



**THAÍS APARECIDA RIBEIRO REZENDE**

**AVALIAÇÃO DO USO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS DE CAFÉ**

**LAVRAS – MG**

**2023**



**THAÍS APARECIDA RIBEIRO REZENDE**

**AVALIAÇÃO DO USO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS DE CAFÉ**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Curso de Engenharia Química para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Gilson Campani Junior  
Orientador

**LAVRAS – MG**

**2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Coordenadoria de Processos Técnicos  
da Biblioteca Universitária da UFLA**

Rezende, Thaís Aparecida Ribeiro

Avaliação do uso energético de resíduos de café / Thaís  
Aparecida Ribeiro Rezende. – Lavras : UFLA, 2023.

49 p. : il.

TCC–Universidade Federal de Lavras, 2023.

Orientador: Prof. Gilson Campani Junior.

Bibliografia.

1. TCC. 2. Monografia. 3. Dissertação. 4. Tese. 5. Trabalho  
Científico – Normas. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-808.066

**THAÍS APARECIDA RIBEIRO REZENDE**

**AVALIAÇÃO DO USO ENERGÉTICO DE RESPÍDUOS DE CAFÉ**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Curso de Engenharia Química para a obtenção do título de Bacharel.

em 19 de Julho de 2023.

Profa. Lidja Dahiane Menezes Santos Boré UFLA  
Profa. Natália Maira Braga Oliveira UFLA

Prof. Gilson Campani Junior  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2023**

*Ninguém faz nada sozinho. Por isso dedico esse trabalho aos que acreditaram em meu futuro, aos que me mostraram empatia e bondade durante o percurso, aos que me disseram a verdade mesmo que ela não fosse fácil de ser dita e aos que disseram que eu conseguiria mesmo que não houvesse prova alguma disso.*

*Dedico esse trabalho principalmente aos meus pais, por todos os sacrifícios que fizeram para que eu chegasse até aqui.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Gilson Campani por aceitar fazer parte desse trabalho como orientador, pelo incrível suporte durante seu desenvolvimento e por todas as discussões que auxiliaram a elaborar essa pesquisa. Além disso, agradeço às professoras Lidja Borél e Natália Oliveira pela gentileza de aceitarem fazer parte da banca avaliadora.

Agradeço aos meus pais por todo sacrifício que fizeram para que chegasse ao fim dessa etapa. À minha mãe Irani Rezende, por sempre me incentivar a nunca desistir dos meus sonhos mesmo que eles parecessem difíceis. E ao meu pai, Ronaldo Rezende, por sempre me guiar a ver o mundo com bondade e gentileza.

Agradeço ao meu namorado, Gustavo Oliveira, por todo companheirismo, por sempre se mostrar aberto a ouvir sobre esse trabalho e pela ajuda em corrigir meu terrível português. Também agradeço a Luciana Campos por todas as sugestões dadas após áudios desesperados.

Agradeço à equipe TROIA de Robótica por me fazer voltar a ver brilho no estudo de engenharia e por me desafiar a ultrapassar meus limites em prol de um propósito em comum. Também agradeço às incríveis conexões que fiz nessa equipe e que mudaram minha vida completamente, especialmente meus amigos Camila Couto, Jobert Coelho, Marcos Xavier, Mateus Santos e Thales Santos.

Por fim, agradeço aos meus Jururus que em nenhum momento me deixaram sozinha na última década, pelas inúmeras noites ouvindo Taylor Swift e por me mostrarem o verdadeiro sentido da expressão “*chosen family*”.

*From sprinkler splashes to fireplace ashes,  
I gave my blood, sweat, and tears for this.  
(Taylor Swift)*

## RESUMO

Cada vez mais é necessário que o setor energético se alinhe às exigências de sustentabilidade atuais, adotando matérias-primas renováveis e menos poluentes. Devido a isso uma das matérias-primas que vem ganhando espaço nos últimos anos é a biomassa de resíduos agrícolas, nesse trabalho escolheu-se a biomassa feita a partir de resíduos de café como objeto de estudo, essa escolha foi feita em decorrência de uma oportunidade de negócio, atualmente o Brasil é o maior exportador de café do mundo, no entanto em seu processamento cerca de 50% de seu volume é descartado como resíduo sem valor de mercado. Dessa forma, os resíduos da cafeicultura se tornam potenciais matérias-primas de baixo custo para a produção energia. O presente trabalho tem como propósito avaliar a viabilidade técnica e econômica do uso de biomassa de resíduos de café para a produção de energia. Para avaliar seu potencial de uso, primeiramente, é investigada a viabilidade técnica da produção energética usando a biomassa. Para isso é realizada uma busca exaustiva em árvore de estados, cujos ramos são propostos de forma a abranger o maior número de possibilidades de síntese energética possível partindo do resíduo de café. Posteriormente, é realizada a busca exaustiva por meio da aplicação de regras heurísticas previamente definidas em cada um dos nós da árvore. A partir da obtenção da rota mais promissora de produção são avaliados alguns dos principais indicadores para mensurar o retorno de investimento, sendo eles: *Payback*, VPL (Valor Presente Líquido) e TIR (Taxa Interna de Retorno). Com posse desses resultados, o trabalho visa explorar novas perspectivas de uso para resíduos do setor agrícola antes considerados inaproveitáveis. Com base nas análises realizadas tem-se que são necessárias poucas alterações na rota tecnológica para adaptação da nova matéria-prima, alto potencial energético devido ao alto poder calorífico dos resíduos de café e retorno econômico favorável à mudança.

**Palavras-chave:** Biomassa. Sustentabilidade. Pirólise. Árvore de estados. Regras heurísticas. Payback. VPL. TIR.

## **ABSTRACT**

It is increasingly necessary for the energy sector to align itself with current sustainability requirements, adopting renewable and less polluting raw materials. Due to this, one of the raw materials that has gained space in recent years is biomass from agricultural residues, in this work biomass made from coffee residues was chosen as the object of study, this choice was made as a result of an business opportunity, currently Brazil is the largest exporter of coffee in the world, however in its processing about 50% of its volume is discarded as waste with no market value. In this way, coffee residues become potential low-cost raw materials for energy production. The purpose of this work is to evaluate the technical and economic viability of using coffee waste biomass for energy production. To evaluate its potential use, first, the technical viability of energy production using biomass is investigated. For this, an extensive search is carried out in a tree of states, whose branches are proposed in order to cover the greatest number of possibilities of energy synthesis possible starting from the coffee waste. Subsequently, an extensive search is performed through the application of previously defined heuristic rules in each of the nodes of the tree. After obtaining the most promising production route, some of the main indicators are evaluated to measure the return on investment, namely: Payback, NPV (Net Present Value) and IRR (Internal Rate of Return). With these results in hand, the study explores new perspectives for the use of residues from the agricultural sector that were previously considered unusable. Based on the analyzes carried out, few changes are necessary in the technological route to adapt the new raw material, high energy potential due to the high calorific value of coffee residues and economic return favorable to the change

**Keywords:** Biomass. Sustainability. Pyrolysis. State tree. Heuristic rules. Payback. NPV. IRR.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1 – Produção de café beneficiada por região - Safra 2021 .....                         | 17 |
| Figura 2.2 – Diferentes estágios do tratamento das cerejas de café pelas vias seca e úmida..... | 18 |
| Figura 2.3 – Diagrama da produção energética através de biogás .....                            | 19 |
| Figura 2.4 – Principais matérias primas para a produção de energia elétrica .....               | 20 |
| Figura 2.5 – Esquema produtivo de uma usina termoelétrica .....                                 | 21 |
| Figura 2.6 – Progressão do consumo primário de energia de acordo com a fonte.....               | 22 |
| Figura 2.7 – Distribuição de reservas de carvão no mundo - 2021 .....                           | 23 |
| Figura 2.8 – Oferta interna de energia elétrica por fonte em 2021 .....                         | 24 |
| Figura 2.9 – Fluxograma de cogeração de energia mecânica e térmica.....                         | 25 |
| Figura 2.10 – Participação da cogeração na geração de energia do país.....                      | 26 |
| Figura 2.11 – Árvore de rotas energéticas a partir de resíduos agrícolas.....                   | 29 |
| Figura 3.1 – Árvore de estados da produção de energia a partir de resíduos de café.....         | 35 |
| Figura 4.1 – Rota ótima de produção de energia usando biomassa de resíduos de café .....        | 41 |
| Figura 4.2 – <i>Payback</i> para investimento em etapa de peletização .....                     | 43 |

## **LISTA DE TABELAS**

|  |    |
|--|----|
| Tabela 4.1 – Despesas para instalação e manutenção de equipamento de peletização ..... | 43 |
|--|----|

## SUMÁRIO

|                |  |           |
|----------------|--|-----------|
| <b>1</b>       | <b>INTRODUÇÃO.....</b>   | <b>15</b> |
| <b>2</b>       | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>   | <b>16</b> |
| <b>2.1</b>     | <b>Cafeicultura no Brasil.....</b>   | <b>16</b> |
| <b>2.1.0.1</b> | <b>Beneficiamento do café.....</b>   | <b>16</b> |
| <b>2.1.0.2</b> | <b>Reutilização dos resíduos da cafeicultura .....</b>                                   | <b>18</b> |
| <b>2.2</b>     | <b>Geração de energia a partir de biogeração anaerobia .....</b>                         | <b>19</b> |
| <b>2.3</b>     | <b>Energia termoelétrica no Brasil.....</b>  | <b>20</b> |
| <b>2.3.1</b>   | <b>O desafio do uso de carvão mineral como combustível em usinas termoelétricas ....</b> | <b>21</b> |
| <b>2.4</b>     | <b>Cogeração de energia.....</b>   | <b>24</b> |
| <b>2.5</b>     | <b>Árvore de estados .....</b>   | <b>27</b> |
| <b>2.6</b>     | <b>Viabilidade econômica para adaptações de rotas industriais.....</b>                   | <b>30</b> |
| <b>3</b>       | <b>METODOLOGIA.....</b>  | <b>32</b> |
| <b>3.1</b>     | <b>Seleção de rotas tecnológica através de árvore de estados.....</b>                    | <b>32</b> |
| <b>3.2</b>     | <b>Definição de subsistemas envolvidos .....</b>   | <b>32</b> |
| <b>3.2.1</b>   | <b>Etapa de beneficiamento do café .....</b>   | <b>32</b> |
| <b>3.2.2</b>   | <b>Etapa de redução granulométrica .....</b>   | <b>33</b> |
| <b>3.2.3</b>   | <b>Etapa de secagem dos resíduos .....</b>   | <b>33</b> |
| <b>3.2.4</b>   | <b>Etapa de compactação .....</b>  | <b>33</b> |
| <b>3.2.5</b>   | <b>Etapa de transformação química.....</b>   | <b>33</b> |
| <b>3.2.5.1</b> | <b>Biodigestão anerobia.....</b>   | <b>33</b> |
| <b>3.2.5.2</b> | <b>Pirólise .....</b>  | <b>34</b> |
| <b>3.2.5.3</b> | <b>Combustão direta.....</b>   | <b>34</b> |
| <b>3.3</b>     | <b>Construção de árvore de estados .....</b>   | <b>35</b> |
| <b>3.4</b>     | <b>Regras heurísticas para as etapas produtivas.....</b>                                 | <b>35</b> |
| <b>3.4.1</b>   | <b>Avaliação econômica.....</b>  | <b>37</b> |
| <b>4</b>       | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>   | <b>39</b> |
| <b>4.1</b>     | <b>Definição da rota tecnológica mais favorável .....</b>                                | <b>39</b> |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 4.2   | <b>Avaliação de viabilidade econômica.....</b> | 41 |
| 4.2.1 | <i>Payback</i> .....                           | 42 |
| 4.2.2 | <b>VPL - Valor presente líquido.....</b>       | 44 |
| 4.2.3 | <b>TIR - Taxa Interna de Retorno .....</b>     | 45 |
| 5     | <b>CONCLUSÃO.....</b>                          | 46 |
| 6     | <b>Referências .....</b>                       | 47 |

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas tem-se visto uma demanda cada vez maior para o uso de matérias-primas renováveis, bem como de recursos mais sustentáveis e menos agressivos ao meio ambiente. Um dos setores onde essa exigência tem sido mais enfática, é o setor energético, isso porque segundo o *Our World in Data* as matérias-primas mais utilizadas para a produção de energia elétrica no mundo continuam sendo o petróleo e o carvão mineral, fontes estas que não são renováveis (OUR WORLD IN DATA BASED ON VACLAV SMIL, 2017).

