

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CAMPUS GUARAPUAVA  
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**TOBIAS JOSÉ DEGLI ESPOSTE ROSA**

**ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DE GERAÇÃO DE  
ENERGIA EM PEQUENA ESCALA NO SETOR  
AGROCAFEEIRO**

**GUARAPUAVA  
2021**

TOBIAS JOSÉ DEGLI ESPOSTE ROSA

**ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DE GERAÇÃO DE  
ENERGIA EM PEQUENA ESCALA NO SETOR  
AGROCAFEEIRO**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à  
Coordenação de Engenharia Mecânica, como  
requisito parcial à obtenção do Título de Bacharel  
em Engenharia Mecânica, da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Renan Manozzo Galante

GUARAPUAVA  
2021



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Guarapuava  
Diretoria de Graduação e Educação Profissional  
Coordenação de Engenharia Mecânica



## TERMO DE APROVAÇÃO

### ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DE GERAÇÃO DE ENERGIA EM PEQUENA ESCALA NO SETOR AGROCAFFEEIRO

por

TOBIAS JOSÉ DEGLI ESPOSTE ROSA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 31 de agosto de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após a deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Renan Manozzo Galante  
Professor Orientador

---

Sérgio Dalmás  
Membro da banca

---

Adriano Martins de Souza  
Membro da banca

---

Dr. Sérgio Dalmás  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

-- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso --

ROSA, Tobias J. D. E. **Estudo da Viabilidade Econômica de Geração de Energia em pequena escala no setor Agrocafeeiro**. 2021. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Mecânica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2021.

## RESUMO

Diante do panorama energético mundial, busca-se constantemente por mitigar os danos causados pela geração de energia que vem crescendo de forma desenfreada desde a revolução industrial. A biomassa é uma fonte de energia considerada limpa, principalmente pelo fato de que as plantas durante sua vida consomem  $\text{CO}_2$  e produzem  $\text{O}_2$ . A palha de café é um resíduo agrícola gerado na última etapa do beneficiamento, quando a casca já seca é removida do grão, já nas proximidades das instalações de beneficiamento onde existe um consumo considerável de energia elétrica. O Brasil produz em média 2.615.429 tep de palha de café por ano, sendo que somente na região do Caparaó são produzidas 657.402 tep de palha de café contando com uma plantação de aproximadamente 1.447.101,5 mil cafeeiros. O presente trabalho estuda uma unidade produtora e beneficiadora de café nesta mesma região que produz 5000 sacas de café de 60 kg e gera em torno de 79.746,8 kg de palha por ano, e em um sistema em que sejam realizadas podas parciais que geram 3,5 kg de lenha por cafeeiro podendo chegar a 511,6 toneladas de lenha por ano. Uma das dificuldades do uso de resíduos da produção de grãos para geração termelétrica é a indisponibilidade de equipamentos voltados para a microgeração distribuída, uma vez que grãos são produzidos de forma linear e o transporte de toda essa biomassa inviabilizaria o investimento de grandes centrais termelétricas para este combustível. Entretanto, o crescimento do preço da energia elétrica associado a incentivos do governo por meio do PRONAF Bioeconomia e ao sistema de compensação de energia elétrica, esse cenário tem se transformado. Como resposta ao cenário descrito, esse trabalho faz o uso de uma turbina Tesla Pelton adaptada e testada em laboratório por Batista (2009) que opera em ciclo Rankine simples e que neste estudo teria fornecimento de calor a partir da combustão de palha de café no período de safra (5 meses) e lenha de cafeeiro no período fora safra. Por fim, é feito um estudo da viabilidade econômica mediante financiamento dos equipamentos por meio do programa de incentivo PRONAF Bioeconomia do governo federal que apresenta resultado positivo de um payback de 4 anos e 4 meses.

**Palavras-chave:** Biomassa. Palha de Café. Termogeração. Viabilidade Econômica. Microgeração Distribuída. Compensação de Energia.

ROSA, Tobias J. D. E. **Economic Feasibility study of small-scale power generation in the agro-coffee sector**. 2021. 46 f. Completion of Coursework to obtain a Bachelor's degree in Mechanical Engineering – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2021.

## ABSTRACT

In view of the global energy panorama, there is a constant search to mitigate the damages caused by the power generation that has been growing wildly since the industrial revolution. Biomass is a source of energy considered clean, mainly due to the fact that plants during their lifetime consume CO<sub>2</sub> and produce O<sub>2</sub>. Coffee straw is a residue generated in the last stage of processing, when the dry husk is removed from the grain, already in the vicinity of processing facilities where there is considerable consumption of electricity. Brazil produces an average of 2,615,429 tep of coffee straw per year, in the Caparaó region 657,402 tep of coffee straw are produced with a plantation approximately 1,447,101.5 thousand coffee trees. The present work studies a unit producer and processor of coffee in the same region that produces 5000 sacks of coffee weighing 60 kg and generates around 79,746.8 kg of straw per year, and in a partial pruning system that generates 3.5 kg of firewood per coffee tree can generate up to 511.6 tons of firewood per year. One of the difficulties of the use of residues from grain production for thermoelectric generation is the unavailability of equipment aimed at distributed microgeneration, since grains are produced from linear form and the transport of all this biomass would make the investment of large thermoelectric power plants for this fuel. However, the increase in energy prices associated with Brazilian government incentives through PRONAF Bioeconomy and the electricity compensation, this scenario has been transformed. In response to the scenario described, this work makes use of a Tesla Pelton turbine adapted and tested in the laboratory by Batista (2009) who operates in a simple Rankine cycle and which in this study would provide of heat from the combustion of coffee straw in the harvest period (5 months) and coffee firewood in the off-season period. Finally, an economic feasibility study is carried out through equipment financing through the PRONAF Bioeconomy incentive program of the federal government that results in a positive result of a payback of 4 years and 4 months.

**Keywords:** Biomass. Coffee Straw. Thermogeneration. Economic Viability. Distributed Microgeneration. Energy Compensation.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Mudança no panorama energético nas últimas décadas.....	11
<b>Figura 2</b> – Matriz energética mundial. ....	12
<b>Figura 3</b> – Matriz energética brasileira.....	12
<b>Figura 4</b> – Matriz elétrica brasileira. ....	13
<b>Figura 5</b> – Destino da biomassa da cafeicultura atualmente .....	16
<b>Figura 6</b> – Ciclo Rankine simples ideal.....	18
<b>Figura 7</b> – Comparação entre os diagramas T-S dos ciclos Rankine ideal e real.....	19
<b>Figura 8</b> – Rendimento alternador.....	21
<b>Figura 9</b> – Procedimento e etapa de acesso .....	24
<b>Figura 10</b> – Sistema de compensação de energia elétrica .....	26
<b>Figura 11</b> – Exemplo de fator de ajuste.....	26
<b>Figura 12</b> – Regiões produtoras de café no Brasil.....	28
<b>Figura 13</b> – Gráfico do ciclo Rankine .....	30
<b>Figura 14</b> – Correção de valores por índice de preços. ....	31
<b>Figura 15</b> - Projeção preço energia elétrica e operação.....	36

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Dados da produção de café .....	16
<b>Tabela 2</b> – Composição química e teor de umidade do combustível. ....	17
<b>Tabela 3</b> – Dados do ciclo Rankine .....	19
<b>Tabela 4</b> – Custo mínimo de disponibilidade .....	26
<b>Tabela 5</b> – Dados utilizados para os cálculos de geração de potência.....	30
<b>Tabela 6</b> – Orçamento dos componentes corrigidos pelo IGP-M.....	32
<b>Tabela 7</b> – Preço por posto tarifários de energia elétrica.....	33
<b>Tabela 8</b> – Parâmetros de entrada para o fluxo de caixa .....	36
<b>Tabela 9</b> – Potencial energético dos resíduos da cafeicultura .....	38
<b>Tabela 10</b> – Resultado do modelo térmico .....	39
<b>Tabela 11</b> – Fluxo de caixa do empreendimento .....	41
<b>Tabela 12</b> – Resultado dos métodos de análise de investimento .....	41

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica	
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento	
BCB	Banco Central do Brasil	
C	Fração mássica de carbono	%
DAP	Declaração de Aptidão ao Pronaf	
$E_{\text{cafeeiro}}$	Potencial energético proveniente do cafeeiro	kJ
$E_{\text{palha}}$	Potencial energético proveniente da palha	kJ
FGC	Fundo garantidor de créditos	
FP	Preço energia elétrica horário fora do horário de pico	R\$
H	Fração mássica de hidrogênio	%
I	Preço energia elétrica horário intermediário entre P e FP	R\$
IGP-M	Índice geral de preços ao mercado	
$\dot{m}_{\text{fl}}$	Vazão mássica do fluido de trabalho do ciclo Rankine	kg/s
$m_{\text{AR}}^*$	Massa estequiométrica de ar por massa de combustível	kg/kg <sub>cb</sub>
$m_{\text{cafeeiro}}$	Massa de lenha de cafeeiro	kg
$m_{\text{palha}}$	Massa de palha de café	kg
$N_{\text{pés}}$	Número de pés de café	1000 pés
O	Fração mássica de oxigênio	%
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico	

PCI	Poder calorífico inferior	kJ/kg
PCS	Poder calorífico superior	kJ/kg
PCS <sub>cafeeiro</sub>	Poder calorífico superior	kJ/kg
PCS <sub>palha</sub>	Poder calorífico superior	kJ/kg
P	Preço da energia elétrica horário de ponta	R\$
P <sub>R</sub>	Preço médio energia elétrica para consumo em zona rural	R\$
PRONAF	Programa nacional de fortalecimento a agricultura familiar	
RFB	Receita Federal Brasileira	
R <sub>crd</sub>	Crédito em energia	kWh
S	Fração mássica de enxofre	%
SAC	Sistema de Amortização Constante	
SC <sub>b</sub>	Sacas de café beneficiadas	60 kg
TMA	Taxa mínima de atratividade	%
tep	Tonelada equivalente de petróleo	4186800 kJ
TIR	Taxa interna de retorno	%
VPL	Valor presente líquido	R\$
W <sub>turb</sub>	Potência da turbina	kW
W	Teor de umidade	%
w	Trabalho específico	kJ/kg

