

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DANNIELLA ROSA
CESAR AUGUSTO ROVEDA DEBONA
MATHEUS EDUARDO DE BRAGA DAVID
NAYLENE FRACCANABBIA
RAFAEL NISHIMURA
VALÉRIA BAEZ LOVATO

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DE ENERGIAS
RENOVÁVEIS EM MICROCERVEJARIA**

CURITIBA

2021

DANNIELLA ROSA
CESAR AUGUSTO ROVEDA DEBONA
MATHEUS EDUARDO DE BRAGA DAVID
NAYLENE FRACCANABBIA
RAFAEL NISHIMURA
VALÉRIA BAEZ LOVATO

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS EM
MICROCERVEJARIA**

Projeto apresentado ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis e Eficiência Energética.

Orientador: Prof. Dr. Christian Scapulatempo Strobel.

CURITIBA
2021

RESUMO

A indústria cervejeira vem crescendo anualmente no Brasil e esse crescimento é acompanhado de um consumo cada vez maior de energia. As cervejarias consomem grandes quantidades de energia térmica e elétrica, portanto, novos meios de economizar energia e diminuir os impactos ambientais do uso de fontes não renováveis se tornam cada vez mais necessários. O presente artigo tem por objetivo analisar a utilização de painéis solares e de um biodigestor para atender ao consumo de energia de uma microcervejaria. A partir desse estudo, pode-se verificar que essas fontes de energia são viáveis economicamente, principalmente o sistema de aquecimento solar (SAS), tendo em vista sua fácil implementação.

Palavras-chave: Cervejarias. Energia. Fontes Renováveis.

ABSTRACT

The brewery business has been growing in Brazil annually and this growth is accompanied by an ever-growing energy consumption. The breweries consume large quantities of thermal and electrical energy, therefore, new ways to save energy and reduce environmental impacts caused by non-renewable energy sources become increasingly necessary. This article seeks to analyze the use of solar panels and a biodigester to meet the energy demands of a microbrewery. From this study, it can be verified that these energy sources are economically viable, especially the solar heating system (SAS), considering its simple implementation.

Keywords: Breweries. Energy. Renewable Sources.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – ETAPAS DA PRODUÇÃO CERVEJEIRA.....	11
FIGURA 2 – PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO BIOGÁS	12
FIGURA 3 – FRAÇÃO SOLAR MENSAL.....	18
FIGURA 4 – SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR PROPOSTO	19

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PARÂMETROS ADOTADOS PARA O DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR.....	16
TABELA 2 - VALORES UTILIZADOS PARA DIMENSIONAMENTO INICIAL DO SISTEMA SOLAR	17
TABELA 3 - RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO PELA METODOLOGIA CARTA F ...	18
TABELA 4 - ESTIMATIVA DE INVESTIMENTO INICIAL	19
TABELA 5 - VALORES ADOTADOS PARA O CÁLCULO DE CUSTOS COM OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DO SISTEMA	20
TABELA 6 - PARÂMETROS DA ANÁLISE ECONÔMICA	20

1. INTRODUÇÃO

A cerveja é uma bebida milenar consumida em todo o mundo. É a bebida alcoólica mais produzida e consumida na atualidade. Existem em torno de 150 tipos diferentes de cervejas, permitindo a satisfação de diversos gostos e tornando essa bebida ainda mais popular. No Brasil não é diferente, em 2019 o país foi o terceiro que mais produziu cerveja no mundo, ficando atrás somente da China e dos Estados Unidos (BARTHASS, 2020). No ano de 2021, os Brasileiros beberam cerca de 13,31 bilhões de litros de cerveja – 62,2 litros por pessoa em média –, um aumento de 5,3% em relação ao ano anterior, e 68,6% dos adultos maiores de 18 anos consumiram a bebida, cerca de 105 milhões de pessoas (ALVARENGA, 2021).

Esse amplo consumo faz com que a indústria cervejeira no Brasil cresça ano a ano. Segundo o Anuário da Cerveja (2020), em 2020 o Brasil possuía 1383 empresas cervejeiras, um aumento de 14,4% comparado ao ano de 2019. É ainda projetado que o número de cervejarias no Brasil triplique até 2025. As cervejarias são divididas em 3 categorias, de acordo com sua produção mensal de cerveja: Nanocervejaria (até 1000 litros), Microcervejaria (de 1000 até 200 mil litros) e Cervejaria (acima de 200 mil litros/mês).

A produção de cerveja consome grandes quantidades de energia térmica e elétrica. É estimado que um terço da energia total consumida por cervejarias seja elétrica e outros dois terços sejam térmica, já que em alguns dos processos da fabricação da cerveja é utilizada água fervente, atingindo temperaturas de 105 °C (MAUTHNER et al., 2014). Para atender o consumo de energia térmica, são utilizadas normalmente duas fontes de energia: combustão de gás natural – não renovável, cuja extração traz grandes impactos ambientais –, e painéis solares – que produzem energia renovável, limpa e com baixo impacto ambiental. Nas cervejarias maiores, máquinas consomem a maior parte da energia elétrica no controle dos processos automatizados, como envase, separação em embalagens para transporte, entre outros. Existe ainda um grande consumo de água potável para a produção de cerveja: a AMBEV, maior cervejaria do Brasil e do mundo, atualmente utiliza cerca de 2,4 litros de água para a produção de 1 litro de cerveja (AMBEV, 2021). Porém, para cervejarias menores, há um consumo ainda maior, podendo chegar a 10 litros de água por litro de cerveja (G1, 2016).

O grande consumo de água e energia causa impactos socioambientais, que tendem a aumentar com o crescimento da produção e do consumo de cerveja.

Estratégias para economia desses recursos são importantes para combater as mudanças climáticas. Para a energia térmica, tem-se a diminuição das emissões de gases estufa da combustão do gás natural através da energia solar. Outra forma de evitar o desperdício de energia nas cervejarias é reutilizar o bagaço e outros resíduos dos processos da produção de cerveja. Esse bagaço pode ser queimado e convertido em energia térmica, além de poder ser colocado em um biodigestor para a produção de gás natural.

