



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE QUÍMICA

Rafael Moreira Marques

**Avaliação técnico-econômica da casca, do endocarpo de macaúba e do
bagaço de cana-de-açúcar para uso em cogeração de energia elétrica**

BRASÍLIA – DF

2021

Rafael Moreira Marques

**Avaliação técnico-econômica da casca, do endocarpo de macaúba e do
bagaço de cana-de-açúcar para uso em cogeração de energia elétrica**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Química da
Universidade de Brasília, como parte dos
requisitos para a obtenção do título de
Bacharel em Química Tecnológica.

Orientador: Prof. Dr. José Joaquin
Linares León

BRASÍLIA – DF

2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus pela ajuda e pela força em todos esses anos de curso.

Agradeço aos meus pais, irmã e amigos pelo apoio e compreensão.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. José Joaquin Linares León e ao meu amigo Fernando Lino pela ajuda e gentileza nesse trabalho e nos últimos semestre do curso.

Agradeço a Inocas Macaúba e a Cooperativa dos Trabalhadores Rurais de Riacho D'anta e Adjacências (COOPER RIACHÃO) pelas informações dadas para a realização deste trabalho.

RESUMO

O aumento das exigências futuras de eletricidade vem com o desafio e a necessidade de descarbonizar o fornecimento de energia, criando assim um espaço cada vez maior para as fontes de energias renováveis. Uma das possibilidades é através da cogeração, que se baseia no processo de produção de calor e energia mecânica, geralmente convertida em energia elétrica a partir da energia proporcionada por uma fonte primária. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar e comparar alguns indicadores técnicos e econômicos por meio do potencial energético de três tipos de fontes de biomassa: casca (epicarpo) e endocarpo de macaúba e bagaço de cana-de-açúcar para uso em uma planta de cogeração. Para isso, foi elaborado fluxo de caixa para um período de sete anos, calculados os indicadores de Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), payback e realizada análise de sensibilidade. Os resultados demonstraram que não foi viável a utilização da casca e do endocarpo de macaúba nos preços atuais devido ao VPL negativo. Entretanto, os indicadores econômicos para o bagaço de cana-de-açúcar foram satisfatórios. Também foi feito um estudo com o objetivo de descobrir qual é o preço máximo por tonelada da casca e do endocarpo em que o VPL seja maior ou igual a zero, ou seja, que o projeto torna-se economicamente viável. Da mesma forma foi feita uma outra análise com a finalidade de encontrar o preço máximo por tonelada da casca e do endocarpo, em que o valor produzido por esses dois projetos seja maior que o do bagaço de cana.

Palavras-chave: Macaúba, Bagaço de cana-de-açúcar, Cogeração de energia, Indicadores Econômicos.

ABSTRACT

Increasing future electricity requirements come with the challenge and need to decarbonize the energy supply, thus creating an ever-increasing space for renewable energy sources. One of the possibilities is through cogeneration, which is based on the process of producing heat and mechanical energy into electrical energy from the energy provided by a primary source. Therefore, the objective of this work was to evaluate and compare some technical and economic indicators through the energy potential of three types of biomass sources, namely, epicarp (husk) and macauba endocarp and sugarcane bagasse, for use in a cogeneration plant. For this, a cash flow for a period of seven years was prepared, the indicators of Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), payback were calculated, and a sensitivity analysis was performed. The results demonstrated that it was not feasible to use macaúba bark and endocarp at current prices for energy cogeneration due to the negative NPV. However, the economic indicators for sugarcane bagasse were satisfactory. A study was also carried out in order to find out what is the maximum price per ton of bark and endocarp where the NPV is greater than or equal to zero, that is, the project becomes economically viable. Likewise, another analysis was carried out in order to find the maximum price per ton of bark and endocarp, in which the value produced by these two projects is greater than that of sugarcane bagasse.

Keywords: Macaúba, Sugarcane bagasse, Energy cogeneration, Economic indicators.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Palmeira da Macaúba. Fonte [9]	11
Figura 2. Fruto da Macaúba Fonte [9,18].	12
Figura 3. Ciclo Superior ou topping. Fonte: Adaptado [36].	16
Figura 4. Ciclo inferior ou bottoming. Fonte: Adaptado [36].	17
Figura 5. Caldeira Flamotubular. Fonte [42].	17
Figura 6. Caldeira Aquatubular. Fonte [42].	18
Figura 7. Turbina a vapor de contrapressão. Fonte [43].	19
Figura 8. Turbina a vapor de condensação. Fonte [43].	19
Figura 9. Processo de geração de energia de uma central a vapor. Fonte [39].	21
Figura 10. Esquema de uma usina a vapor simples que funciona conforme o Ciclo Rankine. Fonte [44].	23
Figura 11. Diagrama da temperatura versus entropia do Ciclo Rankine. Fonte [3]. ..	23
Figura 12. Gráfico da alteração do VPL em função da variação de 30% para mais ou para menos do investimento, da receita e da despesa para a casca de macaúba. Fonte Autor.	42
Figura 13. Gráfico da alteração do VPL em função da variação de 30% para mais ou para menos do investimento, da receita e da despesa para o endocarpo de macaúba. Fonte Autor.	42
Figura 14. Gráfico da alteração do VPL em função da variação de 30% para mais ou para menos do investimento, da receita e da despesa para o bagaço de cana-de-açúcar. Fonte Autor.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Preços da instalação, operação e manutenção e compra dos equipamentos da planta de cogeração usada no estudo Mendes e Rodrigues. Fonte [36] e [39].	31
Tabela 2. Preços da instalação, operação e manutenção e compra dos equipamentos da planta de cogeração atualizados pela inflação. Fonte Autor.	32
Tabela 3. Diferentes estimativas para o investimento inicial, receita e despesa da planta. Fonte [49] e [60].	35
Tabela 4. Poder calorífico superior (PCS), umidade e teor de hidrogênio das biomassas utilizadas para o estudo. Fonte [17], [18], [24], [25], [26] e [27].	36
Tabela 5. Composição elementar da três biomassas utilizadas para o estudo. Fonte [18], [25], [26] e [27].	36
Tabela 6. Poder calorífico superior, teor de cinzas e densidade em kg/m ³ das três biomassas utilizadas para o estudo. Fonte [26] e [27].	37
Tabela 7. Poder calorífico inferior (PCI) das três biomassas. Fonte Autor.	38
Tabela 8. Energia gerada com uma tonelada de biomassa. Fonte Autor.	38
Tabela 9. Quantidade necessária de toneladas das três biomassas para gerar 25920 MWh por ano. Fonte Autor.	39
Tabela 10. Fluxo de caixa da casca da macaúba. Fonte Autor.	39
Tabela 11. Fluxo de do endocarpo de macaúba. Fonte Autor.	39
Tabela 12. Fluxo de caixa do bagaço de cana-de-açúcar. Fonte Autor.	40
Tabela 13. Valores do VPL, TIR, payback simples e econômico das três biomassas utilizadas para o estudo. Fonte Autor.	41
Tabela 14. Mudanças do valor do VPL em relação à variação do investimento, receita e despesa, utilizando a casca de macaúba (Análise de sensibilidade). Fonte Autor.	41
Tabela 15. Mudanças do valor do VPL em relação à variação do investimento, receita e despesa, utilizando o endocarpo de macaúba (Análise de sensibilidade). Fonte Autor.	41
Tabela 16. Mudanças do valor do VPL em relação à variação do investimento, receita e despesa, utilizando o bagaço de cana-de-açúcar (Análise de sensibilidade). Fonte Autor.	43
Tabela 17. Valores do VPL, TIR, payback simples e econômico das três biomassas utilizadas para o estudo, em que os projetos tornam-se economicamente viável. Fonte Autor.	44
Tabela 18. Valores do VPL, TIR, payback simples e econômico das três biomassas utilizadas para o estudo, nos quais os projetos da casca e do endocarpo de macaúba são mais vantajosos que o do bagaço. Fonte Autor.	44

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 OBJETIVO	10
2.1 Geral	10
2.2 Específicos	10
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1 Biomassas utilizadas para o estudo	11
3.1.1 Macaúba	11
3.1.2 Bagaço de cana-de-açúcar	13
3.2 Cogeração	15
3.2.1 Custos da introdução de sistemas básicos de cogeração	16
3.2.2 Caldeira a vapor	17
3.2.3 Turbina a vapor	18
3.2.4 Condensador, tanque de condensado, torre de resfriamento e bombas	20
3.2.5 Processo de geração de energia de uma central a vapor	20
3.2.6 Ciclo termodinâmico de uma central a vapor	21
3.3 Indicadores econômicos (VPL, TIR, Payback)	24
3.4 Análise de Sensibilidade	27
4 MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1 Metodologia para análise técnica	29
4.1.1 Determinação do Poder Calorífico Inferior (PCI)	29
4.2 Metodologia para análise econômica	30
4.2.1 Planta de Cogeração utilizada para o estudo de viabilidade	30
4.2.2 Determinação da Taxa de atratividade	32
4.2.3 Determinação da Receita, Despesa, Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e PayBack	33
4.2.4 Análise de Sensibilidade	34
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5.1 Análise Técnica	36
5.1.1 Determinação do potencial energético das biomassas	37
5.2 Análise Econômica	38
6 CONCLUSÃO	45
REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

Recentemente, a estimativa relacionada à demanda global por energia é de um crescimento de 30% entre hoje e 2040. Isso é similar a incluir outra China e Índia nas necessidades globais de hoje. A eletricidade equivale a 40% do aumento do consumo final até 2040, sendo a grande parcela entre os usos finais de energia em todo o mundo [1]. O aumento das exigências futuras de eletricidade vem com o desafio e a necessidade de descarbonizar o fornecimento de energia, criando assim um espaço cada vez maior para as fontes de energias renováveis [1]. Os benefícios destas fontes resultam em um menor impacto ambiental e reduzem o uso de produtos derivados do petróleo, uma vez que são consideradas energias “limpas”, ou seja, que não produzem poluição e nem se esgotam, além de reciclar resíduos de alto poder energético [2].

A biomassa é uma ótima fonte renovável para a geração de eletricidade por ser considerada, de uma forma geral, capaz de armazenar uma grande quantidade de energia do sol nas suas ligações químicas. É através da fotossíntese que o gás carbônico (CO_2) presente na atmosfera e a água (H_2O) absorvida pelas raízes das plantas, juntamente com os raios ultravioletas provenientes do sol, produzem carboidratos que possibilitam o crescimento da biomassa. A energia do sol fica contida nas estruturas químicas e são liberadas durante a combustão da biomassa, quando o oxigênio reage com o carbono existente na planta vegetal, formando CO_2 e água. Estes compostos ficam disponíveis para a geração e o desenvolvimento de novas plantas [3].

Por ser um processo cíclico, a produção de energia por meio da queima da biomassa é tida como neutra em relação a liberação de Gases de Efeito Estufa (GEE), podendo ser utilizada como Créditos de Carbono (um Crédito de Carbono equivale a uma tonelada de CO_2). Essa associação é obtida se forem plantadas as mesmas quantidades de vegetação que forem abatidas e se for considerado apenas o processo de combustão, isto é, não considerando as emissões ligadas ao transporte ou outros procedimentos em que seja utilizada energia fóssil. A colaboração da biomassa na redução dos lançamentos de GEE e por consequência na diminuição das alterações climáticas, é atualmente vista como um dos fatores motivadores da sua utilização em oposição aos combustíveis fósseis [3].

O Brasil possui um grande potencial para produção de biomassa devido à diversidade das fontes, condições climáticas favoráveis e uma agricultura avançada. Uma das vantagens em comparação aos outros países é a aptidão de introduzir novas áreas à agricultura para geração de energia sem competir com o fornecimento de alimento, com o menor impacto ambiental possível dentro do socialmente aceito [2,4]. É um dos países que possui maior abundância de energia renovável do mundo, cerca de 83,0% da oferta interna de eletricidade é de origem renovável, sendo que a maior parte vem das fontes hídricas, que corresponde por 64,9%. A participação da biomassa na matriz elétrica brasileira é ainda pequena, aproximadamente 8,4%, levando em conta a sua alta capacidade [5]. Atualmente, o Brasil passa pela maior crise hidrológica em 91 anos, uma vez que os dados mostram que o período de setembro de 2020 a abril de 2021 registrou o menor volume histórico de água nos reservatórios das hidrelétricas das regiões Sudeste e Centro-Oeste, que correspondem 70% da capacidade de armazenamento do país [6].

Dessa forma, uma das alternativas é aumentar a participação da biomassa na matriz elétrica brasileira. Uma das possibilidades é através da cogeração, que se baseia no processo de produção de calor e energia mecânica, sendo esta última convertida parcialmente em energia elétrica a partir de uma fonte de energia primária [7]. Na cogeração existem algumas vantagens, como a facilidade de operação, o maior fator de utilização energético devido a uma elevada eficiência simultânea de conversão da energia química do combustível em energia útil para níveis de até 85% (30% para energia elétrica e 55% para energia térmica), a variedade dos equipamentos e a necessidade de diminuir as emissões dos poluentes, usando os combustíveis renováveis em vez dos fósseis. No Brasil, há vários empreendimentos de cogeração, porém, ainda tem grande potencial de crescimento [8].

2 OBJETIVO

2.1 Geral

O objetivo deste estudo é avaliar e comparar alguns indicadores técnicos e econômicos por meio do potencial energético de três tipos de fontes de biomassa: casca e endocarpo de macaúba e bagaço de cana-de-açúcar para uso em uma planta de cogeração.