O Brasil, devido aos seus extensivos recursos naturais, já tem ampliado o uso de recursos renováveis, principalmente a energia elétrica de origem hidráulica que já representa 65,2% da geração interna de energia elétrica (BEN, 2021). Uma outra fonte energética que vem ganhando espaço no país é a biomassa, isso por ser um recurso renovável que pode substituir outras matérias-primas não renováveis nos mesmos processos de transformação. Outra vantagem da biomassa é o reaproveitamento de recursos naturais que não possuíam aplicação imediata, como é o caso das biomassas feitas de bagaço de cana que podem ser usadas em termoelétricas como substituintes do carvão mineral.

Um recurso ainda pouco explorado no Brasil para a fabricação de biomassa é o café. Atualmente o país é o maior exportador mundial e segundo maior consumidor do produto (SAES, NAKAZONE, 2004). Nessa ampla produção são gerados muitos resíduos, como apenas o grão do café possui valor econômico, a casca e a polpa do fruto são geralmente descartadas sem nenhuma aplicação. Esses resíduos representam cerca de 50% de todo o volume colhido (KAFLER *et al.*, 2016) e ainda não possuem nenhum emprego econômico expressivo. Isso abre margens para estudos de como aproveitar esses recursos como matéria-prima de outros negócios, incluindo o uso de biomassa para a produção de energia elétrica.

O presente trabalho tem como objetivo estudar a aplicação da biomassa de resíduos de café na produção de energia elétrica. Esse estudo vai acontecer em duas etapas, a primeira discorrendo a respeito das várias possibilidades de uso da biomassa, além de escolher a rota produtiva ótima. Já a segunda etapa ocorrerá posteriormente avaliando a viabilidade econômica do seu emprego.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Cafeicultura no Brasil**

O café chegou na região norte do Brasil em 1727 (MELO; SILVA; NUNES, 2018), e após a identificação de condições climáticas favoráveis ao seu plantio, a planta foi difundida por todo o país, mas se adaptando principalmente nas regiões nordeste e sudeste. Se aproveitando da mão de obra de escravizados, a produção cafeeira teve crescimento rápido e tornou-se de grande importância na economia do país.

Com o passar do tempo, essa produção se consolidou cada vez mais, configurando o Brasil como o maior exportador mundial e suprindo cerca de 24% do café consumido no mundo (SAES; NAKAZONE, 2004). Em 2021, o país registrou produção equivalente a 47 milhões de sacas de 60 kg. Essa demanda produtiva gera inúmeros impactos no mercado interno, já que além do Brasil ser o segundo maior consumidor de café mundial, a sua produção representa cerca de 3 milhões de empregos diretos com receita de R\$ 5 milhões.

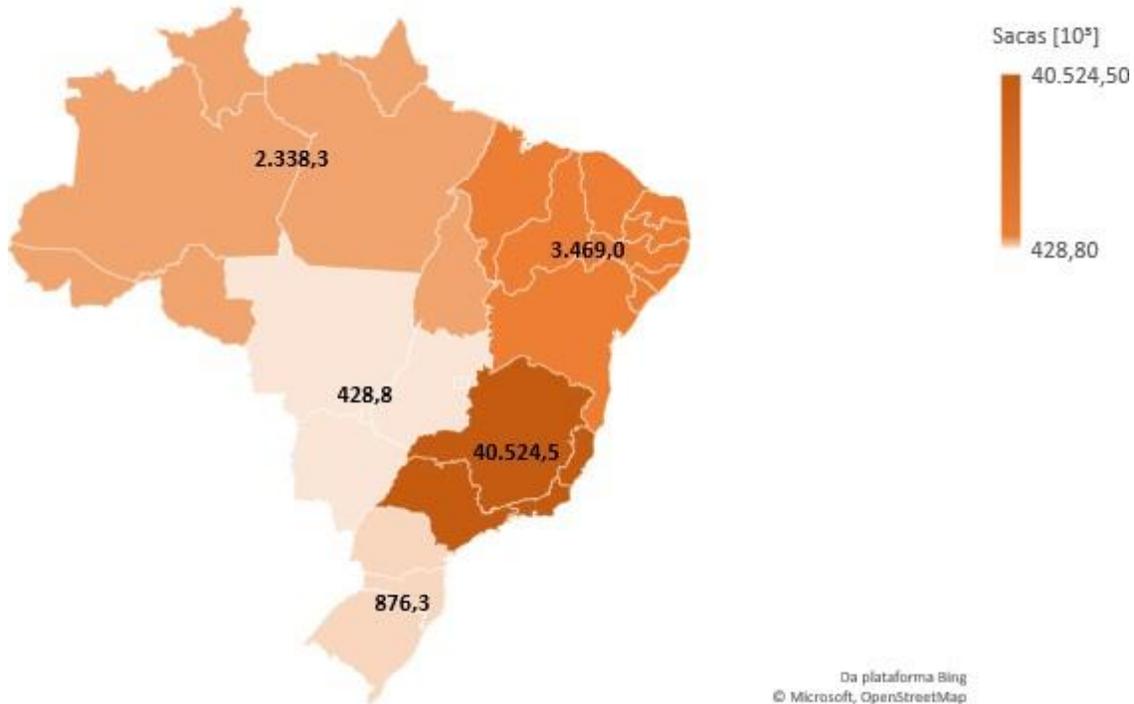
A Conab (Companhia Nacional de Abastecimento) divulga, quatro vezes ao ano, boletins de estimativas da safra nacional de café. No boletim de 2021, foi estimado que, no Brasil, foram beneficiadas 47,71 milhões de sacas (CONAMA, 2021) sendo que, dessas, 46% foram produzidas no estado de Minas Gerais. O mapa da Figura 2.1 mostra a produção por região e exemplifica bem o potencial produtivo do sudeste (cerca de 85% do total) em relação às demais regiões.

#### **2.1.0.1 Beneficiamento do café**

Após a colheita do café, o fruto precisa passar pela etapa de beneficiamento, que consiste na retirada de impurezas da coleta e na separação da casca e polpa do grão. Nesse processo, estima-se que cerca de 50% do volume seja casca e vá para o descarte, além de outros materiais como madeiras e folhas

que estejam presentes nas colheitas (KAFLER *et al.*, 2016). No ano de 2019, foram gerados mais de 5 mil toneladas de resíduos (FAO, 2019).

Figura 2.1 – Produção de café beneficiada por região - Safra 2021  
Produção por região (mil sacas beneficiadas) - Safra 2021

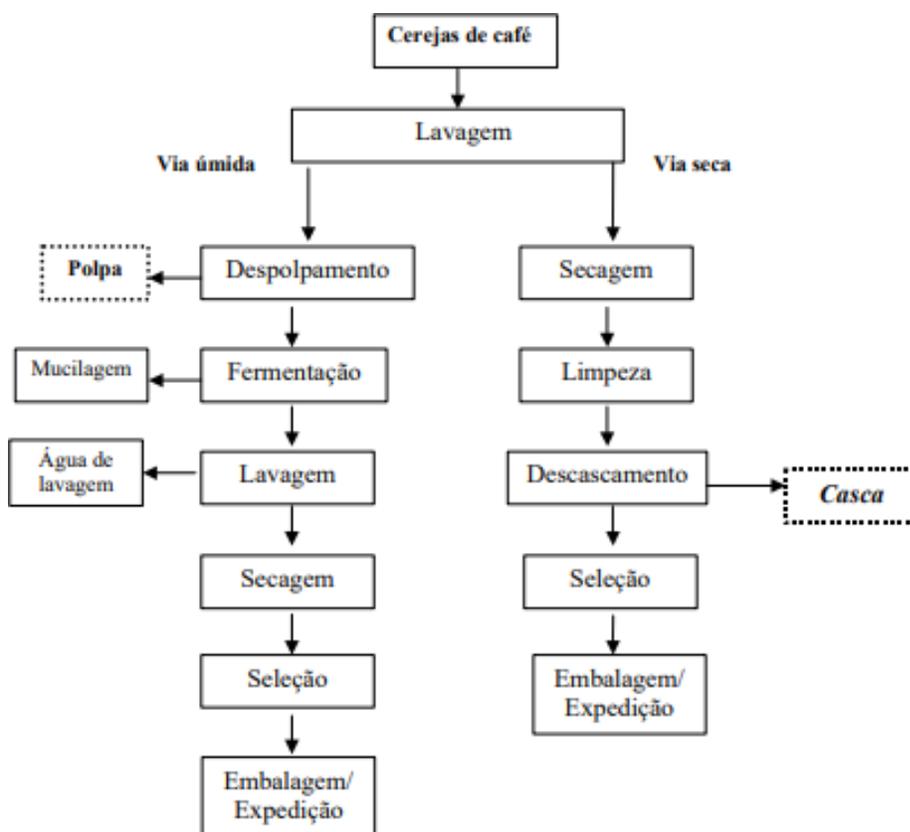


Fonte: Conab (2021)

Atualmente existem dois tipos de processos usados para o beneficiamento do grão e comercialização, sendo eles: o processamento por via úmida e o por via seca. Na via úmida, as cascas do fruto são retiradas por meio de cilindros descascadores, em seguida os grãos são levados para um processo de fermentação a fim de retirar a mucilagem dos grãos e, por fim, são lavados e levados para a secagem. Já o processo por via seca só utiliza água na lavagem dos frutos que chegam das lavouras, esses frutos são posteriormente levados para a secagem ao sol ou para secagem forçada em galpões com equipamentos adequados (MESQUITA, *et al.*, 2016). Cerca de 80% do café produzido no Brasil vem de via seca (SOCCOL, 2002).

Como mostra a Figura 2.2 em ambas as vias de processamento são gerados resíduos que usualmente são descartados mas poderiam ser reaproveitados em outros setores industriais. Pela via úmida é gerada a água de lavagem com resíduos da fermentação. Já pela via seca são geradas as cascas e polpas de frutos secos.

Figura 2.2 – Diferentes estágios do tratamento das cerejas de café pelas vias seca e úmida



Fonte: Soccol (2002)

### 2.1.0.1 Reutilização dos resíduos da cafeicultura

Como resíduo da produção do grão de café são gerados: cascas do fruto, polpa do fruto e até alguns galhos e folhas que permaneceram presentes da colheita. Atualmente existem poucos usos para esses rejeitos da produção. Em

alguns lugares, ele são usadoa para adubação ou para forragem de plantações, mas em sua grande maioria o produto remanescente é apenas descartado. Alguns estudos recentes avaliam o emprego desses resíduos em enriquecimento de alimentos, os incorporando em farinhas e massas, e melhorando o teor de ferro desses alimentos (NEVES, 2016). Outra aplicação estudada é a incorporação em rações para peixes, rãs e ruminantes (PIMENTA, *et al.*, 2011)

O potencial mais significativo de uso dos resíduos da cafeicultura é para a geração de energia elétrica. Isso porque o café possui poder calorífico similar ao da cana-de-açúcar e excelente poder de combustão. Aliado ao fato de que esse produto ainda não possui valor de mercado e de que é descartado em grande quantidade, pode indicar uma boa oportunidade de aproveitamento para o mercado energético. Pela via úmida, a matéria-prima para geração energética seria a água de lavagem com resíduos da fermentação, rico em matéria orgânica, que pode ser usada para a produção energética por biodigestão anaeróbia. Já pela via seca, a matéria-prima seriam as cascas e polpas secas que podem ser usadas para a combustão em termoelétricas.

Outro fator que colabora para o uso dos resíduos da cafeicultura na a produção de energia elétrica é que o seu período de colheita e beneficiamento se inicia entre abril /maio e pode durar até 3 meses, justamente o período de seca, no qual, devido à estiagem as usinas hidrelétricas (principais fornecedoras de energia elétrica do país) estão com volumes mais baixos e produção de energia elétrica reduzida (SILVA, F. M et al, 2002).Com isso, haveria maior disponibilidade da matéria prima justamente no período em que, tradicionalmente, se recorre ao uso de outras formas de produção de energia elétrica para completar a demanda interna de eletricidade.

## **2.2 Geração de energia elétrica a partir de biogeração anaeróbia**

Apesar de o Brasil produzir pouca quantidade de café pela via úmida, com isso gerando pouca quantidade de resíduo líquido, a rota energética que faz uso

20 dessa matéria-prima é interessante e promissora.

A rota em questão é a da biodigestão anaeróbia. Nesse método os resíduos líquidos são colocados em um biorreator onde ocorre a sua degradação por bactérias anaeróbicas (TEITZ; SOARES; SANTOS, 2013). A degradação da matéria orgânica, em especial a mucilagem dissolvida dos grãos de café, promove a formação de um biogás, gás esse que é rico em metano e dióxido de carbono. Então, a energia química é transformada em energia mecânica, por meio de uma combustão controlada do gás previamente gerado que alimenta um gerador e é, então, transformada em energia elétrica, como pode ser visto no esquema da Figura 2.3 (CATAPAN, *et al.*, 2013). Desse processo, há a geração de um subproduto sólido, formado pela lama que fica nos fundos dos tanques de reação, um subproduto que pode ser reaproveitado como biofertilizante.