O objetivo deste artigo é analisar o consumo de energia dentro de cervejarias, focando principalmente na energia térmica para o aquecimento da água, e estudar a cogeração de energia de duas alternativas para satisfazer o consumo da planta. A energia solar térmica, proveniente de painéis solares, será considerada para esquentar a água utilizada nos processos. Além disso, os resíduos sólidos dos processos de fabricação de cerveja serão depositados em um biodigestor, gerando biogás, cuja energia térmica de sua combustão também será utilizada para o aquecimento da água. Através desse estudo, é esperado analisar formas de amenizar o desperdício e consumo de energia e estudar fontes menos poluentes para atender os processos da planta cervejeira.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Há alguns anos nota-se que o uso de fontes renováveis de energia vem sendo expandido, tendo como intuito realizar a transição do uso de energia fóssil para o uso de energia limpa (JI; DU; GENG, 2019). Tal fato visa reduzir a poluição ambiental e a emissão de CO_2 , visto que as fontes não renováveis de energia prejudica o meio ambiente, aumentando o aquecimento global e impactando nas condições climáticas (AHMED; KHALID, 2019).

Entre os séculos XVIII e XIX houve um memorável desenvolvimento tecnológico no que diz respeito à exploração de recursos energéticos, principalmente do carvão mineral e de outros combustíveis fósseis. Tal desenvolvimento se deve ao uso da energia em indústrias e meios de transporte. A partir daquele período, nos países industrializados ocorreu um acentuado aumento da demanda energética, em grande parte por derivados de petróleo e eletricidade (SOUTO, 2019).

Devido à expansão exponencial da população e da economia mundial, fato que se deu a partir da década de 1970, houve um aumento na demanda energética global,

principalmente das fontes primárias de combustíveis fósseis. Salienta-se que tais fontes primárias compõem a base da matriz energética mundial (CARDOSO, 2007).

Vale ressaltar que há esforços em investir e aumentar o consumo de energia proveniente de fontes renováveis como a solar e a eólica. Países tais como Estados Unidos da América, China e Alemanha investem cada vez mais em pesquisas para tornar mais eficiente a captação e a distribuição de energia originada pelo vento e pelo sol.

Atualmente ao escolher as fontes energéticas para compor a matriz energética de um país, deve-se levar em consideração alguns fatores, como por exemplo o impacto ambiental que tais fontes produzem. Diante disso, com o rápido desenvolvimento da economia e das questões ambientais, o mundo todo vem desenvolvendo e expandindo fontes limpas e sustentáveis (AZEVEDO et al., 2019). O foco é realizar a transição do uso da energia fóssil para o uso da energia limpa (JI et al., 2019). Hoje, as matrizes energéticas abrangem fontes não renováveis e fontes renováveis, sendo que a quantidade varia de um país para outro. Em termos de produção e consumo de energia do mundo, países incluindo Brasil, Rússia, Índia e China (os quais fazem parte do BRICs) estão entre os principais, ocupando posição central na economia global. Deste modo, torna-se necessária a formulação de políticas de implementação de energias renováveis (ZHANG et al., 2011).

O consumo de energia, nos dias de hoje, é um dos critérios utilizados na análise de desenvolvimento econômico dos países, estando o mesmo em acentuada expansão devido ao avanço econômico e ao aumento da demanda, em especial do mercado de energia renovável (BEHERA et al., 2018) (FENG et al., 2020). Fontes não renováveis de energia, como carvão, petróleo e gás natural, são utilizados em grande escala pela população mundial. Entretanto deve-se considerar que tais combustíveis fósseis podem acabar se esgotando, devido ao aumento da população mundial e desenvolvimento econômico (ZEREN; AKKUS, 2020). Além disso, os combustíveis fósseis prejudicam o meio ambiente, aumentando o aquecimento global, impactando nas condições climáticas e na política econômica do governo (BEHERA et al., 2018) (AHMED; KHALID, 2019).

Devido a fatores como estes apresentados, no planeta iniciou-se o desenvolvimento e uso de fontes alternativas de energia limpa e sustentável (SAHU, 2015), com o intuito de reduzir a poluição ambiental e a emissão de CO₂, além de ser

uma solução ideal para superar a crise energética (GOUDA et al., 2019) (PERSSON et al., 2017).

Analisando Pedrosa e Corrêa (2016), nota-se que a produção mundial de petróleo vem diminuindo desde meados da década de 1970, em relação ao PIB (Produto Interno Bruto) Global. Tal feito pode ser justificado devido ao destaque das fontes de energias renováveis, as quais estão crescendo em larga escala, visto que tem se tornado comum encontrar residências, indústrias, entre outros, implementando outras fontes de geração de energia limpa e sustentável (FENG et al., 2020).

As fontes de energias renováveis mais utilizadas atualmente são: energia hídrica das águas dos rios; energia eólica da força dos ventos; energia solar da radiação solar; energia de biomassa dos materiais orgânicos; energia maremotriz da força das ondas; energia geotérmica nas formas de vapor, água quente (aquíferos) e pedras quentes.

Neste trabalho, em específico, dá-se destaque a duas fontes de energias renováveis: a de biomassa e a solar. A energia de biomassa é gerada por meio da queima de materiais orgânicos, como por exemplo o bagaço da cana-de-açúcar, o álcool, a madeira, entre outros. Ou seja, biomassa pode ser caracterizada como qualquer recurso renovável derivado de material orgânico de origem vegetal ou animal, podendo ser gerada pelo homem ou existente na natureza. Ressalta-se que atualmente a população mundial gera determinada quantidade de resíduos, o que incentiva estudos de gerenciamento, com o intuito de compreender novas tecnologias capazes de produzir energia por meio de resíduos (FERREIRA et al., 2018) (NUNES et al., 2020).

A energia de biomassa destaca-se em termos de flexibilidade, pois ela apresenta uma particularidade em relação as demais fontes de energia, podendo gerar como resultado do processo de conversão sólidos, líquidos ou combustíveis gasosos. Devido a essa flexibilidade pode-se adaptar o presente recurso de acordo com a necessidade (FERREIRA et al., 2018).

Em suma, salienta-se que todas as fontes de energias renováveis estão disponíveis de forma abundante, sendo teoricamente ilimitadas. Já as fontes de energias convencionais, tais como o carvão, petróleo e gás natural, formado em milhões de anos, são limitadas e não distribuídas homoganeamente em todo o planeta (ZEREN; AKKUS, 2020).