2.2 Específicos

Para alcançar o objetivo geral, é necessário cumprir os seguintes objetivos específicos:

- Buscar características na literatura, como teor de umidade, teor de hidrogênio, poder calorífico superior (PCS), densidade básica, preço por tonelada, dentre outros, dos três tipos de biomassa.
- Calcular o poder calorífico inferior (PCI), através do PCS, teor de umidade e de hidrogênio de cada biomassa analisada.
- Determinar o investimento inicial de uma planta de cogeração de pequeno porte.
- Avaliar economicamente a viabilidade da utilização das três biomassas em uma usina de cogeração por meio de indicadores como, o VPL (Valor Presente Líquido), TIR (Taxa Interna de Retorno), Payback (Tempo de Retorno do Investimento), e realizar uma análise de sensibilidade.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Biomassas utilizadas para o estudo

3.1.1 Macaúba

Com nome científico de *Acrocomia aculeata*, é uma palmeira (figura - 1) que pode alcançar até 25 metros de altura e contém espinhos longos e pontiagudos. É também conhecida por outros nomes, como bocaiúva, macaíba, coco-baboso ou coco-de-espinho. Nativa de florestas tropicais, possui uma ampla distribuição geográfica. No Brasil é encontrada principalmente nos estados de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, sendo bastante distribuída nas áreas do Cerrado. Suas folhas podem atingir até 5 metros de comprimento e apresentam flores e frutos, marrom amarelados, em cachos que chegam a 60 quilos. Os frutos são relevantes para fauna nativa, visto que alimentam araras, cotias, capivaras, antas e emas. São formados quando a palmeira completa entre três e cinco anos de idade, mantendo a produção por mais de 100 anos [9,10].



Figura 1. Palmeira da Macaúba. Fonte [9]

A *Acrocomia aculeata* é resistente a pragas e variações de temperatura, além de se desenvolver em áreas de baixa precipitação. Os frutos são formados em torno de 20% de casca (epicarpo), 40% de polpa (mesocarpo), 33% de endocarpo e 7% de amêndoa (figura - 2). Tanto da polpa, quanto da amêndoa podem ser extraídos óleos, sendo que a quantidade presente na polpa (60%) é um pouco maior em relação à amêndoa (55%) [11,12,13].



Figura 2. Fruto da Macaúba Fonte [9,18].

A polpa é rica em vitamina A e betacaroteno e podem ser utilizadas para fazer suco, sorvete, bolos, pães e doces. O óleo da amêndoa pode ser usado na fabricação de sabão, sabonete, margarina e cosméticos em geral. O óleo extraído da polpa e o da amêndoa também são usados na produção de biodiesel, combustível feito com base em óleos vegetais. As folhas também podem ser aproveitadas para a confecção de redes e linhas de pescaria e as madeiras da palmeira são utilizadas em casa e outras construções no campo [9].

O endocarpo é uma estrutura dura e resistente que recobre a amêndoa no fruto; por ser denso e rico em carbono, possui alto poder calorífico. Quando carbonizado, é possível extrair um carvão de excelente qualidade quando comparado com o carvão mineral, especialmente no que se refere ao seu baixo teor de cinzas, inexistência de enxofre, alta densidade e controlável teor de carbono fixo e de matérias voláteis [14,15]. O endocarpo também pode ser utilizado como combustível para caldeiras, tem estrutura para substituir a brita de concreto e pode ser usado como material de artesanato [16].

Silva et al. [14], mediu a densidade do endocarpo de macaúba, da madeira de eucalipto e do endocarpo de babaçu. O maior valor obtido foi a densidade do endocarpo de macaúba com $1,161 \text{ g/cm}^3$. Esta parte do fruto contém 36,6% de lignina, 52,6% de holocelulose, 0,97% de cinzas e 10,8% de extrativos [14]. Sua composição elementar (teor de carbono, de hidrogênio e de oxigênio) é cerca de 49,43% de carbono, 6,27% de hidrogênio e 42,15% de oxigênio e sua umidade está perto de 9,2% [17,18].

A produtividade da macaúba pode chegar a 30 toneladas por hectare. Isso corresponde um resíduo de 10 toneladas por hectare de endocarpo, tendo em vista o

alto rendimento da macaúba na produção de óleo (cerca de quatro toneladas por hectare de óleo de polpa e uma tonelada/ha de óleo de amêndoa), o aproveitamento deste resíduo para outras finalidades e inclusive para a geração de energia elétrica viria contribuir na redução de despesas no beneficiamento dos frutos [19,20].

A casca ou epicarpo é repleta de fibras, coriáceas, no entanto quebradiças. Exibem uma coloração esverdeada quando o fruto está desenvolvendo-se e no momento em que está maduro a coloração varia de amarelo-esverdeada a marrom claro [21,22]. Podem ser usadas na produção de combustíveis, na composição de fertilizantes e na fabricação de ração animal junto com outras tortas [23].

Na composição da casca é encontrado por volta de 6,5% de óleo, sendo os principais o ácido oleico e o palmítico, além de outros ácidos insaturados e saturados [17]. Zanatta [24] obteve resultados mais específicos sobre a composição da farinha da casca, com 5,29% de lipídeos, 3,23% de cinzas, 1,06% de proteína, 84,97% de carboidratos e 5,43% de umidade [24].

Dourado et al. [25] mediram a densidade básica, teor de minerais, potencial calorífico superior (PCS) e composição elementar da casca de macaúba, de pinhão manso, de mamona e de amendoim. A maior densidade e o menor teor de minerais foi da casca de macaúba com um valor de 0,354 g/cm³ e 3,17%, respectivamente. A casca de macaúba atingiu um dos maiores potenciais caloríficos superiores dentre estas biomassas, em torno de 4595,6 cal/g e sua composição é por volta de 46,42% de carbono, 5,78% de hidrogênio e 47,21% de oxigênio [25].

Evaristo et al. [26] também determinaram algumas propriedades físicas e químicas da casca e do endocarpo de macaúba. Os resultados mostraram que a casca possui 16,12% em carbono fixo, 5,66% em cinzas e 78,22% em materiais voláteis. Sua densidade a granel tem valor de 177 kg/m³ e o PCS deu 4989 kcal/kg. Já o endocarpo contém 21,33% em carbono fixo, 2,04% em cinzas e 76,97% em materiais voláteis, obteve uma densidade a granel de 498 kg/m³ e um PCS de 5011 kcal/kg [26].

3.1.2 Bagaço de cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar, no presente, é uma das principais plantações da economia brasileira e tem favorecido o desenvolvimento do país. Segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), a produção de cana-de-açúcar no ano

de 2019 alcançou 639,0 milhões de toneladas, aumento de 2,3% em relação ao ano anterior, quando a moagem foi 624,5 de milhões de toneladas [27,28].

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar e de açúcar do mundo, e o segundo maior fabricante de etanol. Sendo assim, há uma grande quantidade de resíduos proveniente da cana: os agrícolas, formados pelas palhas; e os agroindustriais, formados pelos bagaços. O setor sucroalcooleiro usa a energia derivada deste bagaço para produzir eletricidade para o seu próprio consumo, pois possui um alto potencial energético [27,29,30].

Dados de 2019 mostram um aumento de 0,5% na geração de energia elétrica a partir da biomassa (inclui o bagaço de cana-de-açúcar, lixo, lenha e outras fontes primárias). Este é o segundo combustível com maior participação nas termelétricas, por volta de 33,1%, o primeiro é o gás natural com 36,5%. Na safra de 2018/19, o valor da tonelada do bagaço comercializado no Centro-Sul foi em média R\$ 59,22 [5,31].

O bagaço de cana-de-açúcar é um resíduo lignocelulósico, cuja composição química varia conforme alguns fatores, como por exemplo, o tipo de cana, o tipo de solo, as técnicas de colheita e até o manuseio. É composto basicamente por 26,6-54,3% de celulose, 14,3-24,4% de hemicelulose e 22,7- 29,7% de lignina. Em relação a composição elementar, o bagaço possui cerca de 39,7- 49% de carbono, 40- 46% de oxigênio, 5,5- 7,4% de hidrogênio e 0- 0,03% de nitrogênio e cinzas [32]. Ao sair da moenda, a sua umidade fica em torno de 50%.

Ponte et al. [27] mediram uma umidade de 14% do bagaço de cana e um PCS de 15,2 MJ/kg. Determinaram também a quantidade de carbono fixo (15,40%), materiais voláteis (69,00%), cinzas (15,40%), além da densidade a granel (0,08 g/cm³). Quanto à análise elementar, obtiveram 38,8% de carbono, 5,2% de hidrogênio, 1,0% de nitrogênio, 0,6% de enxofre e 38,9% de oxigênio [27]. Silva et al. [33] trataram o bagaço de cana para que tivesse 12% de umidade, com isso obtiveram uma densidade a granel de 0,06 g/cm³ e um poder calorífico superior de 18.540 J/kg. Nas análises químicas conseguiram um teor de cinzas de 1,42%, um teor de carbono fixo de 17,89% e um teor de voláteis de 80,69% [33].

3.2 Cogeração

É a geração conjunta de energia térmica e mecânica a partir de um mesmo combustível (gás natural, resíduos de madeira, casca de arroz, bagaço de cana, palha, ponteiros, entre outros), de modo que a energia mecânica pode ser utilizada como trabalho, como por exemplo na operação de moendas, numa usina de açúcar e álcool, ou transformada em eletricidade através de geradores. Já a energia térmica é usada como fonte de calor para processos industriais ou no setor de comércio ou serviços, tal como shopping centers, hospitais, aeroportos, frigoríficos, dentre outros [34].

Os segmentos industriais que mais utilizam essa energia térmica em seus procedimentos são as indústrias de açúcar e álcool, alimentos e bebidas, papel e celulose, têxtil, químico e petroquímico. Desse modo, é evidente que o processo de cogeração possui um rendimento alto devido a produção e aplicação de dois tipos de energia, tendo assim um melhor aproveitamento energético do combustível [34].

Para realizar a cogeração, é preciso a utilização de alguns equipamentos que queimem o combustível e possibilitam aproveitar a energia térmica liberada na combustão. É necessário também acionadores primários que produzem trabalho, como as turbinas a vapor de contrapressão ou as turbinas a gás ou motores diesel. As caldeiras são operadas para queimar biomassas e usar o calor gerado para gerar o vapor que aciona turbinas. Este sistema é normalmente chamado de ciclo a vapor [35,36]

Há dois tipos básicos de cogeração, classificados de acordo com a necessidade da atividade a ser executada, sendo esta exigência em forma de energia elétrica ou de calor. O ciclo superior ou *topping* (figura – 3), tecnologia de cogeração que mais se destaca no Brasil, utiliza as turbinas a vapor de contrapressão. Neste ciclo, primeiramente o combustível é processado, o acionador produz a energia mecânica e/ou elétrica e depois o vapor é fornecido ao processo industrial. Isto implica que a geração de energia mecânica e/ou elétrica ocorre antes da etapa do processo produtivo que usa a energia térmica [35,37].

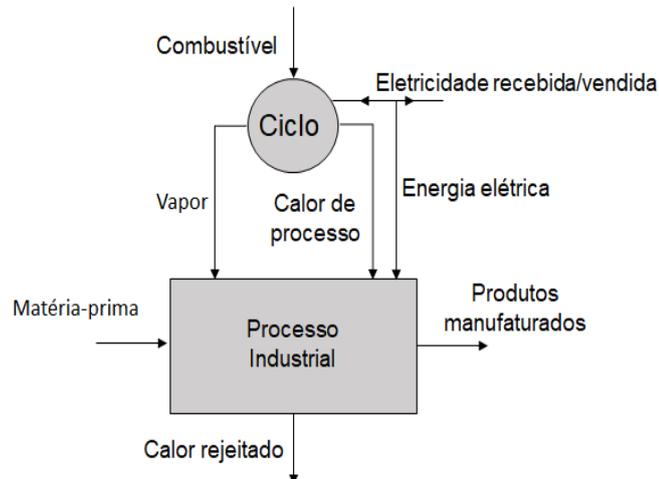


Figura 3. Ciclo Superior ou topping. Fonte: Adaptado [36].

O ciclo inferior ou *bottoming* (figura – 4) inverte o aproveitamento da energia, isto é, o vapor é conduzido inicialmente para o processo industrial e o rejeitado é utilizado para produção de energia mecânica e/ou elétrica. O uso deste tipo de ciclo é mais reduzido, uma vez que precisa de calor rejeitado a altas temperaturas para se tornar viável. As áreas industriais que mais operam com esse método são as cimenteiras, as de cerâmica, as de aços e as de gás. Nos fornos Hoffman (cerâmicas) e nos fornos de clínquer com ciclones recuperativos (cimenteiras), este calor é recuperado e aplicado no preaquecimento da matéria prima e/ou no ar de combustão, melhorando de forma significativa a eficiência destes sistemas. Na situação em que o calor rejeitado não possa ser usado, uma das possibilidades é a sua utilização para geração de energia elétrica em turbinas a gás [8,35,36].