Figura 2.3 – Diagrama da produção energética através de biogás



Fonte: Produção própria

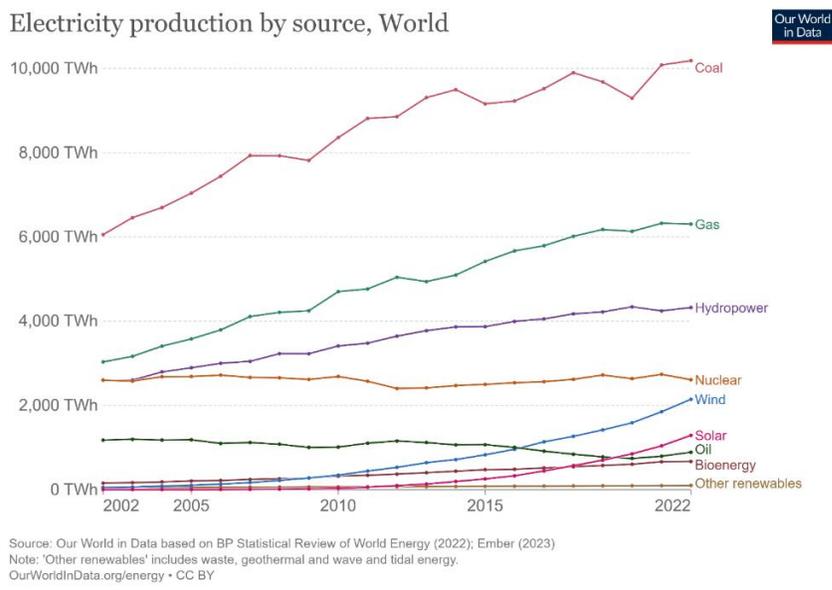
Segundo Teitz e colaboradores (TEITZ; SOARES; SANTOS, 2013), a produção de energia elétrica através de biogás está sendo muito defendida como alternativa para países em desenvolvimento e com cadeias produtivas fortemente agregadas ao agronegócio.

### 2.3 Energia termoelétrica no Brasil

A energia termoelétrica é uma das formas de produção energética mais difundidas no mundo, já que ela pode operar com diferentes matérias-primas como: carvões minerais, biomassas, gás natural, ou até pela fissão de material radioativo, sendo que destas o carvão mineral é a fonte mais usada como

mostrado na Figura 2.4 (RITCHIE; ROSER; ROSADO, 2022). Além disso, essas usinas praticamente não dependem de condições ambientais do local onde são construídas, diferentemente das usinas hidroelétricas e usinas eólicas.

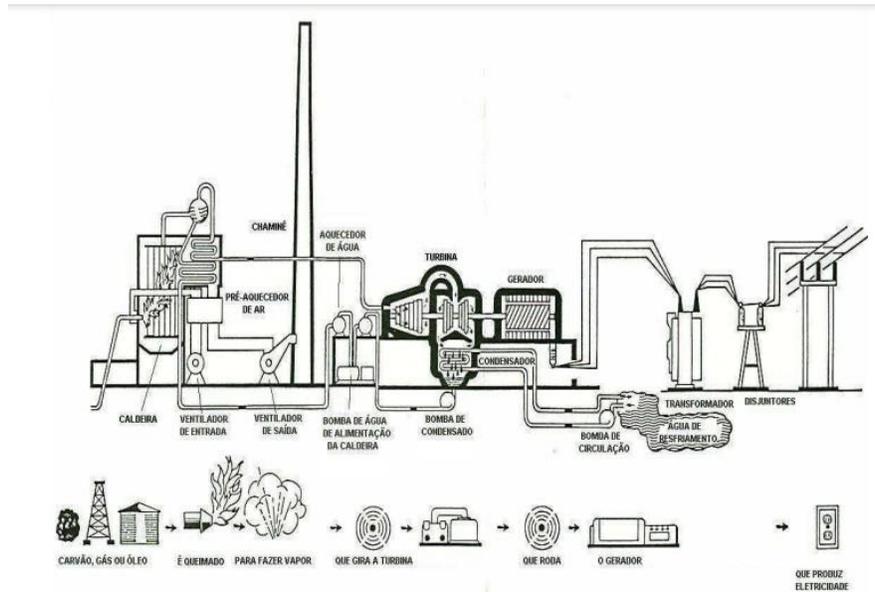
Figura 2.4 – Principais matérias primas para a produção de energia elétrica



Fonte: Ritchie, Roser, Rosado (2010)

O funcionamento dessas indústrias se baseia na conversão de energia térmica em mecânica e, desta, em energia elétrica. Como mostrado na Figura 2.5, ocorre a queima dos combustíveis já citados e o calor gerado promove a evaporação de água que atravessa tubulações que permeiam a caldeira. Esse vapor é o responsável por movimentar as hastes da turbina que acionam o gerador elétrico. Essa energia passa então por um transformador e é enviada para as linhas de distribuição, finalizando a conversão de energia mecânica em energia elétrica.

Figura 2.5 – Esquema produtivo de uma usina termoelétrica



Fonte: Barbosa (2010)

### 2.3.1 O desafio do uso de carvão mineral como combustível em usinas termoelétricas

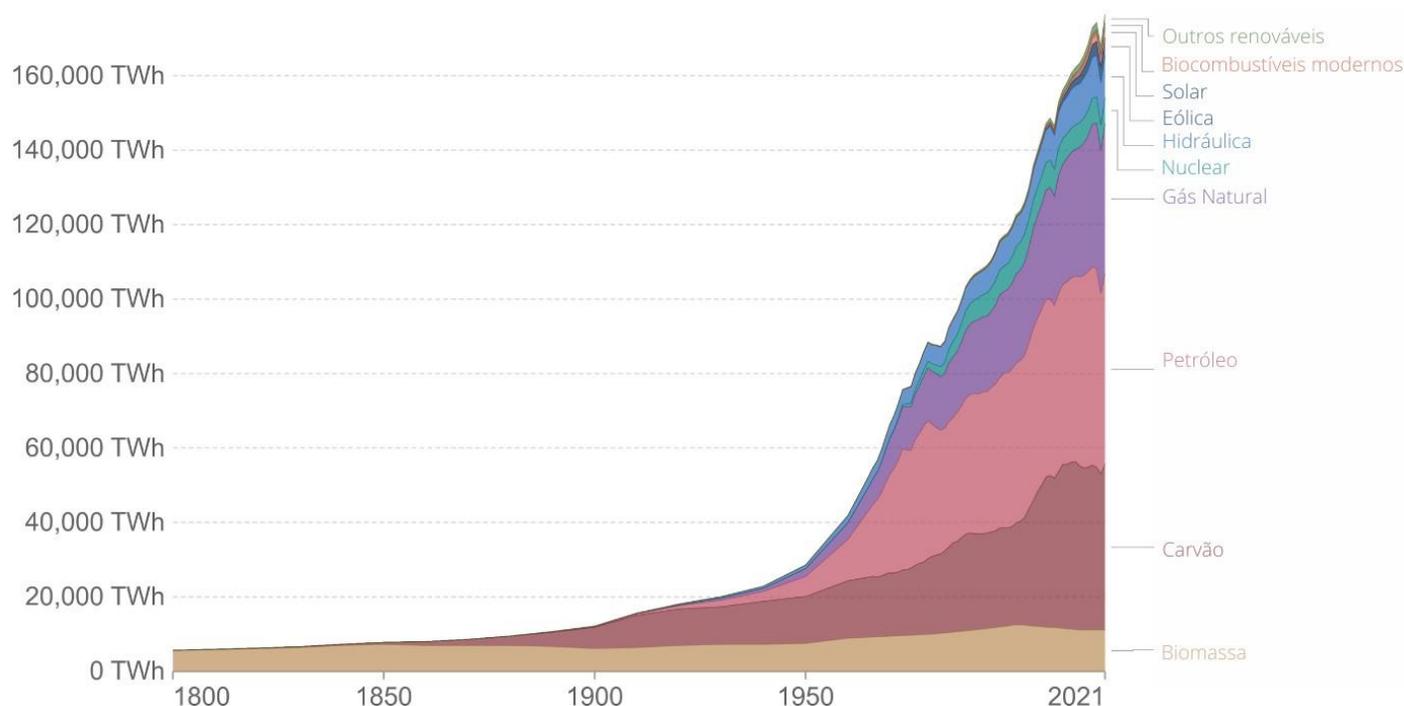
Embora haja vantagens da produção de energia elétrica a partir de carvão natural ou mineral, é preciso compreender os impactos dessa matéria-prima na produção energética das termoelétricas brasileiras e no meio ambiente.

O carvão mineral é um composto formado, em sua maioria, por carbono, mas também possui oxigênio, hidrogênio, enxofre e cinzas em sua composição (COSMO, *et al.*, 2020). Sua formação ocorreu ao longo de milhões de anos pela sedimentação e fossilização de acúmulos de componentes orgânicos, principalmente restos de vegetação. O tempo e a pressão sobre esse material promoveu a carbonização e formação das jazidas.

O carvão mineral foi uma das primeiras fontes de energia utilizadas em larga escala, já que durante a primeira revolução industrial foi utilizada na

geração de vapor que movia os motores. Atualmente, é a segunda fonte de energia mais utilizada no mundo, ficando apenas atrás do petróleo, como mostra a Figura 2.6. O uso tão amplo do carvão como matéria-prima em usinas termoelétricas se deve ao seu alto poder calorífico (28,1 MJ/kg) e baixo teor de cinzas (aproximadamente 7%), esses fatores tornam o seu uso uma opção com grande eficiência energética (CUNHA, 2021).

Figura 2.6 – Progressão do consumo primário de energia de acordo com a fonte



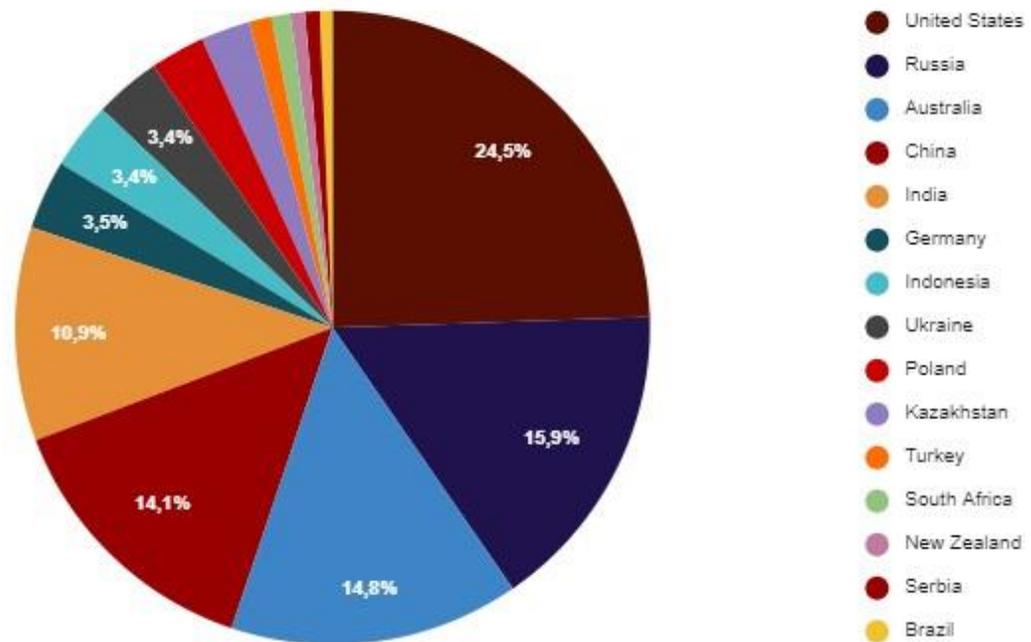
Fonte: Our World in Data based on Vaclav Smil (2017)

As maiores jazidas de carvão mineral estão localizadas nos Estados Unidos e em países ao norte da Europa próximos à Rússia. Como representado na Figura 2.7, o Brasil é o 15º maior detentor de reservas de carvão, com cerca de 0,6% do total mundial. Apesar de sua boa posição na classificação de jazidas, a produção brasileira não é suficiente para suprir o mercado nacional. Além disso, o carvão brasileiro é conhecido como sendo de baixa qualidade. Por esses motivos, o Brasil é essencialmente importador do carvão mineral (CANO, 2009).

