

**PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA DA ESCOLA  
POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**SOLUÇÃO ENERGÉTICA COM FONTES RENOVÁVEIS PARA  
CERVEJARIAS ARTESANAIS**

THIAGO AUGUSTO SEGATTI

São Paulo - SP  
2017

THIAGO AUGUSTO SEGATTI

## **SOLUÇÃO ENERGÉTICA COM FONTES RENOVÁVEIS PARA CERVEJARIAS ARTESANAIS**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, como parte das exigências para a obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Simões Moreira

São Paulo - SP  
2017

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada à fonte.

SEGATTI, THIAGO AUGUSTO  
SOLUÇÃO ENERGÉTICA COM FONTES RENOVÁVEIS PARA  
CERVEJARIAS ARTESANAIS / T. A. SEGATTI – São Paulo, 2017.  
83 p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia.

Orientação: Prof<sup>a</sup>. Dr. José Roberto Simões Moreira.

1. Engenharia. 2. Biomassa. 3. Energia solar. 4. Cervejaria  
I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia

## **Resumo**

O presente trabalho estuda soluções, utilizando uma caldeira de biomassa e sistemas de captação de energia solar, a fim de atender a demanda energética de processos de uma microcervejaria situada no município de Sorocaba, interior do Estado de São Paulo.

Foi feito um estudo detalhado dos processos produtivos de microcervejarias nacionais, bem como suas demandas energéticas e como estas são atendidas.

Sendo assim, a caldeira de biomassa será alimentada por lenha, ou eventualmente briquete, como combustível principal e complementado pelo bagaço de malte de cevada descartado em um dos processos produtivos da cerveja. Além de aquecedores solares para fornecer água quente para determinados processos e geradores fotovoltaicos para atender parte da demanda elétrica.

## **Abstract**

The present work studies solutions, using a biomass boiler and solar energy absorbing systems, in order to supply part of the processes's demand of a craft brewery located in the city of Sorocaba, interior of the State of São Paulo.

A detailed study of the productive processes of national craft breweries was made, as well as their energy demands and how these are fulfilled.

Thus, the biomass boiler will be fueled by firewood, or possibly briquette, as the main fuel and complemented by brewer's spent grain bagasse discarded in one of the brewing processes. In addition to it, solar heaters will provide hot water for certain processes and photovoltaic generators will supply part of the electrical demand.

## **Lista de Figuras**

<b>Figura 2.1</b> – Oferta Interna de Energia no Brasil – jan/17 (BEN, 2017) .....	10
<b>Figura 2.2</b> – Oferta Interna de Energia Elétrica no Brasil jan/17 (BEN, 2017) .....	11
<b>Figura 2.3</b> – Exemplos de caldeira flamotubulares a lenha (ECAL; ARAUTERM) ..	18
<b>Figura 2.4</b> – Média anual da radiação solar no plano inclinado do Brasil (DMA,2006) .....	20
<b>Figura 3.1</b> – Processo de produção da cerveja .....	26
<b>Figura 3.2</b> – Processo de preparo do mosto.....	27
<b>Figura 3.3</b> – Exploração e distribuição de gás natural no Estado de São Paulo (GESP, 2016) .....	34
<b>Figura 4.1</b> – Levantamento do potencial solar no Estado de São Paulo (INPE, 2013) .....	37
<b>Figura 4.2</b> – Sistema de aquecimento solar para alimentar o processo de envase..	45
<b>Figura 4.3</b> – Sistema de aquecimento solar para alimentar a caldeira .....	46
<b>Figura 4.4</b> – Desenhos esquemáticos da caldeira CVS-VL (ARAUTERM) .....	52
<b>Figura 4.5</b> – Caldeira CVS-VL (ARAUTERM) com sua chaminé alimentando uma câmara de secagem de bagaço de malte de cevada .....	56
<b>Figura 4.6</b> – Balanço energético final .....	58
<b>Figura 4.7</b> – Sistema fotovoltaico em rede split-phase (SMA) .....	61
<b>Figura 5.1</b> – Balanço energético convencional da cervejaria em estudo .....	63

## **Lista de Tabelas**

<b>Tabela 2.1</b> – Empreendimentos nacionais em operação que utilizam biomassa (ANEEL, 2017) .....	12
<b>Tabela 2.2</b> – Estimativa da quantidade de resíduos de madeira gerados no Brasil (ESCOBAR, 2016) .....	13
<b>Tabela 2.3</b> – Composição química elementar da madeira em base seca (KLOCK, 2005) ...	13
<b>Tabela 2.4</b> – Composição média macromolecular da madeira (KLOCK, 2005) .....	14
<b>Tabela 2.5</b> – Composição química do bagaço de malte em base seca (DRAGONE, 2007)	15
<b>Tabela 2.6</b> – Poder Calorífico do bagaço de malte de cevada variando em função de seu teor de umidade (CORDEIRO, 2011).....	16
<b>Tabela 2.7</b> – Composição química elementar do bagaço de malte de cevada em base seca (VELEBIL, 2016).....	16
<b>Tabela 2.8</b> – Os cinco países com maior capacidade instalada em geração fotovoltaica (IEA, 2017) .....	23
<b>Tabela 3.1</b> – Maiores nações produtoras de cerveja (WORLDTLAS, 2017).....	25
<b>Tabela 3.2</b> – Consumo de água nos processos produtivos da cervejaria (CETESB, 2005) .	33
<b>Tabela 3.3</b> – Consumo de energia térmica nos processos produtivos da cervejaria (CETESB, 2005) .....	35
<b>Tabela 3.4</b> – Fontes de consumo de energia elétrica em uma cervejaria (SORRELL, 2000)35	
<b>Tabela 4.1</b> – Consumo de calor na microcervejaria .....	38
<b>Tabela 4.2</b> – Consumo de água na microcervejaria.....	39
<b>Tabela 4.3</b> – Tabela climática de Sorocaba – SP (INMET, 2014) .....	41
<b>Tabela 4.4</b> – Dimensionamento do sistema de aquecimento solar .....	43
<b>Tabela 4.5</b> – Componentes do sistema de aquecimento solar.....	47
<b>Tabela 4.6</b> – Composição molar para 100 kg de madeira.....	48
<b>Tabela 4.7</b> – Composição molar para 100 kg de bagaço de malte de cevada .....	49
<b>Tabela 4.8</b> – Quadro de desempenho da caldeira (ARAUTERM) .....	51
<b>Tabela 4.9</b> – Variação do poder calorífico do bagaço de malte em função de seu teor de umidade.....	53
<b>Tabela 4.10</b> – Variação da quantidade de calor produzida pela combustão do bagaço de malte em função de seu teor de umidade .....	54
<b>Tabela 4.11</b> – Relação entre as quantidades de bagaço de malte e lenha para combustão na caldeira .....	55
<b>Tabela 4.12</b> – Dados finais da caldeira.....	58
<b>Tabela 4.13</b> – Componentes do sistema fotovoltaico.....	62
<b>Tabela 5.1</b> – Investimento inicial para o arranjo térmico proposto .....	66
<b>Tabela 5.2</b> – Relação entre o consumo e o custo de caldeira disponíveis para a microcervejaria em estudo .....	67
<b>Tabela 5.3</b> – Investimento inicial para o sistema solar fotovoltaico proposto .....	68
<b>Tabela 5.4</b> – Projeção do fluxo de caixa para a implantação do sistema de geração fotovoltaica .....	70
<b>Tabela 5.5</b> – Análise financeira da implantação do sistema de geração fotovoltaica .....	71
<b>Tabela 5.6</b> – Projeção do fluxo de caixa para a implantação do arranjo térmico proposto em comparação com um sistema a gás natural .....	72
<b>Tabela 5.7</b> – Análise financeira da implantação do arranjo térmico proposto em comparação com um sistema alimentado por uma caldeira a gás natural (GN) .....	73
<b>Tabela 5.8</b> – Projeção do fluxo de caixa para a implantação do arranjo térmico proposto em comparação com um sistema de aquecimento elétrico .....	74
<b>Tabela 5.9</b> – Projeção do fluxo de caixa para a implantação do arranjo térmico proposto em comparação com um sistema a gás GLP.....	75
<b>Tabela 5.10</b> – Análise financeira da implantação do arranjo térmico proposto.....	76

## Sumário

1. Introdução.....	9
2. Revisão bibliográfica.....	10
2.1. Matriz energética brasileira.....	10
2.1.1. Biomassa .....	11
2.1.1.1. Resíduo de madeira.....	12
2.1.1.2. Briquete .....	14
2.1.1.3. Bagaço de malte da cevada .....	15
2.1.1.4. Energia liberada na combustão da biomassa.....	16
2.1.1.4.1. Caldeiras para geração de vapor.....	17
2.1.1.5. Secagem de biomassa .....	19
2.1.2. Energia Solar.....	19
2.1.2.1. Aproveitamento térmico.....	21
2.1.2.1.1. Coletores solares.....	21
2.1.2.1.2. Reservatório térmico.....	22
2.1.2.2. Aproveitamento fotovoltaico.....	23
2.1.2.2.1. Painéis fotovoltaicos .....	23
2.1.2.2.2. Legislação.....	24
3. Produção artesanal de cerveja.....	25
3.1. Processo produtivo da cerveja .....	25
3.1.1. Obtenção do malte .....	26
3.1.2. Preparo do mosto .....	27
3.1.2.1. Moagem .....	27
3.1.2.2. Maceração .....	28
3.1.2.3. Filtração .....	28
3.1.2.4. Fervura .....	29
3.1.2.5. Clarificação .....	29
3.1.2.6. Resfriamento .....	29
3.1.3. Fermentação .....	29
3.1.4. Processamento .....	30
3.1.4.1. Maturação .....	30
3.1.4.2. Filtração .....	31
3.1.4.3. Carbonatação.....	31
3.1.5. Envase .....	31
3.1.5.1. Lavagem de garrafas .....	32
3.1.5.2. Envasamento .....	32
3.1.5.3. Pasteurização.....	32
3.2. Demandas .....	32
3.2.1. Consumo de água .....	33
3.2.2. Consumo de energia.....	33
4. Proposta de solução energética.....	36
4.1. Potencial energético solar.....	36
4.2. Arranjo térmico.....	38
4.2.1. Aquecimento solar.....	39
4.2.1.1. Área coletora .....	40
4.2.1.2. Reservatório térmico .....	44
4.2.1.3. Sistema de aquecimento solar .....	46
4.2.2. Combustão direta da biomassa.....	47
4.2.2.1. Dimensionamento da caldeira .....	49
4.2.2.2. Combustível para a caldeira .....	52

4.3.	Arranjo elétrico .....	59
4.3.1.	Sistema fotovoltaico .....	59
5.	Análise de viabilidade econômica.....	63
5.1.	Investimento .....	65
5.1.1.	Investimento para o arranjo térmico proposto .....	65
5.1.2.	Investimento para o arranjo elétrico proposto.....	67
5.3.	Receitas .....	68
5.4.	Análise financeira .....	69
6.	Conclusão e considerações finais .....	77
7.	Bibliografia.....	78
	Anexo A - Caldeira .....	81

## **1. Introdução**

Existem evidências indicando que há 8.000 anos atrás, já existia uma bebida elaborada com cereais que hoje é conhecida como cerveja. Seu princípio básico de produção permaneceu inalterado.

A diferença entre uma cervejaria e uma microcervejaria está em sua produção. Uma microcervejaria no Brasil pode produzir até 6.000 litros por cozimento, o que geraria perto de 240.000 litros de cerveja por mês, qualquer número acima disto já é considerado como uma cervejaria de pequeno, médio ou grande porte. No entanto, a média da produção mensal das microcervejarias nacionais é de 20.000 litros e 91 % destas encontram-se nas regiões sul e sudeste do país (ICB, 2016).

O mercado de cervejas artesanais no Brasil tem apresentado um crescimento contínuo nos últimos dez anos, apesar do volume de vendas das cervejarias de grande porte (mainstream) ter forte relação com a economia do país. Considerando o ano de 2015, o número de microcervejarias cresceu aproximadamente 17%, ao passo que o volume de vendas de cerveja no país caiu 2% no mesmo ano e 1,8% no ano seguinte (ICB, 2016).

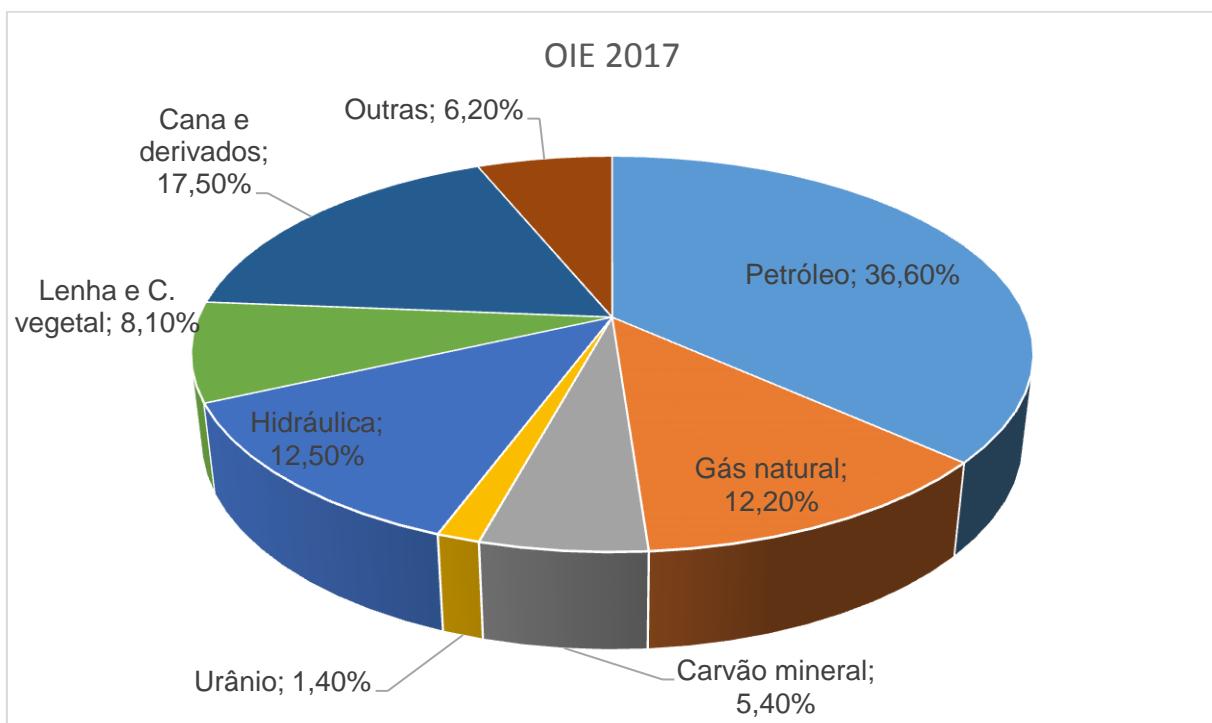
Ao estudar o processo produtivo de uma microcervejaria, é possível perceber que o mesmo não difere muito de uma cervejaria convencional, exceto pela escala de produção. Uma microcervejaria possui uma alta demanda de energia térmica tanto para calor de processo como para refrigeração, as demandas por calor (40°C até 120°C) são comumente atendidas por intermédio de aquecedores elétricos ou a gás, e para a refrigeração (-0,5°C até 12°C) é utilizada energia elétrica (CETESB, 2005).

A partir daí a proposta do presente trabalho é estudar a viabilidade técnico-econômica de atender totalmente ou parte desta demanda energética com o uso de coletores solares para aproveitar a energia térmica do Sol, painéis fotovoltaicos para a demanda elétrica, uma caldeira de biomassa alimentada por cavaco de madeira e complementado com o bagaço de malte que é descartado no processo.

## 2. Revisão bibliográfica

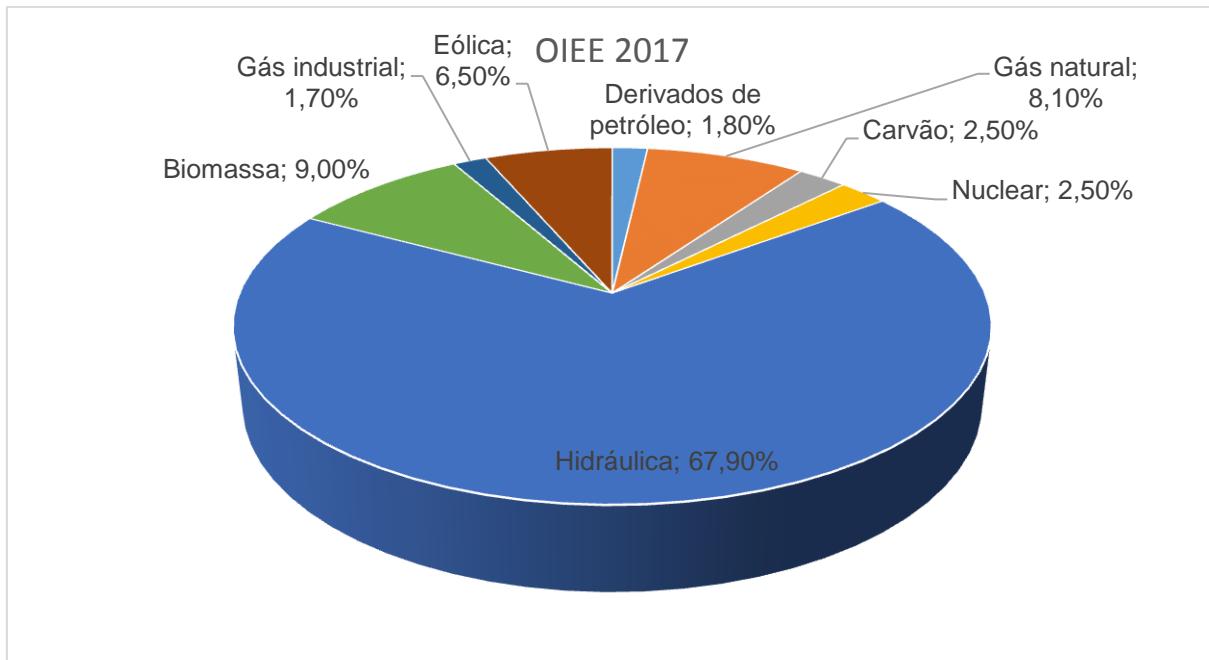
### 2.1. Matriz energética brasileira

Na matriz energética nacional, as fontes renováveis de energia possuem um papel de destaque. Estas são responsáveis por aproximadamente 40% da oferta interna de energia total do país e a figura 2.1 mostra detalhadamente a Oferta Interna de Energia (OIE) no Brasil, e nesta é possível ver a grande participação do petróleo como fonte de energia (36,6%), seguida da cana-de-açúcar e seus derivados (17,5%) e em seguida a energia hidráulica (12,5%) praticamente empatada com o gás natural.



**Figura 2.1 – Oferta Interna de Energia no Brasil – jan/17 (BEN, 2017).**

A figura 2.2 mostra a Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) e esta já mostra um cenário bem diferente, as fontes renováveis dominam esta oferta. A energia hidráulica corresponde a quase 68% da oferta total de energia elétrica, seguida dos 9% da energia proveniente da biomassa. Estas duas somadas à energia eólica correspondem a 83,4% de toda OIEE.



**Figura 2.2 – Oferta Interna de Energia Elétrica no Brasil jan/17 (BEN, 2017).**

Com o crescente consumo mundial de energia (2% a.a.) e tendo como principal fonte os combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás), há uma grande necessidade de viabilizar fontes renováveis para reduzir a dependência destes combustíveis, reduzindo assim a exaustão gradativa das reservas de combustíveis fósseis, a emissão de poluentes e também aumentando a segurança energética.

Outra grande desvantagem dos combustíveis fósseis se deve ao fato de que sua produção está concentrada em pouquíssimos países e seus maiores consumidores são também, as maiores economias do mundo (EUA, China, Japão, Índia, Coréia do Sul, Alemanha e França).