3.2.1 Custos da introdução de sistemas básicos de cogeração

De acordo com Lund e Andersen [38], na Dinamarca existem vários estabelecimentos de cogeração de pequena escala a biomassa (3 a 4 MW). Eles estabelecem os elementos que devem ser observados na análise da implantação da cogeração: o preço de venda de eletricidade, preço de venda do calor, custo de combustível, impostos, subsídios concedidos para a geração de eletricidade, despesas com operação e manutenção, investimentos na compra e instalação dos equipamentos e custos na armazenagem e transporte de biomassa [36,38,39].

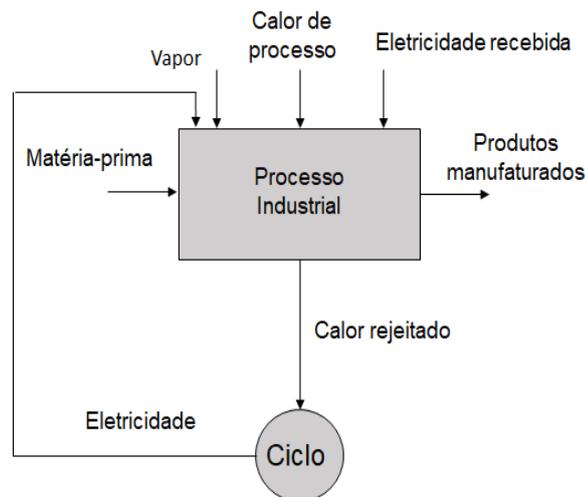


Figura 4. Ciclo inferior ou bottoming. Fonte: Adaptado [36].

3.2.2 Caldeira a vapor

É o instrumento responsável pela geração de vapor. Através da combustão de um combustível, transforma a água líquida em vapor. Existem três tipos de caldeira, a flamotubular (fogatubular), a aquatubular e a mista. A primeira recebe essa denominação em razão da forma como é feito o processo de combustão no interior. Dentro dos tubos ocorre a circulação dos gases de combustão que aquecem a água presente ao redor dos tubos, transformando-a em vapor (figura – 5). Esta caldeira de tubo de fogo é adequada para locais onde demanda-se vapor de baixa pressão e demandas reduzidas.

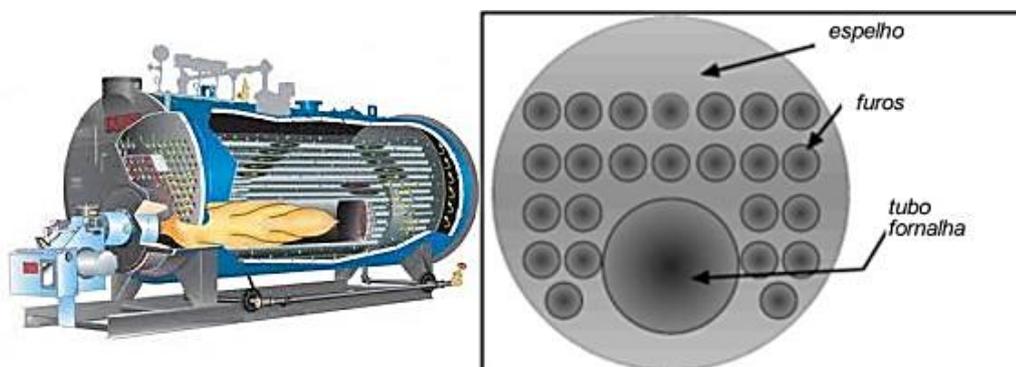


Figura 5. Caldeira Flamotubular. Fonte [42].

Nas caldeiras aquatubulares (figura – 6), a combustão dos gases acontece na parte externa dos tubos e a água é aquecida e convertida em vapor passando por dentro deles. O diferencial deste tipo de caldeira é suportar altas pressões e

temperaturas, bem como gerar grande quantidade de vapor, promovendo uma maior eficiência na produção. Dessa maneira, costumam ser bastante utilizadas principalmente na geração de energia em usinas termelétricas [40,41,42].

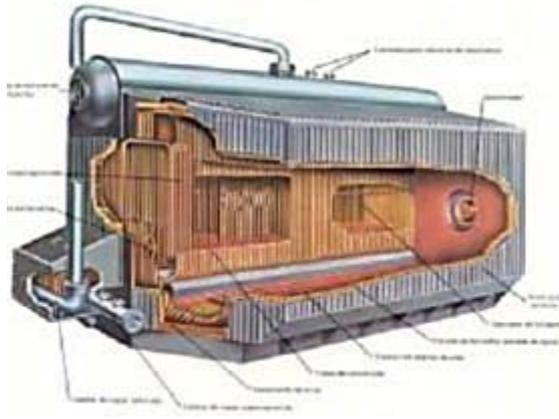


Figura 6. Caldeira Aquatubular. Fonte [42].

O último modelo de caldeira a vapor é a mista, sendo composta pela mistura do processo de combustão das flamotubulares com as paredes revestidas de tubos de água das aquatubulares. Este tipo de caldeira aguenta baixas pressões e temperaturas como as flamotubulares [40,41,42].

3.2.3 Turbina a vapor

É o equipamento encarregado de converter a energia térmica contida no vapor, em energia mecânica, movimentando um eixo ligado ao gerador de eletricidade. O vapor superaquecido à alta pressão e temperatura entra na turbina e é direcionado para uma placa expansora que conduz todo o fluxo do vapor para as palhetas. O vapor pode ser expandido dentro das turbinas de duas formas diferentes, chamadas de estágio. O primeiro é o de ação ou impulso; neste estágio o vapor é acelerado dentro da turbina e é o choque com as palhetas que gira o eixo, isto é, o contato do vapor que impulsiona as palhetas [35,43]. O outro estágio é chamado de reação, neste caso a movimentação do eixo ocorre quando o vapor passa por meio das palhetas gerando uma força de reação devido a diferença de pressão, pois o vapor que passa por dentro das pás possui uma pressão maior que as de fora. Este princípio é semelhante ao das asas de um avião. As turbinas mais modernas, regularmente usam esses dois tipos de estágios no mesmo instrumento, normalmente variando o grau de reação e impulso do início até a extremidade de cada palheta. No deslocamento do vapor pela turbina

ocorre a queda da pressão e, por consequência, uma expansão do vapor. Portanto, as pás do final da turbina devem ser maiores para acompanhar esta variação, já que caso contrário a velocidade seria muito alta e poderia superar os níveis de resistência dos materiais das palhetas [35,43].

Existem dois tipos de turbinas a vapor, as de contrapressão (figura – 7) e as de condensação (figura – 8). A primeira é mais indicada para processos industriais que precisam de calor, uma vez que o vapor de saída da turbina ainda possui energia suficiente para alimentar outros procedimentos, sendo essas turbinas usadas para a cogeração de energia elétrica e térmica. As de condensação são mais utilizadas onde se necessita da maior quantidade de energia eletromecânica produzida. Geralmente a sua saída é ligada a um condensador que opera com uma pressão menor que a atmosférica (vácuo) [35,43].

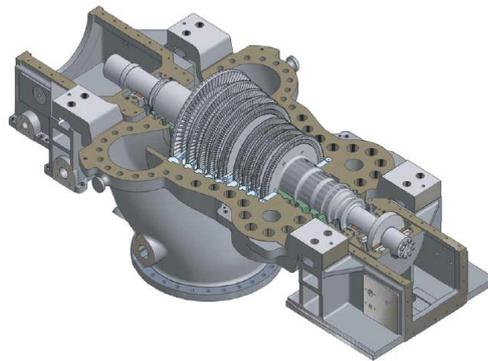


Figura 7. Turbina a vapor de contrapressão. Fonte [43].

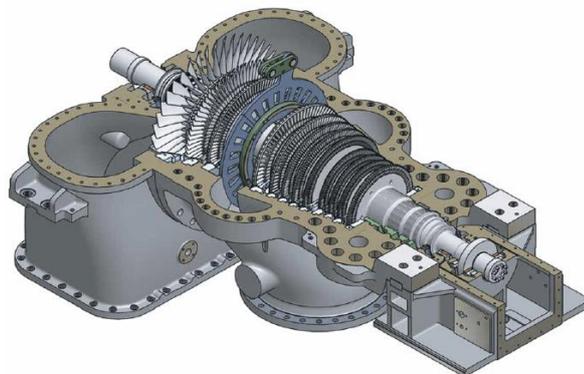


Figura 8. Turbina a vapor de condensação. Fonte [43].

3.2.4 Condensador, tanque de condensado, torre de resfriamento e bombas

É o dispositivo responsável pela troca de calor do vapor úmido vindo da turbina com outro fluido, podendo ser de ação direta quando o ar é o fluido, ou indireta, na qual existe um circuito de água. Esta água troca calor com o vapor, sendo posteriormente conduzida para uma torre de resfriamento a seco, onde o calor recebido pelo vapor é transferido para o ambiente externo. Tanto o condensador a ar, quanto a torre de resfriamento utilizam ventiladores que sopram ar para resfriar o fluido. O tanque de condensado tem como principal função armazenar a água de reposição e o condensado, segurando a reserva de água para fornecer as caldeiras a vapor. Para pressurizar a água de saída do condensador, podendo assim garantir sua chegada ao tanque de condensando, utilizam-se bombas centrífugas. Também são utilizadas para elevar a pressão da água acima da pressão de operação da caldeira [36,39].

3.2.5 Processo de geração de energia de uma central a vapor

Em geral, o procedimento de geração de energia de uma central a vapor a biomassa com ciclo fechado começa com os resíduos de origem vegetal, como, por exemplo, o bagaço ou palha da cana e a madeira. Estes são transportados até uma caldeira, juntamente com adição de ar para manter a combustão em seu interior. Os rejeitos deste processo são as cinzas e os gases de exaustão que saem pela chaminé. O ciclo termodinâmico se inicia desde o processo de circulação do fluido de trabalho, geralmente a água, que sai do tanque de condensado, atravessa a bomba de alta pressão antes de entrar na caldeira, passando ao estado de líquido comprimido [39]. A água obtém calor através da queima da biomassa e passa para o estado de vapor. Este fluido superaquecido a alta pressão e temperatura é entregue à turbina que transforma a energia térmica em energia mecânica. Conectado a turbina está o gerador que é capaz de transformar a energia mecânica em energia elétrica. O vapor que sai da turbina com pressão menor a pressão atmosférica entra no condensador, onde cede calor ao fluido de arrefecimento (ar ou água) podendo passar para o estado líquido. Por meio de uma bomba, o fluido de trabalho retorna ao tanque de condensado, fechando assim o ciclo de geração (figura – 9). Caso o fluido de

arrefecimento seja água, poderá ainda passar por uma torre de resfriamento onde o calor recebido do vapor é transferido para o meio ambiente, ou ser devolvido ao seu corpo de água original [39].

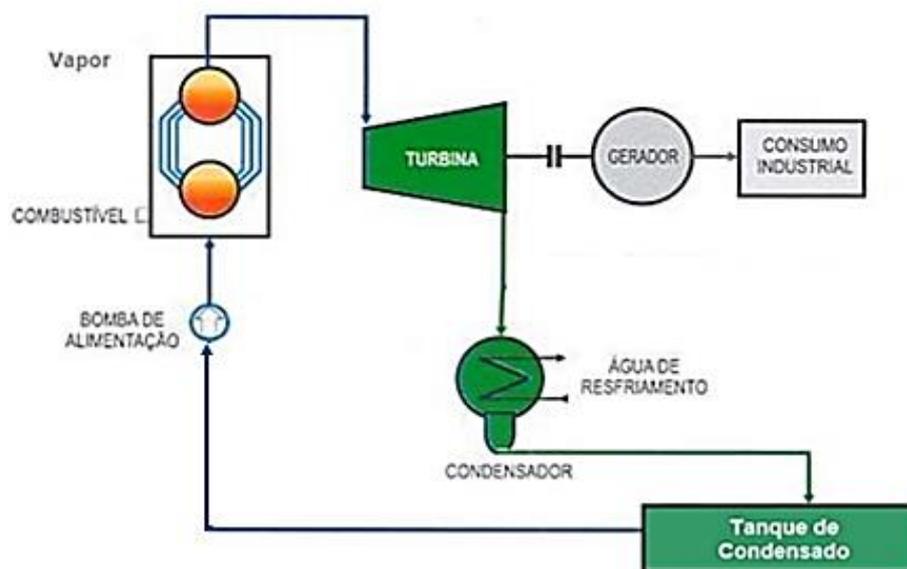


Figura 9. Processo de geração de energia de uma central a vapor. Fonte [39].

3.2.6 Ciclo termodinâmico de uma central a vapor

O processo de geração de energia de uma central a vapor utiliza o ciclo termodinâmico de Rankine, relacionando o consumo de calor com a produção de trabalho. Este ciclo é bastante operado em plantas a vapor de geração de eletricidade que usam a biomassa como combustível, uma vez que esta tecnologia já está consolidada e encontra-se em estágio comercial. Como em outros ciclos termodinâmicos, a máxima eficiência termodinâmica é obtida pelo cálculo de máxima eficiência do ciclo de Carnot. O ciclo Rankine é um ciclo de potência que trabalha com vapor, sendo este produzido em uma caldeira a alta pressão para, então, ser levado a uma turbina onde gera energia cinética e perde pressão. Ao passar pelo condensador, o vapor volta ao estado líquido e depois é impulsionado por uma bomba que aumentará a pressão para assim, poder ingressar novamente à caldeira [3,39].