24 Essa dependência do país com a importação vem sofrendo impactos oriundos do conflito na Ucrânia, pois como grande parte desses recursos são importados de países próximos a essa região, o preço dos insumos inflacionou e questões logísticas, que envolvem operações marítimas, fretes e seguros, também foram afetadas (BIANCHETTI, 2022).

Figura 2.7 – Distribuição de reservas de carvão no mundo - 2021

### Reservas de carvão, 2021



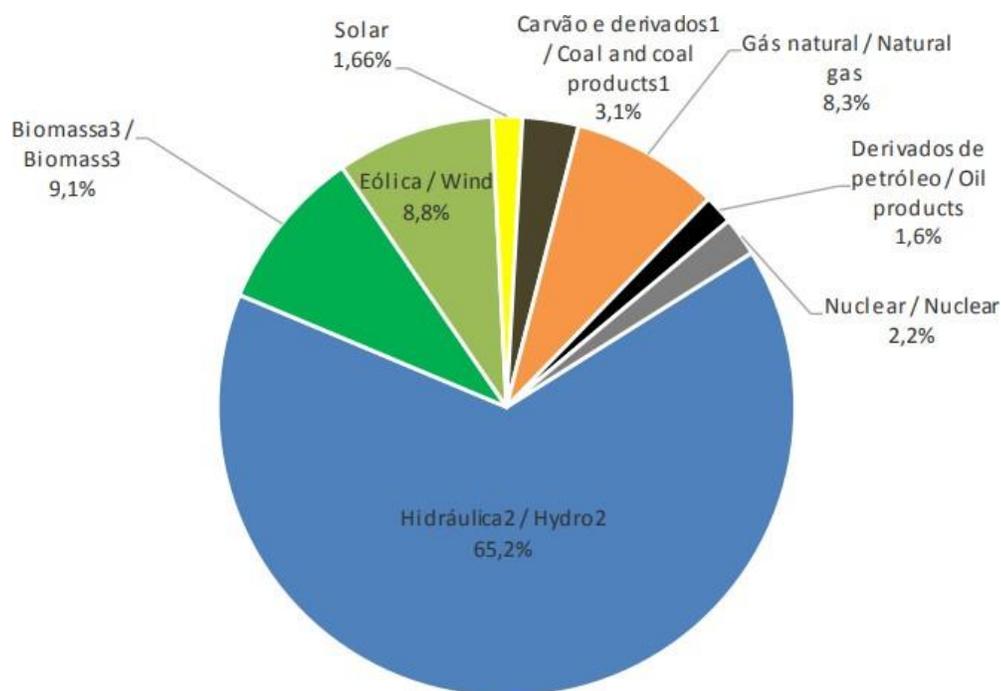
Fonte: Our World in Data based on Vaclav Smil (2017)

No entanto, apesar da ampla utilização do carvão como fonte de energia elétrica, seu uso é extremamente agressivo ao meio ambiente e à saúde humana, causando prejuízos em todas as fases de exploração, sendo as principais delas: a mineração e a combustão. Na etapa de mineração, pode ocorrer a acidificação de lagoas próximas às áreas das mineradoras. Isso acontece devido à dissolução de pirita  $FeS_2$  que acarreta a redução do pH da água (TERREZANI; OLIVEIRA,

2013). Outro impacto ambiental sério que deve ser considerado é a precipitação ácida decorrente da emissão de dióxido de enxofre SO<sub>2</sub> e óxido de nitrogênio NO durante o processo de combustão do carvão em termoelétricas. Além dos riscos ambientais graves, o carvão mineral também apresenta riscos à saúde, pois durante o processo de extração, os trabalhadores ficam suscetíveis a um ambiente com muita poeira e com altos riscos de acidentes de trabalho. Ademais, na combustão ocorre a emissão de gases que são agravantes de doenças respiratórias (COSMO, *et al.*, 2020).

Somado aos inúmeros problemas acarretados pelo uso do carvão mineral, é preciso ressaltar que se trata de uma fonte não renovável de energia, ou seja, finita. Pensando nisso, faz-se necessário pensar em métodos renováveis para substituí-lo. O Brasil possui grande potencial de produção de energia renovável devido ao seu forte setor agrícola, capacidade de incorporar novas áreas à agricultura e extensivos recursos naturais. Pela Figura 2.8, é possível notar que atualmente o país já utiliza diversas fontes renováveis, sendo a principal delas a hidráulica, que representa 65,2% da oferta interna em 2021 (BEN, 2021). Outra fonte renovável que vem ganhando espaço no país em função de suas variadas aplicações, e que pode ser incorporada como substituta do carvão mineral, é a biomassa, podendo ser usada tanto para a produção de energia termoelétrica quanto para a produção de biocombustível. Em 2021, o uso de biomassa para a produção de energia elétrica representou 9,1% da oferta interna de energia elétrica, percentual esse que vem aumentando ao longo dos anos (BEN, 2021). As principais biomassas utilizadas no Brasil são: resíduos florestais, cana-de-açúcar e licor negro (subproduto da indústria de papel e celulose) (BORGES, *et al.* 2016).

Figura 2.8 – Oferta interna de energia elétrica por fonte em 2021



Fonte: BEN (2021)

De forma a incentivar o cenário promissor, o país investiu em políticas públicas que fomentassem o uso de biomassa como fonte energética, como o Programa Pro álcool e Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNBP). Dentre as inúmeras vantagens do uso de biomassa como briquete em termoelétricas, pode-se destacar: o fácil acesso devido à sua disponibilidade de área para cultivo, reaproveitamento de resíduos de outras produções agrícolas, fácil substituição do carvão mineral em usinas termoelétricas, baixo custo e menor índice de poluição pois gera menores quantidades de SO<sub>2</sub> e NO durante a queima e possui ciclo fechado de carbono, o que reduz a emissão líquida de CO<sub>2</sub> no ambiente (BORGES, *et al.*, 2016).

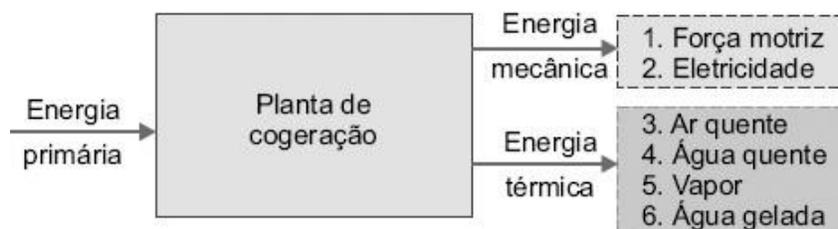
Apesar das inúmeras vantagens da inclusão de biomassa na geração e cogeração de energia, também existem algumas dificuldades, como o alto teor de umidade dos materiais, demandando um processo de secagem, dificuldades de transporte da matéria-prima e substituição de equipamentos para obtenção de

maior eficiência energética. No entanto, diversos estudos têm sido realizados visando a conversão da biomassa em energia elétrica de alta qualidade (KARKANIA, *et al.*, 2012).

## 2.4 Cogeração de energia

A cogeração de energia citada na seção anterior é definida por Moreira (2021) como "o processo de produção simultânea ou sequencial de duas ou mais formas de energia, térmica e mecânica, a partir de um único combustível". Dessa forma, o combustível escolhido ao passar pela planta de cogeração resulta em força motriz, ou eletricidade, advindos de sua transformação em energia mecânica e pode resultar em ar quente, ou vapor, advindos da sua transformação em energia térmica, como mostra o esquema da Figura 2.9. Os combustíveis mais utilizados no processo são o gás natural e a biomassa, no entanto, outros combustíveis como óleo, carvão e gás liquefeito também podem ser utilizados.

Figura 2.9 – Fluxograma de cogeração de energia mecânica e térmica



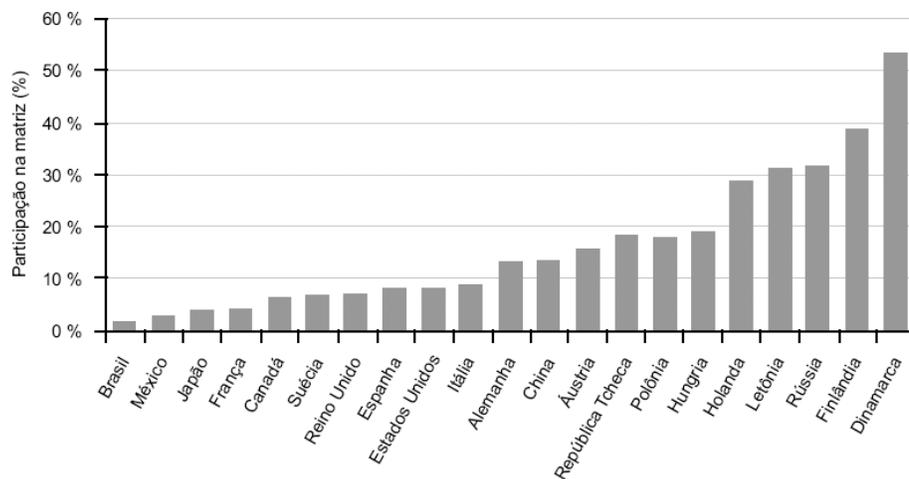
Fonte: Moreira (2021)

A cogeração é aplicada principalmente em empresas que buscam sustentabilidade, reduzindo a demanda de recursos energéticos e maximizando a eficiência no uso da matéria-prima. Essa maximização ocorre devido ao melhor aproveitamento da energia química contida no recurso, combinando o processo de produção de energia térmica e eletricidade, resultando em maior aproveitamento da energia útil. O uso da cogeração para abastecimento elétrico das fábricas é muito vantajoso, já que além da economia financeira, acarreta em

28 maior confiabilidade para planta industrial com parcial ou total independência da rede elétrica local (MOREIRA; 2021).

Nas últimas décadas, devido à exigência mundial por melhor reaproveitamento energético, as usinas termoelétricas têm aplicado a cogeração como forma de maximizar o aproveitamento energético dos ciclos termodinâmicos. As termoelétricas que utilizam a cogeração em suas plantas possuem ciclo combinado, no qual o calor rejeitado é reaproveitado em uma caldeira de recuperação e transformado em trabalho. Dessa forma, há um aproveitamento duplo da energia gerada pela matéria-prima (PARO, 2011).

Figura 2.10 – Participação da cogeração na geração de energia do país



Fonte: Moreira (2021)

Cerca de 7% da geração de energia elétrica mundial é da cogeração (COGEN, 2021). Esse movimento vem sendo favorecido por políticas públicas de incentivo e também pela maior eficiência, que favorece principalmente países que têm difícil acesso às matérias-primas. No Brasil, como mostra a Figura 2.10, esse percentual ainda é baixo, com menos de 2% de participação da cogeração na eletricidade do país. No contexto brasileiro, 77% das plantas de cogeração pertencem à indústria sucroalcooleira (MOREIRA; 2021). O bagaço de cana-de-açúcar tem sido o recurso mais amplamente utilizado pela alta produtividade e

pelo período de colheita da planta coincidir com o período de estiagem, que desfavorecem o parque hidroelétrico brasileiro (CARDOSO, 2011).

Outra matéria-prima que vem sendo muito estudada na cogeração são os resíduos da produção de café, uma vez que cerca de 50% da produção vira resíduo sem valor de mercado e poderia ser reaproveitado. Os recentes estudos indicam que ele possui bom desempenho durante a queima apresentando poder calorífico superior ao da casca de semente de algodão, palha de arroz e sabugo de milho (ORSINI, 2012). Somado a isso, a quantidade de calor que é disponibilizada por unidade volumétrica da casca de café ( $507.528 \text{ Kcal/m}^3$ ) é 18,59% maior que a de resíduos de madeira. Isso ocorre por causa da densidade da casca de café, que reduz o espaço ocupado nos aparelhos de queima em relação à madeira (VALE, *et al.*, 2007). Esses fatores corroboram com a ideia de que utilizar resíduos para cogeração energética é bastante favorável para o mercado brasileiro, podendo substituir o carvão mineral como matéria-prima mais sustentável e ser utilizada para geração distribuída de energia térmica e elétrica em pequenas e médias comunidades e reduzir a dependência de importação de recursos do país.

## 2.5 Árvore de estados

A primeira etapa de desenvolvimento de um processo químico industrial envolve a realização de análises de viabilidade técnica e econômica, e a avaliação de impactos ambientais. Em posse de todos esses resultados, é possível montar o chamado projeto básico de engenharia, usado na criação de novas indústrias ou de modificações nas atuais plantas industriais.

No estudo de viabilidade econômica, é preciso avaliar aspectos como:

- Análise comercial de mercado: avaliação do mercado consumidor, concorrentes e tendências futuras;

- Análise financeira: realização do estudo de viabilidade através de indicadores econômicos e estimativas de custos com base nas especificações de equipamentos;
- Seleção de rota tecnológica: avaliação de custos de matérias-primas, subprodutos gerados, complexidade, termodinâmica e cinética das reações envolvidas.