### 2.1.1. Biomassa

Existem grandes oportunidades para a geração de energia por intermédio da biomassa no Brasil, e esta já conta com uma participação de 25,6% (lenha, carvão vegetal, cana e seus derivados) como é possível analisar na Figura 2.1.

A biomassa é toda matéria orgânica que pode ser usada para gerar energia elétrica ou térmica. No Brasil, o setor sucroalcooleiro e o setor de papel e celulose são os mais desenvolvidos no uso de biomassa, ambos usam resíduos de processo para cogeração de energia elétrica e calor.

Na tabela 2.1 é possível verificar empreendimentos em operação que utilizam variados tipos de biomassa para gerar energia em território nacional, sendo que o bagaço de cana-de-açúcar representa quase 80% da potência instalada. Já o licor negro, resíduo proveniente da indústria de papel e celulose, é a biomassa que possui a segunda maior potência instalada com pouco mais de 16% do total, seguido dos resíduos de madeira que também são usados como combustíveis na indústria de papel e celulose, além da indústria madeireira.

**Tabela 2.1** – Empreendimentos nacionais em operação que utilizam biomassa (ANEEL, 2017).

Tipo de Biomassa	Empreendimentos em operação que utilizam biomassa como combustível.		
	Potência (kW)	%	Quantidade
<b>Combustível</b>			
<b>Licor Negro</b>	2.261.136	16,19	17
<b>Resíduos de madeira</b>	386.100	2,76	50
<b>Capim elefante</b>	65.700	0,47	3
<b>Biogás</b>	120.384	0,86	16
<b>Bagaço de cana-de-açúcar</b>	11.042.010	79,06	397
<b>Óleo de palmiste</b>	4.350	0,03	2
<b>Carvão vegetal</b>	41.197	0,29	7
<b>Casca de arroz</b>	45.333	0,32	12
<b>Total</b>	13.966.210	100	504

### 2.1.1.1. Resíduo de madeira

Cerca de 30 milhões de toneladas de resíduos de madeira são gerados anualmente no Brasil. A tabela 2.2 detalha uma distribuição desta estimativa, evidenciando a grande quantidade de resíduo de madeira que a indústria madeireira gera (27,75 milhões de toneladas por ano), seguido das áreas urbanas e construção civil que se somados, geram 9,3% de todo o resíduo de madeira no país.

**Tabela 2.2** – Estimativa da quantidade de resíduos de madeira gerados no Brasil (ESCOBAR, 2016).

Setor	Resíduos de madeira [10 <sup>3</sup> t/ano]	[%]
Indústria madeireira	27.750	90,7
Construção civil	923	3,0
Áreas urbanas	1.930	6,3

Apesar da grande geração de resíduos de madeira, boa parte é simplesmente abandonada ou queimada sem aproveitamento energético.

Se observarmos o baixo custo da madeira plantada no Brasil, devido a 60 anos de estudo em melhoramento genético do eucalipto, unido a boas características energéticas e a possibilidade do eucalipto ser produzido em várias regiões do país, pode-se concluir que o aproveitamento do resíduo de madeira como fonte de energia no país é uma alternativa que traz benefícios socioeconômicos, e também ambientais, devido à menor emissão de poluentes.

A composição química elementar da madeira de diversas espécies tem pequena variação, e esta pode ser observada na tabela 2.3 com as concentrações de carbono (49 a 50%), hidrogênio (6%), oxigênio (44 a 45%) e nitrogênio (0,1 a 1%).

**Tabela 2.3** – Composição química elementar da madeira em base seca (KLOCK, 2005).

Elemento	Porcentagem
C	49 a 50
H	6
O	44 a 45
N	0,1 a 1

Além dos elementos destacados na tabela acima, a madeira também apresenta substâncias minerais em menores quantidades, tais como Cálcio, Potássio, Magnésio, entre outros e se considerarmos uma madeira de eucalipto, temos ainda um teor de cinzas que varia de 0,3 a 0,6% (FOELKEL, 2011).

Estes componentes químicos, com exceção dos minerais, constituem as substâncias macromoleculares da madeira, são elas: celulose, hemicelulose e lignina. A tabela 2.4 detalha as porcentagens de cada uma destas substâncias e

nesta é possível verificar que a celulose corresponde a quase metade da composição da madeira (40 a 47%), seguida da poliose (um tipo de hemicelulose) que está em uma faixa de 25 a 35% e a lignina na faixa de 16 a 30%, o restante são extrativos (KLOCK, 2005).

**Tabela 2.4 – Composição média macromolecular da madeira (KLOCK, 2005).**

Constituinte	Porcentagem
Celulose	40 a 47
Poliose (Hemicelulose)	25 a 35
Lignina	16 a 30
Extrativos	1 a 8

### 2.1.1.2. Briquete

Briquete é um tipo de biomassa que consiste de resíduos ligno-celulósicos compactados sob pressão e temperatura elevadas durante um processo chamado de briquetagem. As matérias-primas que podem compor o briquete são: serragem, resíduo de madeira, casca de arroz, maravalha, palha de milho, bagaço de cana, sabugo, casca de algodão, casca de café, feno, entre outros (LIPPEL, 2013).

O objetivo principal da briquetagem é o aumento da concentração energética da biomassa, a uniformidade de tamanho e formato do produto final, facilidade de armazenamento, segurança contra incêndios, além de agregar valor à resíduos agroindustriais (EMBRAPA, 2012).

No Brasil é possível encontrar briquetes com densidades que variam de 1.000 a 1.500 kg/m<sup>3</sup>, um poder calorífico superior (PCS) de 4.000 a 4.800 kcal/kg, teores de voláteis de 81%, cinzas de 1,2% e carbono fixo de 18,8% (LIPPEL, 2013). Além disto, os briquetes possuem uma umidade que varia entre 7 e 12% (EMBRAPA, 2012), são manipulados e embalados, não possuem contaminantes com insetos e pragas.

A partir daí esta é uma alternativa viável se comparada com a lenha, principalmente em períodos chuvosos onde há a escassez da mesma.

### 2.1.1.3. Bagaço de malte da cevada

O malte da cevada utilizado na produção de cerveja gera um bagaço durante a etapa de preparo do mosto, conforme já mencionado anteriormente. Este bagaço consiste basicamente da casca do grão de cevada e sua composição química varia de acordo com o tipo de cevada usado e seu tempo de colheita, além das condições de maltagem, mosturação e os tipos de adjuntos adicionados no processo (HUIGE, 1994; SANTOS et al, 2003).

Em linhas gerais o bagaço de malte pode ser considerado como um material lignocelulósico rico em proteínas (20 a 30 %) e fibras (70 a 80 %) (HERNANDEZ et al., 1999). Uma cervejaria produz em média 20 kg de bagaço de malte para cada hectolitro de cerveja produzido com uma umidade que varia de 80 a 86% (REINOLD, 1997).

Apesar da grande quantidade de bagaço produzido, seu reaproveitamento é pouco desenvolvido, o mais comum é armazenar e depois vender o bagaço seco ou úmido. Porém, devido a sua alta taxa de umidade, seu armazenamento e seu transporte são problemáticos devendo ser comercializado para clientes situados a um raio máximo de 50 km da cervejaria em condições brasileiras e consumido em até 10 dias (CHANDLER, 1990; JOHNSON, 1987).

A composição química do bagaço de malte de cevada está apresentada na tabela 2.5 e é possível perceber uma grande diferença entre a composição das madeiras florestais em geral (tabela 2.4) e o bagaço de malte. A hemicelulose e a lignina correspondem com a maior parte da composição e se somadas passam da metade. Já a celulose corresponde a 16,78% e 4,6% são cinzas (DRAGONE, 2007).

**Tabela 2.5 – Composição química do bagaço de malte em base seca (DRAGONE, 2007).**

Componente	[%p/p]
Celulose (glucana)	16,78
Hemicelulose	28,42
Lignina	27,78
Cinzas	4,60
Grupos acetil	1,35
Proteínas	15,25
Extrativos	5,82

O bagaço de malte além de apresentar boas características nutricionais, existem estudos que comprovam suas boas características para geração de energia com sua queima. A tabela 2.6 mostra seu poder calorífico superior e sua densidade variando a umidade do bagaço, nesta é possível perceber um ganho considerável no poder calorífico (variando entre 7 até 38,8 % de aumento) com a redução de umidade (CORDEIRO, 2011).

**Tabela 2.6** – Poder Calorífico do bagaço de malte de cevada variando em função de seu teor de umidade (CORDEIRO, 2011).

Umidade [%]	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	PCS [kcal/kg]
50	219,0	2.656
40	161,1	3.687
30	171,0	4.037
20	117,2	4.697
15	123,0	5.026

Já a tabela 2.7 detalha a composição elementar do bagaço de malte em base seca, nesta é possível perceber a similaridade com a composição da madeira (destacada na tabela 2.3), com exceção de uma maior taxa de nitrogênio, da aparição do enxofre e cinzas na composição (VELEBIL, 2016).

**Tabela 2.7** – Composição química elementar do bagaço de malte de cevada em base seca (VELEBIL, 2016).

Elemento	Porcentagem
C	51,92
H	7,44
N	4,38
S	0,34
O	31,82
Cinzas	4,10

#### 2.1.1.4. Energia liberada na combustão da biomassa

A combustão direta da biomassa é uma das formas mais antigas de se obter energia e esta consiste da oxidação rápida do combustível. No entanto, nem toda a energia gerada na combustão pode ser aproveitada, uma parcela desta energia é perdida nos equipamentos de combustão (fogões, fornalhas, fornos, caldeiras, aquecedores de água, etc.). Esta ineficiência pode ser proveniente de perdas de

calor por radiação, combustão incompleta ou energia perdida com os gases de exaustão. Estas perdas podem variar entre 10 a 60%.

Mesmo assim, a lenha e demais tipos de biomassa são bastante utilizadas como combustíveis devido ao seu baixo custo, tem queima rápida, é facilmente encontrada e gera poucos resíduos que podem ser usados na agricultura e silvicultura como fertilizantes e corretivos de solo. Além disto, os equipamentos empregados no processo são simples e tecnicamente bem conhecidos.

O processo de combustão de biomassa pode ser dividido em seis fases que podem acontecer simultaneamente dentro do queimador e estão descritas abaixo:

- I. Secagem da biomassa para reduzir seu teor de umidade, aumentando seu poder calorífico. Quanto maior for o teor de umidade da biomassa, maior será a energia gasta nesta fase e menor será o rendimento do processo. Esta fase acontece até cerca de 200°C.
- II. Pirólise térmica da biomassa, aquecendo a mesma de 280 a 400°C para que os compostos voláteis da matéria sejam liberados e sustentem a reação para fornecer calor para a secagem da biomassa (primeira fase).
- III. Ignição dos gases voláteis com temperaturas acima de 400°C.
- IV. Combustão completa dos gases voláteis e formação do carvão.
- V. Combustão do carvão entre 600 e 800°C, este carvão é rico em carbono fixo.
- VI. Término do processo, extinção da queima e descarte das cinzas.

#### **2.1.1.4.1. Caldeiras para geração de vapor**

As caldeiras de biomassa dependem do tipo de biomassa, da escala da unidade, nível de automação e potência instalada. Estas caldeiras possuem uma emissão de carbono muito mais baixa que caldeiras convencionais, além de seu combustível (lenha ou outros tipos de biomassas) ser considerado neutro em relação à esta emissão, diferentemente dos combustíveis fósseis das caldeiras convencionais.

Apesar da biomassa ser um combustível mais barato, sustentável e de menor impacto ao meio ambiente em comparação com combustíveis fósseis, uma caldeira

para gerar energia a partir da queima desta biomassa possui um volume consideravelmente maior do que uma caldeira convencional devido às características específicas de combustão.

A caldeira mais comum para se queimar combustíveis baseados em madeiras é a caldeira de grelha em leito fixo. Estas são constituídas de uma fornalha sustentando um leito fixo de queima, sendo o combustível alimentado sobre uma grelha móvel que permite a posterior retirada das cinzas. A transferência de calor ocorre por radiação para as paredes do leito e por convecção dos gases quentes.

A temperatura de trabalho varia entre 850 a 1.000 °C minimizando a formação de NOx e evitando a fusão das cinzas na grelha. A figura 2.3 ilustra duas caldeiras de grelha em leito fixo flamo tubulares a lenha, a caldeira da esquerda é do tipo horizontal e a da direita vertical.



**Figura 2.3** – Exemplos de caldeira flamo tubulares a lenha: à esquerda uma caldeira de corpo horizontal do fabricante ECAL, à direita uma caldeira de corpo vertical do fabricante ARAUTERM.

Com a combustão dos principais constituintes da biomassa vegetal (lignina, hemicelulose, celulose, extractivos), suas moléculas são separadas por intermédio da oxidação e os átomos presentes nestas moléculas sofrem alterações, produzindo assim os produtos da combustão (tais como: dióxido e monóxido de carbono, água, óxidos de nitrogênio e enxofre, etc.).

A formação destes produtos gera energia, sendo que os principais liberadores desta energia são o hidrogênio e o carbono. Esta energia gerada é conhecida como entalpia de combustão.

Para máximo aproveitamento da energia do combustível, a combustão se dá em condições de excesso de ar.

#### **2.1.1.5. Secagem de biomassa**

O processo de secagem da biomassa tem como objetivo reduzir a umidade da mesma. Para tanto, a água em estado líquido que está presente nesta biomassa deve ser transformada em seu estado gasoso não saturado.

Materiais lignocelulósicos podem ser utilizados como biomassa e a secagem dos mesmos exige uma atenção maior do que a maioria dos sólidos. Isto acontece devido à parte do líquido que se aloja no interior de suas fibras e só pode migrar para o ar seco com a difusão entre as fibras. Tal difusão é muito lenta, permitindo que a superfície deste sólido fique completamente seca e seu interior ainda apresente líquido (FOUST, 1980).

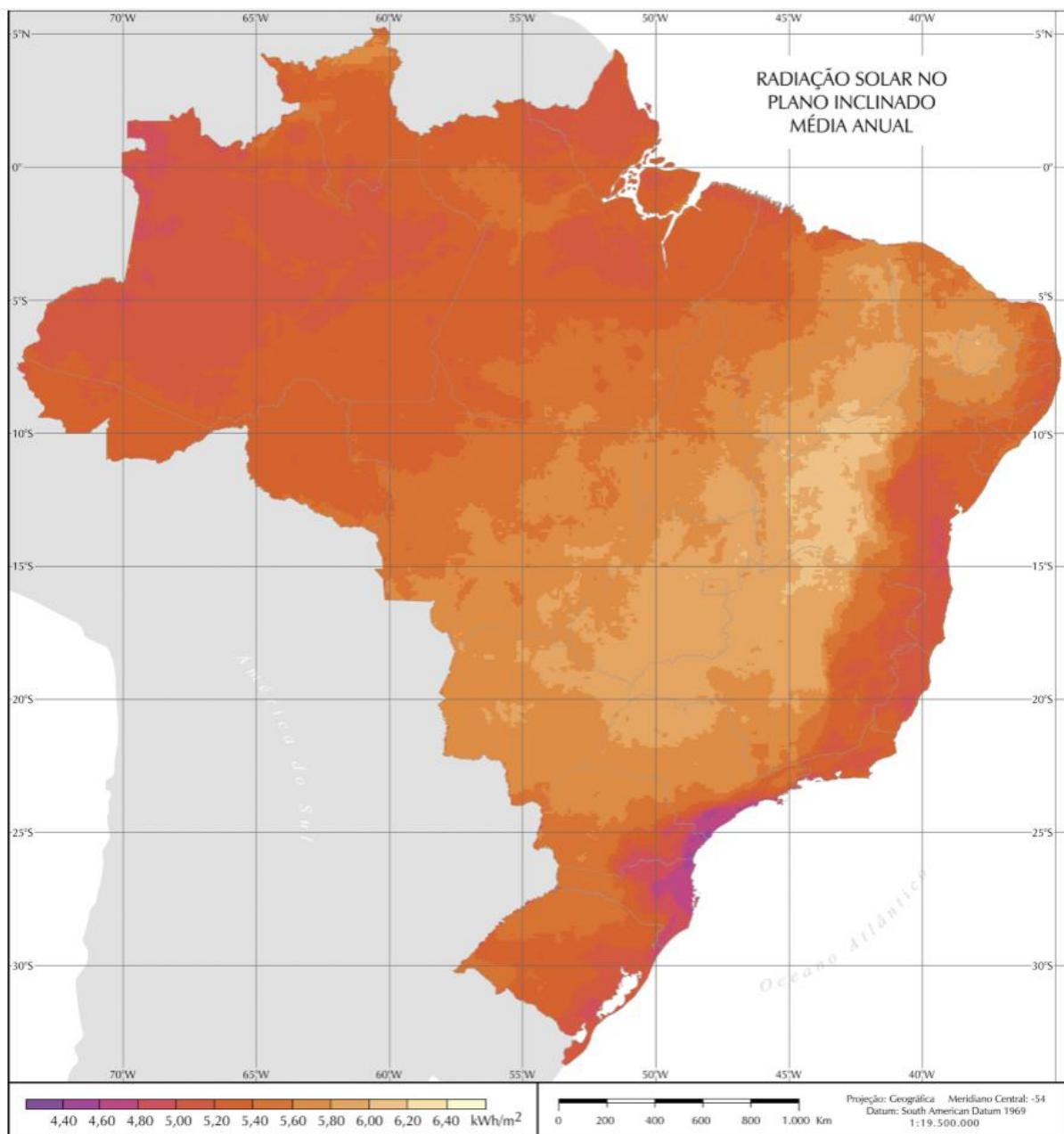
#### **2.1.2. Energia Solar**

A energia solar pode ser proveniente da luz ou do calor do Sol e existem diferentes meios para aproveitar esta energia. Alguns exemplos são o uso da radiação solar para aquecimento de fluidos e ambientes, além de geração de potência elétrica ou mecânica. Além disto, pode ser convertida diretamente em energia elétrica por intermédio de efeitos termoelétrico ou fotovoltaico em determinados materiais.

Os meios mais comuns de se aproveitar a fonte solar é o aquecimento de fluidos por intermédio de coletores ou concentradores solares ou a conversão direta dos fótons contidos na luz solar em energia elétrica por intermédio de células solares, conhecido como efeito fotoelétrico.

O aproveitamento da energia solar proporciona benefícios ambientais e socioeconômicos. Do ponto de vista ambiental, contribui para a redução da emissão de gases poluentes e materiais particulados. Já sob o aspecto socioeconômico, contribui para a geração de empregos locais, aumento da arrecadação e aumento de investimentos.

Além disso, o potencial brasileiro para o aproveitamento desta energia é altíssimo. A figura 2.4 mostra a média anual da radiação solar no plano inclinado do Brasil, nesta é possível perceber a alta radiação em regiões do Nordeste (até 6,4 kWh/m<sup>2</sup>) e boas condições para o norte do Estado de São Paulo (até 6,2 kWh/m<sup>2</sup>).



**Figura 2.4 – Média anual da radiação solar no plano inclinado do Brasil (DMA,2006).**

### **2.1.2.1. Aproveitamento térmico**

Ao final de 2015, a capacidade solar térmica total instalada no mundo chegou a 435,9 GW. Sendo que a China é responsável por 71% deste total e o Brasil chega perto de 2% (IEA, 2017).

O aproveitamento solar térmico consiste de captar a radiação solar por intermédio de coletores solares, que funcionam como trocadores de calor com um fluido passando por estes para absorver o calor proveniente da radiação solar captada.

Os principais aspectos que devem ser observados para o bom aproveitamento térmico solar estão listados abaixo:

- Sombreamento: evitar áreas de sombra durante o dia, garantindo uma boa incidência de sol para a instalação do sistema;
- Área coletora: dimensionada para atender a demanda pré-estabelecida;
- Orientação: os coletores solares devem estar direcionados para o Norte, quando instalados em países do hemisfério Sul, e com uma inclinação de dez graus a mais do que a latitude do local, melhorando o aproveitamento durante o inverno;
- Armazenamento: prever espaço para o reservatório térmico que será responsável por distribuir a água quente;
- Qualidade: todos os componentes devem resistir às intempéries locais.

