabela 4 – Inventário energético de trabalho humano.

Inventário Energético de Trabalho Humano				
Operação	Parâmetros	Valor	Energia (kWh)	Energia (MJ)
Higienização dos Equipamentos	Número de Pessoas Envolvidas	1	0,3099	1,1157
	Atividade	Em pé, moderado/pesado		
	Tempo (h)	0,83		
Água para o Tanque de Aquecimento	Número de Pessoas Envolvidas	1	0,0249	0,0898
	Atividade	Em pé, leve		
	Tempo (h)	0,12		
Moagem	Número de Pessoas Envolvidas	1	0,0930	0,3347
	Atividade	Em pé, leve/moderado		
	Tempo (h)	0,33		
Trasfega 1	Número de Pessoas Envolvidas	1	0,0107	0,0385
	Atividade	Em pé, leve		
	Tempo (h)	0,05		
Adição do malte moído	Número de Pessoas Envolvidas	1	0,0620	0,2231
	Atividade	Em pé, moderado/pesado		
	Tempo (h)	0,17		
Trasfega 2	Número de Pessoas Envolvidas	1	0,0143	0,0513
	Atividade	Em pé, leve		
	Tempo (h)	0,07		
Adição de 15 litros de água no Tanque de Aquecimento	Número de Pessoas Envolvidas	1	0,0178	0,0642
	Atividade	Em pé, leve		
	Tempo (h)	0,08		
Filtragem	Número de Pessoas Envolvidas	1	0,2169	0,7810
	Atividade	Em pé, moderado		
	Tempo (h)	0,67		
Trasfega 3	Número de Pessoas Envolvidas	1	0,0178	0,0642
	Atividade	Em pé, leve		
	Tempo (h)	0,08		
Lavagem	Número de Pessoas Envolvidas	1	0,0535	0,1925
	Atividade	Em pé, leve		
	Tempo (h)	0,25		
Resfriamento	Número de Pessoas Envolvidas	1	0,1860	0,6694
	Atividade	Em pé, moderado/pesado		
	Tempo (h)	0,50		
Preparação e Adição do Fermento	Número de Pessoas Envolvidas	1	0,0697	0,2510
	Atividade	Em pé, leve/moderado		
	Tempo (h)	0,25		
Limpeza dos Equipamentos	Número de Pessoas Envolvidas	1	0,3719	1,3389
	Atividade	Em pé, moderado/pesado		
	Tempo (h)	1,00		
Envase	Número de Pessoas Envolvidas	2	0,3719	1,3389
	Atividade	Em pé, leve/moderado		
	Tempo (h)	0,67		
Sem Atividade e Eventuais Medições	Número de Pessoas Envolvidas	1	0,3626	1,3054
	Atividade	Sentado, trabalho leve		
	Tempo (h)	2,60		
Energia Total:			1,82	7,86

As atividades que mais demandaram energia foram a higienização dos equipamentos e a limpeza de equipamentos posterior a fabricação. A limpeza posterior a fabricação é mais intensa devido ao fator de absorção de água pelos grãos. São absorvidos cerca de 1 litro de água por kg de malte utilizado, totalizando aproximadamente 27 kg de bagaço para ser retirado do tanque de mosturação.

Em seguida, com aproximadamente o mesmo valor, ficaram o tempo sem atividade e eventuais medições. O processo requer que o operador fique esperando os tempos de parada proteica, de conversão enzimática e de fervura, durante a espera é preciso ficar atento ao processo fazendo medidas simples de densidade do mosto.

Durante a brassagem as atividades mais intensas foram a filtragem e o resfriamento, os dois demandam movimentos repetitivos do operador e podem ser facilmente otimizados através de uma bomba alimentícia.

7. CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

O objetivo do trabalho consiste em fazer uma análise energética do processo de fabricação de cerveja artesanal, mensurando os tempos de cada operação e relacionando a potência da operação. Para realizar a análise foi preciso desenvolver uma bancada de ensaios capaz de produzir cerveja seguido as premissas de menor consumo energético, que apenas um operador pudesse fazer todas as operações e que utilizasse a menor quantidade de equipamentos.