Como o presente trabalho tem como foco uma alteração industrial, mais especificamente a alteração da matéria-prima utilizada para a produção de energia elétrica, o estudo de viabilidade técnica e

econômica não demanda tantas etapas, uma vez que a análise de mercado e financeira sofreriam poucas mudanças, além de que a demanda energética no Brasil está em crescimento e novas possibilidades são cada vez mais bem recebidas no mercado (BRUM, 2022). O enfoque do estudo de viabilidade, nesse caso, é a seleção da rota tecnológica mais favorável, isto é, avaliar, nas possíveis rotas, as modificações necessárias para o processamento da nova matéria-prima, os impactos das possíveis alterações nos ciclos industriais utilizados e o potencial retorno econômico gerado pela mudança.

Nesse método, as principais possibilidades de rotas transformação química (rota de biodigestão anaeróbia, combustão direta e pirólise) são dispostas em uma árvore de estados. Em seguida, deve ser feita uma busca exaustiva nos ramos da árvore com base na interpretação de dados da literatura, a fim de encontrar a tecnologia de produção mais viável tecnicamente.

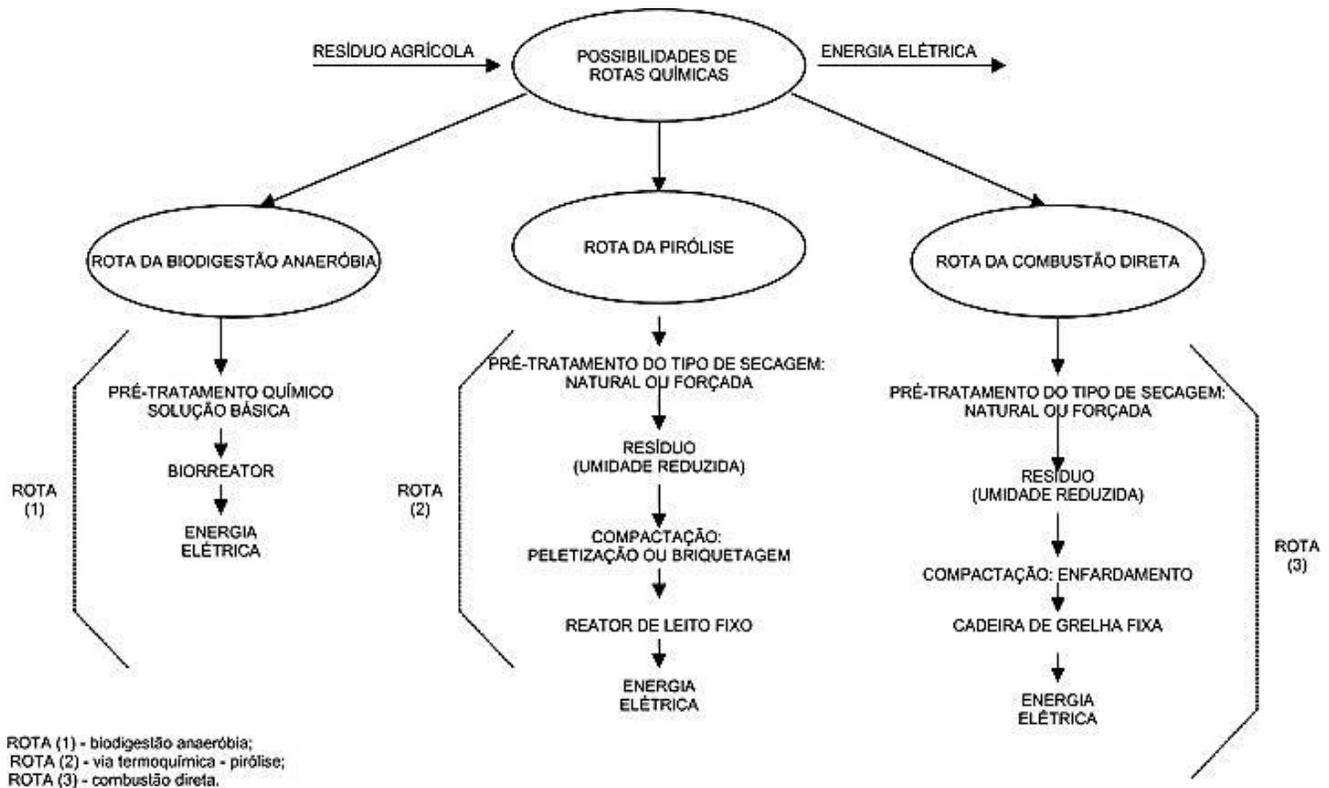
Para tomadas de decisão nesse tipo de seleção são utilizadas regras heurísticas que mapeiam os ramos. Essas regras são subjetivas e variam de problema para problema. Elas se baseiam na análise crítica de dados operacionais de transformação química mas também em dados logísticos e/ou econômicos. Vale ressaltar que as metodologias heurísticas empregadas devem ser minimamente flexíveis, uma vez que se fossem muito restritivas poderiam

levar a resultados inferiores (CARVALHO, 1995).

Uma das formas de aplicação dessas regras heurísticas é pelo chamado método heurístico ordenado, que consiste na aplicação progressivas nos sistemas do fluxograma. Caso alguma regra não seja aplicável, passa-se para o ramo seguinte. Caso a diferença não seja substancial, segue-se a avaliação do ramo em análise. Prossegue-se dessa forma até que a melhor combinação possível de rota seja encontrada (PERLINGEIRO, 2005). Para o bom funcionamento desse método é necessária a elaboração de uma árvore que abranja o maior número de possibilidades possíveis sem repetição, garantindo que não haja omissão da rota ótima.

Na Figura 2.11 é apresentada uma árvore de estados de produção de energia elétrica a partir de resíduos agrícolas, incluindo aqueles oriundos da produção e beneficiamento de café. Existem algumas formas para a produção energética a partir dos resíduos da produção cafeeira variando o processo, reatores e tipos de pré-processamento da matéria-prima. Nesses casos, pode-se verificar que a árvore apresenta como principais elementos: os resíduos; a tecnologia de beneficiamento e secagem; pré-tratamento químico e tecnologias de conversão (pirólise, combustão direta ou biodigestão anaeróbia) (BATISTA, 2014). No entanto, cada árvore elaborada para cada biomassa deve representar as especificidades do processo já existente e do resíduo em questão, como necessidades de moagem, secagem e compactação. Essas especificidades também são refletidas em suas regras heurísticas.

Figura 2.11 – Árvore de rotas energéticas a partir de resíduos agrícolas



Fonte: Batista (2014)

### 1.1 Viabilidade econômica para adaptações de rotas industriais

Dois métodos tradicionalmente utilizados para avaliar a viabilidade econômica de um empreendimento são baseados no CAPEX (*Capital Expenditure*) e no OPEX (*Operational Expenditure*). O CAPEX diz respeito aos ativos fixos de uma empresa, isto é, aqueles com longa vida útil e pouca circulação, como equipamentos e instalações. Para esses, o valor líquido é calculado a partir da depreciação que esses ativos sofrem ao longo dos anos em relação ao valor bruto (IUDÍCIBUS; MARION, 2009). Segundo os mesmos autores, o OPEX é associado aos custos com a operação diária de uma planta, podendo ser despesas de vendas, administrativas e produtivas. Ambos os levantamentos são feitos antes da instalação e montagem do empreendimento

para modelar os gastos demandados.

No caso da análise da substituição de matérias-primas que não afeta significativamente o processo, como quando se substitui o carvão minarel por carvão natural feito de biomassa na produção de energia elétrica, a avaliação de CAPEX e OPEX sofrerão poucas alterações. Por isso, uma forma simplificada de realizar a sua avaliação econômica é averiguar se o investimento realizado nas poucas modificações do processo para a nova matéria-prima serão compensados. Alguns dos métodos aplicáveis nesse tipo de avaliação são: o *Payback*, a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Valor Presente Líquido (VPL). Esses indicadores mostram o retorno do capital investido em relação a algum período de tempo (FIORENSE, *et al.*, 2021).

O *Payback* indica o período necessário para que haja recuperação do capital investido. Por isso, esse é um importante indicador para o investidor, já que pode ser calculado de forma preliminar averiguando se haverá recuperação do capital em tempo vantajoso o suficiente para que o projeto seja viável (FIORENSE, *et al.*, 2021). O seu cálculo é feito com base na relação do capital investido com o ganho de caixa do período avaliado como disposto na Equação 2.1. Onde I é o investimento inicial e FC o fluxo de caixa em cada período analisado.

$$Payback = \frac{I}{(FC)} \quad (2.1)$$

O Valor Presente Líquido, VPL, diz respeito às entradas de caixa no valor presente pelo custo de oportunidade e o investimento inicial. É um indicador fundamental ao investidor, já que uma vez que o VPL seja positivo haverá recuperação do investimento inclusive considerando a taxa de juros do período (REZENDE; SILVA; NUNES, 2018). Na Equação 2.2, FC representa o fluxo de caixa do empreendimento, I o investimento inicial, TMA é a taxa mínima de atratividade e j o período de cada fluxo de caixa.

$$VPL = -I + \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+TMA)^j} \quad (2.2)$$

Por fim, a Taxa Interna de Retorno, TIR, indica a rentabilidade do investimento em relação ao tempo, ou seja, é a taxa de retorno caso o projeto fosse realizado (FIORENSE, *et al.*, 2021). Para o seu cálculo o VPL é igualado a zero, sendo que quando a TIR calculada for maior que a taxa mínima de atratividade deverá haver realização do projeto.

Em posse desses três indicadores é possível avaliar se as alterações necessárias nas usinas energéticas, para que haja uso da biomassa de resíduo de café como matéria-prima são ou não viáveis economicamente.

Na equação 2.1 e 2.2 são utilizados fluxos de caixa que são usualmente estimados com base em custos disponíveis na literatura e em catálogos. Devido a isso é comum que seja necessário realizar uma atualização desses custos, isto é, atualizá-los ao valor presente considerando o juros. Para isso, são utilizados alguns índices de correção como o IPP, Índice de Preços ao Produtor de Industrias Extrativas e de Transformação, ou o CEPCI, *Chemical Engineering Plant Cost Index*. Ambos têm como propósito ajustar o valor ao valor presente, sendo que o primeiro possui índices específicos para cada área de produção e o segundo utiliza-se de um índice padrão anual para a correção (MAXXWELL, 2023). Ambos são corrigidos anualmente e sua aplicação para a correção de valor segue a Equação 2.3.

$$Custo_{presente} = Custo_{passado} \cdot \left( \frac{CEPCI_{presente}}{CEPCI_{passado}} \right) \quad (2.3)$$

## **2 METODOLOGIA**

O presente trabalho tem caráter exploratório de dados por meio de indicadores presentes na literatura. Sua metodologia se baseia em análise de artigos, trabalhos de conclusão de cursos e livros relacionados ao tema para propor rotas tecnológicas de produção de energia elétrica a partir de resíduos da produção de café e selecionar a rota mais viável técnica e economicamente. Como referência para a avaliação dos resultados será considerada uma indústria fictícia instalada no estado de Minas Gerais, podendo ela produzir eletricidade através processo termoelétrico que usa como matéria-prima o carvão mineral ou biomassa vegetal.

A seguir são apresentados: os critérios de desenvolvimento da árvore de estados, definição dos subsistemas acrescentados ao fluxograma e as regras heurísticas utilizadas para o processo de seleção. Além disso, também serão apresentadas as hipóteses tomadas para as avaliações econômicas.

### **2.1 Seleção de rotas tecnológica através de árvore de estados**

Para a seleção da melhor rota tecnológica por meio do método de árvore de estados (seção 2.5), foi necessário definir os subsistemas que compoem os nós do fluxograma e as regras de seleção em cada um deles. Dessa forma, a ordem metodológica do trabalho consistiu em:

- Definição dos subsistemas envolvidos;
- Elaboração da árvore de estados;
- Definição de regras heurísticas para os subsistemas envolvidos;
- Seleção de fluxograma ótimo.

As três primeiras etapas estão descritas na metodologia, já a etapa de

36 seleção de fluxograma ótimo foi desenvolvida na seção de Resultados e Discussão.

## **2.2 Definição de subsistemas envolvidos**

Como forma de auxiliar na construção da árvore de estados o processo foi dividido em etapas, ou subsistemas, nas quais serão aplicadas as regras heurísticas posteriormente definidas.