Para uma instalação convencional de aquecimento solar de água, serão necessários os coletores solares mencionados anteriormente, reservatório térmico, circuito hidráulico para conectar os coletores ao reservatório térmico, conexão com a rede de água, conexão entre o reservatório e toda a aplicação, válvulas de alívio de pressão e limitadoras de temperatura da água.

#### **2.1.2.1.1. Coletores solares**

Existem três tipos de coletores solares no mercado brasileiro e os mesmos estão descritos logo abaixo:

- Coletor solar plano fechado: consiste de uma caixa com um absorvedor, isolamento térmico no fundo e nas laterais e uma cobertura transparente para gerar o efeito estufa dentro do coletor. Seu absorvedor é normalmente feito de alumínio com pintura escura, seu circuito hidráulico é de cobre, caixa de alumínio e sua cobertura é de vidro. Opera com temperaturas de até 90°C;
- Coletor solar plano aberto: é todo feito de material polimérico e opera com temperaturas de no máximo 50°C;
- Coletor solar com tubos evacuados: semelhante ao coletor fechado quanto à aplicação, mas de forma construtiva diferente. Possui um absorvedor tubular dentro de um tubo transparente com um isolamento térmico adquirido por intermédio do vácuo entre eles.

O objetivo de cada um dos três tipos de coletores é o aquecimento de água (ou qualquer outro fluido que seja utilizado nos mesmos), porém cada um difere em sua aplicação.

O coletor solar plano aberto não possui proteção para perdas térmicas, possui um baixo custo e é muito utilizado no aquecimento de piscinas. Já o coletor solar plano fechado, possui uma maior eficiência quando comparado ao coletor aberto e é muito utilizado para aquecimento de água para banho e lavatórios.

Por fim, o coletor solar de tubos evacuados possui uma eficiência superior aos outros dois tipos e isto se deve à sua forma construtiva. Seu tubo de vidro externo garante que os raios solares sejam convergidos e ampliados para o tubo interno do coletor (tubo que recebe o fluido), possibilitando que este receba radiação solar perpendicular na maior parte do dia. Sendo assim, este coletor pode ter as mesmas aplicações que os anteriores e ainda pode ser usado em aplicações industriais devido às suas perdas serem menores e consegue chegar a maiores temperaturas.

#### **2.1.2.1.2. Reservatório térmico**

O reservatório térmico tem a função de armazenar o fluido que sai dos coletores, além de manter sua temperatura. Para tanto, conta com um tanque interno de aço inoxidável para armazenar o fluido, com uma camada de poliuretano ao seu redor e um acabamento externo em chapa metálica ou plástico. Sua

configuração possibilita uma entrada de água fria, uma saída de água quente, uma saída dos coletores e um retorno para os mesmos.

### 2.1.2.2. Aproveitamento fotovoltaico

O mercado mundial fotovoltaico vem crescendo muito nos últimos anos, e segundo a revista PV Magazine em 2016 a capacidade instalada chegou a 303 GWp, um aumento de 76 GW em relação a 2015, que por sua vez havia apresentado um crescimento de 25% em relação a 2014 (IEA, 2017). A tabela 2.8 mostra os dez países com maior capacidade instalada de geração fotovoltaica, é possível verificar que a China lidera este ranking com quase o dobro de capacidade instalada do que o segundo colocado (Japão). Além disto, destaca-se que as principais potências da Europa estão nesta lista.

**Tabela 2.8** – Os dez países com maior capacidade instalada em geração fotovoltaica (IEA, 2017).

Pos.	País	Capacidade instalada
1º	China	78,1 GW
2º	Japão	42,8 GW
3º	Alemanha	41,2 GW
4º	EUA	40,3 GW
5º	Itália	19,3 GW
6º	Reino Unido	11,6 GW
7º	India	9 GW
8º	França	7,1 GW
9º	Austrália	5,9 GW
10º	Espanha	5,5 GW

No entanto, a representatividade da geração de energia fotovoltaica do Brasil no cenário mundial ainda é pequena, visto que ao final de 2016 havia 81 MWp de capacidade instalada no país. Além disto, este valor não representa mais do que 0,05% de toda a capacidade instalada do Brasil (NASCIMENTO, 2017).

#### 2.1.2.2.1. Painéis fotovoltaicos

Os painéis fotovoltaicos são responsáveis por converter a radiação solar incidente nestes em energia elétrica em corrente contínua. Esta energia pode ser consumida diretamente, armazenada em baterias ou transmitida para a rede de distribuição local com auxílio de um inversor de frequência (permitindo a conversão de corrente contínua para alternada).

O painel é composto de células fotovoltaicas em série envolvidas por duas camadas de etilvinila (EVA), em cima de uma base e fechada por um vidro ou filme de fluoreto de polivinila (Tedlar) (SIMÕES, 2017).

Além dos painéis, um sistema fotovoltaico conta com baterias (quando isolados da rede ou necessidade de autonomia), controlador de carga, inversor de frequência, suporte (necessário para fixar os painéis), condutores e quadros de conexão.

#### **2.1.2.2.2. Legislação**

As Resoluções Normativas Nº 482 e Nº 687 da ANEEL entraram em vigor em 2012 e 2016, respectivamente. Ambas são responsáveis por regular o segmento de geração distribuída, permitindo que centrais de microgeração (capacidade instalada de até 75 kW) e minigeração (capacidade instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW para energia solar).

Estas Resoluções permitem que o consumidor conecte sua central geradora de energia elétrica na rede da concessionária e toda a energia gerada contará como créditos para posterior abatimento na conta de energia elétrica deste consumidor. No entanto, a potência instalada da central geradora não pode ser superior à carga instalada da unidade ou à demanda contratada pela unidade consumidora e além disto, haverá uma taxa mínima a ser cobrada.

### **3. Produção artesanal de cerveja**

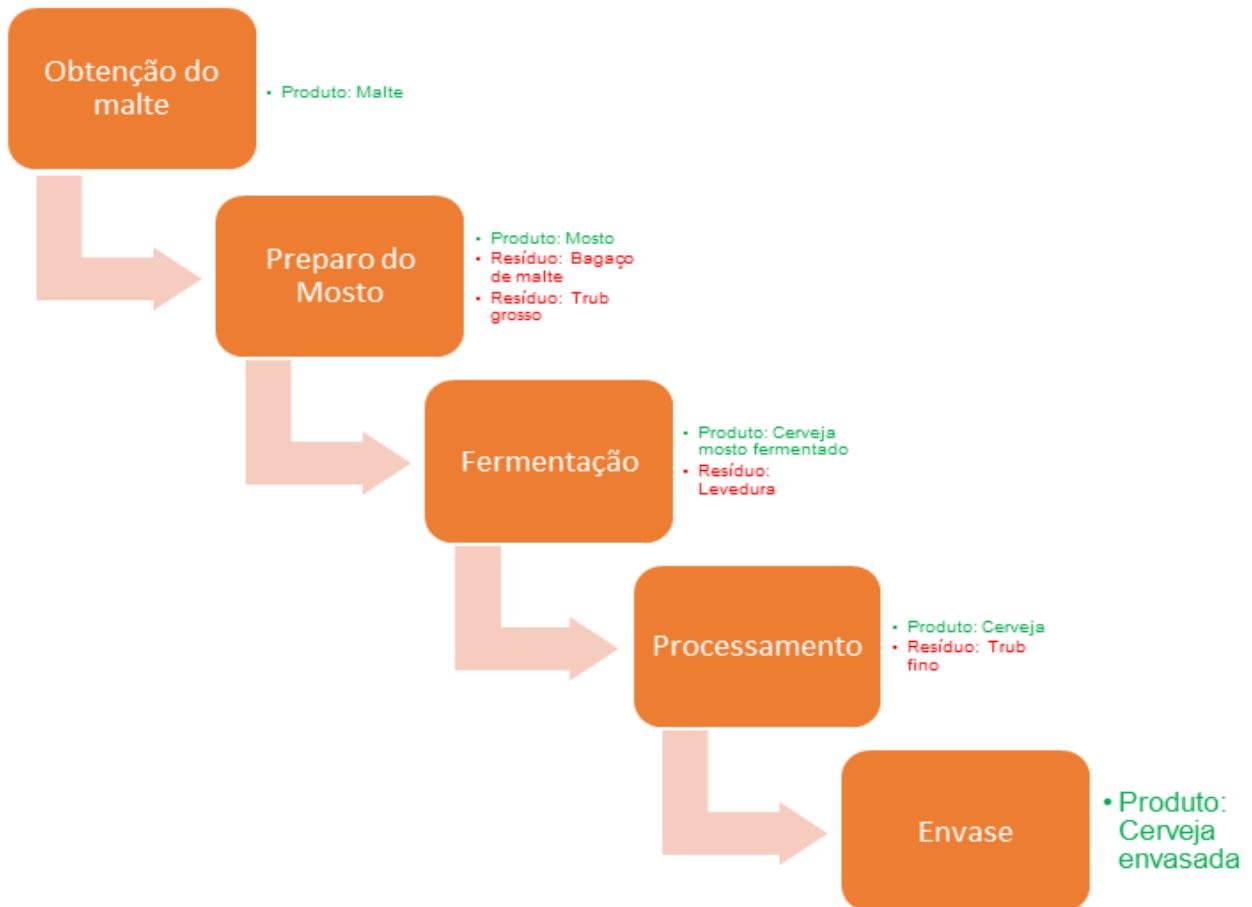
#### **3.1. Processo produtivo da cerveja**

O processo produtivo da cerveja envolve a fermentação de açúcares derivados do malte da cevada seguida de algumas etapas de tratamento para cerveja, a fim de proporcionar sabor, odor e textura ao produto final. A mais recente pesquisa deste mercado mostra que o Brasil é um dos maiores produtores do mundo, conforme tabela 3.1.

**Tabela 3.1 – Maiores nações produtoras de cerveja (WORLDTLAS, 2017).**

Maiores produtores de cerveja do mundo (2013)		
Classificação	País	Produção [hl]
1º	China	465.000.000
2º	EUA	225.000.000
3º	Brasil	135.000.000
4º	Alemanha	95.000.000
5º	Rússia	90.000.000
6º	México	80.000.000
7º	Japão	50.000.000
8º	Reino Unido	40.000.000

Em linhas gerais, a produção da cerveja pode ser resumida em cinco etapas, obtenção do malte, preparo do mosto, fermentação, processamento e envase. Estas cinco etapas estão ilustradas na Figura 3.1 e serão detalhadas a seguir.



**Figura 3.1 – Processo de produção da cerveja.**

### 3.1.1. Obtenção do malte

O malte da cevada pode ser obtido em instalações dedicados a este propósito, mais conhecidas como maltarias. Este processo normalmente não ocorre nas cervejarias nacionais, o malte é comprado pronto.

Na maltagem os grãos de cevada são selecionados, embebidos e são armazenados em estufas para sua germinação. Então, a cevada germinada é encaminhada para fornos de secagem até que se tenha início o processo de caramelização dos grãos, que transformará os grãos em malte.

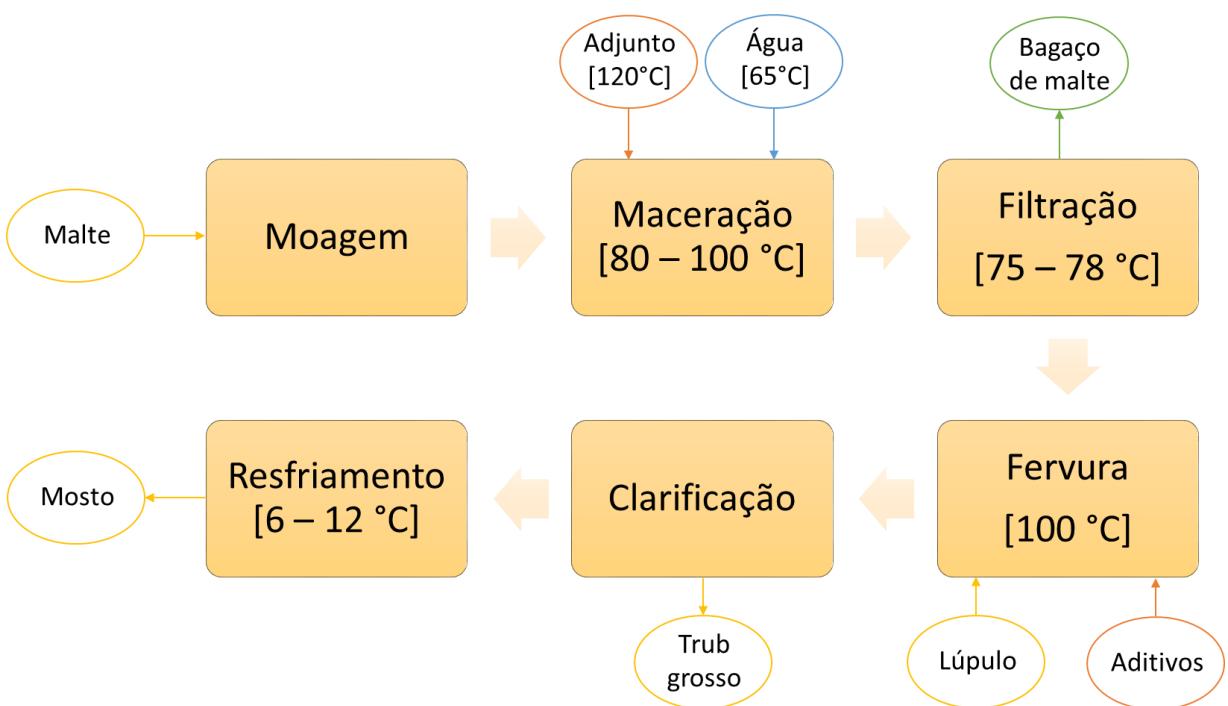
A variação nos parâmetros do processo de caramelização originará diferentes tipos de malte, tais como: malte claro (cerveja tipo Pilsen), malte caramelizado (cerveja tipo Bock e chopp escuro) e malte preto (cerveja tipo Porter) (BERENHAUSER, 1999).

### 3.1.2. Preparo do mosto

A preparação do mosto é o início do processo produtivo da cerveja propriamente dito. Nesta fase há o maior consumo de água e o maior consumo de calor de todo o processo.

O mosto é uma mistura açucarada que será posteriormente passará por uma fermentação alcoólica. Para se preparar o mosto em uma cervejaria, devem ser seguidas as seguintes etapas: moagem, maceração, filtração, fervura, clarificação e resfriamento.

A figura 3.2 mostra um esquema das etapas mencionadas anteriormente e nesta é possível verificar a entrada de matéria-prima (adjunto, água, lúpulo e aditivos) e o descarte de resíduos (bagaço de malte, trub grosso).



**Figura 3.2** – Processo de preparo do mosto.

#### 3.1.2.1. Moagem

O malte é armazenado na cervejaria para depois passar pela moagem, que é um processo físico que tem como objetivo expor o conteúdo do grão de malte para favorecer o contato com a água e ativar as enzimas do amido.

Por intermédio de moinhos de martelo, ou de rolo, ou de cilindros múltiplos, o grão de malte é rasgado e sua porção interior (endospermo) fica em evidência. Em seguida esta porção interior é triturada até que se forme uma farinha.

Esta farinha não pode ser fina a ponto de dificultar a filtração do mosto e nem tão grossa a ponto de dificultar a hidrólise do amido.

### **3.1.2.2. Maceração**

Nesta etapa os grãos de malte moídos são misturados à água aquecida a 65°C, ativando as enzimas do grão. Estas por sua vez, quebram substâncias complexas, transformando-as em substâncias mais simples e mais solúveis em água. Sendo assim, as proteínas são convertidas em peptídeos e posteriormente em aminoácidos, ao passo que os amidos são quebrados em moléculas de glicose, maltose e dextrinas, favorecendo à futura fermentação.

Os adjuntos (ou gritz) são fontes de açúcar complementares que podem ser usados com o objetivo de se alterar sabor, cor, ou mesmo reduzir o custo. Adjuntos mais comuns podem ser de milho, arroz ou trigo e estes são previamente cozidos a 120°C em uma caldeira própria, enquanto o malte moído é cozido a 65°C.

Em seguida, os adjuntos são misturados ao malte na caldeira de mostura, dando origem a uma solução de açúcares chamada de mosto.

### **3.1.2.3. Filtração**

O mosto sai da caldeira de mosturação com uma temperatura de 80 a 100°C e passa por um trocador de calor para resfriá-lo até 75°C para dar início ao processo de sedimentação do bagaço de malte (também conhecido como DRECHE) (CETESB, 2005).

A partir daí esta solução passa por uma filtração por intermédio de peneiras, ou filtros-prensa, ou cuba-filtro.

O mosto limpo é encaminhado para a caldeira de fervura e o bagaço normalmente é armazenado em silos para posterior comercialização para a indústria de ração animal.

#### **3.1.2.4. Fervura**

O mosto filtrado chega na caldeira de fervura onde é cozido a 100°C por no mínimo 60 minutos. Nesta etapa as enzimas são inativadas, concentra o mosto, precipita as proteínas indesejáveis, estabiliza a solução e altera o aspecto e o paladar do mosto (CETESB, 2005).

Nesta fase são adicionados aditivos para alterar aroma, sabor, cor e textura da futura cerveja. Estes aditivos podem ser o lúpulo, mel, açúcar, caramelo, xarope, extratos vegetais, etc.

#### **3.1.2.5. Clarificação**

A clarificação é necessária para remover as proteínas coaguladas, resíduos remanescentes de bagaço ou outras partículas no mosto.

A maneira mais comum de se realizar este processo é por intermédio de um equipamento chamado whirlpool que é responsável por precipitar e decantar os resíduos sólidos mencionados no parágrafo anterior.

Todo resíduo sólido deste processo é denominado trub grosso e é armazenado em silos para posterior venda para a indústria de ração animal (em alguns casos pode ser descarregado no efluente líquido).

#### **3.1.2.6. Resfriamento**

O mosto clarificado é resfriado a uma temperatura entre 6 e 12 °C por intermédio de um trocador de calor e depois é aerado com ar estéril (CETESB, 2005).

### **3.1.3. Fermentação**

O mosto resfriado e aerado recebe as leveduras, iniciando assim o processo de fermentação. Este processo é responsável por metabolizar os açúcares do mosto em álcool e gás carbônico.

A fermentação é dividida em duas fases aeróbica e anaeróbica. A primeira fase é aeróbica e dura de 24 a 36 horas, nesta etapa as leveduras reproduzem e aumentam sua quantidade total de 1,5 a 6 vezes (CETESB, 2005).

Em seguida a fermentação anaeróbica é iniciada, nesta fase o álcool e o gás carbônico são formados. Sua duração varia de 5 a 9 dias e é necessário um controle preciso de temperatura, onde o mosto deve permanecer a uma temperatura constante de 8 a 15 °C. A fim de obter este controle na temperatura, a fermentação anaeróbica ocorre em tanques fechados equipados com camisas de refrigeração (CETESB, 2005).

Ao terminar a fermentação a levedura já foi decantada, podendo ser removida e encaminhada para tratamento e estocagem. Parte desta levedura pode ser reutilizada e parte é vendida para a indústria alimentícia.

Além do mosto fermentado, este processo libera uma grande quantidade de gás carbônico e este é purificado e encaminhado para a posterior carbonatação da cerveja no caso de grandes cervejarias. Porém, em cervejarias artesanais este reaproveitamento não é viável e estas necessitam comprar cilindros de gás carbônico para executar este processo.

### **3.1.4. Processamento**

O mosto fermentado é também chamado de cerveja verde e este deve passar pelo processamento que é a última etapa para gaseificar, garantir qualidade e fornecer características de sabor, cor, aroma e textura.