A vantagem dos sistemas de geração de vapor é também proporcionar, além da energia elétrica, calor para empresas que necessitam de uma fonte de energia térmica para o processo produtivo. O vapor de água, quando utilizado como vetor de transporte de energia térmica, traz benefícios como baixa agressividade química e a

grande capacidade de transportar energia, o que justifica a sua grande disseminação. No procedimento de geração e de utilização do vapor acontecem mudanças de fase da água, tanto na vaporização quanto na condensação, que causa grandes variações de volume, resultando em um alto coeficiente de transferência térmica que, somado à alta densidade energética (calor latente) do vapor, produz elevadas taxas de transferência de energia [3,39].

Com a análise dessas taxas de energia consegue-se o desempenho energético do processo de geração de energia de uma planta a vapor, sendo capaz de quantificar as perdas em cada equipamento da planta. Apesar da análise energética de uma central a vapor poder quantificar as taxas de energia, ela não é adequada para qualificar as perdas de energia provocadas pelas irreversibilidades dos processos térmicos [3,39]. Segundo Mendes [39] a eficiência do processo de geração da energia elétrica de uma usina de pequeno porte (alguns megawatts MW) é de aproximadamente 15%, porém na de maior porte (dezenas de megawatts) é em torno de 30% [39].

O Ciclo Rankine faz parte dos principais ciclos termodinâmico teóricos conhecidos. Estes foram fundamentais no desenvolvimento das máquinas térmicas, bem como o Ciclo de Carnot, o Ciclo Brayton, o Ciclo Otto e o Ciclo Diesel. Todos eles, com exceção do Ciclo Rankine, foram elaborados tendo como fluido de trabalho o ar, diante disso são chamados de ciclos padrão de ar. Estes ciclos termodinâmicos teóricos são avaliados por meio das variações de temperatura e pressão de um fluido, sendo o vapor de água e o ar os principais, assim como em função dos fluxos energéticos de calor e trabalho. Baseado nesses resultados teóricos, os ciclos reais foram desenvolvidos através da experimentação de inúmeras variações construtivas que foram guiadas pelas relações de temperatura e pressão calculadas para o fluido em cada etapa dos ciclos, de forma a obter os maiores rendimentos e potências [3,44].

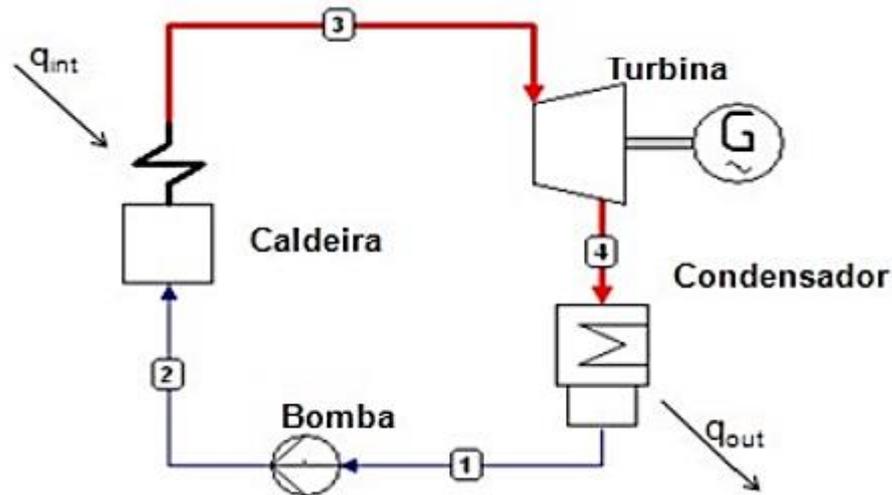


Figura 10. Esquema de uma usina a vapor simples que funciona conforme o Ciclo Rankine. Fonte [44].

Levando em conta que o Ciclo Rankine possui quatro processos que acontecem em regime permanente (figura – 10 e 11), sendo o ponto 1 como líquido saturado e o ponto 3 como vapor superaquecido. De acordo com as figuras – 10 e 11, no processo de 1-2 ocorre a compressão adiabática e isentrópica do líquido saturado, onde o fluido é bombeado de uma pressão baixa para uma mais alta, no 2-3 há o fornecimento de calor a pressão constante na caldeira, no 3-4 verifica-se a expansão isentrópica reversível na turbina e no último processo 4-1 acontece a transferência de calor a pressão constante no condensador, no qual o líquido é resfriado até a condição de líquido saturado [3,44].

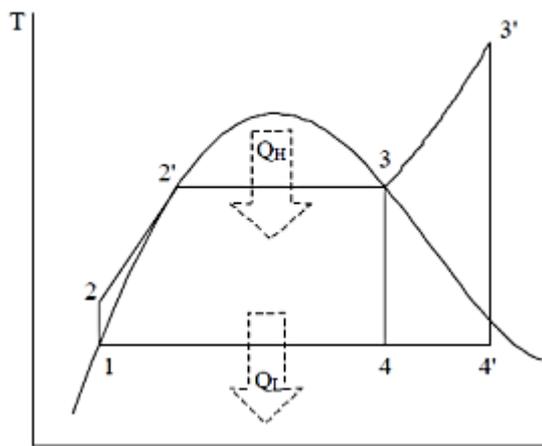


Figura 11. Diagrama da temperatura versus entropia do Ciclo Rankine. Fonte [3].

O rendimento deste ciclo é menor que o do Ciclo de Carnot e depende da temperatura média do calor fornecido para o fluido de trabalho na caldeira e da temperatura média do calor rejeitado do fluido no condensador. Desse modo, o

aumento da temperatura média do calor fornecido (superaquecimento do vapor) ou a redução da temperatura média do calor rejeitado ajudam a melhorar o rendimento do ciclo. Da mesma forma, a pressão é uma variável que influencia no desempenho do processo, uma vez que ao diminuir a pressão (vácuo) no condensador, a temperatura na qual o calor é rejeitado também diminui. Entretanto, esta redução de pressão no condensador cria um cenário indesejável que é a diminuição do título do vapor na saída da turbina gerando o aumento de gotículas e, por consequência, acaba provocando erosão nas palhetas da turbina. Outra alternativa que melhora a eficiência é o aumento da pressão na caldeira gerando uma maior temperatura de fornecimento do calor. O rendimento do Ciclo Rankine pode ser expresso pela equação 1, onde o W_{liq} é o trabalho líquido gerado no processo, ou seja, é o trabalho mecânico produzido na turbina (WT) menos o trabalho produzido pela bomba (WB) e QH é a energia fornecida pelo combustível [3,44].

$$n_t = \frac{W_{liq}}{QH} (1)$$

3.3 Indicadores econômicos (VPL, TIR, Payback)

Em uma avaliação econômica, os indicadores são ferramentas financeiras importantes que auxiliam nas tomadas de decisões sobre o investimento de capital em projetos de longo prazo, cujos retornos estão previstos para vários períodos consecutivos. Sendo assim, essas análises têm como principal objetivo verificar a viabilidade e rentabilidade do projeto, caso aplicado ao setor privado, e para as organizações públicas (governo), têm como finalidade o melhoramento do bem-estar social da população [45].

As técnicas de estudo de investimentos se apoiam nos retornos promovidos pelos fluxos de caixa relacionados aos projetos em análise. A construção do fluxo de caixa se dá por meio da progressão temporal de entradas e de saídas de dinheiro no caixa de uma entidade. Todos os métodos de análise de investimento tomam como base o fluxo de caixa líquido, medido ou projetado durante um período definido [45].

Os acontecimentos que afetam o caixa das atividades operacionais, isto é, que aumenta ou diminui o dinheiro do caixa, são os recebimentos de clientes que se relacionam com a receita e os pagamentos de itens ligados à operação da

organização, como salários, aluguel, seguros, fornecedores, entre outros que estão vinculados a despesa operacional [46]. No entanto as receitas e despesas de origem eminentemente contábil não entram no fluxo de caixa, como por exemplo a depreciação de ativos imobilizados que são as máquinas, prédios, equipamentos, instalações, móveis, entre outros, que perdem valor com o passar do tempo [45,46].

Além do fluxo de caixa, um outro elemento essencial na análise de investimento é a determinação da taxa de desconto, taxa de retorno mínima aceitável ou Taxa Mínima de Atratividade de Retorno (TMAR). Essa taxa é definida de acordo com interesses e decisões de investimento de cada companhia, onde as circunstâncias que orientam esta escolha são: disponibilidade e custos dos recursos, horizonte de planejamento do projeto (curto ou longo prazo), oportunidades estratégicas que o investimento pode oferecer e taxa de juros paga no mercado por grandes bancos ou por títulos governamentais, para o montante de dinheiro envolvido [3,47].

Normalmente, a taxa de atratividade é o retorno médio alcançado pela empresa em suas atividades ou o custo de capital da companhia. Em referência ao poder público, esta pode atrelar o custo de capital à taxa Selic, que é a taxa básica de juros da economia. Os métodos de análises mais usados são o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR) que, por considerar o valor temporal do dinheiro, requerem do uso de uma taxa de desconto para serem aplicados [45].

O VPL pode ser entendido como uma medida do valor presente da riqueza futura gerada pelo projeto, mais especificamente é o fluxo de caixa líquido esperado durante os anos do projeto trazido a valor presente, incluindo uma taxa de atratividade com o propósito de atualizar o fluxo de caixa. Dessa maneira, o VPL é calculado pela equação (2) [45].

$$\text{VPL} = \left[\sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} \right] - I_0 \quad (2)$$

$$\text{VPL} = \left[\frac{FC_1}{(1+i)^1} + \frac{FC_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1+i)^n} \right] - I_0 \quad (2)$$

Onde:

FC_t - Fluxos operacionais líquidos de caixa gerados pelo investimento no período t ($1 \leq t \leq n$) em unidades monetárias;

I_0 - Investimento inicial em unidades monetárias;

i - Taxa de atratividade para atualizar o fluxo de caixa;

O modo como é avaliado o resultado é bem claro, os projetos são aceitos quando o valor do VPL é maior ou igual a zero ($VPL \geq 0$) e rejeitados com valores negativos. O VPL indica a riqueza gerada pelo projeto, portanto, projetos com valores positivos significam que a organização terá um aumento de patrimônio e o inverso ocorrerá quando for negativo [45].

A Taxa Interna de Retorno (TIR) também é utilizada para estudar a viabilidade de um projeto e pode ser compreendida como a taxa de desconto que torna nulo o valor presente líquido de um fluxo de caixa, isto é, o próprio i da equação do VPL é a taxa interna de retorno quando o mesmo iguala a zero, como mostra a equação (3) [45].

$$VPL = [\sum_{t=1}^n FC_t / (1+i)^t] - I_0 = 0 \quad (3)$$

$$VPL = [FC_1 / (1+i)^1 + FC_2 / (1+i)^2 + \dots + FC_n / (1+i)^n] - I_0 = 0$$

Onde:

FC_t - Fluxos operacionais líquidos de caixa gerados pelo investimento no período t ($1 \leq t \leq n$) em unidades monetárias;

I_0 - Investimento inicial em unidades monetárias;

i - Taxa Interna de Retorno (TIR);

Essa taxa também pode ser entendida como uma taxa de desconto que equipararia, em um determinado instante, os valores atualizados das entradas e das saídas de caixa, sendo retratada como uma rentabilidade relativa, em porcentagem, de um projeto de investimento. Dessa forma, a sua análise é através da comparação com a taxa de atratividade usada no cálculo do VPL. Em projetos onde a TIR é superior ou igual a taxa mínima de atratividade, o investimento é identificado como economicamente atrativo ($TIR \geq i$ - taxa de atratividade), no entanto, quando o valor é menor, a orientação técnica é de rejeitar o empreendimento [45].

Outros indicadores econômicos utilizados para avaliar projetos são o payback simples (PBS) e o econômico ou descontado (PBE). O simples revela o tempo necessário para que a soma das receitas nominais líquidas futuras iguale ao valor do investimento inicial, ou seja, é o número de anos em que a soma do fluxo de caixa equivale ao capital aplicado segundo a equação (4). O descontado ou econômico tem

a mesma função do simples, porém leva em conta o valor do dinheiro no tempo de acordo com a equação (5). Ao verificar os valores do payback, a opção mais favorável de investimento é aquela onde o tempo de retorno do capital investido é menor, isto é, quanto mais rápido a entidade receber o valor investido melhor será o projeto [48].

$$PBS = \sum_{t=1}^n (FC_t) = I_0 \quad (4)$$

Onde:

FC_t - Fluxos operacionais líquidos de caixa gerados pelo investimento no período t ($1 \leq t \leq n$) em unidades monetárias;

I_0 - Investimento inicial em unidades monetárias;

$$PBE = \sum_{t=1}^n (FC_t) / (1 + i)^t = I_0 \quad (5)$$

Onde:

FC_t - Fluxos operacionais líquidos de caixa gerados pelo investimento no período t ($1 \leq t \leq n$) em unidades monetárias;

I_0 - Investimento inicial em unidades monetárias;

i - Taxa de atratividade para atualizar o fluxo de caixa;

3.4 Análise de Sensibilidade

É um tipo de avaliação que permite estudar melhor as variáveis que compõem o cálculo do VPL, além de ver o quanto são sensíveis diante de mudanças de cenários. A análise de sensibilidade também é conhecida como análise mop (melhor, otimista e pessimista). Baseia-se no cálculo do VPL para cada alteração de qualquer variável, sendo mantida a previsão esperada para todas as demais. Dessa maneira é possível identificar as variáveis críticas no processo de projeção e demonstração dos fluxos de caixa, de forma que se possa avaliar o projeto considerando diversas hipóteses sobre o comportamento dessas variáveis. O resultado revela quais são os fatores mais sensíveis que podem inviabilizar o projeto e/ou que precisam de mais informações, destinando assim uma atenção maior a eles [49].