### **2.2.1 Etapa de beneficiamento do café**

Como já dito anteriormente foram consideradas no trabalho as rotas principais para o beneficiamento do café, baseadas na via úmida e na seca. Pela via úmida, faz-se uso de água para lavagem dos grãos, seguido do despulpamento, demucilagem por fermentação e secagem dos grãos. Pela via seca, se realiza apenas a limpeza dos frutos que chegam da lavoura, seguido da secagem, onde se gera

o grão de café como produto e a palha como resíduo. Os resíduos gerados pela via úmida podem ser usados pela produção de energia elétrica através da biodigestão anaeróbia. Já os resíduos de via seca são indicados para as rotas termoquímicas.

### **2.2.2 Etapa de redução granulométrica**

Para a aplicação nos processos de transformação química, existe a possibilidade que seja necessária a etapa de moagem dos resíduos de café da via seca. Devido a isso, essa etapa passa a ser considerada como uma das sessões aplicáveis ao uso de regra heurística.

### **2.2.3 Etapa de secagem dos resíduos**

O processo de secagem é necessário para melhoria do poder calorífico do resíduo, no caso da rota seca. Ela pode ocorrer de forma natural pela exposição

dos grãos ao sol ou de forma forçada utilizando um secador.

37

#### **2.2.4 Etapa de compactação**

Para a aplicação das rotas termoquímicas é necessário que haja a compactação dos resíduos transformando-os em briquetes ou pellets. Em ambas as formas, a compactação incrementa a capacidade calorífica do resíduo. A diferença entre os métodos de compactação se dá pelo formato e tamanho de cada um, sendo que o briquete possui diâmetro de aproximadamente 60 mm e comprimento entre 25 e 300 mm e o pellet possui diâmetro de até 16 mm e comprimento entre 25 e 30 mm (EMBRAPA, 2012).

#### **2.2.5 Etapa de transformação química**

Nessa etapa, ocorre a operação unitária responsável por transformar a matéria orgânica presente no resíduo líquido (via úmida) em biogás e o resíduo sólido (via seca) em energia térmica contida em gás aquecido ou vapor. Nesse último caso, a mesma será convertida em energia mecânica e elétrica. Essa etapa equivale ao cerne do processo, já que é nela onde se realizam as transformações químicas necessárias, além de ser a etapa com maior variedade de tecnologias possíveis. As particularidades de cada tecnologia, da biodigestão anaeróbia, pirólise e combustão direta, serão descritas mais detalhadamente nos tópicos seguintes.

##### **2.2.5.1 Biodigestão anaeróbia**

Como já comentado, a biodigestão anaeróbia é o processo em que a matéria-prima em solução aquosa é adicionada em tanques de digestão por microorganismos anaeróbicos para a produção de biogás, rico em metano. Esse procedimento pode ser realizado em reatores anaeróbicos de fluxo ascendente

38 UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) ou em reatores batelada.

#### **2.2.5.2 Pirólise**

Assim como a combustão direta, a pirólise também é uma tecnologia de aproveitamento termoquímica. No caso da pirólise a carbonização da matéria-prima é feita praticamente na ausência de ar, gerando gás de síntese composto por CO, CO<sub>2</sub>, hidrogênio e hidrocarbonetos de baixa massa molar e como subproduto bio-carvão. A tecnologia é conhecida pelo alto aproveitamento energético e por ser muito utilizada com biomassas de matéria-prima.

A pirólise pode acontecer de forma lenta ou de forma rápida. A forma rápida produz líquido e é utilizada para a produção de biocombustíveis, já a pirólise lenta produz bio-carvão e é a mais utilizada para a produção de energia elétrica.

#### **2.2.5.3 Combustão direta**

É a tecnologia de transformação química mais simples, em que a queima é feita pela reação dos combustíveis com o oxigênio, gerando energia térmica e que posteriormente é convertida em energia mecânica. Esse processo usualmente acontece em caldeiras para a geração de vapor. Esse processo também é o mais utilizado em usinas termoelétricas.

### **2.3 Construção de árvore de estados**

Com posse das etapas do processo e os respectivos equipamentos necessários, é possível construir a árvore de estados disposta na Figura 3.1. Como existem outras possibilidades de produção energética, a árvore apresenta as principais rotas possíveis e suas transformações para a geração de energia elétrica a partir de resíduos da produção de café. Foram encontradas 28 rotas possíveis, com 5 camadas de decisões, as quais foram baseadas nos trabalhos de Batista (2014) e de Dal-Bó, Lira e Arrieche (2016).

A árvore proposta a partir de extensa revisão da literatura apresenta 3 ramos principais: (i) via úmida com reatores de biodigestão anaeróbia, (ii) via seca com as rotas de pirólise e (iii) via seca com as rotas combustão direta. Pela via seca, foram rastreadas 24 rotas possíveis, sendo 12 delas empregando pirólise e 12 combustão direta. Pela via úmida foram encontradas 4 rotas possíveis, duas delas usando reator em batelada e duas usando reator de fluxo ascendentes UASB.

Para melhor compreensão da árvore foram feitas omissões de ramos idênticos, focando

principalmente nas bifurcações de decisão e etapas do processo produtivo.

Figura 3.1 – Árvore de estados da produção de energia elétrica a partir de resíduos de café



Fonte: Autoria própria

#### 40 2.4 Regras heurísticas para as etapas produtivas

A aplicação das regras heurísticas de forma ordenada na árvore de estados tem por objetivo a obtenção de um fluxograma o mais próximo possível do ótimo. Ou seja, espera-se que, a partir da aplicação lógica dessas regras de seleção, seja alcançada a rota tecnológica mais interessante do ponto de vista técnico e econômico. Segundo Perlingeiro, as regras heurísticas são comprovadas pelo uso, sendo portanto apropriadas considerando as circunstâncias vigentes naquele estado (PERLINGEIRO, 2005).

Para o objeto de estudo desse trabalho foram estabelecidas as seguintes regras heurísticas de seleção:

**Regra para a etapa de beneficiamento:** No primeiro nível do processo de geração de energia elétrica, busca-se empregar menos utilidades e gerar um resíduo com propriedades adequadas para a operação subsequente. Pela via úmida são necessários elevados volumes de água para a despolpa. Pela via seca os resíduos após breve tratamento alcançam umidade de 10,59%, dentro dos 12% exigidos para a pirólise, além disso, pela via seca apenas é necessária água para a limpeza superficial dos frutos. Para essa etapa foi considerado o volume de resíduos gerados por cada método de beneficiamento, já que há uma grande disparidade entre essas quantias devido as diferentes complexidades das metodologias (SCOOOL, 2000).

**Regra para a etapa de secagem:** Como mencionado na regra heurística referente ao beneficiamento, para a pirólise (e também para a combustão direta) os resíduos devem possuir umidade abaixo de 12% em base úmida. Dessa forma, caso o resíduo:

- Possua umidade igual ou inferior a 12% não é necessário realizar a etapa de secagem;
- Caso a umidade seja maior que 12% e haja disponibilidade de terreno

aberto, de tempo e viabilidade climática deve-se escolher a secagem natural;

- Caso a umidade dos resíduos seja maior do que 12% e não haja disponibilidade dos fatores mencionados no item anterior, deve-se utilizar a secagem forçada (SILVEIRA, 2008).

**Regra para a etapa de redução granulométrica:** Essa etapa tem por objetivo reduzir o tamanho das partículas em prol do aumento da área superficial dos resíduos, gerando maior aproveitamento energético das operações. Apesar da resistência dos resíduos e de suas pequenas dimensões, há casos em que se faz necessária a aplicação da moagem, são eles:

- Se a partícula tiver entre 0,5 e 1,0 cm, aplicar a redução granulométrica utilizando britadores secundários;
- Caso as dimensões das partículas sejam inferiores a 0,5 cm não é necessária a aplicação da moagem (LUZ, *et al.*, 2018).

**Regra para a etapa de compactação:** O principal objetivo dessa etapa é aumentar a densidade energética dos resíduos. Os dois métodos mais indicados para a compactação de biomassa são a peletização e a briquetagem. Os métodos bastante similares entre si, resultando em densidade dos blocos entre 1,0 e 1,2 kg/m<sup>3</sup>, a maior diferença está no formato da compactação e no tamanho de partícula indicado, sendo que o briquete é mais alongado. A seleção da tecnologia de compactação se dá pelo teor de umidade da biomassa após a secagem (caso haja), de forma que:

- Para umidade após a etapa de secagem entre 10% e 15% deve-se utilizar a técnica de briquetagem;
- Já para umidade diferente de 10% a 15% utiliza-se a técnica de peletização. (TUMULURU, 2011).

**Regra para a etapa de transformação química:** Pela via úmida, isto é, com umidade acima de 80% será admitida a rota de biodigestão anaeróbia e para a

42 via seca, umidade em torno de 12% será admitida a rota termoelétrica. Tanto para a rota de biodigestão quanto para a rota termoelétrica serão aplicadas regras heurísticas específicas e independentes.

#### **Regras para a biodigestão aneróbia:**

- Caso os resíduos sólidos do fermentado possuam diâmetro definido (entre 0,5 e 1,0 cm) deve-se utilizar o reator aneróbio do tipo batelada;
- Caso não haja padronização das dimensões dos resíduos ou não seja realizada a etapa de moagem, deve-se utilizar o reator de fluxo ascendente (UASB) (GRANATO, 2003).

#### **Regras para a rota termoquímica:**

- Caso a biomassa possua poder calorífico entre 22 e 24 MJ/kg deve-se aplicar a pirólise como método de transformação química;
- Já se a biomassa utilizada apresentar poder calorífico entre 19 e 20 MJ/kg é preferível aplicar a combustão direta como forma de transformação (ORSINI, 2021).

Com posse das regras heurísticas citadas nessa sessão é possível realizar a aplicação sucessiva nos subsistemas presentes na árvore de estados, do modo a obter a rota produtiva mais promissora e próxima da condição de produção mais favorável.

### **2.5 Avaliação econômica**

Após a avaliação técnica de seleção da rota mais promissora para a produção de energia elétrica a partir de biomassa de café, é possível aplicar a avaliação econômica de viabilidade, na qual se analisam as vantagens e desvantagens econômicas das alterações que devem ser aplicadas ao processo para o uso da matéria-prima de estudo. As avaliações foram aplicadas apenas na rota determinada como a mais adequada.

Nesse trabalho a avaliação econômica, foi feita avaliando: *Payback*, TIR e VPL. Para tal, na avaliação econômica foi mensurado se o investimento realizado para adequar o empreendimento a essas mudanças propostas serão recompensados em receita para um período e montante viável. Essa mensuração foi realizada com dados de custos encontrados na literatura e ajustados ao presente com o índice *Chemical Engineering Plants Cost Index* (CEPCI), esse índice fornece fatores anuais de correção seguindo a inflação e deflação da moeda.

Também é importante ressaltar que a etapa de beneficiamento e secagem do café comumente é feita pelas empresas de café próximas às lavouras. Para que esses resíduos de café cheguem às usina de energia elétrica é necessário uma logística de transporte. Esse fator não será considerado dentro da avaliação econômica. Essa hipótese foi considerada pois a logística só será migrada de uma matéria-prima para outra, já que ambas dependem de transporte, tanto a biomassa quanto o carvão (ou outro combustível fóssil) a ser substituído.

Os cálculos de VPL e TIR são considerados como métodos mais tradicionais da literatura financeira para avaliar o investimento em projetos. No entanto eles também necessitam de uma estimativa para realização e avaliação dos cálculos. A estimativa em questão é a TMA, ou taxa mínima de atratividade, ela indica o retorno mínimo exigido para que seja realizado o investimento. Segundo Schroeder (2005), essa taxa é definida de acordo com a política de cada empresa mas deve-se ter cautela ao estipulá-la já que essa deve pelo menos superar o custo de capital. Realizando uma busca na literatura é possível encontrar outros trabalhos que avaliam a viabilidade econômica de biomassas para produção de energia elétrica com TMA variando entre 10% e 15%. Nesse trabalho será assumida taxa mínima de retorno igual a 15%.

### **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1 Definição da rota tecnológica mais favorável**

A partir das regras descritas na seção 3.4, regras heurísticas para as etapas produtivas, é possível realizar a busca exaustivas nos ramos da árvore de estados. A avaliação dos subsistemas foi realizada da esquerda para a direita, percorrendo todas as possibilidades possíveis em prol de encontrar a melhor sequência de produção de energia através de biomassa da produção de café.