#### **3.1.4.1. Maturação**

Este é o processo mais longo de toda a produção da cerveja, consiste do descanso do mosto fermentado em dornas a uma temperatura de 0°C (ou menos) por um período de 15 a 60 dias (CETESB, 2005).

Com a maturação é possível o produto final é estabilizado e os levedos da cerveja, juntamente com microrganismos indesejáveis, são separados da solução.

### **3.1.4.2. Filtração**

Este processo de filtração é responsável por remover todas as impurezas que não decantaram durante os demais processos. Para execução deste, são usados filtros de velas verticais (ou horizontais), terra diatomácea (meio filtrante), e filtro de cartucho.

Por fim, são adicionados estabilizantes como corante ou açúcar, ajustando o sabor final.

O resíduo sólido desta etapa é composto de terra diatomácea e do trub fino, que consiste de gordura vegetal e parcelas de levedo. A terra diatomácea usada é destinada a aterros como material inerte e o trub fino é armazenado e posteriormente vendido para a indústria de ração animal.

### **3.1.4.3. Carbonatação**

Nesta etapa adiciona-se gás carbônico à cerveja, este gás é proveniente do processo anterior de fermentação do mosto. Além do gás carbônico, pode ser injetado nitrogênio em alguns casos.

Terminada a carbonatação, a cerveja é enviada para adegas de pressão de modo a manter o controle de pressão e temperatura, garantindo sabor e teor de gás carbônico até o envase.

### **3.1.5. Envase**

Ao concluir toda a produção da cerveja, esta pode ser envasada. Neste processo deve-se garantir que a cerveja não entre em contato com oxigênio ou outras fontes de contaminação, além de se evitar a perda de gás.

Neste processo a cerveja pode ser engarrafada, enlatada ou colocada em barris na sua forma de chopp (não pasteurizada). As cervejas engarrafadas e enlatadas correspondem a mais de 90% das vendas de cerveja no Brasil (CETESB, 2005).

### **3.1.5.1. Lavagem de garrafas**

Para o envase da cerveja em garrafas se faz necessário um rígido procedimento de limpeza das mesmas. Existem equipamentos próprios para esta lavagem, onde as garrafas são limpadas com detergente e uma solução de água com soda cáustica, e posteriormente enxaguadas com água a 60°C (CETESB, 2005).

### **3.1.5.2. Envasamento**

Neste processo a cerveja passa por máquinas enchedoras para o envase em garrafas e latas ou por máquinas de embarrilamento para o envase em barris.

As garrafas e latas ainda passam por um último processo, a pasteurização. Já os barris podem partir para a expedição.

### **3.1.5.3. Pasteurização**

Na pasteurização as garrafas ou latas de cerveja são aquecidas progressivamente até uma temperatura de 60°C e mantidas nesta temperatura por um tempo determinado, depois estas são resfriadas até 4°C (CETESB, 2005).

A cerveja pasteurizada apresenta maior estabilidade e durabilidade.

## **3.2. Demandas**

Conforme mostrado nas etapas de produção da cerveja, esta necessita basicamente de quatro matérias-primas, são elas: malte de cevada, adjuntos, lúpulo e água. Sendo a água a principal matéria-prima, constitui mais de 92% do peso da cerveja, seu consumo é altíssimo durante o processo produtivo da cerveja. Além disto, uma cervejaria consome muita energia térmica (calor de processo) e energia elétrica (CETESB, 2005).

### **3.2.1. Consumo de água**

O consumo de água varia muito de acordo com as instalações da cervejaria, sendo inversamente proporcional ao tamanho da cervejaria. Estudos recentes indicam que no Estado de São Paulo estes valores variam entre 4 a 7 hl de água / hl de cerveja (CETESB, 2005).

Para microcervejarias, que é o objeto de estudo, será adotado o maior consumo e segundo um estudo recente europeu, a distribuição do consumo de água se dá em sua maior parte para a produção do mosto (34,2%), seguido do envase, filtração, maturação e fermentação, totalizando 6,89 hectolitros de água para cada hectolitro de cerveja produzido (CETESB, 2005). Todas estas informações estão descritas na tabela 3.2.

**Tabela 3.2 – Consumo de água nos processos produtivos da cervejaria (CETESB, 2005).**

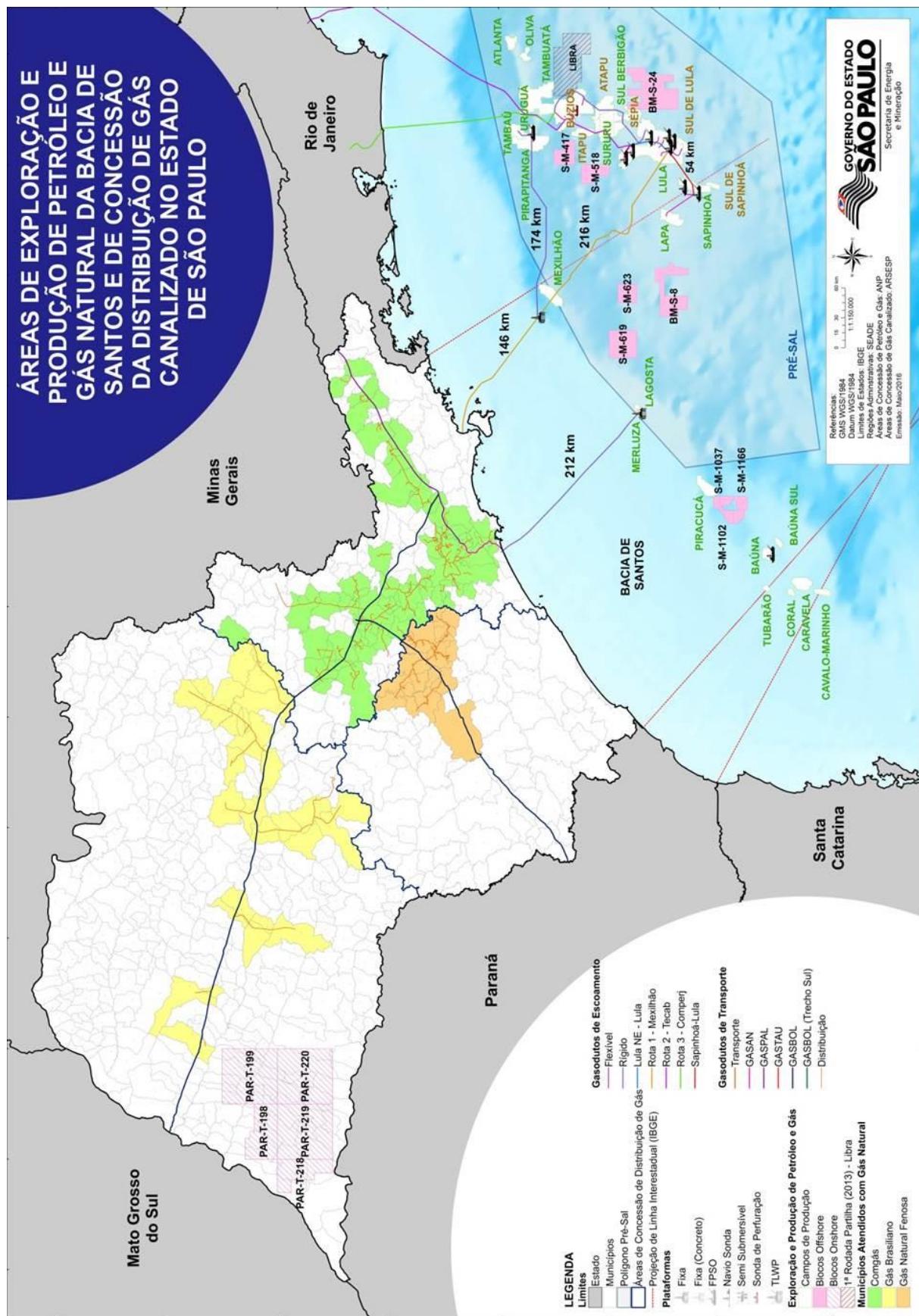
Consumo de água	
Etapa do processo	Consumo [hl de água / hl de cerveja]
Produção do mosto	2,36
Fermentação	0,53
Maturação	0,67
Filtração	1,09
Envase em garrafa	1,63
Envase em barril	0,61
Total	6,89

### **3.2.2. Consumo de energia**

O consumo de energia em uma microcervejaria se dá principalmente na geração de vapor para o calor de processo, além da alimentação de todos os equipamentos e instalações. Para gerar vapor normalmente são utilizados aquecedores elétricos ou caldeiras a gás. Sendo que para o caso do gás, a opção mais comum é o gás liquefeito de petróleo (GLP), devido à pequena pulverização de gás natural (GN) canalizado pelo país.

A figura 3.3 mostra a distribuição de gás canalizado no Estado de São Paulo, além de suas áreas de exploração e produção. Nesta figura é possível concluir que o GN possui uma cobertura limitada em São Paulo.

**ÁREAS DE EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL DA BACIA DE SANTOS E DE CONCESSÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE GÁS CANALIZADO NO ESTADO DE SÃO PAULO**



**Figura 3.3 – Exploração e distribuição de gás natural no Estado de São Paulo (GESP, 2016).**

A energia térmica consumida na produção de cerveja pode variar entre 156 a 236 MJ/hl de cerveja, sendo que quanto menor a cervejaria, menor será sua eficiência energética (maior consumo). Na tabela 3.3 é possível verificar a distribuição deste consumo nos principais processos da cervejaria, que se dá nos processos de preparo do mosto (87 a 121 MJ/hl de cerveja) e envase em garrafas (58 a 94 MJ/hl de cerveja) (CETESB, 2005).

**Tabela 3.3** – Consumo de energia térmica nos processos produtivos da cervejaria (CETESB, 2005).

Etapa do processo	Consumo de calor [MJ/hl de cerveja]
Preparo do mosto	87 – 121
Envase em garrafas	58 – 94
Envase em barril	8 – 13
Água de processo	3 – 8
Total	156 – 236

Já o consumo de eletricidade, desconsiderando a parcela do calor de processo, pode variar de 9,7 a 16,8 kWh/hl de cerveja (DWA, 2010). Sendo que geralmente as maiores parcelas desta energia são consumidas para a refrigeração e o envase, podendo chegar a 75% do total se somadas (SORRELL, 2000). A tabela 3.4 mostra a participação da refrigeração, envase, compressores de ar e iluminação no consumo total de energia elétrica, e é possível perceber que a maior parte do consumo está na refrigeração e envase.

**Tabela 3.4** – Fontes de consumo de energia elétrica em uma cervejaria (SORRELL, 2000).

Fonte de consumo	Porcentagem [%]
Refrigeração	30 a 40
Envase	15 a 35
Compressores de ar	10
Iluminação	6
Outros	10 a 30

## **4. Proposta de solução energética**

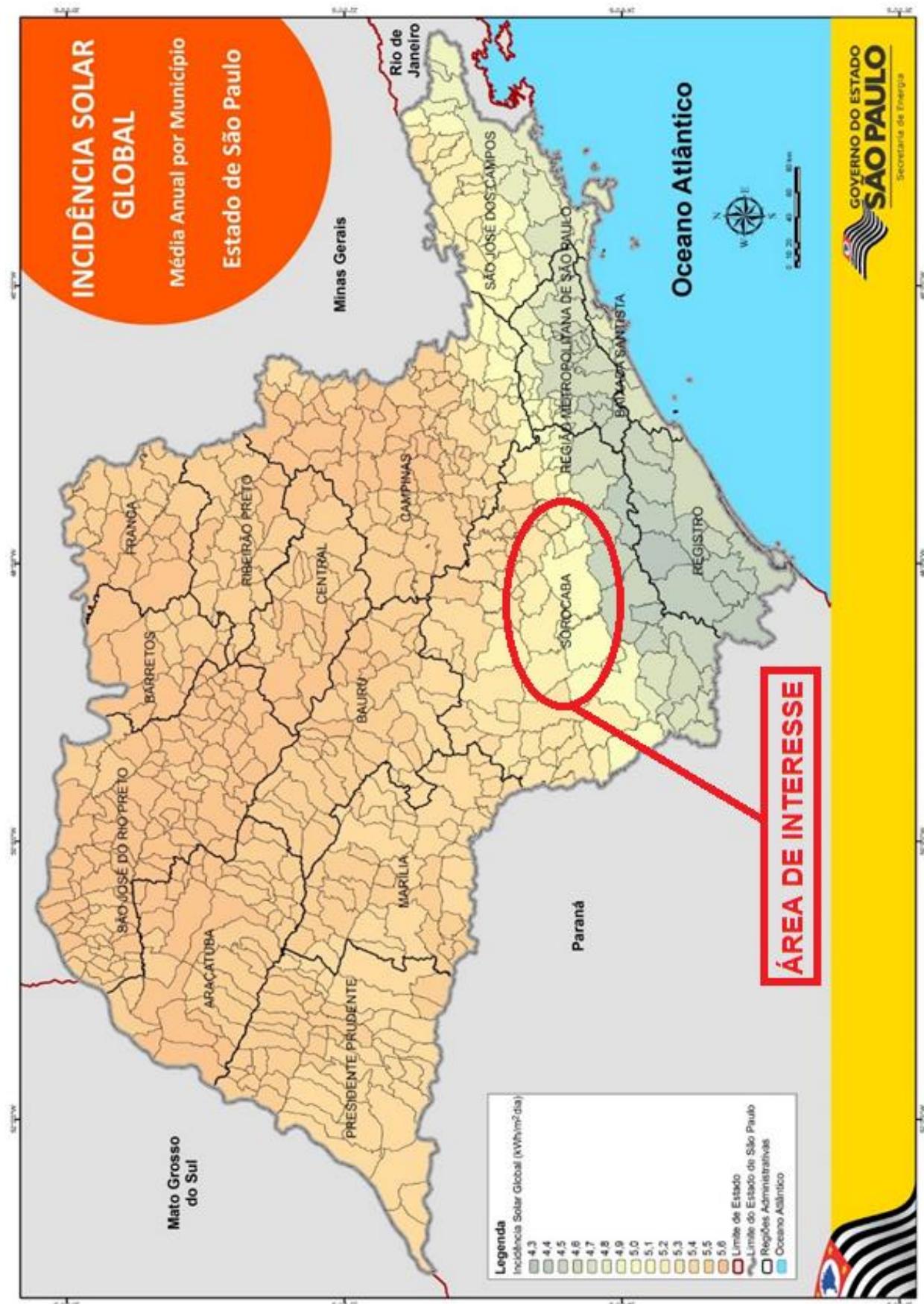
Conforme mostrado no capítulo anterior, todas as demandas da microcervejaria estão em função do hectolitro produzido pela mesma. Sendo assim, o presente trabalho adotará uma produção de 20.000 litros (200 hl) de cerveja por mês que é a média nacional das microcervejarias (ICB, 2016).

A partir daí, propõe-se atender toda a demanda térmica com uma caldeira a lenha, sendo esta complementada por bagaço de malte de cevada. Além disto, coletores solares térmicos também fornecerão calor para o processo para reduzir o consumo de combustível da caldeira.

Por fim, um sistema de painéis fotovoltaicos será usado para atender parte da demanda por energia elétrica.

### **4.1. Potencial energético solar**

A microcervejaria objeto de estudo se situa na região metropolitana de Sorocaba (SP) e segundo o levantamento do potencial da energia solar paulista, estudo elaborado pela Secretaria de Energia do Governo do Estado de São Paulo com dados do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) no ano de 2013, a região central de Sorocaba possui uma incidência solar global média anual de 5,0  $\frac{kWh}{m^2.dia}$ . A figura 4.1 mostra este levantamento com 25 mapas do Estado de São Paulo.



**Figura 4.1 – Levantamento do potencial solar no Estado de São Paulo (INPE, 2013).**

## 4.2. Arranjo térmico

Tendo como premissa a produção mensal de 20.000 litros de cerveja e uma demanda por calor de processo de 236 MJ/hl de cerveja (Tabela 3.3), a microcervejaria apresentará um consumo térmico de 47,2 GJ/mês e isto é equivalente a 268,2 MJ/h (ou 64.055 kcal/h) se considerarmos um regime de trabalho de 44 horas semanais. A tabela 4.1 detalha a distribuição desse consumo energético nas etapas do processo produtivo da microcervejaria e como visto anteriormente na tabela 3.3, toda a demanda térmica se dá durante a produção do mosto e o envase.

**Tabela 4.1 – Consumo de calor na microcervejaria.**

Etapas do Processo	Consumo mensal [MJ/mês]	Consumo horário [MJ/h]	Consumo horário [kcal/h]	Porcentagem [%]
Produção do Mosto	24200	137,50	32842	51,3
Envase em garrafa	18800	106,82	25514	39,8
Envase em barril	2600	14,77	3528	5,5
Água de processo	1600	9,09	2171	3,4
<b>Total</b>	<b>47200</b>	<b>268,18</b>	<b>64055</b>	<b>100</b>

Com esta premissa e o consumo de água informado na Tabela 3.2 (6,89 hl de água/hl de cerveja) é possível chegar a uma vazão de água horária de 782,95 litros. A Tabela 4.2 detalha a distribuição do consumo de água para a microcervejaria em estudo, analisando esta é possível perceber que os dois processos que mais consomem água é a produção do mosto e o envase, respectivamente. Somados, os dois processos consomem 2/3 de toda a água necessária para a produção da cerveja.

**Tabela 4.2 – Consumo de água na microcervejaria.**

Etapas do Processo	Consumo mensal [hl/mês]	Consumo horário [l/h]	Porcentagem [%]
<b>Produção do Mosto</b>	472	268,18	34,25
<b>Fermentação</b>	106	60,23	7,69
<b>Maturação</b>	134	76,14	9,72
<b>Filtração</b>	218	123,86	15,82
<b>Envase em garrafa</b>	326	185,23	23,66
<b>Envase em barril</b>	122	69,32	8,85
<b>Total</b>	<b>1378</b>	<b>782,95</b>	<b>100</b>

A proposta para atender a demanda por calor de processo é substituir o gerador de vapor convencional da microcervejaria (elétrico ou a gás) por uma caldeira a biomassa.

Esta biomassa será constituída de lenha e bagaço de malte descartado no processo de filtração durante o preparo do mosto, para viabilizar o uso de bagaço de malte como combustível será necessário fazer um pré-aquecimento do mesmo a fim de alcançar um teor de umidade adequado para a combustão direta.

#### 4.2.1. Aquecimento solar

Conforme mencionado no capítulo 3, nas etapas dos processos produtivos que envolvem aquecimento suas temperaturas variam em torno de 60 a 80°C, com exceção do processo de fervura do mosto que eleva o mesmo a 100°C. Estas demandas podem ser alcançadas com coletores solares planos ou com tubos a vácuo.

Além disso, ao alimentar a caldeira com água a 80°C, é possível ter uma economia de combustível.

Adotando que a microcervejaria em estudo se situa na região metropolitana de Sorocaba, interior do estado de São Paulo, sua incidência global média é de 5 kWh/(m<sup>2</sup>.dia).

#### 4.2.1.1. Área coletora

Para o dimensionamento da área coletora será adotada a metodologia ABNT (NBR 15569, 2008), dada pela equação 4.1.

$$V_{armaz.} = \frac{V_{consumo} \times (T_{consumo} - T_{ambiente})}{T_{armaz.} - T_{ambiente}} \quad (4.1)$$

Onde,

$V_{consumo}$  é o volume de consumo diário [m<sup>3</sup>];

$V_{armaz.}$  é o volume do sistema de armazenamento do SAS [m<sup>3</sup>] ( $\geq 0,75 \cdot V_{consumo}$ );

$T_{consumo}$  é a temperatura de consumo [°C];

$T_{armaz.}$  é a temperatura de armazenamento da água [°C];

$T_{ambiente}$  é a temperatura ambiente média anual do local de instalação [°C].