## SUMÁRIO

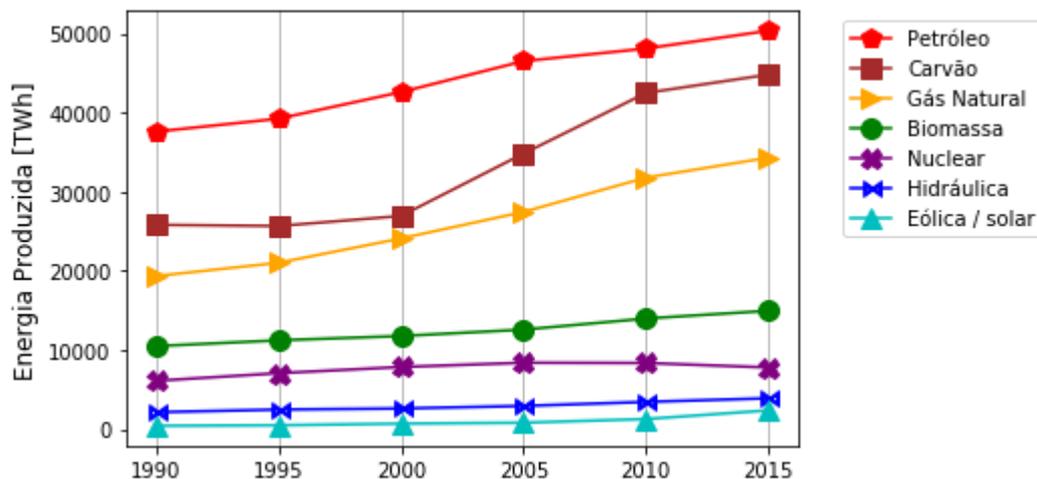
<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>14</b>
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
<b>3.</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>15</b>
3.1	MICROGERAÇÃO E POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOMASSA .....	15
3.1.1	Aproveitamento Das Biomassas Geradas Na Cafeicultura .....	15
3.1.2	Quantidade De Biomassa Disponível Na Região Do Caparaó.....	16
3.2	GERAÇÃO TERMOELÉTRICA.....	17
3.2.1	Combustão.....	17
3.2.2	Ciclo Termodinâmico.....	18
3.2.2.1	Bomba .....	19
3.2.2.2	Caldeira .....	20
3.2.2.3	Turbina .....	20
3.2.2.4	Condensador.....	21
3.2.3	Gerador Elétrico .....	21
3.2.4	Sistema De Transmissão Entre a Turbina e o Gerador .....	22
3.3	VIABILIDADE ECONÔMICA .....	22
3.3.1	Definição De Taxa Mínima De Atratividade .....	22
3.3.2	Definição De Valor Presente Líquido .....	23
3.3.3	Definição De Taxa Interna De Retorno.....	23
3.3.4	Financiamento .....	24
3.3.5	Tarifa De Energia e Procedimentos Junto a Distribuidora.....	25
<b>4.</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>28</b>
4.1	POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOMASSA NA REGIÃO .....	28
4.1.1	Disponibilidade Da Biomassa Na Unidade De Beneficiamento .....	29
4.2	MODELO DO SISTEMA DE TERMOGERAÇÃO .....	29
4.2.1	Ciclo Termodinâmico.....	29
4.2.2	Gerador Elétrico .....	30
4.2.3	Consumo De Combustível.....	31
4.3	APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE VIABILIDADE ECONÔMICA .....	31
4.3.1	Custo De Aquisição Dos Equipamentos .....	31
4.3.2	Financiamento .....	32
4.3.2.1	Juros.....	32
4.3.3	Determinação Da TMA .....	33
4.3.3.1	Receitas .....	33
4.3.3.2	Manutenção E Operação .....	34
4.3.3.3	Custo De Disponibilidade .....	35
4.3.4	Fluxo De Caixa.....	35
4.3.4.1	Lucro Líquido.....	37
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>38</b>
5.1	POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOMASSA .....	38
5.2	SISTEMA DE GERAÇÃO TERMOELÉTRICA .....	39
5.3	VIABILIDADE ECONÔMICA DA MICROGERAÇÃO .....	39
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>42</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>44</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A natureza oferece diversas formas de energia, entre elas a luz solar, utilizada pelo homem desde a pré-história até os dias atuais durante suas atividades diárias. Entretanto, a exploração dos recursos naturais para geração de energia mecânica teve os primeiros registros a cerca de 1000 a.C. no império fenício para locomoção de barcos a vela. Embora haja evidências da energia eólica ter sido descoberta dois mil anos antes, a utilização da energia mecânica na agricultura teve início em torno de 200 a.C. na Pérsia, utilizada em moinhos a vento e rodas de água para moagem de grãos e irrigação (DUTRA, 2001; FARIAS et al., 2011).

Com o aprimoramento da técnica e progresso tecnológico a extração de recursos naturais aumentou significativamente de forma que, a partir da revolução industrial a degradação ambiental se intensificou. O surgimento da energia elétrica revolucionou o panorama energético mundial devido a sua facilidade tanto de transportar quanto de ser transformada em outras formas de energia, aumentando o consumo e agravando a ameaça ambiental. Na segunda metade do século XX, com a distribuição residencial a energia elétrica passou a ser imprescindível na vida humana, desencadeando uma busca constante por novas fontes de energia, principalmente renováveis, como ilustrado na Figura 1, que mostra que a nível global, a partir dos anos 90 as energias renováveis tiveram um aumento sutil mas constante a quantidade de energia produzida, com especial aumento a partir dos anos 2010.

**Figura 1** – Mudança no panorama energético nas últimas décadas.

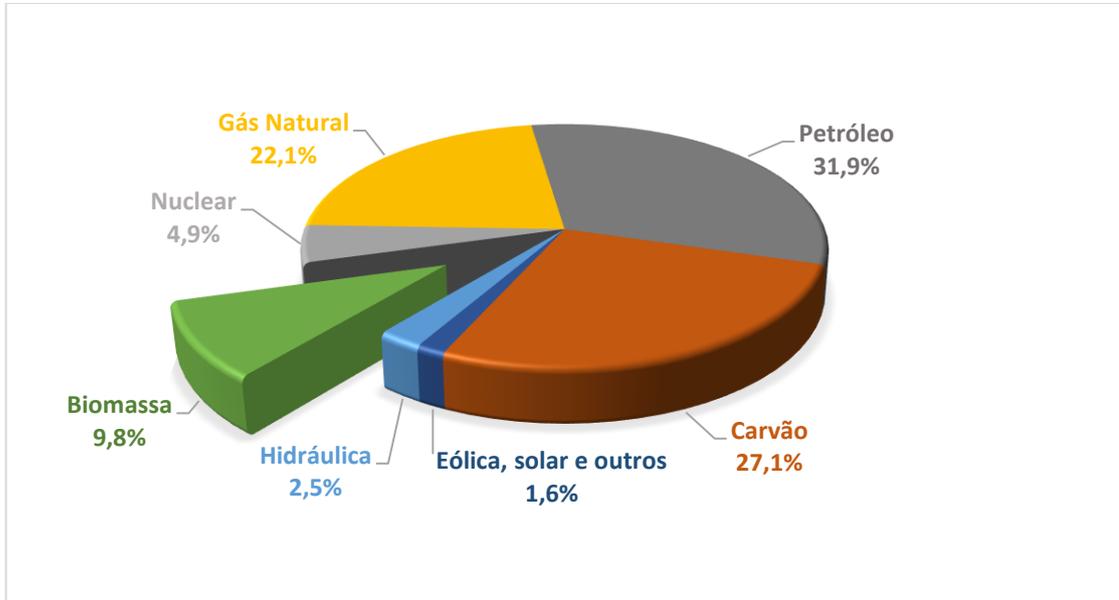


Fonte: Adaptado de IEA, 2018.

As fontes de energia não renováveis como petróleo, carvão e gás natural ainda são as mais exploradas totalizando 82% da matriz energética mundial. As fontes renováveis são

responsáveis por menos de 15%, entre elas a biomassa ocupa 10% conforme apresentado na Figura 2 (IEA, 2018).

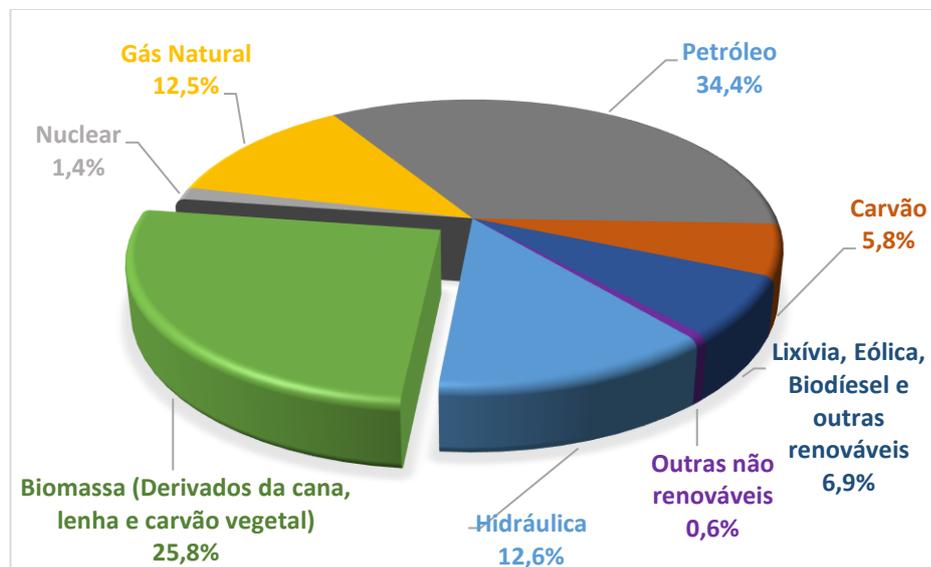
**Figura 2** – Matriz energética mundial.



Fonte: Adaptado de BEN, 2019.

A principal variável na composição da matriz energética são os fatores geográficos da região. No Brasil, mais de 50% da demanda energética primária é suprida por fontes não renováveis, principalmente petróleo e gás natural, o que justifica a necessidade de buscar meios mais interessantes no aspecto ambiental já que o país tem grande potencial eólico, hídrico, solar e de biomassa, sendo esta última a fonte de energia renovável mais consumida, representando 28% da matriz energética primária nacional, como mostra a Figura 3 (BEN, 2019).

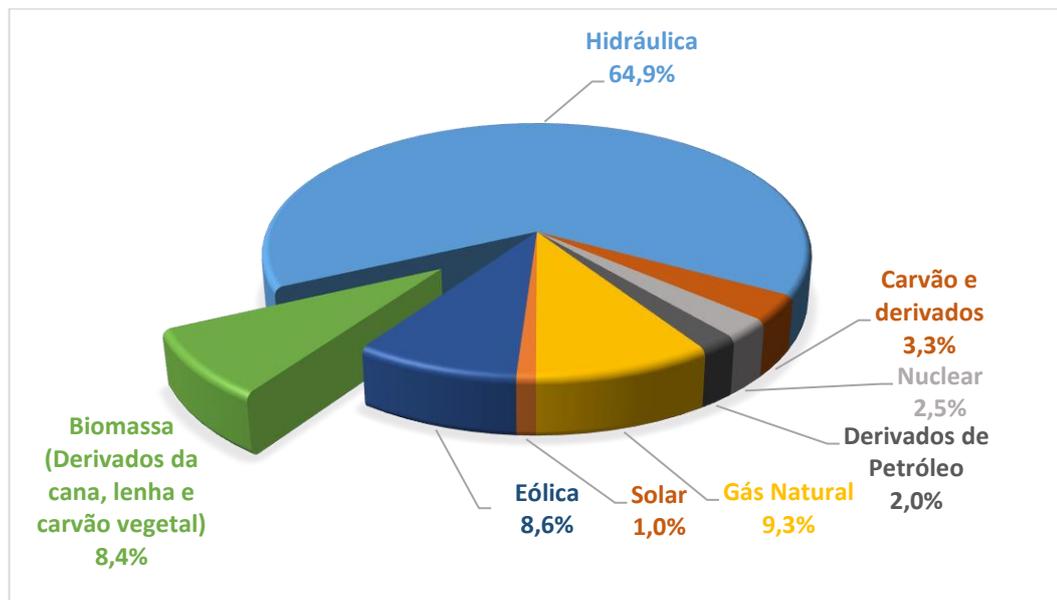
**Figura 3** – Matriz energética brasileira.



**Fonte:** Adaptado de BEN, 2018.

O cenário energético elétrico brasileiro conta com uma fonte diversificada de geração, tendo como principal a geração hidrelétrica, responsável por mais de 60% da energia elétrica gerada no país. A biomassa, embora seja mais consumida como fonte primária, ainda é pouco utilizada para geração de energia elétrica, responsável por apenas 8,4% da geração nacional, como mostra a Figura 4.

**Figura 4** – Matriz elétrica brasileira.



**Fonte:** Adaptado de BEN, 2018.

A parcela de 8,4% referente à biomassa inclui lenha, bagaço de cana, biodiesel, lixívia entre outros, que somaram uma geração de 52.543 GWh em 2019, e restringindo-se à geração termoelétrica, a biomassa é responsável por 33,1% da geração (BEN, 2019).