A primeira regra sugerida no capítulo anterior, e a primeira a ser avaliada, é a regra da etapa de beneficiamento. Como descrito anteriormente, nessa etapa foi considerado para a tomada de decisão o volume de resíduo gerado por cada método. Segundo Soccol (2002), 80% das cerejas de café do Brasil são beneficiadas por via seca, gerando cerca de 30 milhões de sacas de cascas de café no país todos os anos. Além disso, o autor ainda ressalta que esses resíduos praticamente não possuem valor de mercado, como já citado na seção 2.1.0.2. Pela via úmida, além do menor volume de resíduo gerado, ainda é necessária a utilização de recurso hídrico para a despolpa das cerejas e fermentação dos grãos. É importante ressaltar que a água utilizada na limpeza dos frutos beneficiados por via seca, citada na seção 2.1.1 não é interessante para a rota anaeróbica, pois não possui a mucilagem fermentada na via úmida e, por isso, não pode ser contabilizado como volume possível de resíduo. Devido a esses fatores, o beneficiamento por via seca se torna mais vantajoso para compor a rota de produção mais favorável.

A segunda regra heurística diz respeito à secagem. De acordo com a regra, todo resíduo que possua umidade maior do 12% deve passar por algum processo de secagem. De acordo com Andrade (2023), o café é colhido com teor umidade entre 30 % e 65 % b.u., após a despolpa ficam com teor entre 20% e 40% b.u., ou seja, é necessária a aplicação de uma forma de secagem. A técnica mais simples de secagem é a natural, na qual os grãos são espalhados em um grande terreno,

ficando expostos ao sol por alguns dias para que reduzam a umidade naturalmente. A outra forma de secagem é utilizando equipamentos secadores em grandes galpões. Ainda segundo Andrade, no Brasil a secagem em terreiros é a mais comumente utilizada, já que além de demandar menores investimentos e manutenção, também eleva as propriedades dos grãos. O uso dessa técnica só é possível devido ao período de colheita e de beneficiamento, que é justamente no inverno entre abril e julho. Essa época do ano se caracteriza pela baixa umidade e poucas chuvas, o que proporciona condições climáticas favoráveis para a secagem natural. Optando-se pela secagem natural como etapa da rota, a palha de café alcança teor de umidade de até 8,86% b.u. (ORSINI, 2012). Dessa forma, o método escolhido como mais viável é a secagem natural. Embora esse método dependa das condições climáticas do local, ele é o de mais fácil aplicação e trás resultados igualmente satisfatórios com custo reduzido.

A etapa de redução granulométrica possui como regra o tamanho das partículas de resíduos. De forma geral, a palha do café possui pequenas dimensões, principalmente após a secagem, que as deixa mais quebradiças e reduzem ainda mais seu tamanho. Considerando que a grande maioria das partículas presentes no resíduo da produção de café após a secagem tenham tamanho igual ou menor que 0,5 cm não é necessária a aplicação da moagem utilizando britadores secundários, eliminando essa etapa e indo diretamente para a etapa de compactação da biomassa.

Como exposto na seção 3.4, a etapa de compactação visa aumentar a densidade energética da biomassa. Os dois métodos sugeridos são a briquetagem e a peletização, que variam no tamanho e formato dos blocos formados. A regra de seleção avalia a umidade da palha de café para a tomada de decisão, sendo que para umidade entre 10% e 15% deve-se usar a briquetagem e para umidades diferentes disso o método de peletização (TUMULURU, 2011). Como citado acima, a palha de café exposta a secagem natural alcança teor de umidade de até 8,86% b.u. (ORSINI, 2012), valor esse que está fora da faixa de aplicação da

46 briquetagem, portanto, a técnica escolhida para a compactação deve ser a peletização.

Por fim, a última regra heurística é a que seleciona o método de transformação química. Na seção

3.4, foram dispostas regras tanto para a rota anaeróbia quanto para a termoquímica. Como a primeira regra definiu a rota da via seca como a mais favorável, não avaliaremos a rota aneróbia, já que essa deriva do beneficiamento realizado pela via úmida. Pela rota termoquímica foram levantadas duas possíveis metodologias, a pirólise e a combustão direta. Para tomada de decisão, a regra leva em conta o poder calorífico em base seca da biomassa. Segundo Orsini, o poder calorífico superior da palha de café é de 23,64 MJ/kg, valor esse que se encontra na faixa de aplicação da pirólise como técnica de transformação termoquímica. O autor ainda ressalta o potencial da matéria-prima ao comparar com o poder calorífico de outras biomassas usualmente utilizadas: do bagaço cana de açúcar (17,33 MJ/kg), do pinus (20,02 MJ/kg) e do eucalipto (19,42 MJ/kg).

Após a aplicação das regras eurísticas orientadas pela busca exaustiva na árvore de estados, é possível dispor a rota tecnológica mais promissora, a qual está disposta na Figura 4.1.

No Brasil o método de conversão termoquímica mais utilizado nas termoelétricas é a combustão direta, no entanto em alguns lugares a pirólise também é aplicada. De acordo com o potencial calorífico da biomassa de café a pirólise é o método mais favorável de produção, no entanto, a aplicação de combustão direta ainda possibilitaria a conversão da matéria-prima em energia elétrica visto que o resíduo possui alto poder calorífico.



Fonte: Autoria própria

## 4.2 Avaliação de viabilidade econômica

Após a escolha de rota mais promissora na seção anterior, é possível aplicar os indicadores econômicos com base na mesma. Pela rota escolhida, a única alteração fundamental no processo de produção energética seria a adição da compactação por pelletização da matéria-prima, a qual não ocorre quando se utiliza o carvão. Dessa forma, os indicadores econômicos foram aplicados considerando o investimento realizado para a inserção dessa etapa no processo produtivo de energia elétrica. Como já mencionado na seção 3, custos com a logística de transporte desses resíduos não serão avaliados, já que, de acordo com

48 a hipótese assumida, esses recursos apenas substituiriam aqueles já empregados para a matéria-prima anterior (carvão mineral).

#### 4.2.1 Payback

O *Payback* indica o período que será necessário para a recuperação do investimento. Considerando a rota tecnológica escolhida, seria necessário o investimento para a adição da etapa de peletização, por isso os cálculos de índice levarão em conta apenas o custo para a adição dessa etapa. Os gastos em questão são os custos para compra e instalação do equipamento, depreciação do equipamento, bem como os custos fixos e variáveis da operação desse maquinário anualmente.

Para a determinação dos custos de capital (CAPEX) e de operação (OPEX), foram considerados os dados apresentados no estudo de Hoffelder (2011). Neste trabalho, a autora estudou a instalação de uma unidade de peletização para biomassa de cana-de-açúcar. Segundo o estudo, a capacidade de processamento de resíduo da peletizadora é de 19200 ton/ano. No entanto, o único dado de volume mássico encontrado sobre os resíduos de café nos diz que em 2012 foram geradas pelo menos 5000 ton desse resíduo no Brasil. Por isso, para evitar exorbitância dos resultados e continuar usando o estado de Minas Gerais como caso base será tomado 46% dessas 5000 ton/ano como base de cálculo (2300 ton/ano), isso porque a produção de café no estado de Minas Gerais corresponde a 46% da produção nacional. Como estamos considerando um volume menor de processamento de resíduos do que o equipamento tomado como referência é necessário corrigir seus custos pela Equação 4.1, onde CA é o custo de referência, CB é o custo ajustado à capacidade atual, SA e SB são as respectivas capacidades. A potência  $n$  foi definida como 0,6 seguindo *the rule of six-tenths*, esta regra foi desenvolvida ao longo dos anos e fornece boas aproximações para o ajustes de custos às capacidades dos equipamentos (COUPER, 2002).

$$C_B = C_{A*} \left( \frac{S_B}{S_A} \right)^n \quad (4.1)$$

Para o cálculo de *Payback*, como não é possível estimar o fluxo de caixa para todas as etapas do processo, será considerada apenas a economia alcançada com a troca do carvão mineral pela biomassa de resíduos de café na etapa adicionada. Dessa forma, teremos a economia com carvão entrando como receita positiva no fluxo, e os custos fixos (custos destinados a salários de operadores, manutenção e conservação do maquinário), custos variáveis (custos que variam com a produção) e a depreciação considerados negativos no balanço. Com isso, é montado um *Payback* exibindo a relação da receita economizada com a nova matéria prima comparada aos custos da adição da etapa de peletização. Como mencionado, para tal é necessário levar em conta o investimento inicial e também os custos fixos e variáveis de cada período. Na Tabela 4.1 estão dispostos os custos de projeto, sendo que o investimento inicial considera o custo de aquisição e instalação do equipamento, projetados para o ano de 2023 usando o *Chemical Engineering Plants Cost Index* (CEPIC). O período de depreciação assumido foi de 15 anos, trazendo os valores de 2011 para 2023, sendo que o CEPCI do último ano foi estimado até o mês de março e seu valor é de 799,1 (MAXWELL, C. 2023). Na última coluna da tabela tem-se os custos que além de reajustados pelo CEPCI foram adequados ao volume processado seguindo a Equação 4.1.

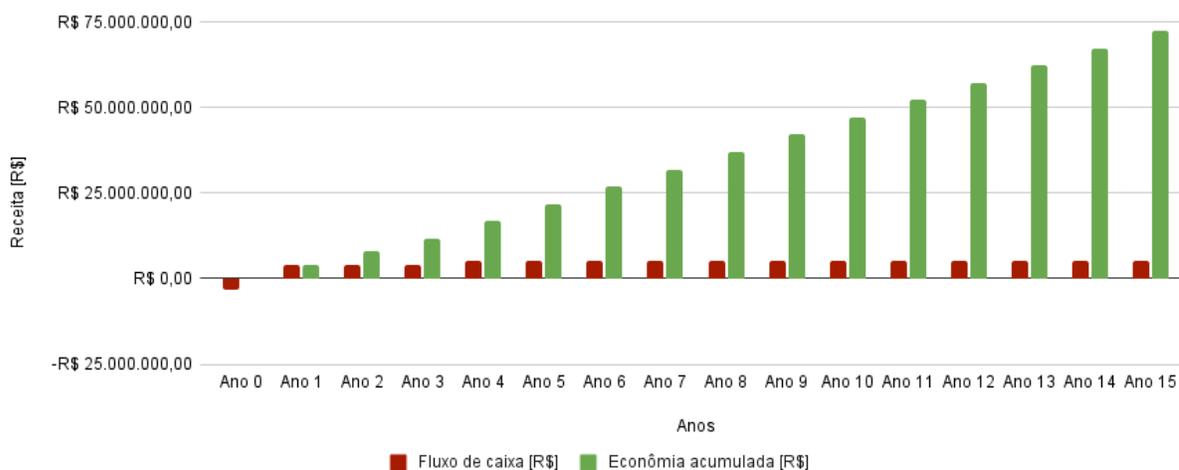
Tabela 4.1 – Despesas para instalação e manutenção de equipamento de peletização

| <b>Despesa</b>       | <b>Custo 2011</b> | <b>Custo presente (2023)</b> | <b>Custos presente ajustado à capacidade</b> |
|----------------------|-------------------|------------------------------|--|
| Investimento inicial | R\$ 8.776.210,0   | R\$ 11.979.818,84            | R\$ 3.353.561,03                             |
| Custo fixo           | R\$1.255.980,00   | R\$ 1.714.454,51             | R\$ 479.934,45                               |
| Custo variável       | R\$ 4.877.952,00  | R\$ 6.658.566,88             | R\$ 1.863.960,61                             |

Fonte: Do autor (2023)

Além dos dados dispostos na tabela 4.1 ajustados para 2023 e para o volume de resíduo processado e a depreciação do equipamento, também é necessário calcular a economia realizada na compra de carvão mineral, já que com a substituição da matéria-prima houve redução do custo do empreendimento com esse recurso e ele não seria mais debitado no fluxo de caixa, no ano de 2022 o custo da tonelada do recurso foi de US\$ 700,00, considerando a conversão do dólar de R\$ 4,83 o custo seria de R\$ 3383,73/ton de carvão mineral (BIANCHETTI, 2022). Como demonstrado na Figura 4.2, o fluxo lucro acumulado é mostrado para os 15 primeiros anos, sendo que a partir do ano 1 a economia com a antiga matéria-prima já é positiva mas passa a ser consideravelmente expressiva a partir do segundo ano, isso fortalece a hipótese de que a adição apenas da etapa de compactação no processo de produção de energia corresponde a uma parcela pequena do receita e economia gerados com a mudança.

Figura 4.2 – *Payback* para investimento em etapa de peletização



Fonte: Autoria própria

Para uma análise mais aprofundada de *payback* seria recomendado utilizar uma referência de equipamento que processe volumes de resíduos mais similares ao volume escolhido, isso porque o fluxos de caixa, custo do equipamento e sua depreciação seriam mais realistas. Como não foi possível encontrar na literatura

referências que se aproximassem mais do caso de estudo foi necessário tomar algumas hipóteses que podem gerar alterações no balanço. Ademais, é recomendado avaliar o fluxo de caixa completo da empresa considerando todas as etapas envolvidas no processo para uma análise completa de viabilidade econômica.