Com os dados das medições de potência real e tempos de utilização foi possível calcular a quantidade de energia necessária para a produção de 50 litros de cerveja. A quantidade de energia utilizada foi 197,77 MJ (3,96 MJ/l), sendo 189,91 MJ de energia elétrica (96%) e 7,86 MJ (4%) de energia humana. O preço do kWh em Porto Alegre é de R\$ 0,37, e convertendo-se a energia elétrica consumida chegou-se em 52,75 kWh, resultando em R\$ 19,51. As operações que consomem mais energia foram a Fermentação e a Maturação, devido principalmente à idade da geladeira utilizada. Estas etapas levam 14 dias, sendo 7 dias para cada uma delas. A energia consumida para manter a temperatura sob controle durante este período foi de 40,71 kWh, e o custo foi de R\$ 15,06. Em comparação com cervejarias de grande porte, o caso estudado requer de 2 a 3 vezes mais energia elétrica.

Na fabricação, a energia física humana foi de 7,86 MJ, sendo a atividade que mais demanda energia é a limpeza dos equipamentos após a brassagem, seguida da higienização dos equipamentos para iniciar a brassagem. Durante a brassagem as atividades que mais demandaram energia física foram a filtragem e o resfriamento, ambos podem obter uma significativa melhora ao utilizar uma bomba centrífuga alimentícia. A bomba elevaria o consumo de energia elétrica, mas aumentaria significativamente a qualidade da cerveja e reduziria o tempo de trabalho do operador.

Para trabalhos futuros, é imprescindível a aprimoração das operações de fermentação, maturação, filtragem e resfriamento. A principal ação é substituir a geladeira ou elaborar um sistema de controle de temperatura, em seguida instalar uma bomba alimentícia aumentando a capacidade de filtração e acelerando o processo de resfriamento.

Substituindo a geladeira por um modelo moderno de capacidade de 280 litros, estima-se consumo mensal de 25 kWh, segundo dados da ANEEL. Como os processos que utilizam a geladeira contabilizam 14 dias, o consumo pode ser aproximado para metade do valor mensal, assim o consumo total pela geladeira seria de 12,5 kWh (0,9 MJ/l) resultando em R\$ 4,63, uma economia de R\$ 10,43. Os valores monetários foram calculados em novembro de 2014.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

OLAJIRE, A.A.; **“The Brewing Industry and Environmental Challenges”**, Journal of Cleaner Production, 2012.

FADARE, D.A.; NKPUBRE, D.O.; ONI, A.O.; FALANA, A.; WAHEED, M.A.; BAMIRO, O.A.; **“Energy and Exergy Analyses of Malt Drink Production in Nigeria”**, Energy, 2010.

MUSTER-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.

WORRELL, E.; GALITSKY, C.; MARTIN, N.; **“Energy efficiency opportunities in the brewery Industry”**, Formal Rep Cement Int, 2003.

WOLFE, E.; BICKHAM S.; HOUSEMAN, D.; WOTRING, G.; SAPSIS, D.; GAROFALO, P.; HANNING, C.; **“Guia de Estudo para os Exames de Cerveja do BJCP”**, BJCP, 2012.

RESENDER, F.E.; HERMES, C.J.L.; MELO, C.; **“Um Método Alternativo para Determinar o Consumo de Energia de Refrigeradores Domésticos.”**, VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2010.

CALEGARI, R.; **“Projeto de uma Microcervejaria: Concepção, Dimensionamento e Construção”**, 2013, 14, Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

SLEMER, O.; **“Os prazeres da cerveja.”**, São Paulo: Makron Books do Brasil, 196p., 1996.

BRIGIDO, R. V.; NETTO, M. S.; **“Produção de cerveja.”**, Florianópolis, 2006. p.28. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia bioquímica) Departamento de engenharia química e engenharia de alimento, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC.

KUNZE, W.; **“Technology of Malting and Brewing”**, Edição 9, Berlim, Alemanha, 2007.

BRIGGS, D. E.; BOULTON, C.A.; BROOKES, P. A.; STEVENS, R.; **“Brewing Science and Practice”**, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England.

MAJOZI, T.; **“Minimization of energy use in multipurpose batch plants using heat storage: an aspect of cleaner production”**, Journal of Cleaner Production, 2009.

http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/17-05_materia1_3.pdf, acessado em 20/03/2014.

<http://cade.gov.br/>, acessado em 09/09/2014

ANEXO 1 – Fluxograma de processamento de cervejaria (Adaptado de KUNZE, 2007)