Ao tratar a respeito da energia solar, afirma-se que a mesma é gerada por intermédio da luz do sol, a qual trata-se do recurso natural mais abundante e encontrado com maior disponibilidade em todo planeta. Por meio dela, pode-se gerar energia elétrica por meio da tecnologia fotovoltaica, por exemplo, a qual caracteriza-se pela transformação da radiação solar em energia elétrica solar, fato que ocorre por meio das células fotovoltaicas que compõe os módulos, ou placas, que ficam expostos a luz solar. Destaca-se que cada painel solar possui eficiência energética. Contudo, é importante ressaltar que as fontes de energias renováveis se caracterizam pela sua variabilidade e intermitência, assumindo a necessidade de planejamento em relação ao aumento da participação na matriz energética mundial, e da previsão precisa de fatores como consumo e geração deste recurso (MIRANDA; SILVA, 2016).

Nos dias atuais, a energia solar é utilizada em projetos de usinas solares, lares e comércios, sendo os dois últimos, sistemas fotovoltaicos conectados à rede que integram a geração distribuída de energia (WANG et al., 2019).

Em suma, percebe-se que com o passar do tempo as fontes de energia foram sofrendo alterações e adaptações de acordo com a necessidade humana e ambiental, o que resultou em um grande aumento na produção e no consumo de fontes alternativas de energia limpa e sustentável (AYODELE, 2015), (SHAH; ALI, 2019), (EMEKSIZ; DEMIRCI, 2019), (ZAKARIA et al., 2020), (SONG et al., 2020), (ZHANG et al., 2020) e (CHENG et al., 2020). Também, devido as variáveis que caracterizam as diferentes fontes de energias renováveis, torna-se necessário um planejamento e uma previsão precisa acerca da produção e do consumo de tais recursos, tornando possível esquematizar um sistema capaz de gerenciar o uso e a disponibilidade de fontes renováveis de energia.

De acordo a isso, ao analisar a literatura, é possível encontrar trabalhos relacionados ao uso de energia solar, de biomassa e gastos energéticos, que vem de encontro ao presente trabalho. Dentre eles, pode-se citar: (CARDOSO, 2019), (MAUTHNER et al., 2014), (SAMEERODDIN et al., 2021), (MORENO-MAROTO et al., 2019) e (DINIZ, 2020).

3. PRODUÇÃO CERVEJEIRA E SUAS ETAPAS

Em síntese a produção de cerveja varia muito de acordo com a estrutura à disposição. Variando da artesanal caseira onde uma pessoa consegue fabricar até 100

litros sozinha na cozinha de casa até indústrias que produzem hectolitros. O perfil estudado neste artigo trata-se de uma microcervejaria localizada em Pato Branco-PR que produz em torno de 720 litros, considerando as evaporações do processo, 12 vezes por mês. O proprietário descreveu em um questionário quais as etapas, destacando o tempo, volume e as temperaturas.

A figura 1 mostra um infográfico que demonstra as principais etapas da produção microcervejeira e descrevendo brevemente cada parte do processo, volumes e temperaturas envolvidos em cada etapa.

FIGURA 1 – ETAPAS DA PRODUÇÃO CERVEJEIRA



FONTE: INFOGRÁFICO (AUTOR), IMAGENS (REFERÊNCIAS).

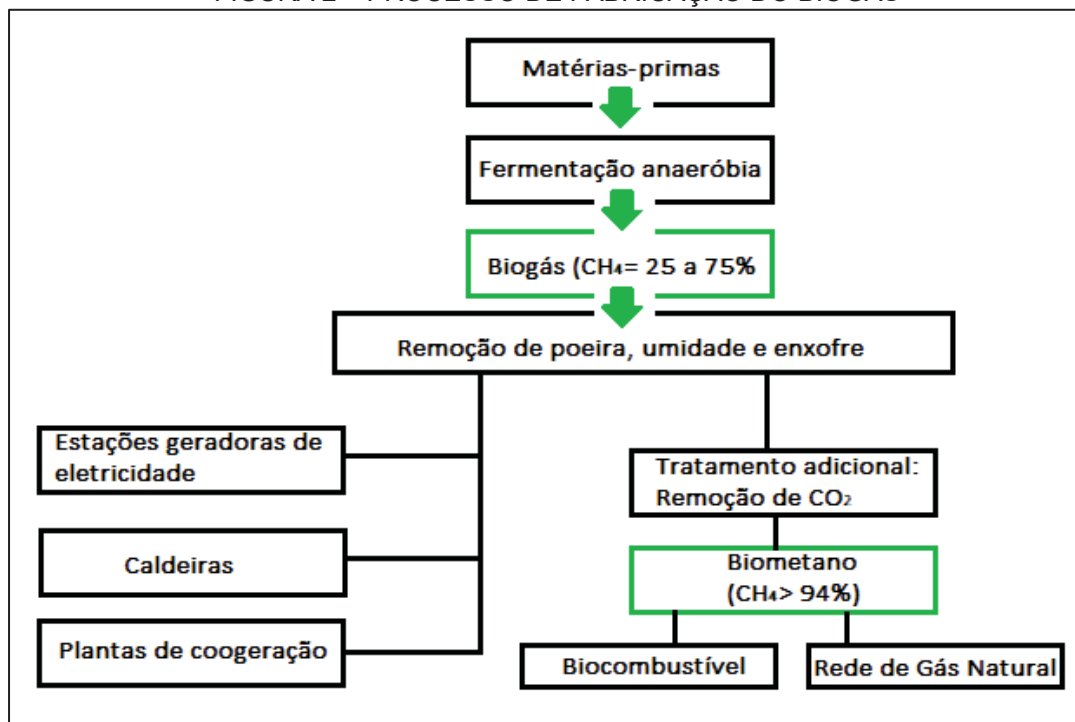
4. BIODIGESTÃO EM CERVEJARIAS

Após a etapa de mostura e esgotamento dos grãos do malte moído é gerado o bagaço do malte, cerca de 85% do total dos resíduos gerados no processo cervejeiro é proveniente desse tipo de resíduo, o que ao longo da produção geram grandes volumes. Em geral, para cada 100 kg de grãos processados, são gerados 125 a 130 kg de bagaço úmido, com cerca de 80 a 85% de umidade, o que corresponde a cerca de 14 e 20 kg de bagaço para cada hectolitro de cerveja produzida (Fillaudeau et al., 2006).