Apesar de a biomassa já ocupar uma parcela significativa na matriz elétrica brasileira, principalmente quando comparado a matriz elétrica mundial, essa fonte ainda tem muito a ser explorada no Brasil que é um dos maiores produtores de grãos do planeta. Entre os grãos produzidos no país, o café gera uma quantidade significativa de resíduos anualmente, uma biomassa ainda não explorada no âmbito da geração de energia elétrica. A geração no setor agrocafeeiro pode ser implementada na forma de microgeração distribuída, tendo como principal desafio a disponibilidade de equipamentos para termogeração em pequena escala.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

A crescente demanda energética requer soluções a partir de fontes alternativas, que não causam impactos ambientais como as principais utilizadas no planeta atualmente. Apesar do crescimento da demanda, ainda existem locais que vivem a falta de energia elétrica, para esses a geração a partir da biomassa pode ser uma solução. Pequenos produtores de energia elétrica podem obter vantagens econômicas quando ligados ao Sistema nacional do sistema elétrico, a geração pode ser realizada a partir da combustão de resíduos da produção agrícola.

## **2. OBJETIVOS**

Este estudo tem como objetivo dimensionar um sistema de microgeração elétrica, com o foco de verificar a viabilidade da palha de café como combustível para geração de energia elétrica e avaliação da viabilidade econômica da implementação do projeto em instalações agrícolas.

### **2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Para cumprir o objetivo geral, serão realizados os seguintes objetivos específicos:

- Quantificar o potencial de produção de biomassa proveniente da produção e beneficiamento do café na região do Caparaó, Minas Gerais;
- Modelagem do sistema de geração termoelétrica adequado as possibilidades da região;
- Análise de viabilidade econômica da microgeração a partir dos resíduos do café.

### **3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **3.1 MICROGERAÇÃO E POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOMASSA**

Atualmente existem importantes fontes de geração de energia em grande quantidade e em locais estratégicos, como no caso de grandes hidrelétricas, por exemplo, o que torna viável a transmissão dessa energia por toda a rede interligada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico, ONS. A microgeração distribuída, embora geralmente utilizada em locais isolados, tem se tornado uma alternativa também para as regiões atendidas pelo ONS, principalmente para pequenos potenciais que através do sistema de compensação podem injetar energia na rede a fim de obter crédito, o que acontece em pequenas fazendas com potencial de geração através da biomassa, um subproduto do beneficiamento de grãos. Outra vantagem da geração distribuída nessas localidades é o suprimento de energia mediante aos frequentes casos de interrupção no fornecimento por parte da distribuidora (CUNHA, 2019).

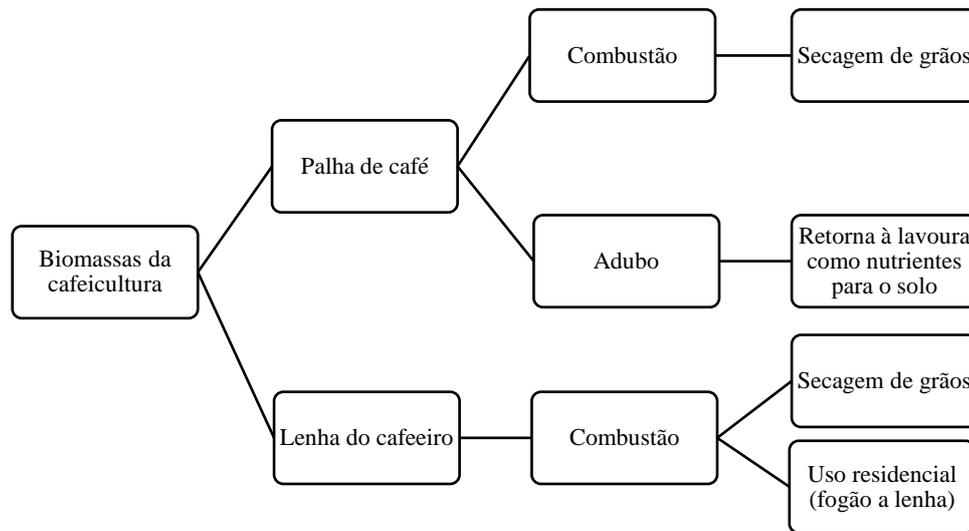
Biomassas como bagaço de cana e resto de madeira são frequentes subprodutos de processos industriais, plantas interessantes para implementação de termoelétricas, podendo oferecer maior valor agregado a esses resíduos (GALANTE, 2015).

É importante destacar que a biomassa é também utilizada como fonte primária de energia, o que justifica essa fonte de energia não ocupar maior parcela na matriz elétrica nacional (RIBEIRO, 2015).

##### **3.1.1 Aproveitamento Das Biomassas Geradas Na Cafeicultura**

Os subprodutos da atividade agrícola que não são utilizados como fonte direta de energia para secagem de grãos, por vezes são simplesmente devolvidos às lavouras como fonte de adubo por não haver uma aplicação mais interessante podendo gerar inclusive custo de descarte. São exemplos a palha de café e de arroz. Uma vantagem da palha de café como combustível sólido é que para melhor qualidade do grão ele deve ser secado juntamente com a palha de forma a diminuir a umidade do grão sem custo adicional. A Figura 5 ilustra os principais destinos dos resíduos da cafeicultura (NUNES et al., 2004).

**Figura 5** – Destino da biomassa da cafeicultura atualmente.



**Fonte:** Autoria própria.

Diferentemente dos resíduos industriais, é menos comum encontrar grandes concentrações de resíduos combustíveis entre os produtores de grãos para geração de energia em grande escala, já que são produzidos de forma linear e demandam maior área de produção, o que acarretaria em custo de transporte da biomassa até o local de geração inviabilizando o processo. Por outro lado, seria interessante a geração em menor escala tornando os agricultores autossuficientes em energia elétrica utilizando-se da biomassa para geração termoelétrica, em pontos estratégicos, próximos às instalações dos consumidores da eletricidade, de forma a diminuir a dependência das distribuidoras (HAKME, 2015).

### 3.1.2 Quantidade De Biomassa Disponível Na Região Do Caparaó

O grão de café seco em ponto de beneficiamento tem cerca de 21% do seu volume convertido em biomassa na forma de casca. Em um sistema de poda a cada 5 anos, um cafeeiro fornece aproximadamente 15 kg de biomassa, e se podado parcialmente, fornece em média 3,75 kg (MAGALHÃES et al., 2008; OLIVEIRA, 2010).

A quantidade de cafeeiro, assim como a biomassa disponível pode ser calculada a partir de dados da Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, conforme apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1** – Dados da produção de café.

Região/UF	Produção Mil sacas em 2018	Produção Mil sacas em 2019	Parque cafeeiro Mil covas em 2018	Parque cafeeiro Mil covas em 2019
MG	32970,1	24235,4	3375558,6	3304547,1
Zona da Mata, Rio Doce e Central	7309,5	5147,4	911903,5	911967,5
Montanhas do ES	4751,0	3002,0	535198,0	519798,0
Região do Caparaó	12406,5	8149,4	1447101,5	1431765,5
Brasil	47483,9	34296,3	5065657,9	4896911,0

Fonte: CONAB, 2019.

## 3.2 GERAÇÃO TERMOELÉTRICA

### 3.2.1 Combustão

O processo de combustão transforma o combustível em calor a partir da ignição forçada ou autoignição na presença de um comburente. Combustível pode ser qualquer substância energética com uma determinada capacidade calorífica que significa o quanto de calor pode ser gerado a partir da sua queima. Para determinar o poder calorífico de um combustível é necessário conhecer sua composição química. Oliveira (2010) classificou os combustíveis sólidos provenientes da produção de café e os qualificou quanto às proporções em fração mássica de carbono ( $C$ ), hidrogênio ( $H$ ), oxigênio ( $O$ ), umidade ( $W$ ), e obteve os resultados conforme Tabela 2.

**Tabela 2** – Composição química e teor de umidade do combustível.

Combustível	C [%]	H [%]	O [%]	W [%]
Lenha de cafeeiro	47,50	6,01	44,86	9,61
Palha de café	47,71	5,93	43,96	9,22

Fonte: Adaptado de OLIVEIRA, 2010.

Segundo Bazzo (1995) a combustão de substâncias no estado sólido é uma reação química com o carbono, hidrogênio e com o enxofre de forma a liberar energia. Neste caso em específico a quantidade de enxofre ( $S$ ) não foi apresentada e será considerada nula. O poder calorífico superior (PCS) e o poder calorífico inferior (PCI) em  $\frac{kJ}{kg}$  podem ser calculados da seguinte forma:

$$PCS = 33900 \cdot C + 141800 \cdot \left( H - \frac{O}{8} \right) + 9200 \cdot S \quad (1)$$

$$PCI = PCS - 2440 \cdot (9 \cdot H - W) \quad (2)$$

Ao se tratar de geração de energia por combustão, é comum selecionar o melhor combustível ou o menos poluente, de acordo com a consciência e as ambições do responsável pelo projeto. É preferível utilizar combustíveis menos poluentes, porém na maioria das vezes essa questão está diretamente relacionada a região geográfica em que a usina está instalada, e utiliza-se o combustível em maior abundância na região. Embora se possa variar o combustível, o procedimento para modelagem da queima não muda muito de um combustível para outro.

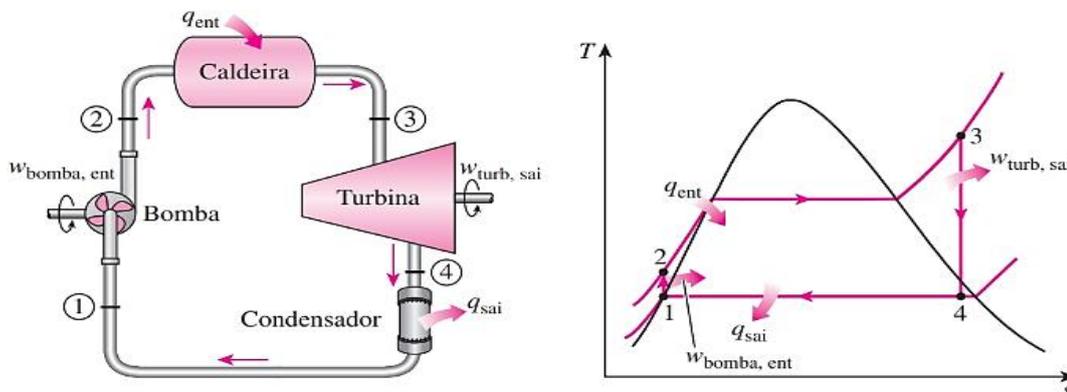
Para modelar a combustão em uma câmara de combustão é necessário conhecer a composição química e a porcentagem de cada elemento do combustível, assim realiza-se a queima com excesso de ar garantindo que todo o combustível seja queimado, porém ao aumentar o fluxo de ar aumenta-se a perda por calor sensível, portanto é necessário um equilíbrio no excesso de ar. A massa estequiométrica de ar ( $m_{AR}^*$ ) pode ser calculada a partir dos dados da Tabela 2 e da equação a seguir (BAZZO, 1995).

$$m_{AR}^* = 138,2 \cdot \left( \frac{C}{32} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right) \quad (3)$$

### 3.2.2 Ciclo Termodinâmico

Segundo Çengel (2013) o ciclo a vapor ideal é o ciclo Rankine, que em sua configuração simples conta com 4 estágios básicos, compressão isentrópica na bomba, fornecimento de calor a uma pressão constante na caldeira, expansão isentrópica na turbina e rejeição de calor a pressão constante no condensador, como ilustrado na Figura 6.