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Metodologia para análise técnica

4.1.1 Determinação do Poder Calorífico Inferior (PCI)

Todo combustível que é queimado gera calor, sendo esta característica denominada de poder calorífico. Definindo de uma forma mais completa, é a quantidade de calor despreendida pela combustão estequiométrica do combustível. O poder calorífico é expresso em unidades de energia por unidade de massa. Na condição de combustíveis líquidos e gasosos, pode ser determinado em unidades de energia por unidades de volume, entretanto, precisa-se fornecer a referência de densidade e/ou o quadro de temperatura e pressão [50].

O gás hidrogênio é o combustível com maior poder calorífico, cerca 28700 kcal/kg, seguido pelo metano, propano e etanol. O carvão é constituído basicamente por carbono e possui o menor poder calorífico dentre estes combustíveis, em torno de 5429 kcal/kg. Dessa forma, quanto maior for a quantidade de hidrogênio no combustível, maior será o seu poder calorífico. Por isso, o carvão foi substituído pelos combustíveis derivados do petróleo na segunda Revolução Industrial [50].

Combustíveis contendo hidrogênio, quando são queimados liberam água, como um dos produtos da reação. O estado desta água influencia no poder calorífico utilizado. O Poder Calorífico Superior (PCS) corresponde ao calor cedido pela queima tendo todo o vapor de água na forma condensada, isto é, na fase líquida. Por isso o PCS é mencionado como superior, pois se recupera o calor de condensação da água [50,51].

Já o Poder Calorífico Inferior (PCI) representa o calor liberado pela combustão estando toda a água resultante no estado de vapor. Desse modo, o PCI é dito inferior porque o calor latente de condensação do vapor não é recuperado, logo o PCS é maior que o PCI. A diferença entre eles está relacionada à existência de água nos produtos da reação que, por sua vez, está ligado à presença de hidrogênio no combustível, e à presença de umidade [50,51].

Portanto, segundo RANADE e KAWRE [52] e LIMA [50], o PCI pode ser calculado pela equação (6). Neste trabalho, os valores do poder calorífico superior, do

teor de hidrogênio e do teor de umidade das três biomassas analisadas, foram buscados na literatura.

$$PCI = PCS - 2440 \cdot (9 \cdot H + U) \quad (6)$$

Onde:

PCI - Poder Calorífico Inferior [kJ/kg] em base seca;

PCS - Poder Calorífico Superior [kJ/kg];

H- Teor de hidrogênio do combustível [kg/kg] em base seca;

U- Teor de umidade do combustível [kg de água/kg de combustível];

Usualmente o PCS é medido em laboratório e o PCI é conseguido através da equação (6). Como a temperatura dos gases de combustão é muito alta nas máquinas térmicas, a água presente neles se encontra sempre no estado de vapor. Sendo assim, é necessário considerar sempre o poder calorífico inferior e não o superior [50].

4.2 Metodologia para análise econômica

4.2.1 Planta de Cogeração utilizada para o estudo de viabilidade

A eficiência global do processo de geração de energia elétrica de uma usina de pequeno porte, com capacidade instalada de alguns MW, é perto de 15%, de acordo com Mendes [39]. Desta forma, somente 15% do poder calorífico inferior (PCI) da biomassa é convertido em energia elétrica. Conforme Lund e Andersen [38], usinas de cogeração de pequena escala na Dinamarca que utilizam a biomassa como combustível possuem potência instalada de 3 a 4 MW. Então para analisar qual tipo de biomassa (casca e endocarpo de macaúba e bagaço de cana-de-açúcar) tem uma maior viabilidade econômica para ser usada em uma planta de cogeração, foi considerada uma usina que opera em ciclo Rankine, com capacidade de 3 MW, eficiência de 15% e que queima combustível durante 24 horas por dia ao longo de 360 dias por ano [36,38,39].

Os valores dos equipamentos utilizados, bem como a instalação, a manutenção e operação dos mesmos foram baseados nos trabalhos de Mendes [39] e Rodrigues [36]. A tabela 1 apresenta todos os preços durante 7 anos de operação da planta de

cogeração usada no estudo de Mendes [39]. Entretanto, como esses valores são antigos (de 2009) precisam ser atualizados incluindo a inflação deste período (01/2009 - 06/2021). A inflação é simplesmente o aumento propagado no preço dos produtos, devido ao excesso de demanda e/ou ao aumento do custo da matéria-prima e/ou a inflação crônica. A sua consequência é diminuir o poder de compra do dinheiro das pessoas e das empresas, isto é, R\$100,00 reais em 2009 não compra os mesmos produtos que hoje em dia, pois é preciso ter mais dinheiro atualmente para obter as mesmas mercadorias [53].

Tabela 1. Preços da instalação, operação e manutenção e compra dos equipamentos da planta de cogeração usada no estudo Mendes e Rodrigues. Fonte [36] e [39].

Componente	Custo		
	Compra	Instalação	Operação e Manutenção
Caldeira (com superaquecedor)	R\$ 388.000,00		
Turbina + Gerador	R\$ 3.503.800,00		
Condensador	R\$ 154.262,14		
Painel de controle	R\$ 14.000,00		
Bombas	R\$ 4.000,00	R\$ 339.345,00	R\$ 191.000,00
Tanque de condensado	R\$ 6.300,00		
Torre de resfriamento	R\$ 25.000,00		
Sistema de Transporte + Silo	R\$ 25.000,00		
Sub-Total	R\$ 4.120.362,14	R\$ 339.345,00	R\$ 191.000,00
Total da Planta		R\$ 4.650.707,14	

O índice da inflação oficial do Brasil é o IPCA (Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo) que mede a variação de preços de mercado para o consumidor final. Esse índice é medido mensalmente pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e é composto por alguns segmentos como, os de alimentação e bebida, artigos de residência, comunicação, despesas pessoais, educação, habitação, saúde e cuidados pessoais, transportes e vestuários. O IPCA é um bom parâmetro para avaliar perdas no poder de compra, sendo usado pelo Banco Central para acompanhar a inflação. Existe outro índice que também mede a inflação mensalmente e está interligado ao IPCA, que é o Índice Geral de Preços de Mercado (IGP-M). Esse indicador é monitorado pela Fundação Getúlio Vargas (FGV) e mede a inflação de diversos produtos, desde matérias-primas agrícolas e industriais até bens e serviços finais, sendo mais amplo que o IPCA [54].

Em vista disso, os preços dos equipamentos, da instalação, da manutenção e da operação foram atualizados pela inflação acumulada no período de janeiro de 2009 a junho de 2021. Como o IGP-M é mais abrangente, foi utilizado ele para os cálculos. Segundo a calculadora do cidadão do Banco Central do Brasil [55], a inflação acumulada neste período é de 161,37%. A tabela 2 mostra os valores atualizados devido a esse aumento nos preços das mercadorias. Vale lembrar que o investimento total necessário para implementar a usina de cogeração será o mesmo para todas as biomassas (casca e endocarpo de macaúba e bagaço de cana-de-açúcar).

Tabela 2. Preços da instalação, operação e manutenção e compra dos equipamentos da planta de cogeração atualizados pela inflação. Fonte Autor.

Componente	Custo		
	Compra	Instalação	Operação e Manutenção
Caldeira (com superaquecedor)	R\$ 1.014.115,60		
Turbina + Gerador	R\$ 9.157.882,06		
Condensador	R\$ 403.194,96		
Painel de controle	R\$ 36.591,80		
Bombas	R\$ 10.454,80	R\$ 886.946,03	R\$ 499.216,70
Tanque de condensado	R\$ 16.466,31		
Torre de resfriamento	R\$ 65.342,50		
Sistema de Transporte + Silo	R\$ 65.342,50		
Sub-Total	R\$ 10.769.390,53	R\$ 886.946,03	R\$ 499.216,70
Total da Planta	R\$ 12.155.553,25		

4.2.2 Determinação da Taxa de atratividade

Antes de determinar a taxa de atratividade é necessário entender sobre a taxa Selic. Essa taxa é conhecida como a taxa básica de juros da economia brasileira, isto significa que todas as outras taxas de juros e empréstimos no Brasil dependem da Selic, que é o quanto de juros que o governo paga pelos seus empréstimos. É mais seguro emprestar dinheiro para o governo, uma vez que é mais difícil dele quebrar, além de possuir o monopólio da emissão de moeda. Dessa maneira, o governo é visto como o emissor de melhor risco de crédito em uma economia, pois nenhum outro contrato de empréstimo, em princípio, possui risco menor do que o empréstimo ao governo. Por isso, as outras taxas de juros costumam ser maiores do que a Selic e é normal que quando esta taxa se reduza, as outras também sofram redução e o contrário é igualmente válido [53].

A taxa Selic é estabelecida pelo COPOM (Comitê de Política Monetária) e é usada como ferramenta para controlar a inflação bem como para auxiliar a determinar a taxa de atratividade. Uma empresa, ou um investidor, ou um empreendedor quando avalia um projeto, ele estipula, claramente, um retorno maior do que o definido pela taxa Selic em razão de estar correndo mais riscos e incertezas ao investir em um projeto do que se investisse somente em títulos públicos, que são mais seguros e remuneram o valor da taxa de juros básica da economia [53]. Segundo os dados do relatório Focus, publicado pelo Banco Central (BC) no dia 26/07/2021, o mercado financeiro calcula que a taxa Selic finalize dezembro deste ano em 7% ao ano e uma inflação de 6,56% ao ano [56]. Portanto será utilizada uma taxa de atratividade de 10% ao ano para determinar o VPL.

4.2.3 Determinação da Receita, Despesa, Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e PayBack.

A receita será obtida somente pela venda da energia elétrica gerada na planta de cogeração durante sete anos. O calor será utilizado para secagem da biomassa e não será vendido. Considerando a capacidade de 3 MW, assim como a operação constante durante 24 h e 360 dias por ano, será produzido um montante de energia diário de 72 MWh e 25920 MWh anuais [57]. No Mercado Livre de Energia existe um parâmetro denominado de PLD (Preço de Liquidação de Diferenças) que é usado para mensurar a energia vendida e comprada no Mercado de Curto Prazo (MCP), espaço este destinado para as negociações de sobras e déficits incluídos nos contratos de fornecimento entre geradores, comercializadores, distribuidores e consumidores [58,59]. Este parâmetro é medido através das diferenças entre a energia contratada e os valores de geração e consumo. Isto é, o PLD equilibra os custos entre a oferta e a demanda de energia no país, sendo determinado pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), instituição encarregada por gerenciar o mercado de energia elétrica no Brasil. A projeção do PLD médio, de acordo com a CCEE, para as regiões Sudeste e Centro-Oeste no ano de 2021 é de aproximadamente R\$ 174,31/MWh, porém em uma situação mais adversa poderá chegar a R\$ 242,29/MWh [58,59]. Este valor será utilizado para produção da receita como preço de venda da energia elétrica devido ao fato da maior crise hidrológica em 91 anos estar acontecendo, com o propósito de realizar a avaliação econômica.

As despesas serão estabelecidas pelo preço e quantidade necessária de biomassa utilizada na usina para produzir os 25920 MWh de energia anual. A massa necessária de todas as biomassas (casca e endocarpo de macaúba e bagaço de cana-de-açúcar) usadas na cogeração para gerar esta quantia de energia serão determinadas pelo PCI. O preço da casca e do endocarpo de macaúba foram obtidos através do contato com a Inocas Macaúba e a Cooperativa dos Trabalhadores Rurais de Riacho D'anta e Adjacências (COOPER RIACHÃO). A Inocas vende a casca R\$ 1000,00 a tonelada e endocarpo a R\$400,00, já a COOPER vende a casca R\$1125,00 a tonelada e o endocarpo a R\$250,00. Para a determinação das despesas foram utilizados os menores preços, desse modo o valor da casca foi de R\$ 1000,00 a tonelada, o endocarpo de R\$ 250,00, e o bagaço de R\$ 59,22 [31]. O VPL, a TIR, o Payback simples e econômico serão calculados através das equações (2) a (5), respectivamente.

4.2.4 Análise de Sensibilidade

É uma avaliação baseada no cálculo do VPL para cada alteração de qualquer variável, sendo mantida a previsão esperada para todas as demais. Para realizar essa análise de sensibilidade foi feita variações nos investimentos, nas receitas e nas despesas. Essas variações foram de - 30% a +30%, escalonadas de 10 em 10%. A tabela 3 mostra como foram distribuídas essas variações. O investimento total e a despesa, quanto maior for o valor, pior será o VPL. Dessa maneira é considerada com uma estimativa pessimista, no entanto quanto menor for o valor do investimento inicial e da despesa, melhor será o VPL. Sendo assim, a estimativa é otimista, já nas receitas é o inverso, quanto maior for o valor mais otimista e quanto menor, mais pessimista [49,60].