É necessário que haja a adoção de um sistema de tratamento desses resíduos a fim de evitar possíveis contaminações do ambiente. A digestão anaeróbia é uma eficiente alternativa de tratamento, apesar de ser um processo complexo exigindo o monitoramento dos parâmetros: pH, alcalinidade, sólidos totais e voláteis, ácidos graxos voláteis, tempo de retenção hidráulica, carga orgânica e composição do biogás. Trata-se de um sistema de tratamento no qual a matéria orgânica é degradada até a forma de metano (CH_4), que pode ser utilizado como fonte de energia, e dióxido de carbono (CO_2) em condições anaeróbias.

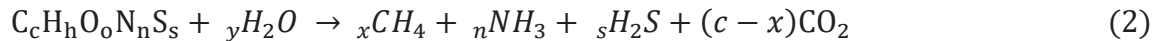
Segundo Soares (2019), o biogás é constituído por gases distintos, sendo que o gás metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2) estão presentes em maiores quantidades, podendo variar de 25% a 75% conforme a eficiência do processo. O metano contido no biogás, quando queimado, libera uma energia útil ao homem, seja pelo uso direto do calor (aquecimento, geração de vapor, secagem em geral) ou da luz para iluminação de ambientes. Também, pode ser empregado para ser convertido em outra forma de energia, como elétrica, através do uso em geradores ou turbinas, ou energia cinética, por meio da utilização do gás em motores ou moto bombas adaptadas.

FIGURA 2 – PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO BIOGÁS



FONTE: AUTOR (2021).

A representação da digestão anaeróbia pode ser feita pela equação 1 (Kelleher et al., 2002). E a formação do biogás a partir da biomassa resulta, em geral, da equação 2.



A biodigestão anaeróbia do bagaço do malte (matéria orgânica), ocorrerá em quatro etapas sequenciais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

I. Hidrólise: Onde os resíduos orgânicos, como lipídios, carboidratos e proteínas são convertidos em ácidos graxos, açúcares e aminoácidos respectivamente. Nesta etapa ocorre a quebra das moléculas de matéria orgânica em moléculas menores e mais solúveis para que as bactérias possam realizar a digestão.

II. Acidogênese: Nesta etapa há formação de subprodutos como amônia, ácidos graxos, hidrogênio e CO₂.

III. Acetogênese: Através da oxidação, as bactérias acetogênicas agem nos compostos gerados nas etapas anteriores, hidrólise e acidogênese. Ocorrendo o rompimento em moléculas ainda menores, havendo a conversão de ácido acético, hidrogênio e CO₂, do material degradado.

IV. Metanogênese: Essa etapa é necessária para que as bactérias metanogênicas ajam sobre o H₂ e o CO₂, convertendo-os em CH₄.

Para a caracterização do bagaço de malte, ele deve ser submetido a análises físico-químicas: umidade, cinzas, minerais totais, proteínas totais, carboidratos, gorduras totais, fibra bruta e energia. Essa caracterização varia em função de diversos fatores, como a variedade da cevada, o tempo de colheita, os cereais utilizados e o processo tecnológico aplicado.

4.1. CÁLCULO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Segundo o Guia Prático do Biogás (2010), publicado pela Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), com apoio do Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha (BMELV), diversos subprodutos são originados na produção da cerveja, sendo o mais importante o bagaço do malte, que responde por

75% do total. Por hectolitro de cerveja são produzidos aproximadamente 19,2 kg de bagaço de cevada, 2,4 kg de levedura e sedimentação, 1,8 kg de trub quente, 0,6 kg de trub frio, 0,5 kg de terra diatomácea e 0,1 kg de pó de malte.

De acordo com a Lei Alemã de Energias Renováveis (EEG), o bagaço do malte, fresco ou prensado, pode produzir 231 kWhel/t MF de biogás e 62 Nm³CH₄/t MF. Em relação a produção de substratos o bagaço de malte poderá produzir de biogás 105-130 Nm³/t e 62-112 Nm³/t de metano.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR E ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Para a determinação do volume do biodigestor, é necessário conhecer a vazão da matéria orgânica a ser decomposta e o tempo de retenção hidráulica. O volume útil do biodigestor é calculado pela equação:

$$V_u = Q \cdot HRT \quad (3)$$

Onde V_u é o volume útil do biodigestor (m³); Q é a vazão de material orgânico (m³/dia) e HRT é o tempo de retenção hidráulica (dias).

Segundo FNR (2010), a estimativa de produção de biogás na biodigestão do bagaço de malte é de 105 a 130 m³ de biogás por tonelada de bagaço de malte. Assim, o volume de biogás produzido é dado por:

$$V_{biogás} = V_{espec} \cdot m_{malte} \quad (4)$$

Onde $V_{biogás}$ é o volume produzido de biogás (m³); V_{espec} é a produção específica de biogás (m³/t de malte) e m_{malte} é a massa de bagaço de malte (t).

5.2. VIABILIDADE ECONÔMICA

A análise da viabilidade econômica deste projeto utilizará os seguintes métodos: valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR) e *payback* descontado.

O VPL representa, em valores monetários atuais, a diferença entre os recebimentos e pagamentos ao longo do projeto. Valores de VPL superiores a zero indicam que o investimento deve ser aceito (NOGUEIRA, 2009).

O VPL pode ser calculado por:

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^n} \quad (5)$$

Onde FC é o fluxo de caixa (R\$/ano); t é o contador de tempo (ano); n é a duração do projeto (ano) e i é a taxa de desconto (%).

A TIR é definida como a taxa de juros que iguala, na data presente, as entradas e as saídas de caixa. A TIR representa a rentabilidade do projeto no tempo. Utiliza-se como comparação à TIR a taxa mínima de atratividade (TMA). Portanto, se a TIR for superior à TMA, o projeto é viável economicamente (PAMPLONA, 2006).

A TIR pode ser calculada pela expressão:

$$\sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^n} = 0 \quad (6)$$

O *payback* indica o tempo de retorno do investimento. Segundo Cassarotto Filho & Kopittke (2007), o *payback* simples representa o número de períodos necessários para se recuperar o investimento inicial, sem levar em conta o valor do dinheiro no tempo. O *payback* descontado é calculado a partir do fluxo de caixa, do resultado entre a receita e as despesas, adotando, porém, uma taxa de desconto que irá fazer a correção dos valores pelo período. Essa taxa, geralmente, é a TMA.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR E ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Com base nos dados levantados na cervejaria e na literatura, foi possível determinar o volume do biodigestor necessário para o tratamento do bagaço de malte. Os parâmetros são apresentados na tabela 1:

TABELA 1 - PARÂMETROS ADOTADOS PARA O DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR

Parâmetros	Valor
Produção de bagaço de malte (kg/dia)	86,0
Vazão de bagaço de malte (m ³ /dia)	0,261
Tempo de retenção hidráulica (dias)	31,6

FONTE – AUTORES (2021)

O volume útil estimado para o biodigestor é de 8,26 m³.