**Figura 6** – Ciclo Rankine simples ideal.

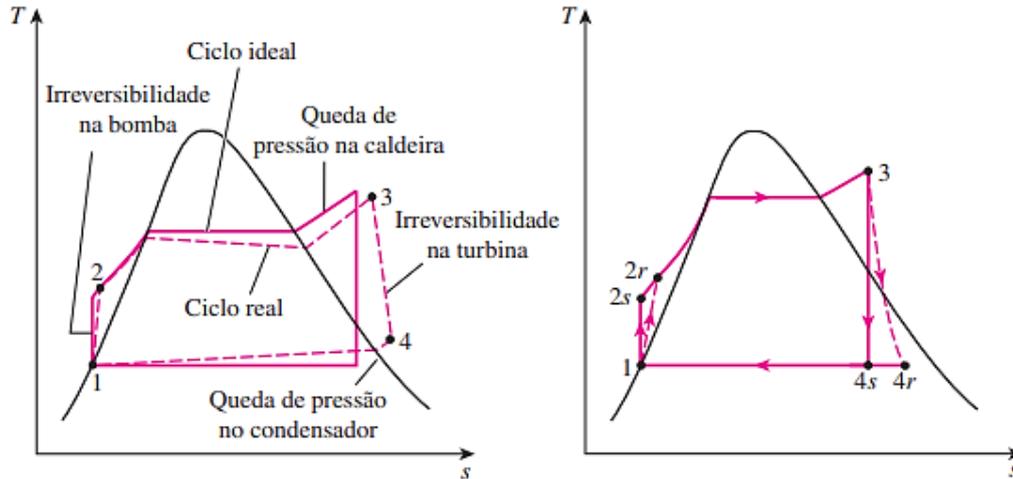


Fonte: ÇENGEL, 2013.

Como se trata de um estudo de viabilidade é preferível utilizar como modelo uma planta real, a Figura 7 representa as diferenças entre os ciclos Rankine ideal e real. Batista (2009)

testou experimentalmente uma planta que opera no ciclo Rankine simples, a fim de montar um sistema de microgeração termoelétrica para abastecimento de comunidades isoladas.

**Figura 7** – Comparação entre os diagramas T-S dos ciclos Rankine ideal e real.



Fonte: ÇENGEL, 2013.

A vazão mássica do fluido de trabalho do ciclo Rankine ( $\dot{m}_{fl}$ ) foi de  $220 \text{ kg/h}$ , e os dados de pressão ( $P$ ) e temperatura ( $T$ ) necessários para os cálculos do ciclo são apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3** – Dados do ciclo Rankine.

Estado	T [°C]	P [kPa]
1	45	9,6
2	-	-
3	172	830
4	-	9,6

Fonte: Adaptado de BATISTA, 2009.

### 3.2.2.1 Bomba

A bomba é responsável por elevar a pressão do fluido antes de entrar na caldeira. O modelo de Batista (2009) utiliza uma pressão de trabalho de 830 kPa. Para um ciclo Rankine real, a eficiência isentrópica da bomba ( $\eta_b$ ) deve ser menor que 100%, pois não existe uma bomba perfeita, Galante (2019) adota como hipótese  $\eta_b = 0,75$ .

### 3.2.2.2 Caldeira

O calor que entra na caldeira ( $\dot{Q}_{ent}$ ) é o calor efetivamente transferido para o fluido de trabalho do ciclo e é gerado na combustão. Batista (2009) utiliza uma eficiência da caldeira aproximada de 80%.

Bazzo, (1995) define a eficiência de caldeiras ( $\eta_c$ ) levando em consideração  $\dot{m}_{fl}$ , o PCI do combustível, a vazão mássica de combustível ( $\dot{m}_{cb}$ ) e a diferença das entalpias na entrada ( $h_2$ ) e saída da caldeira ( $h_3$ ), conforme as equações a seguir:

$$\dot{Q}_{ent} = \dot{m}_{fl} \cdot (h_3 - h_2) \quad (4)$$

$$\eta_c = \frac{\dot{Q}_{ent}}{\dot{m}_{cb} \cdot PCI} \cdot 100\% \quad (5)$$

### 3.2.2.3 Turbina

A turbina é responsável por converter a energia cinética do vapor em movimento rotativo, a transformação se dá pela passagem do vapor superaquecido pelos discos da turbina de forma que na saída da turbina o vapor esteja na condição de vapor saturado, ou seja, contenha energia mínima para que não seja condensado pois a presença de gotículas de água causa erosão e pode danificar os discos da turbina. Considera-se tolerável um título de pelo menos 90% na saída da turbina (ÇENGEL, 2013).

Batista (2009) utilizou os modelos de turbina Tesla e Pelton do qual fez modificações na turbina Tesla utilizando apenas discos “tipo Pelton” e chamou de turbina “Tesla-Pelton”. Testes realizados por Rice (1965) mostram que a eficiência de turbinas Tesla variam entre 17% e 23% confirmando o resultado experimental de Batista (2009) de  $\eta_t = 0,18$ . Um estudo realizado por Lampart (2009) mostra alguns resultados de experimentos com eficiência da turbina Tesla de 21% para potências de 50 kW e podendo chegar a 32% para potência de 3kW destacando a melhor eficiência da turbina operando em baixas potências. Pontos positivos desse modelo de turbina é o fato de não possuir partes móveis além do eixo, que garante menor custo de produção além de manutenção facilitada (BATISTA, 2009; RICE, 1991).

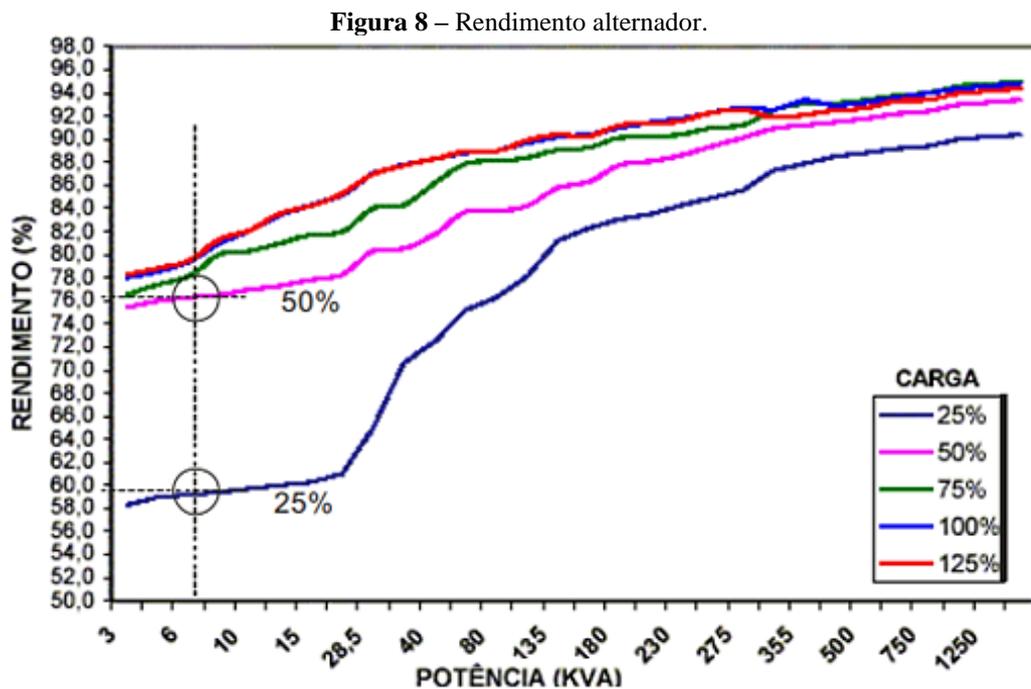
### 3.2.2.4 Condensador

Após sair da turbina, parte do vapor já se condensa e na sequência a mistura vai para o condensador onde acontece a condensação completa para que o fluido possa ser bombeado novamente para a caldeira. A condensação ocorre pela troca de calor do fluido do ciclo com algum fluido no meio ambiente, geralmente utiliza-se grandes reservatórios de água, lagos ou rios. Na ausência de água, a troca de calor também pode ser feita com o ar, como no resfriamento de motores de veículos (ÇENGEL, 2013).

Batista (2009) utilizou dois modelos de resfriamento, o primeiro, um reservatório para o próprio fluido do ciclo, aberto à pressão ambiente contendo 60 L de água, o segundo, um condensador fechado com pressão abaixo da pressão atmosférica, sendo que esse proporciona melhor eficiência para o ciclo.

### 3.2.3 Gerador Elétrico

A eficiência considerada para o gerador  $\eta_{ger}$  é baseada em valores obtidos experimentalmente, utilizando a razão entre a potência gerada e a potência máxima do gerador. A eficiência de um gerador de 7,5 kVA operando abaixo de sua capacidade máxima, a 5,62 kVA é de 75%, como representado na Figura 8 (BATISTA, 2009).



Fonte: Adaptado de LORA, 2004.

### 3.2.4 Sistema De Transmissão Entre a Turbina e o Gerador

Para a turbina “Tesla Pelton” a melhor eficiência e potência são obtidas quando a rotação da turbina atinge 23500 *rpm* porém a rotação na entrada do gerador deve ser menor e portanto há necessidade de um sistema de redução por polias e correia. Batista (2009) considera a eficiência de transmissão ( $\eta_{tr}$ ) de 90%. Outra opção é o uso da energia mecânica de forma direta, sem transformar em energia elétrica, no qual o movimento da turbina é transmitido às máquinas rotativas com as necessárias reduções de velocidade, essa configuração dispensaria o investimento do gerador elétrico, e as perdas por transmissão poderiam ser compensadas pelas supostas perdas do gerador.

## 3.3 VIABILIDADE ECONÔMICA

Um investimento pode ser feito a partir de capital próprio, mediante a empréstimo, ou de forma conjugada. Em situações normais, com taxas de juros condizentes com as disponíveis no mercado financeiro atual, um investimento mediante a empréstimo pode ser mais facilmente inviabilizado quando comparado a investimentos partindo de capital próprio, entretanto quando se trata de áreas contempladas por incentivos do governo com taxas de juros abaixo do mercado, o empréstimo pode se tornar uma boa opção de investimento (BODIE, 2014).

As ferramentas de análises de investimento auxiliam na correta tomada de decisão quando se trata de um novo empreendimento, possibilitando avaliar um investimento ao longo do tempo de forma a identificar possíveis riscos e levando em consideração outras possibilidades de investimentos mais atrativas, chamadas de custo de oportunidade. A análise de investimento em equipamentos para a micro geração de energia elétrica no setor agrícola em questão será feita a partir das ferramentas payback, payback descontado, taxa interna de retorno (TIR) e valor presente líquido (VPL) mediante a uma taxa mínima de atratividade (TMA) (SVIECH, 2013).

### 3.3.1 Definição De Taxa Mínima De Atratividade

A taxa mínima de atratividade (TMA) pode ser entendida como a taxa de juros disponível para a aplicação do capital como um custo de oportunidade e serve de base para aplicação das técnicas de análise de investimento, ou seja, a TMA equivale à rentabilidades de

outras alternativas de investimento disponíveis, portanto o investimento escolhido deve ter uma rentabilidade maior, ou pelo menos equivalente a TMA (SVIECH, 2013).

### 3.3.2 Definição De Valor Presente Líquido

Valor presente líquido (VPL), calculado pela equação apresentada abaixo, é uma previsão de retorno positivo ou negativo do investimento analisado o somatório do fluxo de caixa futuro subtraído dos juros definidos pela TMA em um intervalo de tempo (MARQUEZAN, 2006).

$$VPL_{(i)} = \sum_{j=0}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} - I_0 \quad (6)$$

Onde:

- $i$  é a taxa interna de retorno;
- $j$  é o período de tempo;
- $FC_j$  é o valor de entrada ou saída do caixa em cada período de tempo;
- $VPL_{(i)}$  é o valor presente líquido descontado a uma taxa  $i$ ;
- $n$  é o número de períodos do fluxo;
- $I_0$  é o investimento inicial.