Sendo que, o volume de consumo ( $V_{consumo}$ ) é obtido pela Eq. (4.2).

$$V_{consumo} = \Sigma(Q_{pu} \times T_u \times f) \quad (4.2)$$

Onde,

$Q_{pu}$  é a vazão do processo em estudo [m<sup>3</sup>/s];

$T_u$  é o tempo médio de uso diário do processo em estudo [s];

$f$  é o número total de repetições do processo.

Para a temperatura ambiente de Sorocaba será adotada sua temperatura média anual sem considerar o período de inverno (menor demanda nas cervejarias). Para tal, analisaremos a tabela 4.3 durante o período de outubro a maio, chegando a uma temperatura média de 22,09°C. Note que esta é uma posição conservadora, afinal a temperatura média durante o verão (maior demanda nas cervejarias) passa

de 23,2°C e a média das temperaturas máximas para o mesmo período passa de 29°C.

**Tabela 4.3 – Tabela climática de Sorocaba – SP (INMET, 2014).**

Temperatur a [°C]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
<b>Máxima abs.</b>	36, 4	38,6	34,5	32	29,8	28,6	29,5	31,4	34,1	34,9	38,2	34,6
<b>Máxima méd.</b>	29, 4	29,8	29,1	27,2	25,1	23,5	23,8	25,3	25,8	27,6	28,6	28,4
<b>Média</b>	23, 4	23,8	23,1	21,4	19	17,1	17,3	18,4	19,4	21	22,4	22,6
<b>Mínima méd.</b>	18, 6	18,9	18,2	16,6	13,9	11,7	11,5	12,7	14,1	15,9	17,2	18
<b>Mínima abs.</b>	7,6	13,9	12,6	9,6	5,3	2	2,8	1,8	5,4	9,6	11	13

Já para o volume de consumo existem duas propostas, fornecer água aquecida a 60°C para os processos de lavagem das garrafas e a pasteurização destas já envasadas, além de fornecer água a 80°C para alimentar a caldeira.

Conforme mencionado no capítulo 3, a etapa de lavagem de garrafas e pasteurização utilizam água a 60°C e um consumo total de 1,63 hectolitros de água para cada hectolitro de cerveja produzido, conforme tabela 3.1. Adotando o mesmo regime de trabalho, teremos um volume de água consumido diariamente de 1,482 m<sup>3</sup> e uma vazão de 0,185 m<sup>3</sup>/h.

Já para alimentar a caldeira, a demanda térmica do processo de envase será subtraída da demanda total, gerando assim um novo consumo de 60 kg/h de vapor. A partir daí, pode-se concluir que será necessária uma vazão de 0,15 m<sup>3</sup>/h de água. Adotando um regime de trabalho de 8 horas por dia (40 horas semanais), temos que o volume de água consumido diariamente nestas condições é de 0,48 m<sup>3</sup>.

As temperaturas para a água armazenada na proposta de alimentação da caldeira e para o processo de envase serão de 92 e 69°C, respectivamente.

$$E_{útil} = V_{armaz.} \times \gamma \times C_p \times (T_{armaz.} - T_{ambiente}) \quad (4.3)$$

Onde,

$E_{útil}$  é a energia útil [kWh/dia];

$\gamma$  é o peso específico da água igual a 1.000 kg/m<sup>3</sup>;

$C_p$  é o calor específico da água igual a  $11,63 \times 10^{-4}$  kWh/(kg.°C).

$$PMDEE = 4,901 \times (Fr\tau\alpha - 0,0249 \times Fr_{UL}) \quad (4.4)$$

Onde,

$PMDEE$  é a produção média diária de energia específica do coletor solar [kWh/m<sup>2</sup>];

$Fr\tau\alpha$  é o coeficiente de ganho do coletor solar [adimensional];

$Fr_{UL}$  é o coeficiente de perdas do coletor solar [adimensional].

Os coletores solares com tubos a vácuo selecionados para a aplicação foram da marca EcoComfort e modelo 58\*1800-60H para a proposta água aquecida para o processo de envase de garrafas. Desta forma seus coeficientes de ganho e perdas são respectivamente, 0,673 e 1,368. E sua área externa é de 8,55 m<sup>2</sup> com 60 tubos.

Já para alimentar a caldeira foi selecionado um coletor solar de mesma marca, mas seu modelo é o 58\*1800-30H. Seus coeficientes são iguais ao anterior, mas sua área coletora é de 4,15 m<sup>2</sup> com 30 tubos.

$$A_{coletora} = \frac{(E_{útil} + E_{perdas}) \times FC_{instal} \times 4,901}{PMDEE \times I_G} \quad (4.5)$$

Onde,

$A_{coletora}$  é a área coletora [m<sup>2</sup>];

$I_G$  é o valor da Irradiação global média anual para o local de instalação [kWh/(m<sup>2</sup>.dia)];

$E_{perdas}$  é a somatória das perdas térmicas dos circuitos primário e secundário [kWh/dia].

Sendo que a somatória das perdas térmicas dos circuitos primário e secundário ( $E_{perdas}$ ) é expressa pela Eq. 4.6.

$$E_{perdas} = 0,15 \times E_{útil} \quad (4.6)$$

$FC_{instal}$  é o fator de correção para inclinação e orientação do coletor solar dado pela equação 4.7 ou 4.8.

Para  $15^\circ < \beta < 90^\circ$

$$FC_{instal} = \frac{1}{1 - [1,2 \times 10^{-4} \times (\beta - \beta_{óptimo})^2 + 3,5 \times 10^{-5} \times \alpha^2]} \quad (4.7)$$

Para  $\beta \leq 15^\circ$

$$FC_{instal} = \frac{1}{1 - [1,2 \times 10^{-4} \times (\beta - \beta_{óptimo})^2]} \quad (4.8)$$

Onde,

$\beta$  é a inclinação do coletor em relação ao plano horizontal [°];

$\beta_{óptimo}$  é a inclinação ótima do coletor para o local de instalação [°];

$\alpha$  é o ângulo de orientação dos coletores solares em relação ao norte geográfico [°].

A latitude de Sorocaba é de  $23^\circ 30' 22''$  Sul e a partir daí, podemos concluir que a inclinação ótima para o coletor é de  $33^\circ$  (latitude local acrescida de  $10^\circ$ ). Usando o ângulo de  $33^\circ$  para o coletor, seu fator de correção será igual a 1.

Executando todos os cálculos de dimensionamento, é possível chegar a volumes de armazenamento de  $0,4$  e  $1,2 \text{ m}^3$  para alimentar a caldeira com água a  $80^\circ\text{C}$  e alimentar o processo de envase com água a  $60^\circ\text{C}$ , respectivamente. Além de uma área coletora de  $11,64 \text{ m}^2$  para a caldeira e  $23,52 \text{ m}^2$  para o envase. A tabela 4.5 detalha estes resultados, além da energia útil e vazão utilizada para cada proposta.

**Tabela 4.4** – Dimensionamento do sistema de aquecimento solar.

Solução proposta	Temperatura de consumo	Vazão utilizada	Volume de armaz.	Energia útil	Área coletora
Alimentação da caldeira	$80^\circ\text{C}$	$60 \text{ l/h}$	$398 \text{ l}$	$32,33 \text{ kWh/dia}$	$11,64 \text{ m}^2$
Processo de envase	$60^\circ\text{C}$	$185 \text{ l/h}$	$1198 \text{ l}$	$65,33 \text{ kWh/dia}$	$23,52 \text{ m}^2$

Analizando os resultados obtidos, pode-se concluir que serão necessários 3 coletores solares com 30 tubos a vácuo para alimentar a caldeira e mais 3 coletores solares com 60 tubos para alimentar o processo de envase. Além disto, serão necessários dois tanques de 600 litros para o processo de envase e um tanque de 400 litros para a alimentação da caldeira.

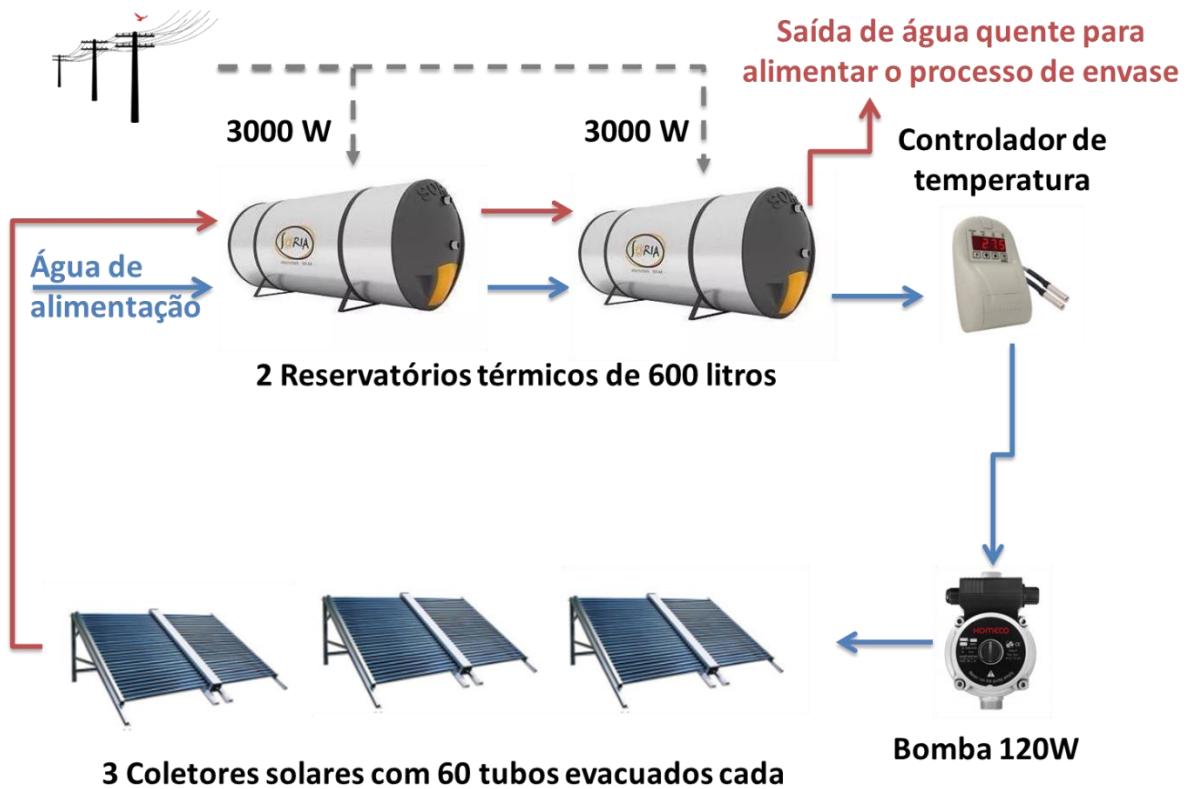
#### **4.2.1.2. Reservatório térmico**

Serão usados dois reservatórios térmicos de 600 litros para atender ao processo de envase e um reservatório de 400 litros para atender a alimentação de água quente da caldeira.

Os sistemas serão independentes e contarão com uma bomba de pequena capacidade com 120 W de potência, pressão mínima de 2 m.c.a., pressão máxima de 11 m.c.a., vazões mínima e máxima de 2 e 30 l/min, respectivamente. Esta bomba será instalada na saída de água fria do reservatório térmico, alimentando os coletores solares.

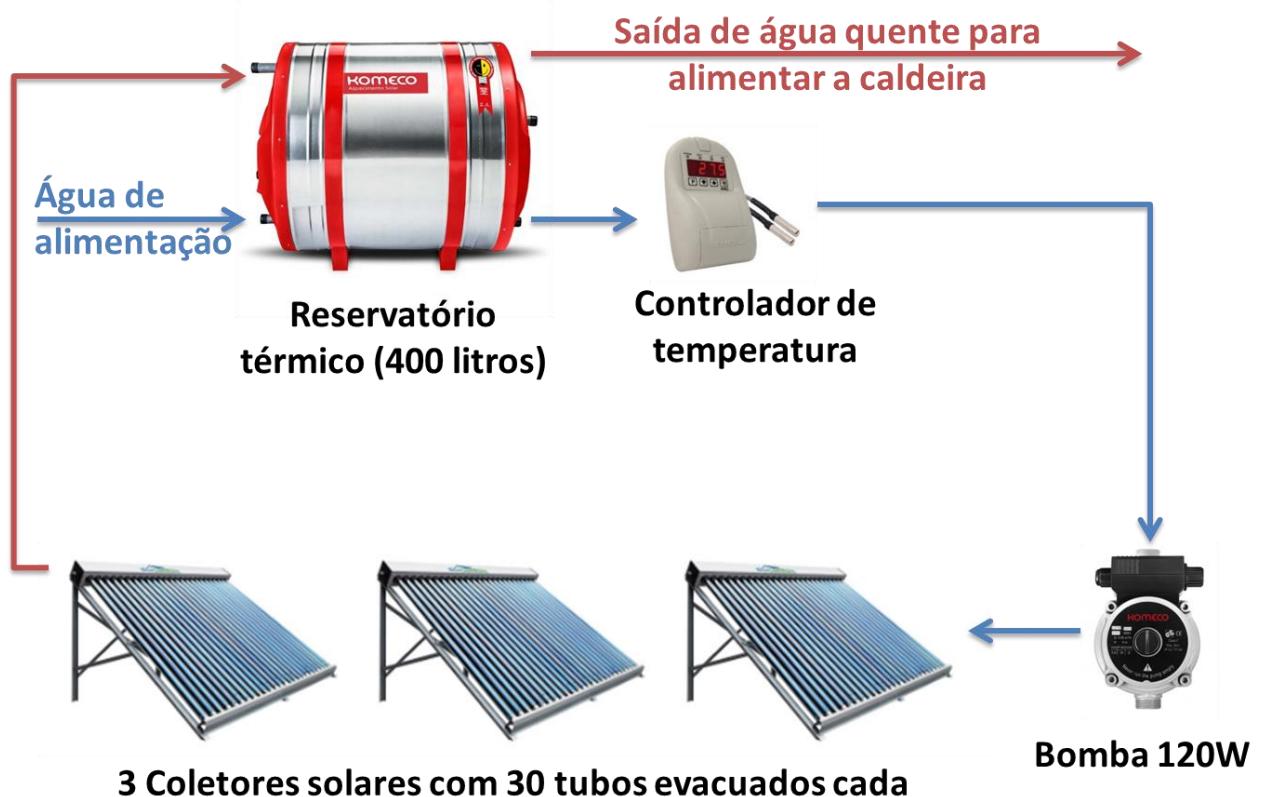
Além das bombas, os sistemas também contarão com um controlador de temperatura instalado antes da bomba, com uma saída de controle para o acionamento da mesma. Ou seja, ao atingir a temperatura desejada, a bomba será automaticamente desligada.

A figura 4.2 detalha o sistema de aquecimento solar para alimentar o processo de envase, note que os reservatórios estão ligados em série e estão conectados à rede para garantir o fornecimento de água quente, em caso de chuvas ou problemas para absorver a energia solar.



**Figura 4.2 – Sistema de aquecimento solar para alimentar o processo de envase.**

Já a figura 4.3 mostra o sistema de aquecimento solar para alimentar a caldeira com água aquecida a 80°C. Para este caso não há a necessidade de conectar o reservatório à rede, porque se a temperatura da água abaixar, a caldeira poderá suprir esta demanda queimando mais combustível.



**Figura 4.3 – Sistema de aquecimento solar para alimentar a caldeira.**

#### **4.2.1.3. Sistema de aquecimento solar**

A tabela 4.5 descreve os principais componentes usados no sistema de aquecimento solar. Nesta é possível verificar tipo, marca e modelo dos coletores solares, reservatórios térmicos, controlador de temperatura e motobomba.

**Tabela 4.5 – Componentes do sistema de aquecimento solar.**

Equipamento	Tipo	Marca	Modelo	Quantidade
<b>Coletores solares (caldeira)</b>	Plano fechado com 30 tubos a vácuo	EcoComfort	58*1800-30H	3
<b>Coletores solares (envase)</b>	Plano fechado com 60 tubos a vácuo	EcoComfort	58*1800-60H	3
<b>Reservatório térmico (caldeira)</b>	Baixa pressão - Desnível	Komeco	400 litros	1
<b>Reservatório térmico (envase)</b>	Baixa pressão - Desnível	Soria	600 litros	2
<b>Controlador</b>	Controlador de temperatura	Tholz		2
<b>Motobomba</b>	Mini-bomba d'água elétrica [120 W]	Komeco	TP 40 G3	2
<b>Instalações / Tubulações</b>				

As duas soluções somadas geram uma energia de 97,66 kWh/dia ou 448,56 MJ/dia e as mini-bombas geram um consumo de energia elétrica de 24kWh/mês quando somadas.

#### 4.2.2. Combustão direta da biomassa

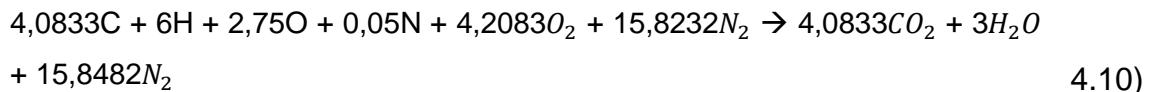
Para chegar à quantidade de combustível necessário para a demanda de calor do processo produtivo da cerveja, o cálculo estequiométrico é essencial. Sendo assim, primeiramente será analisada a estequiometria da combustão da lenha.

De acordo com a tabela 2.3, pode-se dizer que a madeira tem uma composição de 49% de carbono, 6% de hidrogênio, 44% de oxigênio, 0,7% de nitrogênio e 0,3% de cinzas (KLOCK, 2005; FOELKEL, 2011). A partir daí podemos elaborar o cálculo estequiométrico e verificar a quantidade de ar necessário para uma combustão ideal desta madeira. Na tabela 4.6 estão identificadas as massas molares e a quantidade de mols para cada elemento em uma quantidade de 100 kg de madeira.

**Tabela 4.6** – Composição molar para 100 kg de madeira seca (KLOCK, 2005; FOELKEL, 2011).

Composição	C	H	O	N	Cinzas
Massa molar [kg/mol]	12	1	16	14	-
Massa total [kg]	49	6	44	0,7	0,3
Número de mols	4,0833	6	2,75	0,05	-

A equação 4.10 detalha a estequiométrica na combustão da madeira.



A partir daí, é possível calcular a relação estequiométrica de ar por combustível com a equação 4.11.

$$\text{Relação mássica ar/combustível} = \frac{4,2083 \times 32 + 15,8232 \times 28}{100} = 5,78 \text{ kg}_{ar}/\text{kg}_{comb.} \quad (4.11)$$

Conhecida a relação mássica de ar por combustível, podemos chegar ao valor de excesso de ar necessário para a combustão. Este valor varia de acordo com o tipo de combustível, com seu teor de umidade e com o tipo da fornalha usada. Sendo assim, será usado um coeficiente de excesso de ar ( $\lambda$ ) de 1,6. A partir daí, temos que a relação mássica real de ar por combustível é igual a 9,248, segundo a equação 4.12.

$$\lambda = \text{massa de ar real} / \text{massa de ar estequiométrico} \quad (4.12)$$

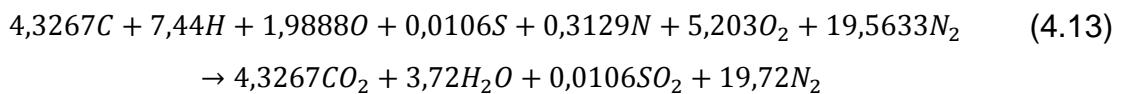
Já para o bagaço de malte de cevada usaremos a tabela 2.7 (VELEBIL para sua composição elementar e usaremos a taxa de 20 kg de bagaço para cada hectolitro de cerveja produzido (conforme mencionado no capítulo 2.1.1.2.).

Para chegar à composição molar do bagaço de malte, serão considerados 100 kg de bagaço de malte em base seca conforme tabela 4.7.