Considerando o valor médio apresentado por FNR (2010), que corresponde a uma geração de biogás de 118 m³ por tonelada de bagaço úmido, a produção na cervejaria é de 10,15 m³/dia, o que equivale a uma produção mensal de 304,4 m³. Este volume de biogás produzido mensalmente é equivalente a 1.826,64 kWh, considerando um poder calorífico de 5,5 kWh/m³ de biogás. Este volume de biogás gerado, no entanto, não é suficiente para suprir a demanda de energia térmica da microcervejaria em estudo, estimada em 4.364 kWh/mês considerando um consumo específico médio de 40,5 kWh/hl de cerveja produzida (KALETA & WALEK, 2015). Assim, a energia gerada proveniente do biogás pode ser complementada por outra fonte, como a solar.

6.2. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR

Para dimensionar o sistema de aquecimento solar, é considerado como demanda de água quente aquela quantidade de água necessária para abastecimento dos tanques, ou seja, descarga de água para início da etapa da mostura (500 L de água a 66 °C) e a descarga para lavagem e filtragem dos grãos (360 L a 76 °C). Com isso, inicialmente considera-se a necessidade de aquecer 1000 L de água quente até 80 °C. Além disso, dentro do processo tem-se a etapa do resfriamento do mosto, onde a cerveja que está por volta de 96 °C é resfriada até 26 °C por meio de um trocador de calor, utilizando água filtrada a temperatura ambiente como fluido de resfriamento. Dessa forma será estimado um aproveitamento de aproximadamente 50 % da energia

térmica no processo (36,5 kWh/dia), sendo que esta energia será descontada da demanda de energia solar térmica.

Para o dimensionamento inicial, foi utilizada a metodologia de cálculo B.2 contida na ABNT NBR 15569, onde foi considerado dados médios anuais de irradiação e temperatura inicial da água. Os valores iniciais utilizados estão expostos na Tabela 2 a seguir.

TABELA 2 - VALORES UTILIZADOS PARA DIMENSIONAMENTO INICIAL DO SISTEMA SOLAR

Parâmetros	Valor
Volume de consumo (m ³)	1000
Fluído de trabalho	Água
Temperatura inicial (°C)	18,5
Temperatura de armazenamento (°C)	80
FC instalada	1
Contribuição solar	70%
Irradiação no plano inclinado (kWh/m ² .dia)	4,91
Energia útil SAS descontado recuperação de calor (kWh/dia)	34,81

FONTE – AUTORES (2021)

Esse dimensionamento inicial resultou em 2,1 unidades de coletores solar, dessa forma na sequência considera-se 2 coletores. Com isso, o passo seguinte é avaliar o comportamento do sistema na cidade de Pato Branco PR ao longo do ano, utilizando a metodologia de cálculo da carta F, proposta por Duffie e Beckman (2013), para verificar se existe necessidade de redimensionamento.

Os dados de irradiação solar foram encontrados no portal do CRESESB (Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sergio de S. Brito), os dados de temperatura média mensal foram retirados do site (pt.climate-data.org) e os dados do coletor solar foram fornecidas pelo fabricante dos equipamentos.

O Método da Carta F fornece a fração solar mensal ao longo do ano, ou seja, qual a proporção da energia térmica está sendo fornecida pelo sistema solar, comparado a demanda total de energia térmica. Para esse método, é considerado que o processo ocorre durante 20 dias no mês. Com isso foram obtidos os resultados exibidos na Tabela 3 a seguir.

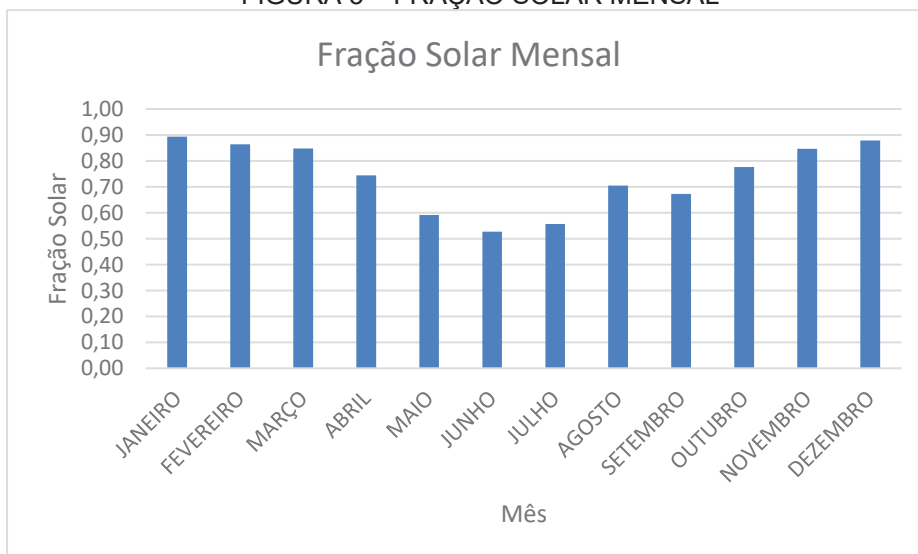
TABELA 3 - RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO PELA METODOLOGIA CARTA F

Irradiação no Plano Inclinado (kWh/m ² .dia)	Temperatura Ambiente (°C)	Demanda Energética Mensal (kWh)	Fração Solar Mensal (f)	Produção Energética Mensal Solar (kWh)
5,61	22,2	804,5	0,89	718,8
5,39	22,0	810,0	0,86	699,3
5,40	21,1	835,1	0,85	707,6
4,88	19,0	893,5	0,74	664,8
4,16	15,4	993,7	0,59	587,7
3,80	14,3	1024,3	0,53	539,2
4,07	13,7	1041,0	0,56	579,2
5,01	15,5	990,9	0,70	697,7
4,54	17,4	938,1	0,67	631,1
5,06	19,5	879,6	0,78	682,5
5,52	20,3	857,4	0,85	726,1
5,57	21,7	818,4	0,88	719,5

FONTE: AUTORES, 2021.