Sendo que:

- $VPL > 0$ : O investimento é viável;
- $VPL = 0$ : O investimento é equivalente à TMA;
- $VPL < 0$ : O investimento não é viável.

### 3.3.3 Definição De Taxa Interna De Retorno

A taxa interna de retorno (TIR), calculada pela equação abaixo, corresponde à taxa de desconto que zera o valor presente líquido de um projeto (URTADO, 2009).

$$FC_0 = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} \quad (7)$$

Onde:

- $i$  é a taxa interna de retorno;
- $j$  é o período de tempo;
- $FC_j$  é o valor de entrada ou saída do caixa em cada período de tempo;
- $FC_0$  é o valor do fluxo de caixa no momento zero (investimento).

Sendo que:

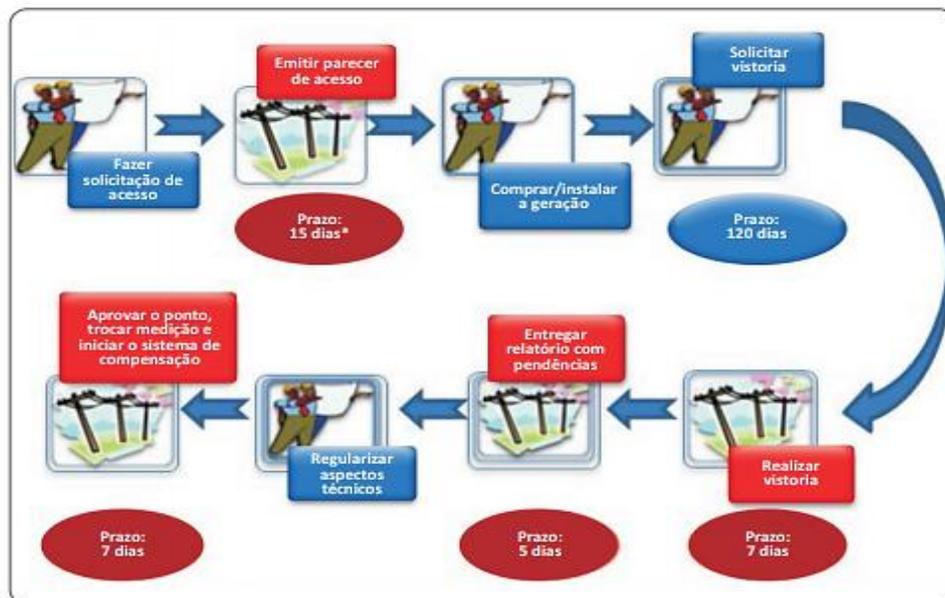
- $TIR > TMA$ : O investimento é viável;
- $TIR = TMA$ : O investimento é equivalente à TMA;
- $TIR < TMA$ : O investimento não é viável.

### 3.3.4 Financiamento

O Pronaf Bioeconomia é uma modalidade de financiamento do BNDES que contempla agricultores, que apresentem Declaração de Aptidão ao PRONAF (DAP) válida, ou seja, que não tenham pendências ou restrições em seus nomes. O procedimento e etapa de acesso é ilustrado na Figura 9 – Procedimento e etapa de acesso(BNDES, 2021).

O agricultor deve elaborar uma proposta com projeto de implantação que deve se enquadrar em uma das áreas ofertadas (Tecnologias de energia renovável, como o uso da energia solar, da biomassa, eólica, miniusinas de biocombustíveis e a substituição de tecnologia de combustível fóssil por renovável nos equipamentos e máquinas agrícolas (BNDES, 2021).

**Figura 9** – Procedimento e etapa de acesso.



Fonte: BNDES, 2021.

O financiamento mediante ao BNDES conta com juros de até 2,75% a.a. voltado para tecnologias de energia renovável com 100% dos produtos financiáveis de valor máximo financiável de R\$ 165.0000,00 por ano agrícola e com prazos máximo de carência e financiamento de 5 e 10 anos respectivamente.

As garantias do financiamento são de livre negociação entre a instituição financeira credenciada e beneficiário do financiamento, desde que sejam cumpridas as normas pertinentes ao Conselho Monetário Nacional (BNDES, 2021).

### 3.3.5 Tarifa De Energia e Procedimentos Junto a Distribuidora

Em concordância com a Resolução Normativa nº 482/2012 que se refere ao Sistema de Compensação de Energia Elétrica, a energia gerada em excedente pelo consumidor pode ser adicionada a rede de distribuição, atuando como uma bateria, acumulando a energia excedente, conforme ilustrado na Figura 10.

Caso haja um excedente de energia o consumidor terá direito a um crédito em (kWh), este poderá ser utilizado para compensar o consumo dos meses seguintes ou outro posto tarifário dentro do prazo de 60 meses. O crédito poderá ainda ser consumido em outro ponto de consumo desde que as duas unidades pertençam a mesma concessão, e que seja caracterizada como autoconsumo remoto, geração compartilhada ou condomínios, como definido na literatura a seguir (ANEELa, 2016).

- Geração compartilhada: caracterizada pela reunião de consumidores, dentro da mesma área de concessão ou permissão, por meio de consórcio ou cooperativa, composta por pessoa física ou jurídica, que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras nas quais a energia excedente será compensada;
- Autoconsumo remoto: caracterizado por unidades consumidoras de titularidade de uma mesma Pessoa Jurídica, incluídas matriz e filial, ou Pessoa Física que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras, dentro da mesma área de concessão ou permissão, nas quais a energia excedente será compensada;
- Empreendimento com múltiplas unidades consumidoras (condomínios): caracterizado pela utilização da energia elétrica de forma independente, no qual cada fração com uso individualizado constitua uma unidade consumidora e as instalações para atendimento das áreas de uso comum constituam uma unidade consumidora distinta, de responsabilidade do condomínio, da administração ou do proprietário do empreendimento, com microgeração ou minigeração distribuída, e desde que as unidades consumidoras estejam localizadas em uma mesma propriedade ou em propriedades contíguas, sendo vedada a utilização de vias públicas, de passagem aérea ou subterrânea e de propriedades de terceiros não integrantes do empreendimento (ANEELa, 2016).

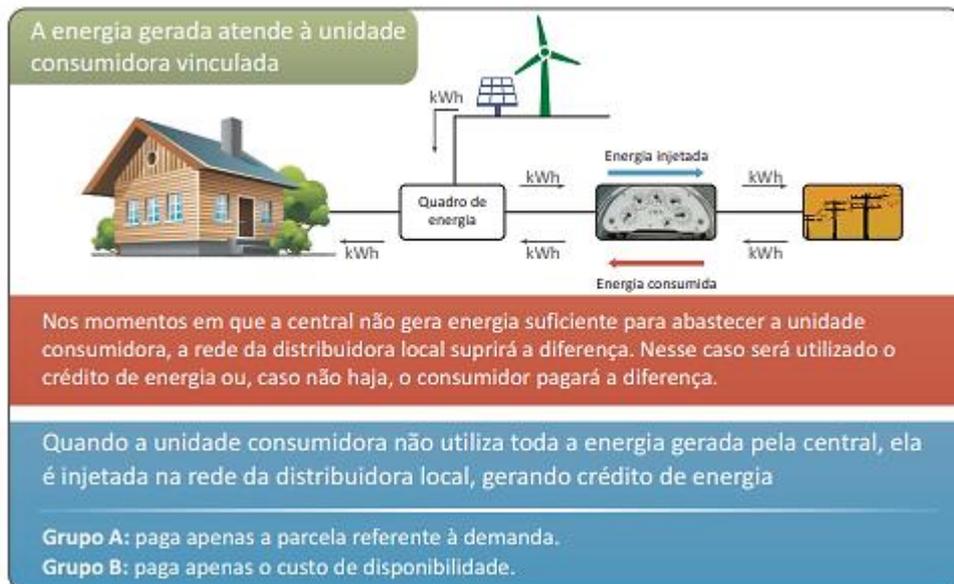
Nos casos em que o consumidor seja autossuficiente, ou seja, aquele que produz toda a energia que consome ou um valor excedente, haverá um custo mínimo de disponibilidade em kWh conforme a disponibilidade local, conforme Tabela 4 (ANEELa, 2016).

**Tabela 4** – Custo mínimo de disponibilidade.

Nº de fases	Custo equivalente
Monofásico	30 kWh
Bifásico	50 kWh
Trifásico	100 kWh

**Fonte:** Adaptado de ANEELa, 2016.

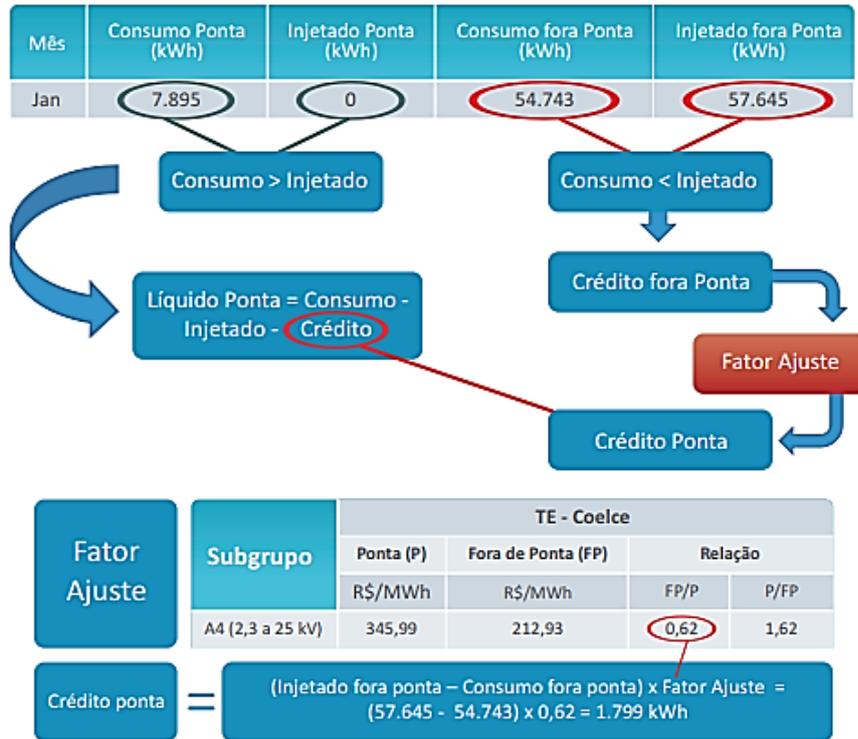
**Figura 10** – Sistema de compensação de energia elétrica.



**Fonte:** ANEELa, 2016.

A energia consumida em horário de ponta é corrigida por um fator de ajuste que varia conforme a diferença entre as tarifas de horário de ponta ( $P$ ), tarifa intermediária ( $I$ ) e tarifa de horário fora ponta ( $FP$ ), como apresentado na Figura 11.

**Figura 11** – Exemplo de fator de ajuste.



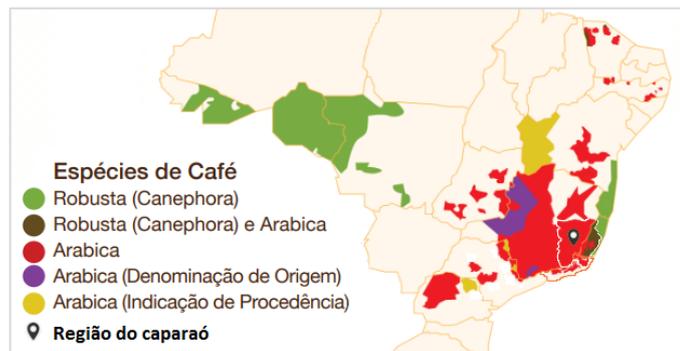
Fonte: ANEELa, 2016.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOMASSA NA REGIÃO

Este estudo de fornecimento de biomassa e geração de eletricidade tem como foco a Região do Caparaó. Para efeito desse estudo, será entendido como Região do Caparaó as seguintes regiões: Zona da mata, Vale do Rio Doce e central de Minas Gerais e montanhas do Espírito Santo, como indicado na Figura 12. A produção de café do norte do estado do Rio de Janeiro, onde se encontra a unidade de beneficiamento estudada, é escoada pelos estados de Minas Gerais e Espírito Santo e acaba contribuindo estatisticamente para estes estados.