*Tabela 3. Diferentes estimativas para o investimento inicial, receita e despesa da planta.
Fonte [49] e [60].*

	Investimento	Receita	Despesa
Pessimista	30%	-30%	30%
Pessimista	20%	-20%	20%
Pessimista	10%	-10%	10%
Esperada/Melhor	0%	0%	0%
Otimista	-10%	10%	-10%
Otimista	-20%	20%	-20%
Otimista	-30%	30%	-30%

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise Técnica

Normalmente a biomassa é caracterizada pela a análise elementar (composição do carbono, hidrogênio e oxigênio), que combinados formam a celulose, a hemicelulose e a lignina. O fato de conhecer a quantidade de cada elemento na fonte vegetal, revela o quanto de energia está disponível para a conversão, dado que o poder calorífico depende da porção desses compostos na biomassa [18]. A tabela 4 apresenta os valores encontrados na literatura do poder calorífico superior (PCS), da umidade e do teor de hidrogênio da casca e do endocarpo de macaúba e do bagaço de cana-de-açúcar. Verifica-se que o PCS da casca e do endocarpo de macaúba são maiores em relação ao do bagaço, uma vez que maiores valores de PCS estão ligados a maiores porcentagens de carbono e hidrogênio. Na tabela 5 é mostrada a composição elementar das três biomassas, percebe-se que o endocarpo possui os maiores valores de carbono e hidrogênio e conseqüentemente o maior valor do PCS.

Tabela 4. Poder calorífico superior (PCS), umidade e teor de hidrogênio das biomassas utilizadas para o estudo. Fonte [17], [18], [24], [25], [26] e [27].

Biomassa	PCS (MJ/Kg)	Umidade (%)	Teor de Hidrogênio (%)
Casca de Macaúba	20,87 [26]	5,43% [24]	5,78% [25]
Endocarpo de Macaúba	20,97 [26]	9,20% [17]	6,27% [18]
Bagaço de cana-de-açúcar	15,20 [27]	14% [27]	5,2% [27]

Tabela 5. Composição elementar da três biomassas utilizadas para o estudo. Fonte [18], [25], [26] e [27].

Biomassa	C (%)	H (%)	O (%)	PCS (MJ/Kg)
Casca de Macaúba	46,42 [25]	5,78 [25]	47,21 [25]	20,87 [26]
Endocarpo de Macaúba	49,43 [18]	6,27 [18]	42,15 [18]	20,97 [26]
Bagaço de cana-de-açúcar	38,80 [27]	5,20 [27]	38,90 [27]	15,20 [27]

O PCS do endocarpo é associado à maior proporção de hidrogênio, elemento fortemente energético na combustão comparado às outras biomassas. Quanto ao oxigênio, a relação é inversamente proporcional, isto é, porcentagens maiores de oxigênio levam a menores valores do PCS. Como é observado na tabela 5, as quantidades de oxigênio na composição da casca e do endocarpo de macaúba bem

como os PCS. Nota-se que a casca de macaúba possui um maior teor de oxigênio e um menor valor do poder calorífico superior comparado ao endocarpo [25].

Outra variável que também influencia os resultados dos PCS, é o teor de cinzas (minerais) visto que as matérias inorgânicas (minerais) não liberam energia durante a combustão. Sendo assim, quanto maior for a parcela de cinzas na biomassa, menor a energia cedida no momento da queima e, portanto, menor será o PCS [25]. Além disso, as cinzas podem ser arrastadas e depositadas no combustor, pois, na maioria das vezes, os processos de combustão operam com temperaturas superiores ao ponto de amolecimento das cinzas e isso pode provocar sinterização ou aglomeração destas em espaços que prejudicam a troca térmica [27].

A tabela 6 exibe os valores do PCS e do teor de cinzas, além das densidades. Esse é um dado importante pois, biomassas que apresentam densidades maiores proporcionam uma maior produção de bioenergia por volume de material queimado, uma vez que a quantidade de massa por volume é maior. Os resíduos de macaúba possuem maiores densidades que o bagaço. Isto, do ponto de visto do custo de transporte, suporia uma despesa menor neste quesito, o que ajuda na viabilidade do aproveitamento energético da biomassa [25].

Tabela 6. Poder calorífico superior, teor de cinzas e densidade em kg/m³ das três biomassas utilizadas para o estudo. Fonte [26] e [27].

Biomassa	PCS (MJ/Kg)	Cinzas (%)	Densidade
Casca de Macaúba	20,87 [26]	5,66 [26]	177 [26]
Endocarpo de Macaúba	20,97 [26]	2,04 [26]	498 [26]
Bagaço de cana-de-açúcar	15,20 [27]	15,40 [27]	80 [27]

5.1.1 Determinação do potencial energético das biomassas

O poder calorífico inferior (PCI) da casca foi determinado pela equação (6) em KJ/Kg. Para isto, foram utilizados os dados da tabela 4, como apresenta o cálculo abaixo.

$$PCI = 20870 - 2440 * (9 * 0,0578 + 0,0543)$$

$$PCI = 19468,22 \text{ KJ/Kg}$$

Dessa forma, o PCI da casca é de 19,47 MJ/Kg, sendo que somente 15% é usado para geração de energia elétrica, ou seja, 2,92 MJ/Kg. Logo, 1000 Kg ou uma tonelada (t) produz 2920,23 MJ de energia. Para converter essa energia em KWh é preciso multiplicar por $2,777 \cdot 10^{-7}$ (1 J é igual a $2,777 \cdot 10^{-7}$ KWh [3]) o que resulta em aproximadamente 810,95 KWh ou 0,81 MWh de energia elétrica. O mesmo procedimento foi feito tanto para o endocarpo de macaúba, quanto para o bagaço de cana-de-açúcar, utilizando os dados da tabela 4. Os resultados correspondentes são apresentados nas tabelas 7 e 8.

Tabela 7. Poder calorífico inferior (PCI) das três biomassas. Fonte Autor.

Biomassa	PCI (KJ/Kg)	PCI (MJ/Kg)	15% do PCI (MJ/Kg)
Casca de Macaúba	19468,22	19,47	2,92
Endocarpo de Macaúba	19368,63	19,37	2,91
Bagaço de cana-de-açúcar	13716,48	13,72	2,06

Tabela 8. Energia gerada com uma tonelada de biomassa. Fonte Autor.

Biomassa	Energia (MJ)	Energia (KWh)	Energia (MWh)
Casca de Macaúba	2920,23	810,95	0,81
Endocarpo de Macaúba	2905,29	806,80	0,81
Bagaço de cana-de-açúcar	2057,47	571,36	0,57

5.2 Análise Econômica

Com uma tonelada de casca de macaúba é possível produzir 0,81 MWh de energia elétrica. A cada ano será gerado 25920 MWh de energia na usina, então será preciso 31963 toneladas ($25920 \text{ MWh} / 0,81 \text{ MWh ton}^{-1} = 31963 \text{ ton}$) de casca para produzir 25920 MWh por ano. O preço da casca é de R\$1.000,00 a tonelada, logo a despesa total anual será de R\$ 31.962.564,18 e a receita anual será de R\$ 6.280.156,80 (baseado no preço acima mencionado do MWh). Esses cálculos também foram feitos com o endocarpo de macaúba e com o bagaço de cana-de-açúcar. A tabela 9 exhibe a quantidade necessária de toneladas das três biomassas para gerar 25920 MWh por ano.

Tabela 9. Quantidade necessária de toneladas das três biomassas para gerar 25920 MWh por ano. Fonte Autor.

Biomassa	Massa em toneladas (t)
Casca de Macaúba	31963
Endocarpo de Macaúba	32127
Bagaço de cana-de-açúcar	45365

Para a formação do fluxo de caixa, foram utilizados o investimento inicial, a receita e a despesa anual. Na tabela 10 é mostrado o fluxo de caixa da casca de macaúba, na 11 é o fluxo de caixa do endocarpo e na 12 é o do bagaço de cana-de-açúcar.

Tabela 10. Fluxo de caixa da casca da macaúba. Fonte Autor.

Período Anual	Investimento Inicial	Receita Anual	Despesa Anual	Fluxo de Caixa Líquido
0	R\$ 12.155.553,25	R\$ -	R\$ -	R\$ -
1	R\$ -	R\$ 6.280.156,80	R\$ 31.962.564,18	-R\$ 25.682.407,38
2	R\$ -	R\$ 6.280.156,80	R\$ 31.962.564,18	-R\$ 25.682.407,38
3	R\$ -	R\$ 6.280.156,80	R\$ 31.962.564,18	-R\$ 25.682.407,38
4	R\$ -	R\$ 6.280.156,80	R\$ 31.962.564,18	-R\$ 25.682.407,38
5	R\$ -	R\$ 6.280.156,80	R\$ 31.962.564,18	-R\$ 25.682.407,38
6	R\$ -	R\$ 6.280.156,80	R\$ 31.962.564,18	-R\$ 25.682.407,38
7	R\$ -	R\$ 6.280.156,80	R\$ 31.962.564,18	-R\$ 25.682.407,38

Tabela 11. Fluxo de do endocarpo de macaúba. Fonte Autor.

Período Anual	Investimento Inicial	Receita Anual	Despesa Anual	Fluxo de Caixa Líquido
0	R\$ 12.155.553,25	R\$ -	R\$ -	R\$ -
1	R\$ -	R\$ 6.280.156,80	R\$ 8.031.728,31	-R\$ 1.751.571,51
2	R\$ -	R\$ 6.280.156,80	R\$ 8.031.728,31	-R\$ 1.751.571,51
3	R\$ -	R\$ 6.280.156,80	R\$ 8.031.728,31	-R\$ 1.751.571,51
4	R\$ -	R\$ 6.280.156,80	R\$ 8.031.728,31	-R\$ 1.751.571,51
5	R\$ -	R\$ 6.280.156,80	R\$ 8.031.728,31	-R\$ 1.751.571,51
6	R\$ -	R\$ 6.280.156,80	R\$ 8.031.728,31	-R\$ 1.751.571,51
7	R\$ -	R\$ 6.280.156,80	R\$ 8.031.728,31	-R\$ 1.751.571,51

Tabela 12. Fluxo de caixa do bagaço de cana-de-açúcar. Fonte Autor.

Período Anual	Investimento Inicial	Receita Anual	Despesa Anual	Fluxo de Caixa Líquido
0	R\$ 12.155.553,25	R\$ -	R\$ -	R\$ -
1	R\$ -	R\$ 6.280.156,80	R\$ 2.686.541,71	R\$ 3.593.615,09
2	R\$ -	R\$ 6.280.156,80	R\$ 2.686.541,71	R\$ 3.593.615,09
3	R\$ -	R\$ 6.280.156,80	R\$ 2.686.541,71	R\$ 3.593.615,09
4	R\$ -	R\$ 6.280.156,80	R\$ 2.686.541,71	R\$ 3.593.615,09
5	R\$ -	R\$ 6.280.156,80	R\$ 2.686.541,71	R\$ 3.593.615,09
6	R\$ -	R\$ 6.280.156,80	R\$ 2.686.541,71	R\$ 3.593.615,09
7	R\$ -	R\$ 6.280.156,80	R\$ 2.686.541,71	R\$ 3.593.615,09

Na tabela 13 são apresentados os dados do VPL, TIR, payback simples e econômico. Percebe-se que o VPL é negativo tanto na utilização da casca de macaúba quanto na do endocarpo. Isso significa que o projeto do uso da casca e do endocarpo de macaúba para a cogeração de energia deve ser rejeitado, isto é, com esses preços dessas biomassas por tonelada (R\$1.000 da casca e R\$250 do endocarpo) não é viável a utilização delas, uma vez que a organização perderá dinheiro no período de sete anos. Pelo fato de possuírem um VPL negativo, os restantes parâmetros não são estimados, já que não há rentabilidade alguma. Em relação ao bagaço de cana-de-açúcar, verifica-se que o VPL é positivo, logo pode ser aceito.

Dessa maneira, o uso do bagaço é um bom combustível para ser operado nesta usina de cogeração de energia. A sua taxa interna de retorno é de 22%, sendo superior a taxa mínima de atratividade que é de 10%, portanto o investimento no projeto é identificado como economicamente atrativo. O tempo de retorno do empreendimento (payback simples) é de aproximadamente de 3,4 anos, em outras palavras, demora esse tempo para que o dinheiro gerado pelo fluxo de caixa recupere o valor gasto no investimento. A leve diferença observada com relação ao payback econômico é devido ao valor cronológico do dinheiro, levando a um período de retorno mais longo.

Na análise de sensibilidade da casca de macaúba (tabela 14), observa-se que os valores do VPL para a estimativa esperada/melhor são todos iguais, a medida que varia isoladamente os valores dos investimentos, receitas e despesas e mantém o resto constante, todos os resultados do VPL continuam sendo negativos. Isso deixa evidente a inviabilidade do projeto, do jeito como foi determinado, não gerando lucro

ao investidor [49,60]. O mesmo acontece com o endocarpo, como é mostrado na tabela 15.

Tabela 13. Valores do VPL, TIR, payback simples e econômico das três biomassas utilizadas para o estudo. Fonte Autor.

Biomassa	VPL	TIR	Payback Simples (anos)	Payback Econômico (anos)
Casca de Macaúba	-R\$ 137.188.268,62	-	-	-
Endocarpo de Macaúba	-R\$ 20.682.936,94	-	-	-
Bagaço de cana-de-açúcar	R\$ 5.339.670,10	22%	3,4	4,3

Tabela 14. Mudanças do valor do VPL em relação à variação do investimento, receita e despesa, utilizando a casca de macaúba (Análise de sensibilidade). Fonte Autor.