**Tabela 4.7** – Composição molar para 100 kg de bagaço de malte de cevada (VELEBIL, 2016).

Composição	C	H	O	S	N	Cinzas
Massa molar [kg/mol]	12	1	16	32	14	-
Massa total [kg]	51,92	7,44	31,82	0,34	4,38	4,10
Número de mols	4,3267	7,4400	1,9888	0,0106	0,3129	-

Já a equação 4.13 mostra a estequiometria da combustão do bagaço de malte de cevada.



Novamente será considerado um excesso de ar na combustão de 60% e a partir das equações 4.11 e 4.12, a relação real de massa de ar por massa de combustível será de 11,43 para o bagaço de malte.

#### 4.2.2.1. Dimensionamento da caldeira

Para o dimensionamento da caldeira será admitido o consumo total de energia térmica da microcervejaria que já fora mencionado no início deste capítulo (64.055 kcal/h), seu combustível principal será lenha (ou resíduo de madeira) e terá como complemento o bagaço de malte da cevada.

Mesmo com a utilização da energia solar térmica, a caldeira será dimensionada para atender a demanda de calor total. No entanto, esta trabalhará na maior parte do tempo para fornecer apenas 71,5% (45.800 kcal/h), depois de descontada a geração pelo sistema de aquecimento solar. Além disto, a demanda total de calor pode ser atendida com as menores caldeiras a lenha existentes no mercado brasileiro.

Sendo assim, a caldeira poderá apoiar a demanda de calor do processo de envase caso haja a necessidade de alguma manutenção no sistema de aquecimento solar ou este se depare com condições climáticas desfavoráveis por mais de um dia.

A caldeira selecionada foi do tipo flamo tubular vertical, com fornalha interna cilíndrica, com dois passes de gases (um na fornalha e o outro nos tubos de fogo), com grelha própria e alimentação manual da mesma (extração de cinzas também feita manualmente), além de uma chaminé com 6 metros a partir do piso de instalação. Seu fabricante é a ARAUTERM, e CVS-VL 150 é o seu modelo.

O desempenho da caldeira está descrito na tabela 4.8 e nesta é possível verificar que a caldeira selecionada tem uma capacidade térmica suficiente para atender a demanda (96.000 kcal/h), gerando 150 kg/h de vapor saturado com um rendimento térmico de 75% a partir de uma alimentação de 128.000 kcal/h.

A caldeira foi dimensionada para ser alimentada por lenha em toras com teor de umidade máximo de 30%. Além disto, formando um leito com as toras de lenha, é possível alimentar a caldeira com resíduos de madeira ou bagaço posicionando-os logo acima das toras.

**Tabela 4.8** – Quadro de desempenho da caldeira (ARAUTERM).

Descrição	Valor	Unidade
Produção de vapor (água de alimentação a 20°C)	150	kg/h
Pressão máx. de trabalho permitida (PMTP)	8	kgf/cm <sup>2</sup>
Pressão máxima de operação (PMO)	7	kgf/cm <sup>2</sup>
Pressão de teste hidrostático	12	kgf/cm <sup>2</sup>
Potência	8	BHP
Capacidade térmica (output)	96.000	kcal/h
Carga térmica (input)	128.000	kcal/h
Superfície de aquecimento caldeira + fornalha	5,05	m <sup>2</sup>
Entalpia do vapor	660	kcal/kg
Combustível	Lenha em toras + biomassa	
Umidade máxima prevista para o combustível	30	%
Temperatura dos gases de exaustão	230 a 260	°C
Qualidade do vapor	Saturado	
Classificação	Flamotubular	
Passagem de gases	2	
Corpo	Cilíndrico vertical	
Fornalha	Interna cilíndrica	
Rendimento térmico	75±2	%

A figura 4.4 mostra o modelo da caldeira selecionada, ARAUTERM CVS-VL 150. Para maiores informações, sua folha de dados consta no anexo A.



**Figura 4.4** – Imagem da caldeira CVS-VL (ARAUTERM).

#### 4.2.2.2. Combustível para a caldeira

Conforme mencionado no capítulo 2.1.1.2, são gerados 20 kg de bagaço de malte de cevada durante o processo de preparo do mosto para cada hectolitro de cerveja produzida. Adotando este valor para a microcervejaria em estudo, é possível chegar a um valor de 4000 kg de bagaço produzidos por mês.

Para compor a relação de combustão de bagaço de malte por lenha será preciso definir o teor de umidade mais acessível do bagaço para sua queima. Para tanto, serão usados os valores da tabela 2.6 para bagaço com 30% ou menos de umidade (a máxima umidade admissível para a caldeira é de 30%).

A fim de se obter a taxa de calor produzida pela combustão do bagaço, é preciso calcular o poder calorífico inferior (PCI), que pode ser expresso pela equação 4.14 (BIZZO, 2003).

$$PCI = PCS - 2440 \times (9 \times \%H + \%umidade) \quad (4.14)$$

Sendo que incógnita  $\%H$  representa a concentração de hidrogênio, que pode ser encontrada na tabela 2.7 (7,44%), possibilitando o cálculo do poder calorífico inferior do bagaço de malte. Além disto, é preciso calcular a perda de massa total do bagaço com a redução do teor de umidade.

Com todos os cálculos feitos, é possível analisar o considerável ganho do poder calorífico e perda de massa total com a redução do teor de umidade. A tabela 4.9 mostra esta diferença e é possível verificar que o PCI do bagaço só é maior que o PCI da madeira (35% de umidade) quando alcançado o teor de 15% de umidade.

**Tabela 4.9** – Variação do poder calorífico do bagaço de malte em função de seu teor de umidade (CORDEIRO, 2011).

Teor de umidade do bagaço de malte	PCS (Poder Calorífico Superior)	PCI (Poder Calorífico Inferior)	Produção final após secagem
30%	4037 kcal/kg	1671 kcal/kg	1760 kg/mês
20%	4697 kcal/kg	2575 kcal/kg	1360 kg/mês
15%	5026 kcal/kg	3026 kcal/kg	1160 kg/mês

A partir daí, pode-se calcular a melhor composição do bagaço de malte para uma combustão mais eficiente, conforme mostrado abaixo:

$$Q_c = m_c \times PCI \quad (4.15)$$

Onde,

$Q_c$  é a taxa de calor produzida pelo combustível [kcal/h];

$m_c$  é a vazão mássica do combustível [kg/h];

$PCI$  é o poder calorífico do combustível [kcal/kg].

A tabela 4.10 mostra os resultados desta equação com a variação do teor de umidade do bagaço de malte. Nesta é possível notar uma grande variação na quantidade de calor produzida pelo bagaço de malte com 30% de umidade (16712 kcal/h) e com 20% (19899 kcal/h), porém ao se chegar a 15% de umidade o ganho é pouco expressivo e não consegue atingir nem 0,3%. Sendo assim, a composição mais indicada para o bagaço de malte é respeitando um teor de umidade de 20%.

**Tabela 4.10** – Variação da quantidade de calor produzida pela combustão do bagaço de malte em função de seu teor de umidade.

Teor de umidade do bagaço de malte	$m_c$ [kg/h]	PCI [kcal/kg]	$Q_c$ [kcal/h]
30%	10	1671	16.712
20%	7,73	2575	19.899
15%	6,59	3026	19.945

Se considerarmos a demanda de calor total (64055 kcal/h) e usarmos o rendimento térmico da caldeira mostrado na tabela 4.8 (75%), podemos concluir que a quantidade de calor a partir da combustão da biomassa deve ser de 85407 kcal/h. Sendo assim, a queima do bagaço de malte com 20% de umidade consegue suprir 23,31% desta demanda. Mas se considerarmos o aquecimento solar descrito no capítulo 4.2.1 para elevar a temperatura da água de alimentação até 80°C, esta carga térmica será reduzida.

$$\eta = \frac{m_v \times (h_v - h_a)}{Q_c} \quad (4.16)$$

Onde,

$\eta$  é o rendimento térmico da caldeira [75%];

$m_v$  é a vazão mássica do vapor [kg/h];

$h_v$  é a entalpia do vapor produzido na caldeira [660 kcal/kg];

$h_a$  é a entalpia do água de alimentação a 80°C [80,05 kcal/kg];

$Q_c$  é a quantidade de calor produzida pelo combustível [kcal/h].

Aplicando-se os conceitos mostrados acima, é possível chegar a uma nova carga térmica de 77402 kcal/h se adotarmos a água de alimentação a 80°C. Desta forma, é possível aumentar a contribuição do bagaço de malte, chegando a suprir 25,72% da nova demanda.

Por fim, é possível compor uma relação entre as quantidades de combustíveis e a diferença de temperatura para a água de alimentação da caldeira. A tabela 4.11 evidencia esta relação e é possível ver uma redução de mais de 12% no consumo de lenha.

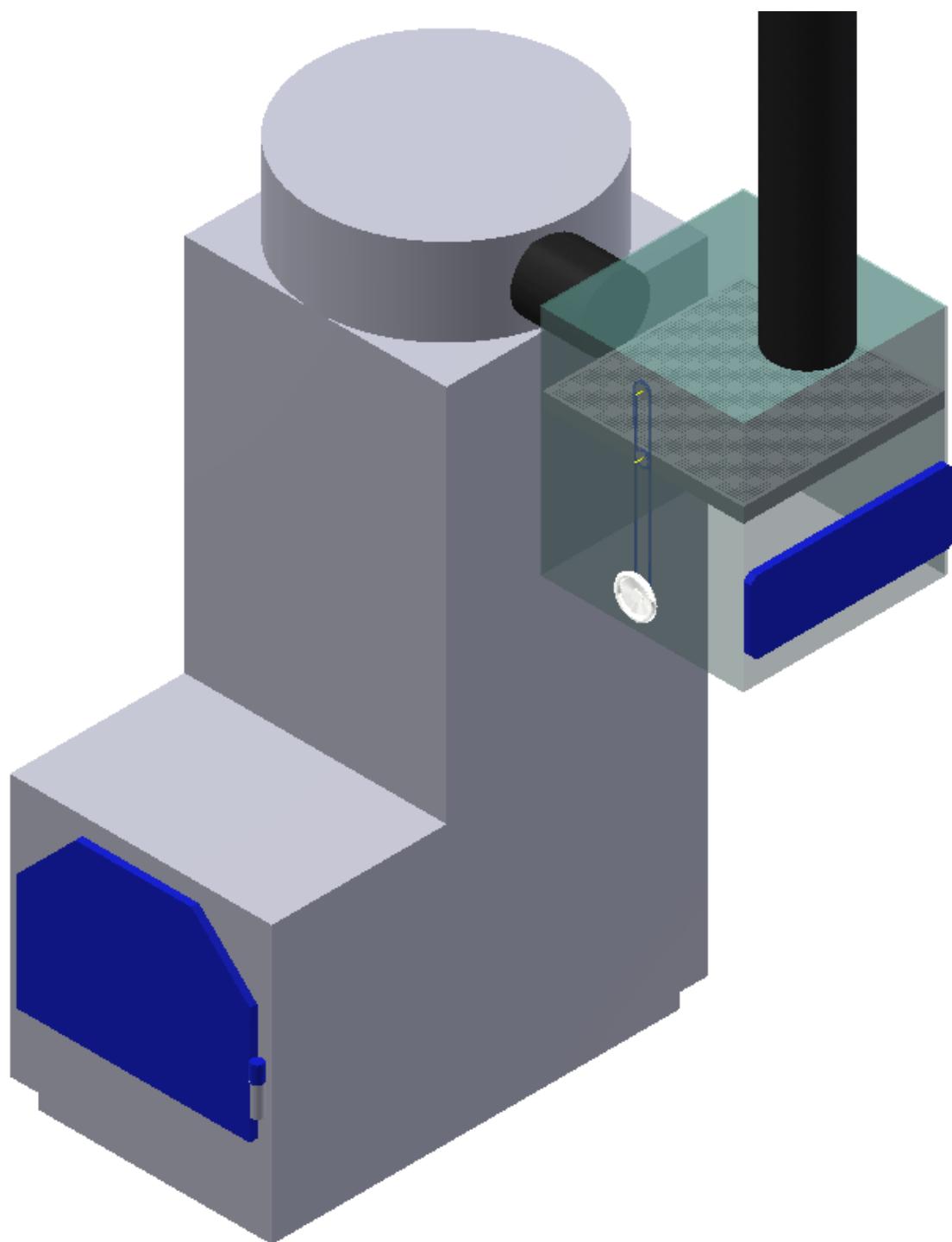
**Tabela 4.11** – Relação entre as quantidades de bagaço de malte e lenha para combustão na caldeira.

	Temp. da água de alimentação	Bagaço de malte produzido	Quantidade de lenha
Caldeira alimentada por lenha	20 °C	-	29,55 kg/h
	80 °C		26,78 kg/h
Caldeira a lenha + bagaço	20 °C	7,73 kg/h	22,67 kg/h
	80 °C		19,9 kg/h
SAS (envase) + caldeira a biomassa	80 °C		9,23 kg/h

A fim de se alcançar este teor de umidade de 20% para o bagaço de malte, este deverá passar por um processo de secagem alimentado pelos gases de escape da caldeira. Para tanto, o bagaço de malte será considerado com um teor de umidade máximo de 86% e a temperatura mínima para os gases de escape será de 230°C.

Sendo assim, será prevista uma estufa a partir de uma estrutura de chapas metálicas que sustentará uma grelha a ser alimentada pelo bagaço úmido. Esta estrutura será conectada à chaminé da caldeira possibilitando assim, que a grelha com o bagaço receba um fluxo cruzado dos gases de escape da caldeira, sendo que a alimentação do mesmo será feita manualmente. O acesso a esta câmara de secagem será através de uma escada até uma plataforma, visto que a caldeira tem uma altura de 2,6 m. É possível verificar o esquema de instalação desta câmara de secagem na figura 4.5, sua grelha contará com guias e um acionamento com três rodas dentadas conectadas por uma corrente de rolos para possibilitar a

alimentação da câmara, além de seu fundo ser parafusado para permitir a eventual limpeza.



**Figura 4.5** – Caldeira CVS-VL (ARAUTERM) com sua chaminé alimentando uma câmara de secagem de bagaço de malte de cevada.

Os gases de exaustão de uma caldeira correspondem a uma perda de aproximadamente 10 a 30% em relação ao rendimento térmico (TEI, 2007). A partir daí, será considerado 10% do calor gerado pelo combustível (7740,15 kcal/h) para a secagem do bagaço de malte.

Para se chegar à massa de bagaço ideal para a câmara de secagem, será usada a soma da quantidade de calor para a água alcançar sua temperatura de evaporação e a quantidade de calor para a mudança de fase da água líquida para vapor, conforme equação 4.12.

$$q_s = m \cdot c \cdot (T - T_0) + m \cdot L \quad (4.17)$$

Onde,

$q_s$  é a quantidade de calor para a secagem do bagaço [7740,15 kcal/h];

$m$  é a massa de água a ser evaporada [kg/h];

$c$  é o calor específico da água [1 kcal/kg.°C];

$T$  é a temperatura para a evaporação da água [100 °C];

$T_0$  é a temperatura inicial da água [75°C];

$L$  é a entalpia de evaporação da água [540 kcal/kg].

Aplicando a equação 4.12 é possível chegar a uma massa de água evaporada de 13,7 kg/h e considerando a redução do teor de umidade total do bagaço de 86% para 20%, a massa de água evaporada é equivalente a 76,7% da água contida no bagaço. Sendo assim, toda o bagaço de malte gerado em um dia de produção será armazenado no final do expediente e destinado à câmara de secagem no dia útil seguinte, imediatamente antes da caldeira ser acionada.

A figura 4.6 mostra o balanço energético final com as duas soluções propostas de aquecimento solar, além da caldeira de biomassa.



**Figura 4.6 – Balanço energético final.**

A partir do balanço energético final, podemos recalcular as demandas de calor e o consumo de combustíveis subtraindo a demanda de envase em garrafas, afinal esta será suprida pelo sistema de aquecimento solar.

A nova vazão mássica de vapor necessária será de 60,23 kg/h e seu calor gerado será de 34.929 kcal/h. Mantendo a massa de bagaço de malte constante, a quantidade de madeira necessária cairá para 9,23 kg/h, a tabela 4.12 mostra esta relação.

**Tabela 4.12 – Dados finais da caldeira.**

Temperatura de alimentação	Produção de vapor	Calor gerado	Quantidade de lenha necessária	Quantidade de bagaço de malte
80°C	60,23 kg/h	34.929 kcal/h	9,23 kg/h	7,73 kg/h

Apesar das vantagens da lenha para queima em caldeiras, esta pode se tornar escassa e de difícil acesso em períodos chuvosos. Para solucionar este eventual problema, a caldeira selecionada também pode ser alimentada por briquetes, que possuem um PCI de 3884 kcal/kg quando compostos de madeira de eucalipto e casca de arroz (QUIRINO, 2005).

Além de seu poder calorífico ser mais alto em relação a lenha, o briquete também é mais denso, possui menor teor de umidade, fácil armazenamento e também é livre de contaminantes.

Sendo assim, se a lenha for substituída pelo briquete e o mesmo for complementado pelo bagaço de malte, sua vazão mássica será de 6,87 kg/h com uma água de alimentação a 80°C.

#### **4.3. Arranjo elétrico**

Conforme mencionado no capítulo 3.2.2, a demanda elétrica da microcervejaria pode variar de 9,7 a 16,8 kWh para cada hectolitro de cerveja produzida. Adotando o valor mais alto desta demanda (16,8 kWh / hl de cerveja), é possível chegar em um consumo mensal 3.360 kWh. O sistema fotovoltaico proposto tem como objetivo atender 60% desta demanda (2.016 kWh).

##### **4.3.1. Sistema fotovoltaico**

Primeiramente, se faz necessário conhecer a radiação global média no plano dos painéis e o desempenho global do sistema para se chegar a uma área coletora e à disposição de todo o sistema fotovoltaico.

Adotando que a microcervejaria em estudo se situa na região metropolitana de Sorocaba, interior do estado de São Paulo, sua incidência global média é de 5 kWh/(m<sup>2</sup>.dia).

O desempenho global do sistema ( $PR$ ) é a razão entre a produtividade final ( $Y_F$ ) e a produtividade de referência do sistema ( $Y_R$ ), conforme indica a equação 4.18 (ALMEIDA, 2012).

$$PR = Y_F/Y_R \quad (4.18)$$

Sendo que a produtividade final ( $Y_F$ ) e a de referência do sistema ( $Y_R$ ) são expressas pelas equações 4.19 e 4.20, respectivamente (ALMEIDA, 2012).

$$Y_F = E_R/P_{NG} \quad (4.19)$$

$$Y_R = H_{SP}/G_{STC} \quad (4.20)$$

Onde,

$E_R$  é a quantidade de energia elétrica em corrente alternada injetada na rede [2016 kWh/mês];

$P_{NG}$  é a potência nominal do gerador fotovoltaico [kWp];

$H_{SP}$  é a radiação total no plano do painel fotovoltaico [5 kWh/(m<sup>2</sup>.dia)];

$G_{STC}$  é a irradiância de referência [kWp].