Com as informações fornecidas pela metodologia da Carta F, é possível observar que nos meses de verão a produção de energia térmica solar se aproxima de 1, ou seja, atende quase totalmente a demanda, e nos períodos de inverno aproxima-se da metade. Fazendo interações aumentado a quantidade de coletores para 3 unidades, notou-se que praticamente metade do ano a fração solar passou da unidade, representando de 4 a 8 % de energia excedente, além de a demanda de energia térmica estar superdimensionada. Com isso, adotou-se como dimensionamento final a quantidade de 2 coletores solar de tubos evacuados, onde a fração solar mensal é exibida no gráfico da Figura 3.

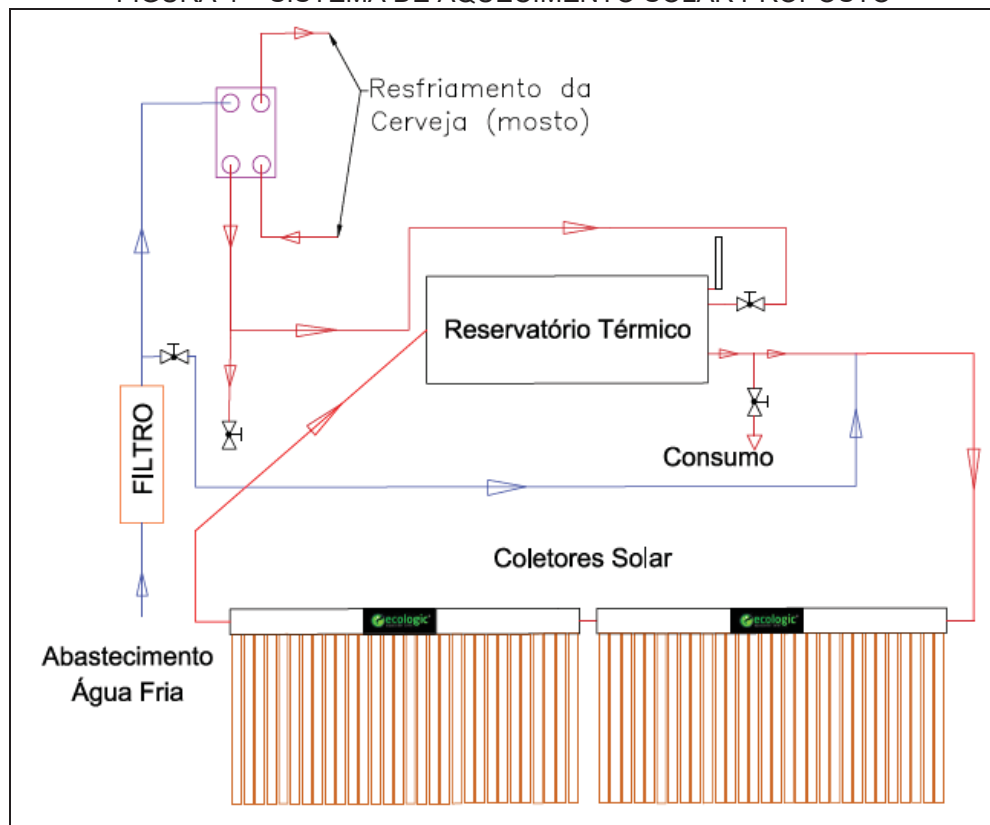
FIGURA 3 – FRAÇÃO SOLAR MENSAL



FONTE: AUTOR (2021).

Sendo assim, o sistema de aquecimento solar SAS proposto, exibido na Figura 4, consiste em um reservatório térmico de 1000 L e 2 coletores de tubos evacuados modelo BNP-1-30 da marca Ecologic, além do sistema de resfriamento com trocador de calor pertencente ao processo de produção da cerveja. As perdas térmicas no sistema não foram consideradas.

FIGURA 4 – SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR PROPOSTO



FONTE: AUTOR (2021).

6.3. VIABILIDADE ECONÔMICA

As tabelas 4 e 5 apresentam, respectivamente, os custos estimados com o investimento inicial e para operação e manutenção do sistema de produção de biogás.

TABELA 4 - ESTIMATIVA DE INVESTIMENTO INICIAL

Itens	Custo unitário	Custo total (R\$)	Fonte
Biodigestor	R\$ 1.924,15/m ³	14.639,32	Alves (2017), atualizado pelos autores
Compressor	US\$ 516,00/m ³ /h	4.837,74	Santos et al. (2016)
Caldeira a gás	£ 67/kWt	12.395,00	Department of Energy & Climate Change [DECC] (n.d.)
Gerador	US\$ 320,00/kW	43.200,00	Naami (2017)
SAS	R\$ 18.910,00	18.910,00	Autores

TABELA 5 - VALORES ADOTADOS PARA O CÁLCULO DE CUSTOS COM OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DO SISTEMA

Itens	Custo unitário	Fonte
Operação e manutenção	5% do investimento inicial	Kohler (2017)
Despesas quinquenais com o biodigestor	10% do investimento inicial	Kohler (2017)
Filtro de H ₂ S	US\$ 0,0254/m ³	Abatzoglou & Boivin (2009)

A estimativa da economia gerada foi obtida considerando uma tarifa de energia elétrica de R\$ 0,83156/kWh (ANEEL, 2021).

Para o cálculo da viabilidade econômica, por meio do VPL, TIR e *payback* descontado, foi considerado um cenário de 20 anos e uma taxa de desconto de 10%. Os resultados para quatro cenários são mostrados na tabela 6.

TABELA 6 - PARÂMETROS DA ANÁLISE ECONÔMICA

Parâmetro	Cenário 1: Biodigestor + Caldeira	Cenário 2: Biodigestor + Gerador	Cenário 3: SAS	Cenário 4: Biodigestor + Caldeira + SAS
Investimento inicial	R\$ 33.116,92	R\$ 63.921,92	R\$ 18.910,00	R\$ 52.026,92
Operação e manutenção	R\$ 1.655,85/ano	R\$ 3.196,10/ano	R\$ 945,50/ano	R\$ 2.601,35/ano
Despesas quinquenais com o biodigestor	R\$ 1.588,42 a cada 5 anos	R\$ 1.588,42 a cada 5 anos	Não há	R\$ 1.588,42 a cada 5 anos
Filtro de H ₂ S	R\$ 501,08/ano	R\$ 501,08/ano	Não há	R\$ 501,08/ano
Valor economizado	R\$ 14.202,28/ano	R\$ 5.848,00/ano	R\$ 9.663,39/ano	R\$ 23.865,68/ano
VPL	R\$ 67.216,91	-R\$43.395,74	R\$ 55.310,33	R\$ 126.793,26
TIR	35,8%	-2,29%	46,08%	40,55%
<i>Payback</i> descontado	3,38 anos	Não há	2,58 anos	2,45 anos