**Figura 12** – Regiões produtoras de café no Brasil.



**Fonte:** Adaptado de BSCA, 2018.

Segundo CONAB (2019) a média de produção dos dois últimos anos na região do Caparaó é de 10.104.900 sacas beneficiadas ( $SC_b$ ) de café de 60 kg. Para estimativa da lenha será considerado apenas cafeeiro em produção, com uma média bienal de 1.439.433,5 mil pés de café ( $N_{pés}$ ). O potencial energético proveniente da palha ( $E_{palha}$ ) e do cafeeiro ( $E_{cafeeiro}$ ), Equações (10) e (11) podem ser calculados a partir da Tabela 1 e das respectivas massas de palha de café ( $m_{palha}$ ) e de lenha de cafeeiro ( $m_{cafeeiro}$ ), Equações a seguir.

$$m_{palha} = \frac{21 \cdot 60 \cdot 1000 \cdot SC_b}{79} \quad (8)$$

$$m_{cafeeiro} = \frac{15 \cdot 1000 \cdot N_{pés}}{5} \quad (9)$$

$$E_{palha} = PCS_{palha} \cdot m_{palha} \quad (10)$$

$$E_{cafeeiro} = PCS_{cafeeiro} \cdot m_{cafeeiro} \quad (11)$$

O PCS e o PCI da palha de café e do cafeeiro são calculados a partir da Equação (1) e da Equação (2) respectivamente.

#### 4.1.1 Disponibilidade Da Biomassa Na Unidade De Beneficiamento

O estudo considera uma propriedade rural denominada “Alpha” situada na região do Caparaó que compreende a quantidade de aproximadamente 10 vezes a produção média dos produtores locais, o que implicaria em uma associação de 10 produtores com uma produção média de  $SC_b = 5000,00$ , sendo que essa média deve ser calculada considerando a produção bienal, ou seja, um ano de baixa e outro de alta produção. Desta forma, a massa de combustível de palha de café local disponível ( $m_{cb,palha}$ ) por ano a massa anual de combustível de cafeeiro ( $m_{cb,cafeeiro}$ ) local disponível podem ser calculadas pelas equações apresentadas a seguir, onde o valor 140 é o número médio de cafeeiros necessários para produzir uma saca beneficiada segundo os dados da Tabela 1 e o valor de 3,5 é a massa de lenha gerada por cada cafeeiro em um sistema de poda parcial a cada 5 anos.

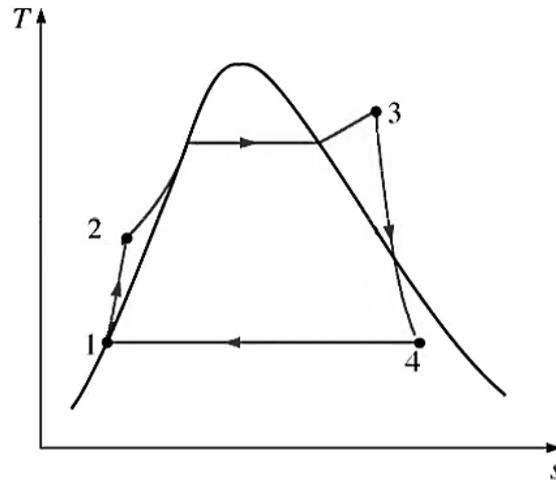
$$m_{cb,palha} = \frac{21 \cdot 60 \cdot SC_b}{79} \quad (12)$$

$$m_{cb,cafeeiro} = \frac{140 \cdot 3,5 \cdot SC_b}{5} \quad (13)$$

## 4.2 MODELO DO SISTEMA DE TERMOGERAÇÃO

### 4.2.1 Ciclo Termodinâmico

Utilizando o modelo de cálculo do ciclo Rankine real de Çengel (2013), os dados de propriedades termodinâmicas da água da biblioteca CoolProp para programação em linguagem Python e os dados de entrada apresentados na Tabela 5 representados na Figura 13, chega se a a potência líquida entregue a turbina ( $\dot{W}_{turb}$ ).

**Figura 13** – Gráfico do ciclo Rankine.

Fonte: Adaptado de Çengel, 2013.

**Tabela 5** – Dados utilizados para os cálculos de geração de potência.

Variável	Valor	Unidade
T1	45	°C
T3	172	°C
P1	9,6	KPa
P3	830	kPa
$\dot{m}_{fl}$	220	Kg/h
$\eta_c$	80	%
$\eta_b$	75	%
$\eta_t$	18	%
$\eta_g$	77	%
$\eta_{tr}$	90	%

Fonte: BATISTA, 2009; GALANTE, 2019.

#### 4.2.2 Gerador Elétrico

Estima-se inicialmente uma eficiência esperada para o alternador de  $\eta_{ger} = 0,75$  para calcular a potência do gerador aproximada em kVA dada pela equação a seguir (14), onde o valor de 1,25 é o fator de conversão de kW para kVA (BATISTA, 2009).

$$\dot{W}_{ger} = 1,25 \cdot \dot{W}_{turb} \cdot \eta_{ger} \cdot \eta_{tr} \quad (14)$$

O gerador elétrico utilizado é de 7,5 kVA, e a razão de potência é  $\frac{6,15}{7,5} = 0,82$  identificado na Figura 8 entre as linhas de cor verde (75%) e azul (100%), define-se então a eficiência do gerador como 77%. Para calcular definitivamente a potência do gerador, deve ser feito o cálculo usando a Equação (14) para a nova eficiência definida.

### 4.2.3 Consumo De Combustível

Para obter a potência  $\dot{W}_{turb}$  é necessário uma vazão de combustível  $\dot{m}_{cb}$ , e se associada ao montante de combustível disponível  $m_{cb}$ , pode ser determinado o tempo diário de operação.

A vazão mássica de palha de café consumida é calculada pela equação:

$$\dot{m}_{cb,palha} = \frac{3600 \cdot Q_{ent}}{\eta_c \cdot PCI} \quad (15)$$

A vazão mássica de lenha de cafeeiro consumida é calculada pela equação:

$$\dot{m}_{cb,cafeeiro} = \frac{3600 \cdot Q_{ent}}{\eta_c \cdot PCI} \quad (16)$$

## 4.3 APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE VIABILIDADE ECONÔMICA

### 4.3.1 Custo De Aquisição Dos Equipamentos

Equipamentos para microgeração termoelétrica ainda são difíceis de serem encontrados no mercado brasileiro, porém, o aumento da demanda energética aliada a incentivos do governo para projetos sustentáveis podem mudar esse cenário. Os equipamentos utilizados por Batista (2009) para operação da planta foram orçados em R\$ 35.000,00 já instalados. Os valores podem ser traduzidos em valores atuais por meio da calculadora do cidadão, ferramenta do Banco Central do Brasil para correção de valores por índices de preços. O índice geral de preços ao mercado IGP-M é um indicador utilizado para corrigir variações de preços ao longo do tempo. Os valores corrigidos de acordo com o índice IGP-M, são apresentados na Figura 14.

**Figura 14** – Correção de valores por índice de preços.

<b>Dados básicos da correção pelo IGP-M (FGV)</b>	
<b>Dados informados</b>	
Data inicial	03/2010
Data final	03/2021
Valor nominal	R\$ 35.000,00 ( REAL )
<b>Dados calculados</b>	
Índice de correção no período	2,45712130
Valor percentual correspondente	145,712130 %
Valor corrigido na data final	R\$ 85.999,25 ( REAL )

**Fonte:** BCB, 2021.

Os valores discretizados para cada equipamento estão apresentados na Tabela 6, a linha preenchida por (---) significa que não foi realizado o orçamento do condensador no estudo de Batista (2009). O valor de 1.265,95\* se refere ao orçamento real do condensador em 2021 e foi adicionado ao valor total do capital a ser investido corrigido pelo índice IGP-M indicado na Figura 14.

**Tabela 6** – Orçamento dos componentes corrigidos pelo IGP-M.

<b>Equipamento</b>	<b>Preço original [R\$] 2010</b>	<b>Corrigido IGP-M [R\$] 2021</b>
Caldeira	20.000,00	49.142,43
Turbina	10.000,00	24.571,21
Condensador	-----	1.265,95*
Gerador elétrico	2.500,00	6.142,80
Instalações	2.500,00	6.142,80
<b>Total</b>	<b>35.000,00</b>	<b>87.265,19</b>

**Fonte:** Adaptado de BATISTA, 2009.

A depreciação aproximada para equipamentos mecânicos é de 10% ao ano considerando uma vida útil de 10 anos, dessa forma o valor residual dos equipamentos após 10 anos deve ser considerado apenas como valor de sucata (FEDERAL, 1998; WAGNER, 2000).

#### 4.3.2 Financiamento

O investimento pode ser feito por capital próprio ou mediante a financiamento de 100% do valor do capital na forma de empréstimo bancário via Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura (PRONAF) Bioeconomia, neste caso havendo a necessidade de pagamentos de juros. Sabe-se que os juros de 2,75% a.a. sendo totalmente liquidada após o pagamento de 120 prestações, através do Sistema de Amortização Constante (SAC). O financiamento para 10 anos foi simulado utilizando um sistema SAC com auxílio de uma planilha Microsoft Excel automatizada.

##### 4.3.2.1 Juros

A baixa taxa de juros do financiamento é em função do incentivo do governo à projetos que contribuem para uma matriz energética mais limpa, nessas condições pode ser viabilizado o pagamento de juros pressupondo que sejam abatidos no pagamento mensal pelo fornecimento de energia elétrica à distribuidora. Os juros anuais presentes no fluxo de caixa foram obtidos a

partir da soma simples dos juros mensais referentes a 2,75% a.a. calculados em planilha Microsoft Excel.

### 4.3.3 Determinação Da TMA

A taxa mínima de atratividade proposta foi a oferecida pelo Tesouro Direto, programa da Secretaria Nacional do Brasil que democratiza a compra e venda de títulos públicos federais por pessoas físicas, uma opção atraente entre os investimentos cobertos pelo Fundo Garantidor de Créditos (FGC). A taxa de juros de 9,27% a.a. utilizada foi obtida por simulação de aplicação no Tesouro Direto prefixado para 10 anos, tempo estimado para a vida útil do equipamento.

#### 4.3.3.1 Receitas

A principal receita é o crédito ( $R_{crd}$ ) concedido em kWh, ou seja, o valor evitado a ser pago para a distribuidora, calculado a partir da  $\dot{W}_{ger}$ , do preço médio do kWh anual na modalidade rural ( $P_R$ ) e da quantidade de horas de operação do equipamento em horário de pico ( $h_P$ ), horário intermediário ( $h_i$ ) e fora do horário de pico ( $h_{FP}$ ) multiplicado pelo fator de ajuste ( $P/FP$ ) apresentado na Tabela 7 e ilustrado na Figura 11.