Variação	Investimento	Receita	Despesa
30%	-R\$ 140.834.934,59	-R\$ 128.015.938,55	-R\$ 183.870.413,29
20%	-R\$ 139.619.379,27	-R\$ 131.073.381,91	-R\$ 168.309.698,40
10%	-R\$ 138.403.823,94	-R\$ 134.130.825,26	-R\$ 152.748.983,51
0%	-R\$ 137.188.268,62	-R\$ 137.188.268,62	-R\$ 137.188.268,62
-10%	-R\$ 135.972.713,29	-R\$ 140.245.711,97	-R\$ 121.627.553,72
-20%	-R\$ 134.757.157,96	-R\$ 143.303.155,32	-R\$ 106.066.838,83
-30%	-R\$ 133.541.602,64	-R\$ 146.360.598,68	-R\$ 90.506.123,94

Tabela 15. Mudanças do valor do VPL em relação à variação do investimento, receita e despesa, utilizando o endocarpo de macaúba (Análise de sensibilidade). Fonte Autor.

Variação	Investimento	Receita	Despesa
30%	-R\$ 24.329.602,92	-R\$ 11.510.606,88	-R\$ 32.413.482,11
20%	-R\$ 23.114.047,59	-R\$ 14.568.050,23	-R\$ 28.503.300,39
10%	-R\$ 21.898.492,27	-R\$ 17.625.493,59	-R\$ 24.593.118,67
0%	-R\$ 20.682.936,94	-R\$ 20.682.936,94	-R\$ 20.682.936,94
-10%	-R\$ 19.467.381,62	-R\$ 23.740.380,30	-R\$ 16.772.755,22
-20%	-R\$ 18.251.826,29	-R\$ 26.797.823,65	-R\$ 12.862.573,50
-30%	-R\$ 17.036.270,97	-R\$ 29.855.267,01	-R\$ 8.952.391,77

Essa análise também mostra, através de um gráfico, qual é a variável mais crítica e que precisa de mais atenção ao se avaliar o projeto. Por meio de um gráfico da alteração do VPL em função da variação de 30% para mais ou menos do investimento, da receita e da despesa para a casca de macaúba (figura 12), verifica-se que quanto maior a inclinação da reta, mais vulnerável é o projeto aquela variável [60]. Dessa forma, observando os gráficos da casca e do endocarpo, figuras 12 e 13,

respectivamente, percebe-se que o item mais crítico nesses dois projetos é a despesa e que está relacionada diretamente ao preço por tonelada da biomassa.

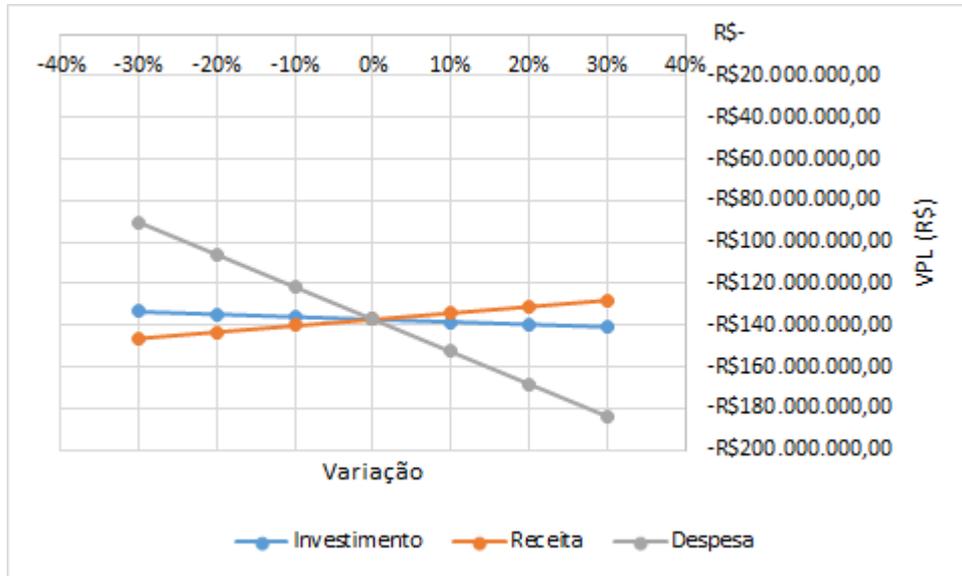


Figura 12. Gráfico da alteração do VPL em função da variação de 30% para mais ou para menos do investimento, da receita e da despesa para a casca de macaúba. Fonte Autor.

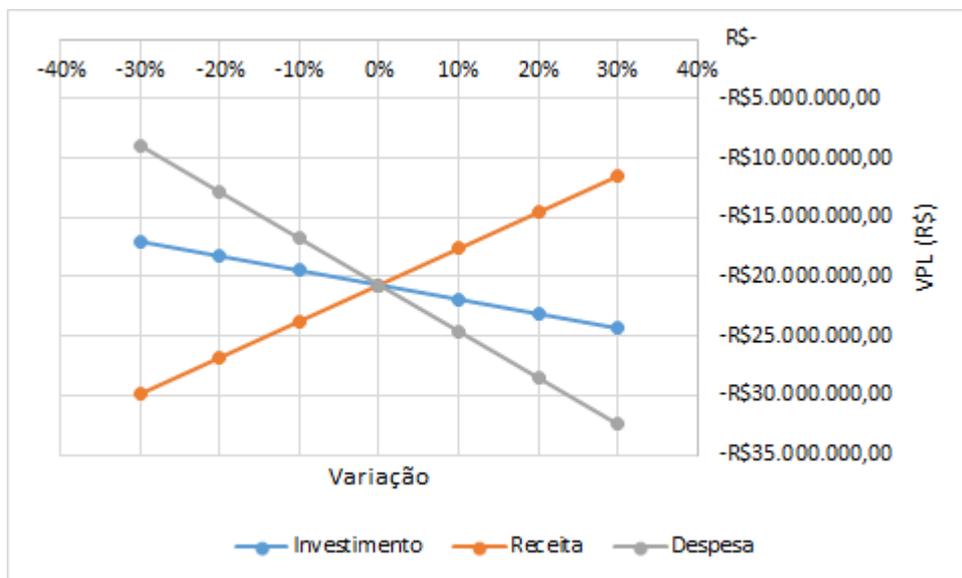


Figura 13. Gráfico da alteração do VPL em função da variação de 30% para mais ou para menos do investimento, da receita e da despesa para o endocarpo de macaúba. Fonte Autor.

Os resultados da análise de sensibilidade do bagaço de cana-de-açúcar foram diferentes das outras biomassas. Na tabela 16, nota-se que praticamente todos os valores do VPL foram positivos, somente dois, relacionados com a diminuição de -

30% e -20% da receita, que foram negativos. Isso significa que esse projeto pode ser viável ao investidor, uma vez que geraria lucro. Ao examinar o gráfico da alteração do VPL em função da variação de 30% para mais ou para menos do investimento, da receita e da despesa para o bagaço de cana (figura 14), percebe-se que a variável crítica desse projeto é a receita, devido a inclinação da reta ser maior que as outras.

Tabela 16. Mudanças do valor do VPL em relação à variação do investimento, receita e despesa, utilizando o bagaço de cana-de-açúcar (Análise de sensibilidade). Fonte Autor.

Variação	Investimento	Receita	Despesa
30%	R\$ 1.693.004,12	R\$ 14.512.000,16	R\$ 1.415.907,04
20%	R\$ 2.908.559,45	R\$ 11.454.556,81	R\$ 2.723.828,06
10%	R\$ 4.124.114,77	R\$ 8.397.113,45	R\$ 4.031.749,08
0%	R\$ 5.339.670,10	R\$ 5.339.670,10	R\$ 5.339.670,10
-10%	R\$ 6.555.225,42	R\$ 2.282.226,74	R\$ 6.647.591,12
-20%	R\$ 7.770.780,75	-R\$ 775.216,61	R\$ 7.955.512,14
-30%	R\$ 8.986.336,07	-R\$ 3.832.659,96	R\$ 9.263.433,16

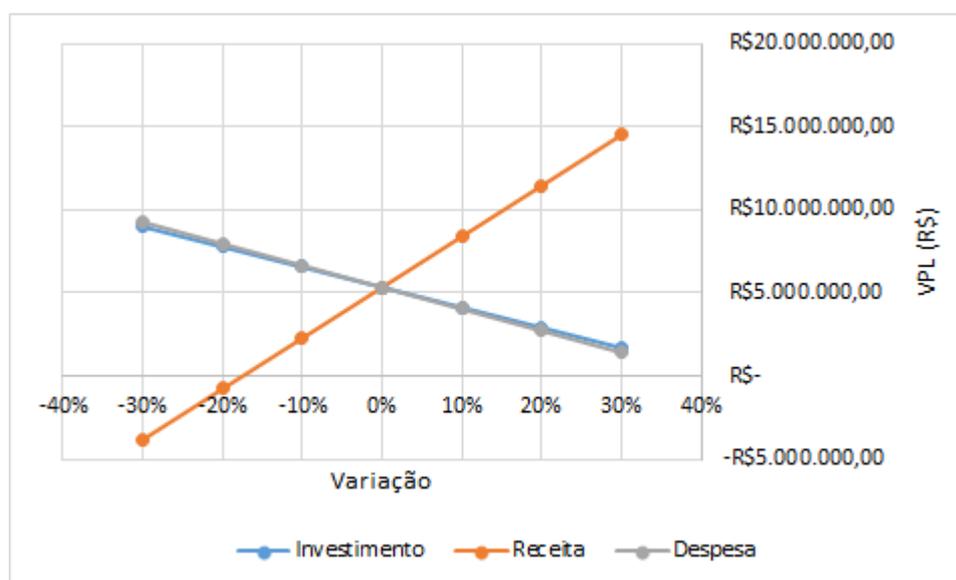


Figura 14. Gráfico da alteração do VPL em função da variação de 30% para mais ou para menos do investimento, da receita e da despesa para o bagaço de cana-de-açúcar. Fonte Autor.

Como se percebeu que o item mais crítico no projeto do uso da casca e do endocarpo de macaúba para a cogeração de energia é o preço por tonelada da biomassa, foi feito um estudo com o objetivo de descobrir qual é o preço máximo por tonelada da casca e do endocarpo para o projeto se tornar viável (VPL positivo). Os

preços encontrados por tonelada para a casca e o endocarpo foram, respectivamente, R\$ 118,00 e R\$ 117,00. Na tabela 17 são apresentados os valores do VPL, TIR, payback simples e econômico. Verifica-se, a partir destes dados, que os dois projetos podem ser aceitos nessas condições, pois o VPL é maior que zero e a taxa interna de retorno é de 10%, igual a taxa de atratividade. O payback simples é em torno de 4,8 anos e o econômico é aproximadamente 7,0 anos.

Tabela 17. Valores do VPL, TIR, payback simples e econômico das três biomassas utilizadas para o estudo, em que os projetos tornam-se economicamente viável. Fonte Autor.

Biomassa	VPL	TIR	Payback Simples	Payback Econômico
Casca de Macaúba	R\$ 57.236,72	10%	4,8	7,0
Endocarpo de Macaúba	R\$ 119.229,83	10%	4,8	6,9
Bagaço de cana-de-açúcar	R\$ 5.339.670,10	22%	3,4	4,3

Mesmo tendo a possibilidade de os dois projetos serem aceitos, com o valor da tonelada nesse preço, observa-se através da tabela 17, que o bagaço ainda gera mais riquezas, uma vez que o VPL e a TIR são maiores que o da casca e do endocarpo de macaúba. Desse modo, foi feita uma outra análise com a finalidade de encontrar o preço máximo por tonelada da casca e do endocarpo, em que o valor produzido por esses dois projetos seja maior que o do bagaço de cana. Os preços descobertos por tonelada para a casca e o endocarpo foram, respectivamente, R\$ 84,00 e R\$ 83,00.

Na tabela 18 são vistos os valores do VPL, TIR, payback simples e econômico. Nota-se que seria mais vantajoso utilizar a casca ou o endocarpo para a cogeração, com o valor da tonelada nesses preços do que o bagaço de cana-de-açúcar. A tabela 18 ainda mostra que o projeto do endocarpo, nessas condições, possui um benefício maior, pois além do VPL ser maior que todos os outros, a taxa interna de retorno também é superior.

Tabela 18. Valores do VPL, TIR, payback simples e econômico das três biomassas utilizadas para o estudo, nos quais os projetos da casca e do endocarpo de macaúba são mais vantajosos que o do bagaço. Fonte Autor.

Biomassa	VPL	TIR	Payback Simples	Payback Econômico
Casca de Macaúba	R\$ 5.347.879,78	22%	3,4	4,3
Endocarpo de Macaúba	R\$ 5.437.076,97	23%	3,4	4,3
Bagaço de cana-de-açúcar	R\$ 5.339.670,10	22%	3,4	4,3

6 CONCLUSÃO

Na avaliação técnica, compreende-se que o poder calorífico inferior (PCI) da casca e do endocarpo são próximos e maiores que o bagaço de cana-de-açúcar, fator associado às maiores porcentagens de carbono e hidrogênio presente naqueles. Na análise econômica, os resultados demonstram que não é viável a utilização da casca e do endocarpo de macaúba para a cogeração de energia com os preços atuais por tonelada (R\$1.000 da casca e R\$250 do endocarpo), resultando em um VPL negativo. No entanto, os indicadores econômicos para o bagaço de cana-de-açúcar foram satisfatórios, com um VPL positivo de R\$5.339.670,10, e uma taxa interna de retorno de 22%, um payback simples de 3,4 anos e econômico de 4,3 anos. Portanto, por esses motivos o investimento no projeto do bagaço é identificado como economicamente atrativo. Através da análise de sensibilidade, foi possível identificar que a despesa é o item mais crítico no projeto do uso da casca e do endocarpo de macaúba, fator diretamente relacionado ao preço por tonelada da biomassa. Desse modo, esses dois projetos são viáveis quando o preço da tonelada é de R\$ 118,00 para a casca e R\$ 117,00 para o endocarpo. Entretanto, para que sejam mais atrativos economicamente ao caso do bagaço de cana, o preço máximo por tonelada da casca e do endocarpo precisa ser, respectivamente, de R\$ 84,00 e R\$ 83,00.