Observa-se, pelos resultados apresentados na tabela 5, que o menor *payback* descontado foi apresentado pelo cenário 4, que corresponde ao uso de biogás diretamente em aquecimento combinado a um SAS. O VPL, para esta configuração, é de R\$ 126.793,26 ao final do projeto, enquanto a TIR estimada é de 40,55%, valor superior à TMA (10%), indicando, assim, a sua viabilidade econômica. A utilização de biodigestor e caldeira a gás (cenário 1) e a adoção de SAS (cenário 3) também são viáveis economicamente, com *paybacks* de 3,38 e 2,58 anos, respectivamente. Finalmente, a utilização de gerador a biogás para geração de energia elétrica (cenário 2) não apresentou viabilidade financeira.

7. CONCLUSÃO

Pode-se verificar, através dos resultados obtidos, que há viabilidade econômica para a utilização do biogás nos processos da microcervejaria em questão

que necessitam de aquecimento. No entanto, ressalta-se que neste caso há a necessidade de conversão destes processos para a utilização do biogás, uma vez que o empreendimento emprega eletricidade como fonte de energia térmica. Ademais, exigirá intervenções importantes na planta, como a introdução de biodigestor, tubulações e equipamentos para compressão e filtragem do biogás.

O emprego de SAS em processos que envolvem menores temperaturas (até 76°C), como a mostura e a filtragem, também se mostrou economicamente viável e apresenta menor complexidade para a sua implantação em comparação ao uso de biodigestor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A água é da nossa conta!. Ambev, 2021. Disponível em: <https://www.ambev.com.br/sustentabilidade/agua/>. Acesso em: 03/08/2021.

Abatzoglou, N.; Boivin, S. A review of biogas purification processes. Society of Chemical Industry and John Wiley & Sons, 2009.

ABNT NBR 15569:2021. Sistema de Aquecimento Solar de Água em Circuito Direto – Requisitos de Projeto e Instalação.

Ahmed, A.; Khalid, M. (2019). A review on the selected applications of forecasting models in renewable power systems. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*. p. 9-21. fev. 2019.

Alvarenga, D. Consumo de cerveja 'migra' para dentro de casa e volume de vendas no Brasil é o maior desde 2014. G1, 23 de maio de 2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/noticia/2021/05/23/consumo-de-cerveja-migra-para-dentro-de-casa-e-volume-de-vendas-no-brasil-e-o-maior-desde-2014.ghtml>. Acesso em: 30/07/2021.

Ambiente Brasil. Disponível em: <<http://www.ambientebrasil.com.br>> Biomassa> Vantagens da Biomassa na Produção de Energia. Acessado em: 14 de fevereiro de 2011.

Ascheri, D. P. R., Burger, M. C., Malheiros, L. V., Oliveira, V. N. (2007). Curvas de secagem e caracterização de hidrolisados de bagaço de cevada. Rio Grande do Norte.

Ayodele, T. R. (2015). Determination of Probability Distribution Function for Modelling Global Solar Radiation: Case Study of Ibadan, Nigeria. *International Journal Of Applied Science And Engineering*. p. 233-245. out. 2015.

Azevedo, S. G.; Santos, M.; Antón, J. R. (2019). Supply chain of renewable energy: A bibliometric review approach. *Biomass and Bioenergy*. p. 70-83. jul. 2019.

Barthhaas report. Hops 2019/2020. BarthHaas, 2020. Disponível em: https://www.barthhaas.com/fileadmin/user_upload/downloads/barth-berichte-broschueren/barth-berichte/englisch/2010-2020/barthhaas_report_2020_en.pdf. Acesso em: 02/08/2021.

Behera, M. K.; Majumder, I.; Nayak, N. (2018). Solar photovoltaic power forecasting using optimized modified extreme learning machine technique. *Engineering Science and Technology, An International Journal*. p. 428-438. jun. 2018.

Cardoso, A. C. (2019). *Determinação Do Consumo Energético De Microcervejarias*. 40 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, 2019.

Cardoso, R. B. (2007). *Perspectivas da Matriz Energética Mundial e do Brasil. O Setor Elétrico*. p. 32-43. nov. 2007.

Casarotto Filho, N.; Kopittke, B. H. (2007). *Análise de investimentos: matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial*. 10. ed. São Paulo: Atlas.

Com crescimento de 14,4% em 2020, número de cervejarias registradas no Brasil passa de 1,3 mil. Governo Federal, 30 de abril de 2021.

Cheng, L. et al. (2020). Solar energy potential of urban buildings in 10 cities of China. *Energy*. p. 1-36. jan. 2020.

Department of Energy & Climate Change. (n.d.). Gas Boiler Cost Data. Disponível: http://2050-calculator-tool-wiki.decc.gov.uk/cost_categories/82

Diniz, D. P. (2020). *Transição Energética Em Cervejarias*. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energias Renováveis – PPGER, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

Duffie, J. A.; BECKMAN, W. A. 2013. *Solar engineering of thermal processes*.

Emeksiz, C.; Demirci, B. (2019). The determination of offshore wind energy potential of Turkey by using novelty hybrid site selection method. *Sustainable Energy Technologies And Assessments*. p. 1-21. dez. 2019.

Feng, Y. et al. (2020). Machine learning models to quantify and map daily global solar radiation and photovoltaic power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. p. 1-13. fev. 2020.

Ferreira, L. R. A. et al. (2018). Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. p. 440-455. out. 2018.

Fillaudeau, L., Blanpain-avet, P., Daufin, G. Water, wastewater and waste management in brewing industries. *Journal of Cleaner Production*, vol. 14, 2006. pp. 463-471.

Gouda, S. G. et al. (2019). Model selection for accurate daily global solar radiation prediction in China. *Journal Of Cleaner Production*. p. 132-144. jun. 2019.

Ji, Q.; Du, Y.; Geng, J. (2019). The dynamic dependence of fossil energy, investor sentiment and renewable energy stock markets. *Energy Economics*. p. 1-41. out. 2019.