**Tabela 7** – Preço por posto tarifários de energia elétrica.

Postos Tarifários	Intermediário 1 ( $I_1$ )	Horário Ponta (P)	Intermediário 2 ( $I_2$ )	Horário Fora Ponta (FP)
Duração [h]	16:00 – 18:00	18:00 – 21:00	21:00 – 22:00	22:00 – 16:00
Preço [kWh]	0,880	1,333	0,880	0,571

**Fonte:** Adaptado de ANEELd.

O horário de pico corresponde às 3 horas consecutivas de maior consumo diário e os horários de tarifa intermediária é a soma dos períodos de transição antes ( $I_1$ ) e depois ( $I_2$ ) do horário de pico e dura em média 3 h. Os demais horários compreendem em período fora pico. Tais diferenças entre postos tarifários são válidas apenas para dias úteis, ou seja, entre segunda e sexta-feira excluindo-se os 11 feriados nacionais, para efeito de cálculo será considerado uma média de 21 dias úteis por mês. Embora o fator de ajuste não seja fixo, é desejável que o consumo seja maior em horário fora pico e que a produção aconteça principalmente no horário de pico, conforme apresentado na Figura 11. O fator de ajuste é um dos fatores fundamentais para definir a viabilidade do empreendimento, seu valor médio referente ao primeiro semestre

de 2021 disponibilizado pela ANEEL é de 2,33. Desta forma, a receita anual referente ao crédito em energia pode ser calculada conforme a equação:

$$R_{cred} = 12 \cdot \left( 21 \cdot \left( \frac{P \cdot h_p + I \cdot h_i}{FP} + h_{FP} \right) + 9 \cdot (h_{FP} + h_p + h_i) \right) \cdot P_R \cdot \dot{W}_{ger} \quad (17)$$

Outra receita também considerada é o frete do combustível que se comporta de forma distinta e deve ser analisado de forma mais cuidadosa. Em razão do processo de beneficiamento a palha de café já é disponibilizada na própria unidade de beneficiamento de grãos, e se esse combustível não for utilizado como fonte de energia na combustão direta para a secagem de grãos o mesmo deve ser destinado de volta as lavouras proporcionando um custo anual de descarte ( $C_{desc}$ ), ou seja, a combustão da palha de café poupa o custo com o frete e  $C_{desc}$  e passa a ser considerado uma receita, entretanto, como a palha é gerada apenas no período de safra, em torno de 5 meses, os demais 7 meses a planta deve operar com lenha de cafeeiro que teria também um custo de frete equivalente ao da palha se utilizados nas mesmas proporções, porém agora no sentido contrário, da lavoura para a unidade de beneficiamento.

Como o período de uso de lenha de cafeeiro é maior, o custo de frete entrará como despesas e pode ser calculado a partir da diferença entre massa de palha e de cafeeiro já calculadas anteriormente multiplicado pelas soma das horas diárias de atividade em horário de pico ( $h_p$ ) e em horário fora pico ( $h_{FP}$ ) também já definidas e ainda multiplicado pelo preço das horas de trabalho do veículo de transporte e do operador. Para efeito de cálculo considera-se que a planta opera todos os 30 dias do mês e que o trator é capaz de transportar 1000 kg a cada 1 h. O preço da hora do trator ( $P_{tr}$ ) e do operador ( $P_{op}$ ), baseado no salário mensal de R\$1.800,00, são apresentados na Tabela 8. Dessa forma o custo anual de descarte ou custo de frete pode ser calculado através da equação:

$$C_{desc} = (7 \cdot \dot{m}_{cb,cafeeiro} - 5 \cdot \dot{m}_{cb,palha}) \cdot \frac{30}{1000} \cdot (h_p + h_{FP} + h_i) \cdot (P_{tr} + P_{op}) \quad (18)$$

#### 4.3.3.2 Manutenção e Operação

A manutenção dos equipamentos utilizados para beneficiamento de grãos na agricultura cafeeira de médio porte, 5000 sacas por ano, geralmente é executada pelos próprios operadores que adquirem essas habilidades ao longo dos anos de prática ou através de outros

operadores mais experientes. O custo de manutenção mensal para equipamentos mecânicos e máquinas diversas é de aproximadamente 0,765% o custo de aquisição (WAGNER, 2000).

Galante (2019) adotou como hipótese para uma planta de microgeração de capacidade semelhante, um custo de manutenção de 5% do valor do capital investido. Desta forma, associando os valores citados pelas duas literaturas, será utilizado um valor inicial de 5% no primeiro ano quando o equipamento estiver no início de sua vida útil e com crescimento proporcional chegando a 9,8% no décimo ano considerado o fim da vida útil, desta forma  $0,05 \leq n \leq 0,098$  e o custo anual de manutenção ( $C_m$ ) pode ser calculado pela equação:

$$C_m = Ci \cdot n \quad (19)$$

O operador responsável por abastecer a fornalha de combustível também opera outros equipamentos da planta de beneficiamento. O tempo destinado pelo operador a unidade de geração de energia pode ser estimado baseado no consumo da caldeira em massa de combustível, aproximadamente 45 kg/h. Se o operador leva 5 minutos para transportar 45 kg de combustível a cada hora, o custo anual de operação pode ser calculado pela equação:

$$C_{op} = 30 \cdot 12 \cdot \frac{5}{60} \cdot P_{op} \cdot (h_p + h_i + h_{FP}) \quad (20)$$

#### 4.3.3.3 Custo De Disponibilidade

O custo de disponibilidade ( $C_{disp}$ ) é um custo destinado a manutenção das linhas de transmissão e é pago a empresa responsável pela concessão na região. O custo varia conforme o número de fases disponibilizado na unidade consumidora, Tabela 4. Para um sistema bifásico como na região de estudo, o custo mensal corresponde a 30 kwh e o custo anual pode ser calculado pela equação:

$$C_{disp} = 30 \cdot 12 \cdot P_R \quad (21)$$

#### 4.3.4 Fluxo De Caixa

O fluxo de caixa é primordial para uma análise segura e que sirva para reais tomadas de decisões de investimento, quanto mais aspectos forem abordados e quanto mais ampla a

análise, mais confiável será o resultado. Nessa etapa devem ser considerados todos os detalhes que possam impactar no possível lucro líquido do empreendimento, apresentados na Tabela 8.

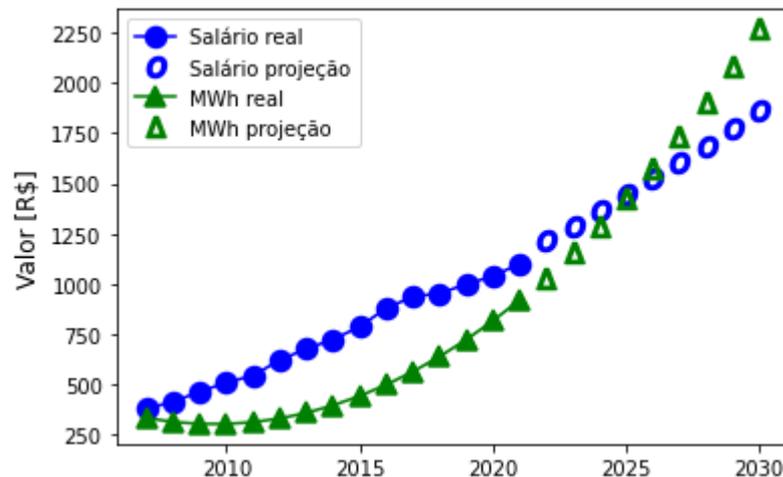
**Tabela 8** – Parâmetros de entrada para o fluxo de caixa.

Parâmetro	Sigla	Valor	Unidade
Período uso de palha	--	5	Meses
Período uso de lenha	--	7	Meses
Tarifa rural 1º ano (Atual)	$PR$	0,937	R\$/kWh
Posto tarifário de pico	$P$	1,33	R\$/kWh
Posto tarifário intermediário	$I$	0,880	R\$/kWh
Posto tarifário fora pico	$FP$	0,571	R\$/kWh
Operação tarifa de pico	$h_p$	3	h
Operação tarifa fora pico	$h_{FP}$	5,7	h
Operação tarifa intermediária	$h_i$	3	h
Preço da hora do operador	$P_{op}$	7,5	R\$
Preço da hora/viagem trator	$P_{tr}$	30	R\$

**Fonte:** Autoria própria.

Com objetivo de tornar a análise mais precisa foram inseridos reajustes para o fornecimento de energia elétrica e transporte da biomassa dos anos subsequentes estimados por extrapolação polinomial dos dados de reajustes da tarifa de energia elétrica dos últimos 15 anos disponibilizados por ANEELb e ANEELc. O reajuste referente a operação também foi estimado por extrapolação polinomial a partir de dados de reajustes dos últimos 30 anos. Os dados referente ao histórico de preço da energia elétrica e do salário mínimo dos aos últimos 15 anos, assim como a projeção para os próximos 10 anos são apresentados na Figura 15.

**Figura 15** - Projeção preço energia elétrica e operação.



**Fonte:** Autoria própria.

O reajuste referente a manutenção será considerado de maneira conjunta com o aumento da necessidade de manutenção ao longo da vida útil do equipamento, já calculados anteriormente na Seção 4.3.3.2.

#### 4.3.4.1 Lucro Líquido

O fluxo de caixa fornece o lucro líquido, utilizado como dado de entrada para aplicação das técnicas de viabilidade econômica. Os cálculos referentes às técnicas de viabilidade econômica podem ser realizados através das fórmulas introduzidas na Seção 3.3. Os resultados obtidos calculados em planilha automatizada são apresentados na Tabela 12.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOMASSA

O potencial energético dos resíduos da produção cafeeira na região do Caparaó e arredores obtidos foi de aproximadamente 17.196.877 tep/ano, sendo que deste potencial, cerca de 95% é referente a podas dos cafeeiros na forma de lenha, um recurso energético que pode ter seu aproveitamento inviabilizado pela logística de recolhimento e transporte até a unidade de beneficiamento. Por outro lado, os resíduos convertidos em palha de café compreendem em média 650 tep/ano na região e são gerados nas próprias unidades de beneficiamento. O balanço energético dos resíduos da cafeicultura disponíveis na região são apresentados na Tabela 9.

**Tabela 9** – Potencial energético dos resíduos da cafeicultura .

Região/UF	$E_{palha} \left[ \frac{tep}{ano} \right]$	$E_{palha} \left[ \frac{tep}{ano} \right]$	$E_{cafeeiro} \left[ \frac{tep}{ano} \right]$	$E_{cafeeiro} \left[ \frac{tep}{ano} \right]$
	2018	2019	2018	2019
MG	2.108.847	1.550.155	40.327.718	39.479.345
Zona da Mata, Rio Doce e Central	467.533	329240	10.894.489	10.895.254
Montanhas ES	303.855	192.015	6.393.997	6.210.014
Região do Caparaó	793.549	521.255	17.288.487	17.105.268
Brasil	3.037.185	2.193.674	60.519.294	58.503.279

Fonte: CONAB, 2019.

O potencial de biomassa de palha e de cafeeiro da região do Caparaó são agrupados em pequenas e médias unidades de produção. A unidade de produção e beneficiamento referida gera em média 80 t/ano de palha e 511,6 t/ano de lenha de cafeeiro. Diferentemente da biomassa de palha de café que é gerada anualmente, a lenha é calculada pela média anual já que cada cafeeiro gera 3,5 kg a cada 5 anos. Para gerar um fluxo contínuo de lenha basta aplicar um sistema controlado de poda dividindo-se os parques cafeeiros em 5 lotes.

A utilização da palha de café é ideal para o período de safra, geralmente entre abril e setembro (5 meses), podendo ser utilizada conforme a produção principalmente pelo fato de que esse grande volume de palha é difícil de ser armazenado e ainda pelo risco de perder a qualidade desse combustível em caso de grandes períodos de chuva. A lenha de cafeeiro pode ser mantida aos arredores da lavoura e ser transportada conforme a demanda durante o período entre setembro e abril (7 meses).