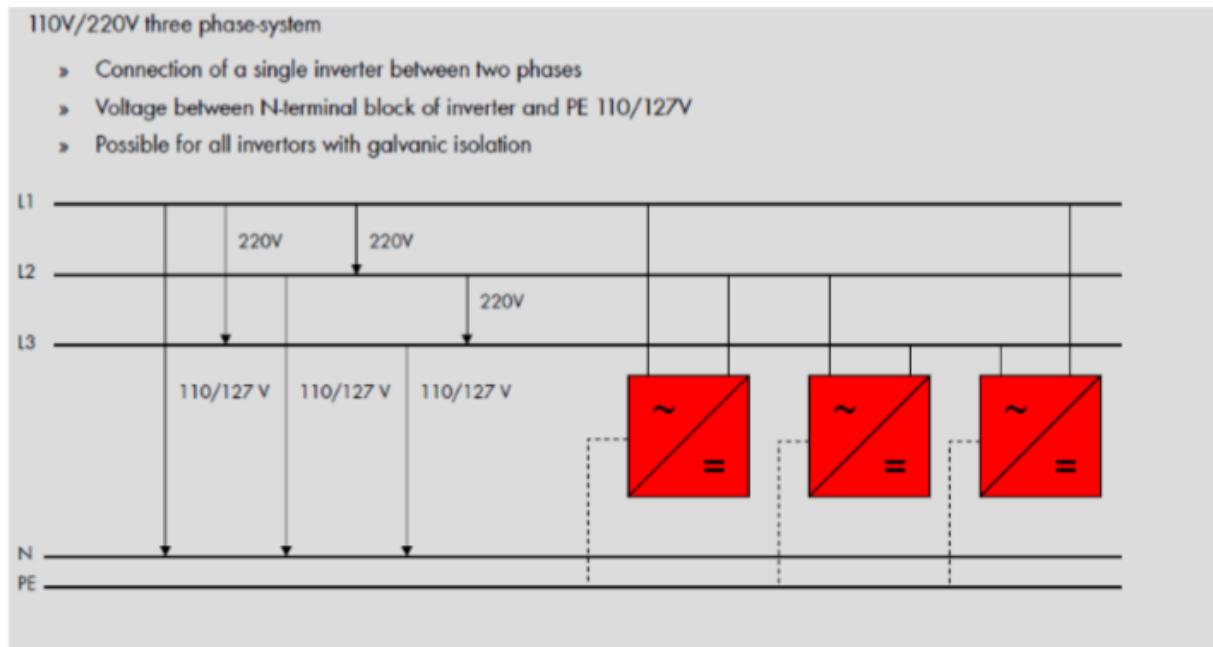
Adotando um gerador fotovoltaico com 1 kWp e a radiação global média de 5 kWh/(m<sup>2</sup>.dia) ( $H_{SP}$ ) é possível chegar a um valor de produtividade de referência do sistema ( $Y_R$ ) de 1.825  $\frac{kWh}{kWp.ano}$ .

Bons sistemas voltaicos possuem um desempenho global entre 0,6 e 0,8 (MARION, ADELSTEIN, et al., 2005, e JAHN e NASSE, 2003). Já um sistema ótimo possui um desempenho mínimo de 0,75 (ALMEIDA, 2012). Portanto, será considerado um desempenho global de 0,75 para o cálculo da produtividade final ( $Y_F$ ), 1.368,75  $\frac{kWh}{kWp.ano}$ .

Com a produtividade final conhecida e a demanda elétrica (2016 kWh/mês) também conhecida, é possível obter uma potência nominal para o gerador fotovoltaico de 17,67 kWp. Com isto, é possível dimensionar o gerador fotovoltaico, foi selecionado o modelo de painel fotovoltaico CS6U-320P da marca Canadian Solar. Este possui uma potência nominal de 320 W, eficiência de 16,46% e dimensões de 1.960 x 992 x 40 mm, serão necessários 56 painéis e uma área coletora de 108,88 m<sup>2</sup> para gerar uma energia final de 2.044 kWh/mês.

Para o dimensionamento dos inversores de frequência deve-se considerar o fornecimento de energia em Sorocaba, este é feito pela CPFL Piratininga com energia em três fases com voltagem 127/220. Como os inversores são especificados

para trabalhar em 220 V, será feito um arranjo com três inversores monofásicos para balancear a produção de energia entre as três fases. A figura 4.7 ilustra a conexão do sistema fotovoltaico à rede.



**Figura 4.7 – Sistema fotovoltaico em rede split-phase (SMA).**

A tabela 4.13 detalha os equipamentos selecionados para a geração fotovoltaica.

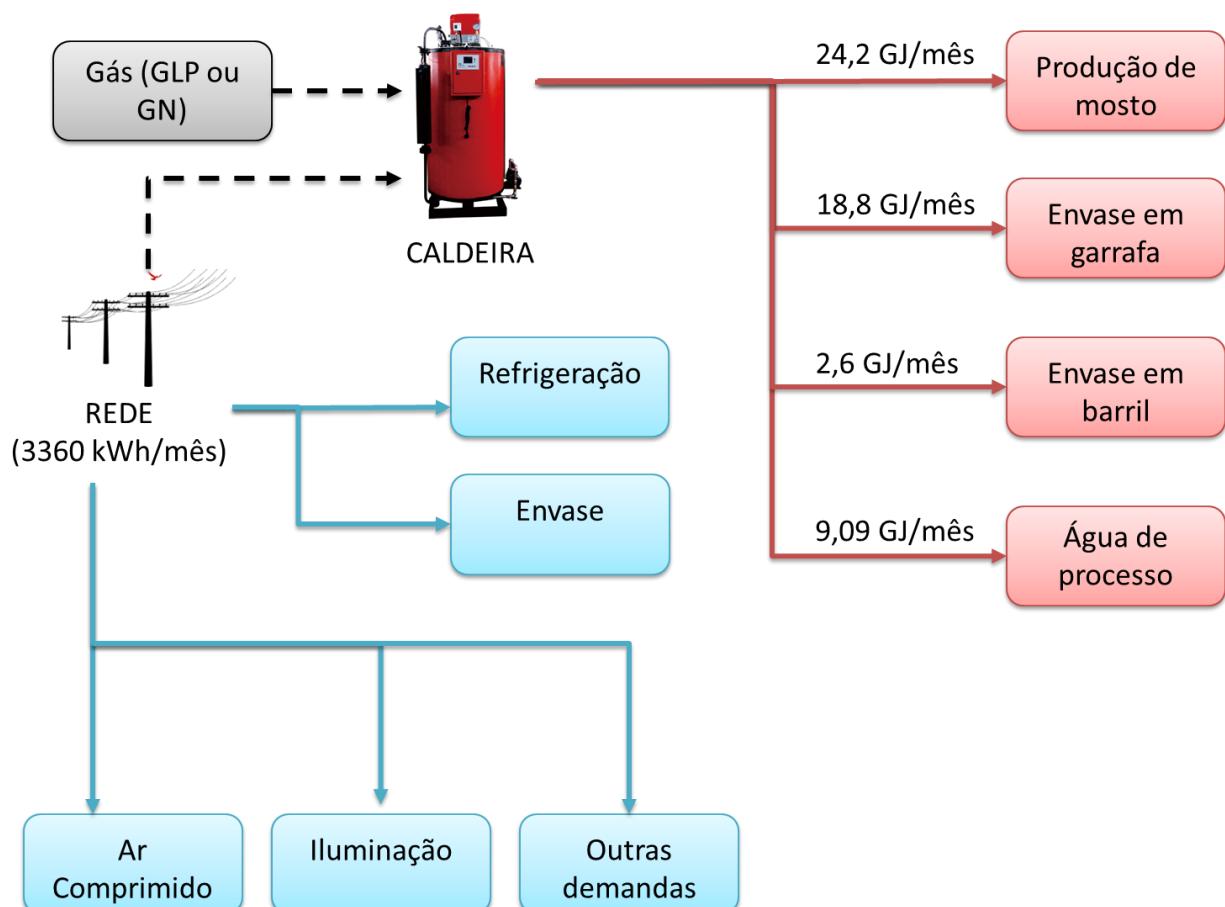
**Tabela 4.13** – Componentes do sistema fotovoltaico.

Equipamento	Tipo	Marca	Modelo	Quantidade
<b>Módulos fotovoltaicos</b>	Painel Solar Fotovoltaico Policristalino de 320 W	Canadian Solar	CS6U-320P	56
<b>Inversores</b>	Grid tie	Primo	Fronius 6.0 - 1 (6.000W)	3
<b>Estrutura de ancoragem</b>	Perfis alumínio	-	-	30
<b>Instalação</b>	Cabo de 6 mm <sup>2</sup> de seção e outros			

## 5. Análise de viabilidade econômica

Para analisar a viabilidade econômica das soluções de geração de energias alternativas propostas, será considerada como situação base uma microcervejaria convencional instalada na região de Sorocaba – SP, com produção de 20.000 litros de cerveja por mês, com uma caldeira para suprir uma demanda de calor do processo de 47,2 GJ/mês, e um consumo mensal de energia elétrica de 3360 kWh atendido pela rede de distribuição local com uma tensão de conexão que obedeça à Resolução Normativa nº 414. Ou seja, para uma carga instalada de até 75 kW será considerado um fornecimento de energia em baixa tensão, já para uma carga maior que 75 kW e inferior (ou igual) a 2.500 kW será considerada tensão média de conexão (2,3 a 34,5 kV).

O balanço energético desta situação base está ilustrado na figura 5.1, vale ressaltar que as caldeiras convencionais para esta aplicação podem ser elétricas ou a gás (GLP ou GN).



**Figura 5.1** – Balanço energético convencional da cervejaria em estudo (CETESB, 2005; DWA, 2010).

Para efeito de cálculo, foram consideradas três opções de caldeiras, a primeira alimentada por gás GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) com produção de 120 kg/h de vapor e eficiência de 85% da marca ETNA, modelo GV-120. Esta deve ser alimentada por 6,85 kg/h de gás GLP para produzir 98,29 kg/h de vapor (considerando um PCI de 11.000 kcal/kg), valor este necessário para atender a demanda de 64.055 kcal/h conforme mencionado na tabela 4.1.

A segunda opção foi considerada a mesma caldeira da primeira, mas desta vez alimentada por gás natural. Usando assim uma vazão de 8,017 m<sup>3</sup>/h de gás com um PCI de 9400 kcal/m<sup>3</sup> para as mesmas condições anteriores.

Já a terceira opção é uma caldeira elétrica de modelo CVS-VE - 120 do fabricante ARAUTERM com potência de 90 kW, capaz de gerar 120 kg/h de vapor com um rendimento de 95%. Sendo assim, o consumo desta caldeira para atender a demanda será de 13.200 kWh/mês.

Considerando um valor de R\$ 4,38 por quilograma de gás GLP, que é a média praticada no Estado de São Paulo, o custo mensal com a demanda de calor será de R\$ 5.281,18 (ANP, 2017). Para a composição do custo mensal de GN, foram considerados os valores da COMGAS para consumidores da indústria com demanda de até 50.000 m<sup>3</sup> por mês. Esta tarifa é composta de um valor fixo de R\$ 236,45 por mês e um valor variável de R\$ 2,213106 / m<sup>3</sup> de gás natural (ambos os valores com ICMS), gerando assim um custo mensal de R\$ 3.359,11.

Já para o preço da energia elétrica foram consideradas as tarifas fornecidas pela CPFL Piratininga, que é a distribuidora local, e foi assumida uma tarifa de energia com o acréscimo previsto na bandeira amarela.

Sendo assim, ao considerar o fornecimento de energia elétrica em baixa tensão, a TUSD (Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição) é tida pelo valor de R\$ 167,86/MWh, a tarifa de energia (TE) é de R\$ 257,75/MWh, e as tarifas PIS, COFINS e ICMS são tidas como 1,65%; 7,6% e 18% (respectivamente). Gerando assim, um preço final de R\$ 1.965,70 por mês.

Mas é possível considerar o fornecimento de energia elétrica em média tensão quando a geração de vapor for suprida pelo aquecedor elétrico, visto que a capacidade instalada, que é de 103 kW (90kW para o aquecedor), ultrapassa o limite mínimo de 75 kW para viabilizar o fornecimento de energia em média tensão

(REN414, 2010). A demanda se enquadra no sub-grupo A4 (2,3 a 25 kV) e tarifa horo-sazonal verde, além de uma bandeira tarifária amarela. A partir daí os preços (com os impostos já descontados) do kWh durante o horário de ponta e fora de ponta serão R\$ 1,122859/kWh e R\$ 0,39233/kWh (respectivamente), além de um custo fixo mensal de R\$ 868,61 para a demanda contratada. Totalizando assim, um custo mensal de R\$ 7.455,59, sendo que a parcela referente à demanda do aquecedor elétrico é de R\$ 6.047,36 por mês.

## **5.1. Investimento**

### **5.1.1. Investimento para o arranjo térmico proposto**

O investimento inicial para a caldeira a biomassa da ARAUTERM é de R\$ 52.941,00 com o custo de sua instalação, e mais R\$ 5.000,00 para a câmara de secagem de biomassa. Já o sistema de aquecimento solar totaliza um investimento de R\$ 42.022,68. A tabela 5.1 mostra a composição destes valores e sua somatória final (R\$ 99.963,68).

**Tabela 5.1** – Investimento inicial para o arranjo térmico proposto.

Equipamento	Valor unitário	Qtde.	Preço final
<b>Coletor solar com 30 tubos a vácuo</b>	R\$ 3.444,00	3	R\$ 10.332,00
<b>Coletor solar com 60 tubos a vácuo</b>	R\$ 6.099,00	3	R\$ 18.297,00
<b>Reservatório térmico (400 litros)</b>	R\$ 1.675,90	1	R\$ 1.675,90
<b>Reservatório térmico (600 litros)</b>	R\$ 1.889,00	2	R\$ 3.778,00
<b>Controlador de temperatura</b>	R\$ 184,00	2	R\$ 368,00
<b>Motobomba 120 W</b>	R\$ 284,00	2	R\$ 568,00
<b>Tubulação + instalação</b>	20% do custo total do SAS	1	R\$ 7.003,78
<b>Caldeira a biomassa (150 kg/h de vapor)</b>	R\$ 33.711,00	1	R\$ 33.711,00
<b>Sistema de descargas automático de fundo</b>	R\$ 3.790,00	1	R\$ 3.790,00
<b>Tanque coletor das descargas (Blow Dow)</b>	R\$ 5.440,00	1	R\$ 5.440,00
<b>Instalação da caldeira</b>	R\$ 10.000,00	1	R\$ 10.000,00
<b>Câmara de secagem + acesso</b>	R\$ 5.000,00	1	R\$ 5.000,00
<b>Investimento inicial para o arranjo térmico completo</b>			<b>R\$ 99.963,68</b>

Para a alimentação da caldeira foi considerado um fornecedor de lenha de eucalipto e pinus situado no município de São Roque (SP), esta não dista mais do que 38 km do centro de Sorocaba. Este fornecedor tem um preço de R\$ 65,00 por m<sup>3</sup> de lenha, já com o frete incluso e lenha fornecida possui um teor de umidade de 30%, além de uma densidade de 450 kg/m<sup>3</sup>.

Além do preço de aquisição da lenha, ainda há uma taxa anual de reflorestamento a ser paga para a utilização da mesma. Para o Estado de São Paulo devem ser respeitadas a Resolução Conjunta SMA-IBAMA nº 04 e a Lei Estadual nº10.780/2001. Sendo assim, para cada um metro cúbico de lenha em tora

consumida, devem ser repostas 6 árvores ou paga a taxa de R\$ 0,75 para cada árvore citada, conforme Portaria DEPRN nº03 de 2006.

A tabela 5.2 estabelece uma relação entre o custo de alimentação do arranjo proposto, uma caldeira elétrica, uma caldeira a gás natural ou GLP e uma caldeira a lenha. Note que a diferença de preço do custo final da lenha para as outras alternativas é altíssima, chegando a ter um custo mensal com combustível mais do que doze vezes menor que o custo de uma caldeira elétrica e quase seis vezes menor do que o custo mensal de uma caldeira a gás natural. E ainda se compararmos o arranjo térmico proposto com uma caldeira a lenha para atender toda a demanda térmica, é possível observar uma redução de quase 60% no custo mensal.

**Tabela 5.2** – Relação entre o consumo e o custo de caldeira disponíveis para a microcervejaria em estudo.

	Caldeira elétrica	Caldeira a gás GLP	Caldeira a gás natural	Caldeira a lenha	Arranjo térmico proposto
<b>Consumo de combustível</b>	13200 kWh/mês	1205,75 kg/mês	1410,984 m <sup>3</sup> /mês	8,86535 m <sup>3</sup> /mês	3,609725 m <sup>3</sup> /mês
<b>Preço por unidade</b>	R\$0,39/kWh + R\$868,61/mês	R\$4,38/kg	R\$2,38/m <sup>3</sup>	R\$65,75/m <sup>3</sup>	R\$65,75/m <sup>3</sup>
<b>Custo mensal</b>	<b>R\$ 6.047,36</b>	<b>R\$ 5.281,18</b>	<b>R\$ 3.359,11</b>	<b>R\$ 616,14</b>	<b>R\$ 250,88</b>

### 5.1.2. Investimento para o arranjo elétrico proposto

O investimento inicial para o arranjo do sistema solar fotovoltaico é de R\$ 117.907,20, sendo que o conjunto de painéis fotovoltaicos corresponde a 31,58% deste valor. A tabela 5.3 detalha estes custos além dos inversores, ancoragens, mão de obra e instalações.

**Tabela 5.3 – Investimento inicial para o sistema solar fotovoltaico proposto.**

Equipamento	Valor unitário	Qtde.	Preço final
Painel fotovoltaico 320Wp	R\$ 664,95	56	R\$ 37.237,20
Inversor de frequência 6000W	R\$ 11.890,00	3	R\$ 35.670,00
Estrutura de alumínio	R\$ 500,00	30	R\$ 15.000,00
Mão de obra / Instalações	R\$ 30.000,00	1	R\$ 30.000,00
<b>Investimento inicial para o sistema fotovoltaico completo</b>			<b>R\$ 117.907,20</b>

## 5.2. Custo de operação e manutenção

O custo anual de operação e manutenção para sistemas fotovoltaicos é extremamente baixo, chegando a no máximo 0,5% do investimento inicial (NREL, 2017). Além disto, a vida útil dos inversores varia de 10 a 15 anos conforme informado pelo fabricante.

Para o sistema de aquecimento solar, será considerado um custo de operação e manutenção igual a 1,5% de seu investimento inicial.

Já para a caldeira será considerado um custo de 3% ao ano de seu investimento inicial.

## 5.3. Receitas

A partir da tabela 5.2 é possível analisar a economia do sistema térmico proposto em relação às tecnologias convencionais por mês de consumo. Além deste, há a economia de energia devido a geração fotovoltaica de 2044 kWh/mês, permitindo uma economia anual de R\$ 14.349,64.

Foi considerada também uma perda de capacidade anual, tanto para a geração fotovoltaica quanto para o arranjo térmico, de 0,75% e uma inflação de 6% ao ano.

#### **5.4. Análise financeira**

Considerando uma vida útil para o sistema fotovoltaico de 25 anos e ocorrência da troca dos inversores de frequência no 13º ano, a tabela 5.4 apresenta toda a análise financeira da instalação deste sistema com uma taxa de desconto de 9%, acompanhando a taxa SELIC. Nesta tabela é possível verificar a estimada variação do fluxo de caixa ao longo dos 25 anos em estudo e é possível perceber que o retorno só ocorre a partir do 10º ano.