REFERÊNCIAS

- [1] **World Energy Outlook 2017: A world in transformation.** IEA - International Energy Agency, 2017.
Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2017>. Acesso em: maio de 2021.
- [2] MOURA, Johnson P.; SELVAM, Pannir. **Geração de energia com inovação tecnológica de aproveitamento de biomassa residual.** An. 6. Enc. Energ. Meio Rural, 2006.
- [3] MIZIARA, Carlos R. **Estudo técnico e econômico das fontes de biomassa para uso em cogeração de energia elétrica.** Uberaba - MG, 2013.
- [4] BORGES, Ane C. P. **Energias renováveis: uma contextualização da biomassa como fonte de energia.** REDE - Revista Eletrônica do PRODEMA Fortaleza, Brasil, v. 10, n. 2, p. 23-26, jul/dez. 2016.
- [5] **Balanço Energético Nacional 2020: Relatório Síntese/ano base 2019.** EPE - Empresa de Pesquisa Energética, maio de 2020.
- [6] NASCIMENTO, Luciano. **Crise hídrica leva à criação de sala de situação para buscar soluções.** Agência Brasil, maio de 2021.
Disponível em:
<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2021-05/crise-hidrica-leva-criacao-de-sala-de-situacao-para-buscar-solucoes> . Acesso em: maio de 2021.
- [7] **ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica.** Resolução Normativa ANEEL n. 235, de 14 de novembro de 2006 (Diário Oficial, de 22 nov. 2006, seção 1, p. 78).
- [8] ROMO, Beethoven N. R. **Estudo de viabilidade técnica de um sistema de cogeração para planta de processo, mangueiras hidráulicas.** Investigación aplicada a la Ingeniería de Procesos.
- [9] **Cerratinga: Produção Sustentável e Produção Consciente.** Disponível em: <http://www.cerratinga.org.br/macauaba/>. Acesso em junho de 2021.
- [10] LORENZI, G. M. A. C. **Acrocomia aculeata (Jacq. Lodd. ex. Mart. – Areaceae): bases para o extrativismo sustentável.** Curitiba, PR, 2006.
- [11] MOTTA, P. E. F. D. et al. **Occurrence of macaúba in Minas Gerais, Brazil: Relationship with climatic, pedological and vegetation attributes.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 37, n. 7, p. 1023-1031, 2002.
- [12] ANDRADE, M. H. et al. **Óleo do Fruto da Palmeira Macaúba-Parte I: Uma Aplicação Potencial para Indústrias de Alimentos, Fármacos e Cosméticos.** I TECNIQ Seminário sobre Tecnologia na Indústria Química 2006.

- [13] BHERING, L. **Macaúba: matéria-prima nativa com potencial para a produção de biodiesel**. EMBRAPA AGROENERGIA (CNPAE), 2009.
- [14] SILVA, J. D. C.; BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O. **Endocarpos de babaçu e de macaúba comparados à madeira de *Eucalyptus grandis* para a produção de carvão vegetal**. Ipef, v. 34, 1986.
- [15] TOLÊDO, D. P. **Análise técnica, econômica e ambiental de macaúba e de pinhão-manso como alternativas de agregação de renda na cadeia produtiva de biodiesel**. 2010.
- [16] AMARAL, F. P. **Estudo das características físico-químicas dos óleos da amêndoa e polpa da macaúba [*Acrocomia aculeata* (jacq.) Lodd. ex mart]**. 2007.
- [17] FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. Programa Energia. **Produção de combustíveis líquidos a partir de óleos vegetais. Relatório final**. Belo Horizonte: CETEC, 1983. p. 152.
- [18] LISBOA, F. C. **Carbonização e gaseificação de resíduos da macaúba, tucumã e cupuaçu para geração de eletricidade**. Brasília/DF, 2016.
- [19] CHIES, Vivian. **Macaúba no mercado de bioenergia**. Embrapa, 2012. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/1481706/macauaba-no-mercado-de-bioenergia>. Acesso em: junho de 2021.
- [20] CLEMENT, C.; LLERAS, E.; VAN LEEUWEN, J. **O potencial das palmeiras tropicais no Brasil: acertos e fracassos das últimas décadas**. *Agrociencia*, v. 9, n. 1-2, p. 67-71, 2005.
- [21] SILVA, J. C. **Macaúba: fonte de matéria-prima para os setores alimentício, energético e industrial**. Viçosa: Departamento de Engenharia Florestal, UFV, 2007. 63 p.
- [22] FARIAS, T. M. **Biometria e processamento dos frutos da macaúba (*Acrocomia sp.*) para a produção de óleos**. Belo Horizonte, 2010.
- [23] BANDEIRA, F. S. **Cultivo in vitro e embriogênese somática de embriões zigóticos de macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.))**. Viçosa, 2008.
- [24] ZANATTA, Samuel. **Caracterização da macaúba (casca, polpa e amêndoa) e análise sensorial através da Educação do Gosto**. Piracicaba, 2015.
- [25] DOURADO, David C. et al. **Avaliação das propriedades físico-químicas de resíduos lignocelulósicos provenientes da produção do biodiesel**. *Revista Espacios*. Vol. 28 (Nº 26), 2017. Pág 24.
- [26] EVARISTO, Anderson B. et al. **Potencial Energético dos resíduos do fruto da macaúba e sua utilização na produção de carvão vegetal**. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 26, p. 571-577, abr.-jun., 2016.

- [27] PONTE, M. R.; GADELHA, A. M. T.; MACHADO, Y. L.; et al. **Blendas de bagaço de cana-de-açúcar, podas de mangueira e cajueiro: caracterização das propriedades e investigação de seus potenciais energéticos.** Revista Matéria, v.24, n.2, 2019.
- [28] **Balço Energético Nacional 2020: Relatório Final/ano base 2019.** EPE - Empresa de Pesquisa Energética, maio de 2020.
- [29] NACHILUK, K. **Cana-de-açúcar: produção e processamento em 2019.** Instituto de Economia Agrícola (IEA), São Paulo, 2020.
Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/out/TerTexto.php?codTexto=14767>. Acesso em junho de 2021.
- [30] SANTOS, L. A., et al. **Potencial energético da biomassa de cana-de-açúcar em uma usina sucroenergética.** Revista da Universidade Vale do Rio Verde, Três Corações, v. 14, n. 2, p. 1101-1108, ago./dez. 2016.
- [31] **JornalCana: Quanto custa o bagaço?** Disponível em:
<https://jornalcana.com.br/quanto-custa-o-bagaco-confira-aqui/#:~:text=Em%20m%C3%A9dia%2C%20o%20valor%20da,de%20R%24%2059%2C22>. Acesso em junho de 2021.
- [32] SILVA, V. L. M. M.; GOMES, W. C.; ALSINA, O. L. S. **Utilização do bagaço de cana de açúcar como biomassa adsorvente na adsorção de poluentes orgânicos.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.2, 1 (2007) p.27-32.
- [33] SILVA, D. A., et al. **Caracterização de biomassas para a briquetagem.** FLORESTA, Curitiba, PR, v. 45, n. 4, p. 713 - 722, out. / dez. 2015.
- [34] COELHO, S. T. **Mecanismos para implementação da cogeração de eletricidade a partir da biomassa. Um modelo para o Estado de São Paulo.** São Paulo, 1999.
- [35] LORA, E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. **Geração Termelétrica: planejamento, projeto e operação.** Rio de Janeiro: Interciência, 2 volumes, 2004. 1296p.
- [36] RODRIGUES, M. L. M. **Estudo técnico-econômico da implantação da cogeração em pequena escala a biomassa em uma indústria.** Belo Horizonte, 2009.
- [37] DANTAS FILHO, P. L. **Análise de Custos na Geração de Energia com Bagaço de Cana-de-Açúcar: um Estudo de Caso em Quatro Usinas de São Paulo.** Dissertação (Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia) – EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo, 2009.
- [38] LUND, H.; ANDERSEN, A. N. **Optimal designs of small CHP plants in a market with fluctuating electricity prices.** Energy Conversion and Management. V. 46, p.893- 904, 2005.

[39] MENDES, M. E. S. S. **Metodologia para análise exergética-econômica de plantas a vapor para geração de eletricidade consumindo resíduo de biomassa amazônica**. Belém, 2009.

[40] **Engecass: Tecnologia em Equipamentos**. Disponível em: <https://blog.engecasscaldeiras.com.br/como-funciona-cada-tipo-de-caldeira-a-vapor/>. Acesso em setembro de 2021.

[41] **XH Mar Bethlehem: Energia para mudar**. Disponível em: <https://xhmarbethlehem.com.br/blog/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-caldeiras/>. Acesso em setembro de 2021.

[42] **Togawa Engenharia**. Disponível em: <https://togawaengenharia.com.br/blog/caldeiras-classificacao-geral/>. Acesso em setembro de 2021.

[43] **Turbivap**. Disponível em: <https://turbivap.com.br/funcionamento-turbina-a-vapor/>. Acesso em setembro de 2021.

[44] ROCHA, G.; SILVA, A. L.; SILVA, F. N. **Simulação de uma usina com ciclo simples a vapor (Ciclo Rankine)**.

[45] PUCCINI, E. C. **Matemática Financeira e Análise de Investimentos**. 2ª Edição, 2012.

[46] Tibúrcio, S.C. A.; Fernandes, R. F. **Curso Prático de Contabilidade - Analítico e Didático, 2ª edição**. Atlas: Grupo GEN, 2018.

[47] NOGUEIRA, E. Análise de investimentos. In: BATALHA, M.O. (Org.). **Gestão agroindustrial**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2001. cap. 4, p. 223-288.

[48] FARO, C. Elementos de engenharia econômica. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1979.

[49] Ross, S. A.; et al. **Administração financeira**. 10ª Edição. Bookman: Grupo A, 2015.

[50] LIMA, A. G. G. **Curso de geração de energia elétrica: Combustíveis**. Disponível em: <http://www.antoniolima.web.br.com/arquivos/combust%C3%ADveis.htm>. Acesso em setembro de 2021.

[51] Norma ASTM D 1238 - 94 a. **Standard test method for flow rates of thermoplastics by extrusion plastometer**. Annual Book of ASTM Standards, 1994.

[52] RANADE, P.; KAWRE, J. P. **A seminar report on hydrogen from biomass**. 2010. Disponível em: Acesso em setembro de 2021.

[53] REIS, T. **Taxa de juros nominal: qual o seu significado e como calcular?** 2020. Disponível em: <https://www.suno.com.br/artigos/taxa-de-juros-nominal/>. Acesso em setembro de 2021.

[54] Btg Pactual Digital. **IPCA: o que é, como é calculado e sua relação com outros índices.** 2017. Disponível em: <https://www.btgpactualdigital.com/como-investir/artigos/financas/ipca-o-que-e>. Acesso em setembro de 2021.

[55] **Banco Central do Brasil. Calculadora do cidadão.** Disponível em: <https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADAOPublico/exibirFormCorrecaoValores.do?method=exibirFormCorrecaoValores&aba=1>. Acesso em setembro de 2021.

[56] D'ÁVILA, M. Z. **Focus: com previsão de inflação de 6,56% em 2021, mercado já vê alta de 1 ponto percentual da taxa Selic em agosto.** 2021. Disponível em: <https://www.infomoney.com.br/economia/focus-com-previsao-de-inflacao-de-656-em-2020-mercado-ja-ve-alta-de-1-ponto-percentual-da-taxa-selic-em-agosto/>. Acesso em julho de 2021.

[57] **Energisa Comercializadora.** Disponível em: <http://comercializadora.grupoenergisa.com.br/paginas/mercado-livre/glossario.aspx?letra=M>. Acesso em setembro de 2021.

[58] **Esfera Energia. O que é PLD e como ele é calculado?** 2021. Disponível em: <https://esferaenergia.com.br/blog/o-que-pld/>. Acesso em setembro de 2021.

[59] Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). **Projeção do PLD médio no Sudeste/Centro-Oeste para 2021 vai a R\$174,31/MWh.** 2021. Disponível em: https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/noticias-opiniao/noticias/noticia leitura?contentid=CCEE_662235&_adf.ctrl-state=qhhgj1trd_1&_afLoop=56112732360526#!%40%40%3Fcontentid%3DCCEE_662235%26_afLoop%3D56112732360526%26_adf.ctrl-state%3Dqhhgj1trd_5. Acesso em setembro de 2021.

[60] JANOSELLI, H. R. D.; HARBS, R.; MENDES, F. L. **Viabilidade econômica da produção de eucalipto no interior de São Paulo.** Revista iPecege 2(2): p. 24-45, 2016.