Kaletka, P.; Walek, T. (2015). Benefits of MCHP XRGI use in the brewing industry. *Systems Supporting Production Engineering: Review of Problems and Solutions*.

Kohler, P. (2017). *Biodigestor. Apresentação Biokohler – Biodigestores*. Show Rural Coopavel. Cascavel.

ANEEL. (2001). *Resolução Homologatória nº 2.886 de 22 de junho de 2021*.

FNR - Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (2010). Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização. FNR: Gülzow.

Mainardis, M.; Flaibani, S.; Mazzolini, F.; Peressotti, A.; Goi, D. (2019). Techno-economic analysis of anaerobic digestion implementation in small Italian breweries and evaluation of biochar and granular activated carbon addition effect on methane yield. *Journal of Environmental Chemical Engineering*.

Mauthner, F. et al. Manufacture of malt and beer with low temperature solar process heat. *Energy Procedia*, v. 48, p. 1188-1193, 2014.

Miranda, M. C.; Silva, G. N. (2016). Análise de Séries Temporais de Radiação Solar para Previsão de Energia Incidente Disponível. X Jornada Científica da AB3E. São Paulo, p. 1-17. dez. 2016.

Moreno-Maroto, J. M. et al. (2019). Manufacturing of lightweight aggregates from biomass fly ash, beer bagasse, Zn-rich industrial sludge and clay by slow firing. *Journal Of Environmental Management*, [S.L.], v. 246, p. 785-795, set. 2019. Elsevier BV.

Naami, A. A. (2017). Techno-economic Feasibility Study of a Biogas Plant for Treating Food Waste Collected from Households in Kartamantul Region, Yogyakarta. Dissertação de mestrado, KTH School of Industrial Engineering and Management, Estocolmo, Suécia.

Nogueira, E. (2009). Análise de Investimentos. In. Batalha, M. O. (Coord.). *Gestão Agroindustrial: GEPAL: grupo de estudos e pesquisas agroindustriais*. 5. ed. São Paulo: Atlas.

Nunes, L. J. R.; Causer, T.P.; Ciolkosz, D.. (2020). Biomass for energy: A review on supply chain management models. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*. p. 1-8. mar. 2020.

Pamplona, V. (2006). Implementação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP: Estudo de caso. Dissertação (Mestrado em Energia). Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

Pedrosa Jr, O. A.; Corrêa, A. C. F. (2016). A crise do petróleo e os desafios do pré-sal. *Boletim de Conjuntura*, Rio de Janeiro, n. 2, p. 4-14, fev. 2016.

Persson, C. et al. (2017). Multi-site solar power forecasting using gradient boosted regression trees. *Solar Energy*. p. 423-436. jul. 2017.

Sahu, B. K. (2015). A study on global solar PV energy developments and policies with special focus on the top ten solar PV power producing countries. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*. p. 621-634. mar. 2015.

Saiba quantos litros de água são necessários para produzir um de cerveja. G1, 01 de novembro de 2016. Disponível em: <http://glo.bo/2fb4cL3>. Acesso em: 02/08/2021.

Sameeroddin, M. et al. (2021). Renewable energy: fuel from biomass, production of ethanol from various sustainable sources by fermentation process. *Materials Today: Proceedings*, [S.L.], p. 427-448, fev. 2021. Elsevier BV.

Santos, I.F.S; Barros, R. M.; Tiago Filho, G. L. (2016). Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment plants in Brazil: an assessment of feasibility and potential. *Journal of Cleaner Production*, v. 126, p. 504-514.

Schmidt, H. Katechismus der Brauerei-Praaxis, Nürnberg, 15a ed.: Verlag Hans Carl, Nürnberg, Doitland, 1989.

Shah, T. R.; Ali, H. M. (2019). Applications of hybrid nanofluids in solar energy, practical limitations and challenges: A critical review. *Solar Energy*. p. 173-203. maio 2019.

Soares, C. M. T, et al. Produção de Biogás Como Alternativa Energética Sustentável: Perspectivas de Desenvolvimento Territorial Com Autonomia. *Orbis Latina*, v. 9, n. 2, p. 102-110, 2019.

Song, D. et al. (2020). New perspectives on maximum wind energy extraction of variable-speed wind turbines using previewed wind speeds. *Energy Conversion And Management*. p. 1-10. fev. 2020.

Souto, A. L. (2019). Evolução do uso da energia ao longo da história. Site: Khan Academy. Disponível em: <<https://pt.khanacademy.org/science/7-ano/materia-e-energia-7-ano/tecnologia-maquinas-automocao-informatizacao/a/evolucao-do-uso-da-energia-ao-longo-da-historia>>. Acesso em: 19 ago. 2021.

Wang, Z.; He, L.; Zheng, H. (2019). Forecasting the residential solar energy consumption of the United States. *Energy*. p. 610-623. jul. 2019.

Zakaria, A. et al. (2020). Uncertainty models for stochastic optimization in renewable energy applications. *Renewable Energy*. p. 1543-1571. jan. 2020.

Zeren, F.; Akkus, H. T. (2020). The relationship between renewable energy consumption and trade openness: New evidence from emerging economies. *Renewable Energy*. p. 322-329. mar. 2020.

Zhang, H. et al. (2011). Comparison of renewable energy policy evolution among the BRICs. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*. p. 4904-4909. dez. 2011.

Zhang, Y. et al. (2020). Solar energy potential assessment: A framework to integrate geographic, technological, and economic indices for a potential analysis. *Renewable Energy*. p. 577-586. abr. 2020.

Referências de Imagens:

1. <https://www.liess.ind.br/pt/cevejarias/> Acesso em 24/08/2021
2. <https://www.gea.com/pt/products/brewery-systems/warehouse/lautering/lauterstar.jsp> visualizado em 24/08/2021 Acesso em 24/08/2021
3. <https://www.hominilupulo.com.br/recirculacao-e-lavagem-graos/> Acesso em 24/08/2021
4. <https://www.tresdomingos.com.br/> Acesso em 24/08/2021
5. Autor, 2021.
6. Autor, 2021.
7. <http://blog.grambier.com.br/como-funciona-a-fermentacao-da-cerveja/> Acesso em 24/08/2021
8. <https://www.terra.com.br/vida-e-estilo/saude/dia-mundial-da-cerveja-como-ela-pode-ser-benefica-a-saude-entenda,2690d99e1ed2b99e9cfd0d0a68fd23624w9wbs7a.html> Acesso em 24/08/2021.