**Tabela 5.4** – Projeção do fluxo de caixa para a implantação do sistema de geração fotovoltaica.

Ano	Fluxo de Caixa	Valor Presente	Fluxo Ajustado
			Acumulado
1	-R\$ 117.907,20	-	-R\$ 117.907,20
2	R\$ 14.507,00	R\$ 13.309,18	-R\$ 104.598,02
3	R\$ 14.672,55	R\$ 13.461,06	-R\$ 91.136,97
4	R\$ 14.846,73	R\$ 13.620,85	-R\$ 77.516,12
5	R\$ 15.029,96	R\$ 13.788,96	-R\$ 63.727,16
6	R\$ 15.222,73	R\$ 13.965,81	-R\$ 49.761,35
7	R\$ 15.425,54	R\$ 14.151,87	-R\$ 35.609,48
8	R\$ 15.638,91	R\$ 14.347,62	-R\$ 21.261,86
9	R\$ 15.863,37	R\$ 14.553,55	-R\$ 6.708,30
10	R\$ 16.099,53	R\$ 14.770,21	R\$ 8.061,91
11	R\$ 16.347,97	R\$ 14.998,14	R\$ 23.060,05
12	R\$ 16.609,35	R\$ 15.237,93	R\$ 38.297,98
13	-R\$ 18.785,67	-R\$ 17.234,56	R\$ 21.063,42
14	R\$ 17.173,62	R\$ 15.755,62	R\$ 36.819,03
15	R\$ 17.477,97	R\$ 16.034,84	R\$ 52.853,87
16	R\$ 17.798,16	R\$ 16.328,59	R\$ 69.182,46
17	R\$ 18.135,02	R\$ 16.637,64	R\$ 85.820,10
18	R\$ 18.489,42	R\$ 16.962,77	R\$ 102.782,86
19	R\$ 18.862,25	R\$ 17.304,82	R\$ 120.087,68
20	R\$ 19.254,50	R\$ 17.664,68	R\$ 137.752,36
21	R\$ 19.667,16	R\$ 18.043,26	R\$ 155.795,62
22	R\$ 20.101,30	R\$ 18.441,56	R\$ 174.237,18
23	R\$ 20.558,03	R\$ 18.860,58	R\$ 193.097,76
24	R\$ 21.038,54	R\$ 19.301,42	R\$ 212.399,18
25	R\$ 21.544,06	R\$ 19.765,20	R\$ 232.164,38

Após analisar a tabela 5.4, é possível chegar a um *Payback* descontado de pouco mais 9 anos e 5 meses, um Valor Presente Líquido (VPL) de R\$ 232.164,38 e

uma Taxa Interna de Retorno (TIR) de 7%. A tabela 5.5 destaca estes valores, além do valor de investimento inicial.

**Tabela 5.5** – Análise financeira da implantação do sistema de geração fotovoltaica.

Investimento inicial	Payback descontado	VPL	TIR
R\$ 117.907,20	9,454 anos	R\$ 232.164,38	7%

A partir dos resultados obtidos, é possível perceber que a TIR para este projeto está menor que a taxa de desconto (9%). Sendo assim, mesmo com a economia de energia elétrica que o sistema de geração fotovoltaica propicia, a aquisição do mesmo não é viável para a microcervejaria.

Já para o arranjo térmico proposto, a vida útil considerada foi de 20 anos com a mesma taxa de desconto anterior (9%). A tabela 5.6 detalha a projeção do fluxo de caixa para este projeto ao longo da vida útil considerada em comparação com um sistema térmico alimentado por uma caldeira a gás natural, utilizando os consumos destacados na tabela 5.2.

**Tabela 5.6** – Projeção do fluxo de caixa para a implantação do arranjo térmico proposto, substituindo um sistema a gás natural.

Ano	Fluxo de Caixa	Valor Presente	Fluxo Ajustado
			Acumulado
1	-R\$ 99.963,68	-	-R\$ 99.963,68
2	R\$ 36.871,60	R\$ 33.827,16	-R\$ 66.136,52
3	R\$ 36.422,20	R\$ 33.414,86	-R\$ 32.721,66
4	R\$ 35.949,41	R\$ 32.981,11	R\$ 259,45
5	R\$ 35.452,00	R\$ 32.524,77	R\$ 32.784,23
6	R\$ 34.928,71	R\$ 32.044,69	R\$ 64.828,91
7	R\$ 34.378,18	R\$ 31.539,61	R\$ 96.368,53
8	R\$ 33.798,99	R\$ 31.008,25	R\$ 127.376,78
9	R\$ 33.189,66	R\$ 30.449,23	R\$ 157.826,01
10	R\$ 32.548,61	R\$ 29.861,11	R\$ 187.687,12
11	R\$ 31.874,20	R\$ 29.242,38	R\$ 216.929,50
12	R\$ 31.164,68	R\$ 28.591,45	R\$ 245.520,95
13	R\$ 30.418,23	R\$ 27.906,63	R\$ 273.427,58
14	R\$ 29.632,93	R\$ 27.186,17	R\$ 300.613,76
15	R\$ 28.806,75	R\$ 26.428,21	R\$ 327.041,97
16	R\$ 27.937,57	R\$ 25.630,80	R\$ 352.672,77
17	R\$ 27.023,15	R\$ 24.791,88	R\$ 377.464,66
18	R\$ 26.061,14	R\$ 23.909,30	R\$ 401.373,96
19	R\$ 25.049,05	R\$ 22.980,78	R\$ 424.354,74
20	R\$ 23.984,28	R\$ 22.003,93	R\$ 446.358,67

Com a projeção do fluxo de caixa ajustado destacado na tabela 5.6 é possível calcular um *Payback* descontado de aproximadamente 4 anos, um VPL de R\$ 446.358,67 e uma TIR de 32%, note que esta última é muito maior que a taxa de desconto e isto já viabiliza o projeto. A tabela 5.7 mostra estes resultados.

**Tabela 5.7** – Análise financeira da implantação do arranjo térmico proposto em comparação com um sistema alimentado por uma caldeira a gás natural (GN).

Investimento inicial	Payback descontado	VPL	TIR
R\$ 99.963,68	3,992 anos	R\$ 446.358,67	32%

O resultado da análise financeira do arranjo térmico proposto, em comparação com um sistema alimentado por gás natural, se mostrou razoável. Porque apesar de sua TIR ter um alto valor, seu *Payback* não é tão atrativo (pouco menos de 4 anos para o retorno financeiro).

No entanto, o uso de gás natural depende da localização da microcervejaria, afinal a distribuição do mesmo não é tão pulverizada no Estado de São Paulo, conforme mencionado no capítulo 3.

Sendo assim, serão apresentadas as análises de viabilidade econômica do arranjo térmico proposto em comparação com um sistema para caldeira elétrica e a gás GLP. A tabela 5.8 mostra a projeção do fluxo de caixa para o arranjo proposto em comparação com o aquecimento elétrico, considerando que a energia elétrica será fornecida em média tensão. É possível notar que o cenário ficou muito mais favorável com esta comparação.

**Tabela 5.8** – Projeção do fluxo de caixa para a implantação do arranjo térmico proposto, substituindo um sistema de aquecimento elétrico.

Ano	Fluxo de Caixa	Valor Presente	Fluxo Ajustado Acumulado
1	-R\$ 99.963,68	-	-R\$ 99.963,68
2	R\$ 70.809,78	R\$ 64.963,10	-R\$ 35.000,58
3	R\$ 72.126,86	R\$ 66.171,43	R\$ 31.170,85
4	R\$ 73.512,49	R\$ 67.442,65	R\$ 98.613,50
5	R\$ 74.970,24	R\$ 68.780,04	R\$ 167.393,53
6	R\$ 76.503,87	R\$ 70.187,04	R\$ 237.580,57
7	R\$ 78.117,33	R\$ 71.667,28	R\$ 309.247,85
8	R\$ 79.814,77	R\$ 73.224,56	R\$ 382.472,41
9	R\$ 81.600,56	R\$ 74.862,90	R\$ 457.335,30
10	R\$ 83.479,29	R\$ 76.586,51	R\$ 533.921,81
11	R\$ 85.455,82	R\$ 78.399,84	R\$ 612.321,65
12	R\$ 87.535,23	R\$ 80.307,55	R\$ 692.629,20
13	R\$ 89.722,87	R\$ 82.314,56	R\$ 774.943,75
14	R\$ 92.024,37	R\$ 84.426,03	R\$ 859.369,78
15	R\$ 94.445,67	R\$ 86.647,40	R\$ 946.017,18
16	R\$ 96.993,00	R\$ 88.984,40	R\$ 1.035.001,58
17	R\$ 99.672,91	R\$ 91.443,04	R\$ 1.126.444,62
18	R\$ 102.492,32	R\$ 94.029,65	R\$ 1.220.474,26
19	R\$ 105.458,47	R\$ 96.750,89	R\$ 1.317.225,15
20	R\$ 108.579,01	R\$ 99.613,77	R\$ 1.416.838,93

Já a tabela 5.9 mostra uma comparação entre o arranjo proposto e um sistema alimentado por uma caldeira a gás GLP, detalhando a projeção do fluxo de caixa ajustado acumulado.

**Tabela 5.9** – Projeção do fluxo de caixa para a implantação do arranjo térmico proposto, substituindo um sistema a gás GLP.

Ano	Fluxo de Caixa	Valor Presente	Fluxo Ajustado Acumulado
1	-R\$ 99.963,68		-R\$ 99.963,68
2	R\$ 61.137,07	R\$ 56.089,05	-R\$ 43.874,63
3	R\$ 61.950,68	R\$ 56.835,49	R\$ 12.960,86
4	R\$ 62.806,65	R\$ 57.620,78	R\$ 70.581,64
5	R\$ 63.707,16	R\$ 58.446,94	R\$ 129.028,58
6	R\$ 64.654,55	R\$ 59.316,10	R\$ 188.344,67
7	R\$ 65.651,25	R\$ 60.230,50	R\$ 248.575,18
8	R\$ 66.699,83	R\$ 61.192,50	R\$ 309.767,68
9	R\$ 67.802,98	R\$ 62.204,57	R\$ 371.972,25
10	R\$ 68.963,56	R\$ 63.269,32	R\$ 435.241,56
11	R\$ 70.184,54	R\$ 64.389,48	R\$ 499.631,05
12	R\$ 71.469,07	R\$ 65.567,96	R\$ 565.199,01
13	R\$ 72.820,47	R\$ 66.807,77	R\$ 632.006,78
14	R\$ 74.242,20	R\$ 68.112,11	R\$ 700.118,89
15	R\$ 75.737,94	R\$ 69.484,35	R\$ 769.603,24
16	R\$ 77.311,53	R\$ 70.928,01	R\$ 840.531,25
17	R\$ 78.967,02	R\$ 72.446,81	R\$ 912.978,06
18	R\$ 80.708,69	R\$ 74.044,67	R\$ 987.022,73
19	R\$ 82.541,01	R\$ 75.725,69	R\$ 1.062.748,42
20	R\$ 84.468,69	R\$ 77.494,22	R\$ 1.140.242,64

Por fim, é possível chegar ao VPL de ambos, assim como suas TIRs e seu Paybacks descontados. A tabela 5.10 detalha os resultados da comparação entre o arranjo proposto e as demais configurações (GN, GLP e elétrica).

**Tabela 5.10** – Análise financeira da implantação do arranjo térmico proposto.

Configuração	Payback descontado	VPL	TIR
Arranjo proposto x GN	4 anos	R\$ 446.358,67	32%
Arranjo proposto x Aquecimento elétrico	2 anos e 7 meses	R\$ 1.416.838,93	67%
Arranjo proposto x GLP	2 anos e 9 meses	R\$ 1.140.242,64	57%

A partir dos resultados obtidos, é possível concluir que o arranjo térmico proposto é uma opção viável para substituir qualquer um dos três sistemas mais comuns de fornecimento de calor para o processo produtivo de uma cervejaria artesanal.

A taxa interna de retorno alcançada em cada uma das análises para o arranjo térmico apresentou um valor muito mais elevado que a taxa de desconto (9%). Porém o *Payback* para a substituição da alimentação por gás natural apresentou um valor alto, aproximadamente 4 anos, enquanto as outras comparações não chegaram a 3 anos.

Conforme já mencionado no capítulo 2.1.1.2, o briquete é uma alternativa viável quando há uma escassez de lenha (períodos chuvosos). Existem fornecedores na região de Sorocaba e seus arredores que comercializam briquete a um valor de R\$ 20,00 para cada saco de 25 kg e garantem um poder calorífico inferior de no mínimo 3.900 kcal/kg. Desta forma, é possível substituir a lenha pelo briquete gerando um consumo de 6,84 kg/h do mesmo, se combinado com a queima do bagaço de malte. Sendo assim, o custo mensal do briquete seria de R\$ 962,96 (R\$ 712,09 a mais do que o custo mensal da lenha) e o mesmo ocuparia menos da metade do espaço que a lenha ocupa, visto que a densidade do briquete varia de 1.000 a 1.500 kg/m<sup>3</sup> e a lenha não passa de 450 kg/m<sup>3</sup> (LIPPEL, 2013).

## **6. Conclusão e considerações finais**

O sistema alternativo de fornecimento de energia térmica e elétrica proposto (a partir de coletores solares térmicos, geradores fotovoltaicos e caldeira a biomassa) para cervejarias artesanais é tecnicamente viável, propõe um destino melhor a uma parte considerável dos resíduos sólidos do processo produtivo da cerveja, gera uma alta economia de combustível e energia elétrica, confere uma maior confiabilidade e segurança para o atendimento das demandas energéticas, além de contribuir para o meio ambiente com o uso de fontes renováveis para geração de energia e menores emissões de poluentes.

Para o estudo da viabilidade econômica do sistema proposto, foi possível analisar a significativa vantagem do arranjo térmico composto pelo aquecimento solar e combustão direta de biomassa para atender a demanda em relação às tecnologias convencionais para esta aplicação (aquecedores elétricos e caldeiras a gás). No entanto, o sistema de geração fotovoltaico apresentou resultados pouco atrativos do ponto de vista financeiro, devido ao fato de que seu retorno é demorado (mais de 9 anos) e sua Taxa Interna de Retorno (TIR) ficou abaixo da taxa SELIC (9%), evidenciando que sua taxa de retorno seria menor que o seu custo de capital.

As tecnologias para a geração fotovoltaica ainda possuem um custo muito alto no Brasil, inviabilizando o uso das mesmas para algumas aplicações.

O mercado de cervejarias artesanais está em constante crescimento no país e apresenta boas oportunidades de melhoria para eficiência energética. Algumas destas oportunidades para futuros estudos são listadas abaixo:

- Uso de chiller de absorção com o vapor produzido na caldeira para os processos que necessitam de refrigeração;
- Cogeração a partir de gás, biomassa ou biogás;
- Melhor recuperação de calor dos processos.

## 7. Bibliografia

- ABNT NBR 15569:2008. *Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto – Projeto e instalação.* 2008.
- ALMEIDA, M. P. *Qualificação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede.* Dissertação de Mestrado em Energia. São Paulo, 2012.
- ANEEL. *BIG – Banco de Informações de Geração.* 2017.
- ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis). *Evolução dos Preços de GLP – Resumo Brasil.* Brasil, 2017.
- BERENHAUSER, A. H. T.; SOBRINHO, P. A. *Fabricação de Cervejas e Refrigerantes – Tratamento de Efluentes.* PHD 5872 – Caracterização e Tratamento de Despejos Industriais. 1999
- BIZZO, W. A. *Geração, Distribuição e Utilização de Vapor.* FEM – Unicamp. Campinas (SP), 2003.
- CETESB, Mateus Sales dos Santos e Flávio de Miranda Ribeiro. *Cervejas e Refrigerantes.* São Paulo, 2005.
- CHANDLER, P. *Energy prediction of feeds by forage testing explorer.* Feedstuffs. 1990.
- CORDEIRO, L. G. *Caracterização e viabilidade econômica do bagaço de malte oriundo de cervejarias para fins energéticos.* Dissertação de Mestrado – UFPB/CT. João Pessoa, 2011.
- DMA; CPTEC; INPE; MCT. *Atlas Brasileiro de Energia Solar.* 1º ed. São José dos Campos, 2006.
- DWA, standard M 732. *Brewery waste water.* German Association for Water, Wastewater and Waste. Germany, 2010.
- DRAGONE, Solange Inês Mussatto. *Aproveitamento integral de subproduto da indústria cervejeira em processos químicos e biotecnológicos.* Tese de Doutorado em Biotecnologia Industrial para a Escola de Engenharia de Lorena da USP. Lorena, 2007.
- EMBRAPA, Agroenergia. *Briquetagem e Peletização de Resíduos Agrícolas e Florestais.* Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Governo Federal. Brasília, 2012.
- ESCOBAR, J. *O potencial de produção sustentável de madeira para energia no Brasil: o caso dos pellets de madeira.* Tese de doutorado do Instituto de Energia Ambiente da USP, 2016.

ICB, Instituto da Cerveja Brasil. *A Cena Craft Beer no Brasil por Instituto da Cerveja Brasil*. São Paulo, 2016.

IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY), SHC. *Solar Heat Worldwide*. Graz, Austria. 2017.

\_\_\_\_\_. *2016 Snapshot of Global Photovoltaic Markets*. Photovoltaic Power Systems Programme. Report IEA PVPS T1-31. 2017.

INPE, Secretaria de Energia do Governo do Estado de São Paulo. *Energia Solar Paulista: Levantamento do Potencial*. São Paulo, 2013.

FOELKEL, C. *Resíduos Sólidos Industriais do Processo de Fabricação de Celulose Kraft de Eucalipto. Parte 5: Resíduos Minerais*. Eucalyptus Online Book & Newsletter. ABTCP (Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel). Brasil, 2011.

FOUST, A. S., WENZEL, L. A., CLUMP, C. W., MAUS, L. & ANDERSEN, L. B. *Princípios das Operações Unitárias*. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois, 1980.

GESP (Governo do Estado de São Paulo). *Áreas de Exploração e Produção de Petróleo e Gás Natural da Bacia de Santos e de Concessão da Distribuição de Gás Canalizado no Estado de São Paulo*. Secretaria de Energia e Mineração. São Paulo, 2016.

HERNÁNDEZ, A.M.; RODRÍGUEZ, J.L.; LÓPEZ, B.; ZERQUERA, O.L., *Caracterización química y funcional del afrecho de malta*. Alimentaria, p.105-107, may. 1999.

HUIGE, N. J.. *Brewery by-products and effluents*. In: HARDWICK, W.A. (ed.). *Handbook of Brewing*. New York: Marcel Dekker, 1994. p.501-550.

JOHNSON, C. O. / HUBER, J. T. *Aerobic storage and utilization of ammoniatrated distillers wet grains for lactating dairy cows*. Journal of Dairy Science, 1987

KLOCK, U. / MUÑIZ, G. I. B. / HERNANDEZ, J. A. / ANDRADE, A. S. *Química da Madeira*. 3º Ed. Revisada, Universidade Federal do Paraná. 2005.

LIPPEL. *Briquetes de Biomassa e Carvão*. Santa Catarina, 2013.

NASCIMENTO, R. L. *Energia Solar no Brasil: Situação e Perspectivas*. Câmara dos Deputados. 2017.

NREL (National Renewable Energy Laboratory). *New Best-Practices Guide for Photovoltaic System Operations and Maintenance*. Golden, CO. USA, may 2017.

QUIRINO, W. F.; DO VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. *Poder Calorífico da Madeira e de Materiais Ligno-celulósicos*. Revista da Madeira nº 89, abril 2005, pág. 100-106. IBAMA/LPF. Brasília, 2005.

REINOLD, M.R. *Manual Prático de Cervejaria*, 1. ed. São Paulo: ADEN Editora e Comunicações Ltda, 1997. 214 p.

SANTOS, M.; JIMÉNEZ, J.J.; BARTOLOMÉ, B.; GÓMEZ-CORDOVÉS, C.; DEL NOZAL, M.J. *Variability of brewer's spent grain within a brewery*. Food Chemistry, v.80, p.17-21, 2003.

SIMÕES-MOREIRA, José Roberto. *Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética*. 1 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

SORRELL, S. *Barriers to Energy Efficiency in the UK Brewing Sector. Science and Technology Policy Research*. (SPRU). Un. of Sussex. 2000

TEI (Thailand Environment Institute), The Energy Conservation Center (Japan). *Thermal Energy Efficiency Improvement Handbook (TEEI Handbook)*. Thailand, 2007.

VELEBIL, J. / MALAT'ÁK, J. / BRADNA, J. *Mass and energetic yields of hydrochar from brewer's spent grain*. Agronomy Research 14, Czech University of Life Sciences Prague, Faculty of Engineering, Department of Technological Equipment of Buildings, 2016.

WORLDATLAS. *Top 10 Beer Producing Nations*.

<http://www.worldatlas.com/articles/top-10-beer-producing-nations.html>. 2017.

## **Anexo A - Caldeira**