#### **4.2.2 VPL - Valor presente líquido**

O VPL pode ser traduzido como uma estimativa entre o valor presente das entradas e saídas do negócio menos o investimento inicial, levando em consideração a valorização dos recursos ao longo do tempo (REZENDE, 2017). Portanto, quando o VPL for positivo, há viabilidade de investimento e o negócio atende à taxa mínima de atratividade estipulada. Caso contrário, o negócio não retornará o investimento realizado.

Como representado na Equação 2.2, o valor presente líquido considera: os fluxos de caixa de cada período, a TMA e o número de períodos que serão estimados. A TMA foi definida anteriormente com base na literatura como sendo de 15%. Em relação ao número de períodos, será mantido o mesmo montante usado para o payback, estimando 15 anos a partir do ano zero, quando serão feitas as modificações no processo produtivo. Para o fluxo de caixa, serão considerados os recursos referentes: ao custo do equipamento e instalação, custos fixos, custos variáveis, depreciação do equipamento, imposto de renda, contribuição social e economia gerada da compra de carvão mineral. Fluxo necessário para a adição do etapa de compactação assim como realizado no indicador anterior. No entanto, mais uma vez deve-se apontar que o fluxo de caixa total da empresa envolveria custos adicionais ao custos da etapa de peletização, custos como impostos, custos das outras etapas produtivas e depreciações de outros equipamentos.

Para o caso da adição da etapa de peletização para o processamento da

52 biomassa de café foi encontrado VPL igual a R\$ 9.173.773,22 no período analisado. Como o valor supera um, é possível constatar que o investimento nessa alteração é economicamente viável. Sendo que no seu quarto ano de aplicação a biomassa já é possível economizar a receita correspondente a um ano inteiro da antiga matéria-prima.

#### **4.2.3 TIR - Taxa Interna de Retorno**

A TIR, ou taxa interna de retorno, é a taxa capaz de zerar o valor presente líquido que já foi calculado. Para a avaliação de resultados, se a TIR for maior do que a TMA, o investimento é favorável. Caso a TIR seja menor do que a TMA o investimento no empreendimento não é indicado.

O cálculo da TIR foi realizado considerando o mesmo período utilizado para o *Payback* e para o VPL. A estimativa também foi feita por meio da Equação 2.2, assim como no caso do VPL. Para o caso da adaptação do processo de produção energética para receber a biomassa como matéria-prima, a TIR encontrada foi de 25,35%, indicando o investimento como lucrativo uma vez que seu resultado foi maior que a TMA estipulada (15%) e favorável a lucro ao investidor.

## 4 CONCLUSÃO

No presente trabalho, foi realizada uma análise preliminar do uso de resíduos do beneficiamento de café para a produção de energia elétrica em uma termoelétrica em substituição ao carvão mineral. Para isso, foram empregados métodos de levantamento e definição de rotas tecnológicas, bem como a avaliação de viabilidade econômica.

A avaliação dos dados e resultados expostos no presente trabalho indicam que o uso de resíduos da produção de café é uma oportunidade de negócio, a princípio, acessível às indústrias termoelétricas em MG, uma vez que seu estudo de caso se mostrou economicamente viável em uma primeira análise. Além disso, a mudança da matéria-prima para biomassa de café coopera com o *status* mais sustentável do negócio, gerando menores impactos, uma vez que não necessita da etapa de mineração e emite menos gases tóxicos no processo, como no caso do carvão mineral. Outro ponto positivo do uso dos resíduos de biomassa de café é que atualmente eles não possuem custo de mercado, sendo usualmente descartado. Com isso, o custo de aquisição da matéria-prima é desconsiderado quando comparada a outras.

Avaliando as rotas tecnológicas possíveis, foi possível notar que o processo demanda poucas alterações para que o torne apto ao uso da nova matéria-prima. Também é válido destacar que a árvore de estados mostra inúmeras rotas possíveis, permitindo que outras possibilidades sejam avaliadas e aplicadas dependendo das circunstâncias das indústrias e acessos aos recursos necessários.

Em relação à viabilidade econômica, para a rota definida como ótima tem-se um *Payback* com economia positiva a partir do segundo ano. Para o VPL e TIR, foram obtidos resultados positivos de R\$ 9.173.773,22 e 25,35%, respectivamente.

Para próximos estudos, sugere-se uma avaliação mais aprofundada dos custos operacionais e de capital para o investimento em questão, aplicando os cálculos aos fluxos de caixas reais da indústria e considerando os custos de adaptação de forma mais detalhada.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, P. S. **Estudo da secagem de café arábica (Coffea Arabica L.) despulpado em seca-dor rotoaerado**. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Química. 2023.

BEN. **Balanco Energético Nacional** . Ministério de Minas e Energia-EPE. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>>. Acesso em: 15 de Novembro de 2022.

BARBOSA, D. **Usinas Termelétricas – UTE Muricy I**. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Federal de Campina Grande. 2010.

BATISTA, R.R. **Rotas de aproveitamento tecnológico de resíduo orgânico agrícola: casca de coco, casca de cacau e casca de café - destinadas à geração de energia**. Dissertação (mestrado em energia) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro universitário Norte do Espírito Santo. 2014.

BIANCHETTI, M. **Preço do carvão mineral dispara e pressiona siderurgia no País**. Diário do comércio. 12 de abril de 2022. Disponível em: <<https://diariodocomercio.com.br/economia/preco-do-carvao-mineral-dispara-e-pressiona-siderurgia-no-pais/>>. Acesso em: 20 de Novembro de 2023.

BORGES, A. *et al.* **Energias renováveis: uma contextualização da biomassa como fonte de energia**. REDE - Revista Eletrônica do PRODEMA, volume 10, nº . Julho de 2016.

BRUM, G. **Demanda de energia no Brasil, em março, cresce 1,9% comparada a 2021**. Radioagência Nacional. 29 de Abril de 2022. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/radioagencia-nacional/economia/audio/2022-04/demanda-de-energia-no-brasil-em-marco-cresce-19-comparada-2021>>. Acesso: 12/12/2022.

CANO, T. **CARVÃO MINERAL**. Agência Nacional de Mineração-Economia Mineral do Brasil -2009. 14 de junho de 2017.

CARDOSO, T. **Cogeração de energia através do bagaço de cana-de-açúcar: Revisão de literatura**. Universidade Federal de São Carlos - Centro de Ciências Agrárias. 2011.

CARVALHO, C.A.C. **Síntese e otimização de sequências de destilação utilizando simuladores comerciais**. Universidade Estadual de Campinas. 1995.

CATAPAN, A. *et al.* **Utilização de Biodigestores Para Geração de Energia Elétrica a Partir de Dejetos de Suínos e Equinos: Uma Análise da**

56 **Viabilidade Financeira Com o Uso da Simulação de Monte Carlo.** XX Congresso Brasileiro de Custos – Uberlândia, MG, Brasil, 18 a 20 de novembro de 2013.

CEMIG. **Valores de Tarifas e Serviços.** 2023. Disponível em: <<https://www.cemig.com.br/atendimento/valores-de-tarifas-e-servicos/>>. Acesso em: 24/06/2023.

COGEN – **Associação da Indústria de Cogeração de Energia.** Disponível em: <<https://www.cogen.com.br/cogerao/conceito-e-tecnologias>> . 2021. Acesso em: 03 de Julho de 2023.

COSMO, B. *et al.* **Carvão mineral.** Revista Agronomia Brasileira. Volume 4, 13 de março de 2020. Disponível em: <<https://www.fcav.unesp.br/Home/ensino/departamentos/cienciasdaproducaoagricola/laboratorioidematologia-labmato/revistaagronomiabrasileira/rab202001.pdf>> Acesso em: 20 de Maio de 2023.

COUPER, J. R. **Process engineering economics.** 1 ed. New York: Marcel Dekker, 2003.

CUNHA, M. G. **Avaliação da co-combustão de carvão mineral com serragem de eucalipto em leito fluidizado borbulhante.** Universidade do Vale do Rio do Sinos - UNISINOS. 2021.

DAL-BÓ, V. LIRA, T. ARRIECHE, L. **Síntese da Estrutura de Processamento da Casca do Café para a Geração de Energia.** XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ. 2016.

EMBRAPA. **Briquetagem e peletização de resíduos agrícolas e florestais.** Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/65331/1/FOLDER-Briquetagem2-2012.pdf>> . 2012. Acesso em: 26 de Junho de 2023.

FAO, **Food and Agriculture Organization of the United Nations,** 2019. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/data>>. Acesso em 21/02/2021.

FIorense, L.; SULZBACH M.; SILVA R. M. **Análise da viabilidade de uma empresa de multi- mídia em Lajeados/RS: TIR, Payback E VPL.** Administração de empresas em revista. Volume 1 - número 23. 2021. Curitiba-PR.

GRANATO, E. **Geração De Energia Através Da Biodigestão Anaeróbica Da Vinhaça .** UNESP - Campus de Bauru. 2003

RITCHIE. H.; ROSER, M.; ROSADO. P. **Energy - OurWorldInData.org.** 2022. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/energy>>. Acesso em: 25 de outubro de 2022.

Hoffelder, J. **Pallets de bagaço de cana-de-açúcar na matriz energética.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2011.

IUDÍCIBUS, S.; MARION, J. C.; **Curso de contabilidade para não contadores: para as áreas de administração, economia, direito e engenharia.** 6ª ed. São Paulo: Editora Atlas, 2009.

KARKANIA, V.; FANARA, E.; ZABANIOTOU, A. **Review of sustainable biomass pellets production: A study for agricultural residues pellets' market in Greece.** Renewable and Sustainable Energy, Greece, n.16, p.1426-1436, 2012.

KAFLER, L. M. *et al.* **Secagem da Casca do Café como Etapa Prévia à Geração de Energia.** In: ANAIS DO CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 2016. Anais eletrônicos. Campinas, Galoá, 2016. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobeq/cobeq-2016/papers/secagem-da-casca-do-cafe-como-etapa-previa-a-geracao-de-energia?lang=pt-br>> Acesso em: 21 jan. 2023.

MAXXWELL, C. **Cost Indices, Towering Skills.** 2023. Disponível em: <<https://toweringskills.com/financial-analysis/cost-indices/>>. Acesso em: 23/07/2023.

MESQUITA, C. M. *et al.* **Manual do café: colheita e preparo (Coffea arábica L.).** Belo Horizonte: EMATER-MG, 2016. 52 p. il.

MOREIRA, J. R. S. **Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.** Grupo GEN, 2021. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9788521636816/>>. Acesso em: 10 abr. 2023.

NEVES, J. V. G. **Cascas residuais de café orgânico: composição química, potencial antioxidante, fatores antinutricionais e aplicação tecnológica.** Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia. 2016.

ORSINI, R.D.R. **Estudo do aproveitamento do resíduo da lavoura cafeeira como fonte de bio-massa na produção de hidrogênio.** Tese, Universidade do Estado de São Paulo, São Paulo, 2012.

PARO, André de Carvalho. **Uma metodologia para gestão da eficiência energética de centrais de cogeração a biomassa: aplicação ao bagaço de cana.** 2011. Tese (Doutorado em Sistemas de Potência) - Escola Politécnica, University of São Paulo, São Paulo, 2011.

PERLINGEIRO, C. A. G. **Engenharia de Processos.** Editora Blucher, 2005. E-book. ISBN 9788521215004. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9788521215004/>>. Acesso em:

58 22 maio de 2023.

PIMENTA, C.J. *et al.* . **Aproveitamento do resíduo do café na alimentação de tilápia do Nilo.** Arch. zootec., Córdoba , v. 60, n. 231, p. 583-593, sept. 2011 . Disponível em: <<http://scielo.isciii.es/scielo.p?script=sciarttext&pid=S0004-05922011000300047&lng=es&rm=iso>>. Acesso em: 21 de Janeiro de 2023.

REZENDE, J. M.; FERNANDES, N. M. S.; NUNES, N. M. S. **Café: origem e contribuição para a economia do Brasil.** Múltiplos Acessos, v. 3, n. 1, 25 jun. 2018.

REZENDE, B. X. **Estudo da viabilidade da utilização de biomassa para geração de energia elétrica.** 2018. 39 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2018.

SILVA, F. M. et al. **Colheita do café mecanizada e semimecanizada.** Universidade Federal de Lavras. 2002

SOCCOL, C. R. **Resíduo de café: um substrato promissor para a produção industrial de bioprodutos com alto valor agregado.** In: EMBRAPA-CAFÉ. (Org.). I Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil. 1 ed. Brasília: EMBRAPA, v. 1, p. 83-98, 20