## 5.2 SISTEMA DE GERAÇÃO TERMOELÉTRICA

O modelo de turbina Tesla Pelton proposto por Batista (2009) operando em um ciclo Rankine simples consome 45 kg/h de palha de café ou lenha, e nessas condições entrega uma potência líquida de 5 kW na saída do gerador, praticamente a capacidade máxima do equipamento. O PCI e PCS dos dois combustíveis apresentaram valores muito próximos, os valores calculados pela equação de Bazzo (1995) utilizados também são próximos aos de Oliveira (2010), porém mais conservadores e, portanto, satisfatórios. Os dados obtidos do modelo da combustão e do ciclo termodinâmico são apresentados na Tabela 10.

**Tabela 10** – Resultado do modelo térmico.

Parâmetro	Sigla	Valor	Unidade
Vazão mássica palha	$\dot{m}_{cb,palha}$	45,16	kg/h
Vazão mássica lenha	$\dot{m}_{cb,cafeiro}$	45,52	kg/h
Poder calorífico superior palha	$PCS_{palha}$	16790,5	kJ/kg
Poder calorífico inferior palha	$PCI_{palha}$	15713,3	kJ/kg
Poder calorífico superior lenha	$PCS_{cafeiro}$	16673,2	kJ/kg
Poder calorífico inferior lenha	$PCI_{cafeiro}$	15587,9	kJ/kg
Potência na saída da turbina	$\dot{W}_{turb}$	7,29	kW
Potência saída do gerador	$\dot{W}_{ger}$	5,05	kW
Massa de palha	$m_{cb,palha}$	79746,8	kg/ano
Massa de cafeiro	$m_{cb,cafeiro}$	511,6	t/ano

**Fonte:** Autoria própria.

Para garantir que toda a palha de café seja consumida durante o período de safra que dura 5 meses, a planta deve funcionar em média 11,7 horas por dia, sendo que esse tempo pode variar conforme a produção de cada ano sendo que o equipamento poderia consumir até 162 t de palha durante 5 meses e 230 t de lenha de cafeiro nos demais 7 meses caso operasse em um regime de 24 h por dia.

## 5.3 VIABILIDADE ECONÔMICA DA MICROGERAÇÃO

A microgeração no setor agrocafeeiro pode ser vista como viável ou não, dependendo de cada produtor de forma particular, um dos objetivos desse trabalho é auxiliar e informar para uma tomada de decisão coerente e condizente com a realidade dos produtores rurais, sejam eles dependentes das distribuidoras de energia elétrica ou aqueles que nem mesmo são atendidos pelas mesmas, são estes os moradores de localidades isoladas e de difícil acesso. Nos casos de produtores que não são atendidos pelo ONS, não haverá receita referente a crédito em energia

já que os mesmos ainda não fazem o uso de energia elétrica. Para esses casos, se o produtor decidir por investir no equipamento, a análise econômica deve ser feita comparando o custo de oportunidade de outras formas de geração de energia no local.

Nos casos dos produtores que contam com o ONS, a principal variável analisada na viabilidade econômica é o crédito em energia, que se dá pela isenção de pagamento mensal a distribuidora de energia consumida pelas máquinas responsáveis pelo beneficiamento e secagem de grãos, ou seja, o valor evitado de ser pago a distribuidora pode ser visto como receita.

Outro fator que integra o fluxo de caixa e também pode ser visto como receita é a isenção do custo de descarte da palha de café, chamado de frete de combustível no fluxo de caixa. Uma situação utilizando palha e maior tempo de operação diária no período de safra é o melhor cenário para a viabilidade econômica por ter menor custo com transporte de biomassa.

Os custos com manutenção, operação e com frete de combustível tem taxas de crescimento semelhantes entre si, principalmente pelo fato de que possuem fatores comuns influenciando seus valores.

O rápido crescimento da receita se deve às projeções feitas para o preço da tarifa de eletricidade, que foi ajustado para manter a mesma tendência de crescimento dos últimos 15 anos. A análise do primeiro ano foi realizada a partir de dados reais e atuais. Enquanto que as análises dos anos subsequentes foram desenvolvidas a partir de uma extrapolação polinomial, como ilustrado na Figura 15.

Além do crescimento do preço da energia, outro fator fundamental que também justifica maior receita é o fator de ajuste de horário tarifário, já que a análise foi realizada procurando gerar energia contemplando o horário de maior valor agregado e consumir preferencialmente no horário de menor valor agregado, resumindo, ao se utilizar essa estratégia é possível que a energia consumida seja maior que a energia produzida, pagando apenas o valor mínimo (custo de disponibilidade).

Vale destacar que o investimento é avaliado levando em consideração a situação em que os custos anuais com energia elétrica e descarte de palha sejam iguais ou superiores à receitas apresentada na Tabela 1.

Os dados apresentados no fluxo de caixa da Tabela 9 são os considerados mais importantes, e contemplam os custos e receitas mais relevantes no setor de microgeração distribuída voltados para biomassa e de sistemas de compensação de energia, nos casos de locais atendidos pelo ONS, adaptados à realidade da produção de café da região do Caparaó.

**Tabela 11** – Fluxo de caixa do empreendimento.

Ano	Investimento [R\$]	Receitas [R\$](+)	Manutenção e Operação [R\$](-)	Disponi- bilidade [R\$](-)	Frete Combustível [R\$](-)	Juros [R\$](-)	Lucro líquido [R\$]	Saldo líquido [R\$]
0	-87.265,19	-	-	-	-	-	-	-87.265,19
1	-	26.633,35	6.995,76	337,47	1174,12	2261,44	15864,56	-72.768,12
2	-	29.322,07	7.741,03	371,54	1313,72	2024,43	17871,35	-57.822,90
3	-	32.778,05	8.381,20	415,33	1453,52	1787,43	20740,57	-41.948,34
4	-	36.500,61	9.026,64	462,50	1603,38	1550,42	23857,67	-25.235,93
5	-	40.489,76	9.677,37	513,04	1763,30	1313,41	27222,64	-7.783,07
6	-	44.745,49	10.333,37	566,97	1933,26	1076,41	30835,48	10.309,85
7	-	49.267,81	10.994,66	624,27	2113,28	839,40	34696,20	28.941,98
8	-	54.056,71	11.666,22	684,95	2303,35	602,39	38804,79	48.012,98
9	-	59.112,20	12.333,06	749,01	2503,48	365,39	43161,26	67.426,32
10	87.309,87	64.434,27	13.010,19	816,44	2713,65	128,38	47765,61	87.088,57

**Fonte:** Autoria própria.

Para uma situação totalmente idealizada, em que a planta opera apenas com palha e durante 5 meses e que utilize toda a palha sem haver a necessidade de descartes, com a planta operando 5,85 h por dia especialmente em horário de pico e consumindo exclusivamente em horário fora pico e considerando Payback de exatamente 10 anos, seria possível o investimento para situações de custo anual com a distribuidora e com descarte de palha a partir de R\$ 6.896,00.

Diferentemente de uma situação idealizada, as condições abordadas procuram ser o mais real possível, sendo otimizado o tempo de operação de 11,57 h por dia, apenas para garantir o consumo total da palha de café ao longo do período de safra. Nessas condições, o tempo necessário para que o investimento seja recuperado (Payback) é de aproximadamente 4 anos e 4 meses. Se forem descontados os juros da TMA nesse período (Payback descontado), o tempo necessário é de 5 anos e 7 meses, como mostra a Tabela 12.

**Tabela 12** – Resultado dos métodos de análise de investimento.

Método	Payback	Payback descontado	TIR	VPL
Resultado	4,3 anos	5,4 anos	24,65%	R\$ 87.088,57

**Fonte:** Autoria própria.

A TIR apurada aponta que o investimento pode proporcionar um ganho anual de 24,69%. O VPL apurado aponta que pode ser atingido até o fim da vida útil do equipamento, além da TMA, um resultado excedente de R\$87.088,57 se os equipamentos forem financiados via Pronaf Bioeconomia, indicando que o investimento é viável. A fim de contemplar mais produtores pode ser feita uma associação de pequenos produtores que utilizam a mesma unidade de beneficiamento para realizar o investimento, desde que juntos produzam uma quantidade equivalente de biomassa.

## 6. CONCLUSÃO

O aproveitamento dos recursos energéticos derivados da cafeicultura, em geral são para fornecimento de calor na secagem de grãos, no entanto sua utilização pode ser ampliada e promovida a solucionar outro problema recorrente na região, o custo de energia elétrica para o beneficiamento, já que o estudo destaca que esse potencial energético é bastante amplo, na casa de 17,8 milhões de tep/ano. Na cafeicultura, as unidades de beneficiamento contam com diversas máquinas principalmente secadores de grãos que apresentam consumo significativo de energia elétrica. A solução apresentada a alternativa de gerar energia elétrica e inserir na rede em busca de crédito em energia por meio do sistema de compensação, que pode ser visto como uma receita, já que elimina a despesa, no entanto o valor poupado tem que exceder a parcela referente ao financiamento dos equipamentos. Nessas condições, o estudo comprova que cada grupo de 10 produtores da região do Caparaó-MG tem combustível suficiente para gerar energia por 11,7 h diárias, se considerar o uso apenas de palha por 5 meses no período de safra e lenha de cafeeiro nos demais 7 meses, utilizando uma turbina Tesla Pelton com potência de 5 kW que convertido em valores monetários é suficiente para pagar as parcelas do financiamento e ainda havendo um excedente.

A geração de potência também pode ser utilizada de forma direta, apenas o equipamento ligado às máquinas, em locais que não sejam atendidos pelo ONS. Outro fator é a disponibilidade efetiva da rede no local do empreendimento, muitas vezes em horários de pico, é comum a interrupção do fornecimento em algumas localidades, principalmente na zona rural, que são os extremos das linhas de transmissão, locais estes onde o reabastecimento é mais lento.

A interrupção do fornecimento se ocorrida de forma inesperada pode causar danos as máquinas e até mesmo a qualidade dos grãos beneficiados caso o reabastecimento não seja feito no mesmo dia, entretanto, os produtores atendidos pelo ONS ainda tem a vantagem de poder compartilhar energia com a rede e obter uma série de vantagens, uma delas é o ganho de energia devido ao fator de correção que pode ser favorável quando se converte um montante de energia lançado na rede em horário de pico em um crédito de consumo maior se consumido em horário fora pico.

O crescimento expressivo do preço da energia elétrica com previsão de R\$ 2,26/kWh em 2030, é um fator de peso para a decisão, visto que apesar do preço, a demanda energética também tem crescido. A previsão de lucro de R\$ 87.088,57 até 2031 mostra que o empreendimento é viável nas condições apresentadas. Cenários que se assemelham com o descrito também tem grande probabilidade de viabilidade econômica, visto que o resultado

excedeu em praticamente 100% do capital investido. Um fator extra a ser considerado de forma mais detalhada é a bandeira tarifária, que varia principalmente em função da necessidade de utilização de termelétricas a gás natural ou a diesel quando baixam os níveis dos reservatórios das hidrelétricas, uma melhor análise desse fator fica como sugestão para trabalhos futuros.

Outro ponto a ser considerado é o comparativo frente a geração solar, que tem crescido significativamente. Uma das vantagens quando comparado ao sistema fotovoltaico é quando se trata de comunidades isoladas devido a indisponibilidade no período noturno em que há maior demanda do fornecimento de energia nas residências rurais. Quando se trata de localidades atendidas pelo ONS, mesmo apresentando necessidade de investimento maior comparado ao investimento em painéis solares, ainda não inviabiliza a geração termelétrica por biomassa, uma vez que o valor poupado mensalmente seja suficiente para cobrir as parcelas do financiamento, justificando que o custo dos equipamentos não é um fator único decisivo quando se trata dessa modalidade de financiamento.

## REFERÊNCIAS

- ANEELa. Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Micro e minigeração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica**. 2 ed – Brasília: ANEEL, 2016.
- ANEELb. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Ranking de tarifas** – Brasília: ANEEL, 2021. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas> Acesso em Julho 2021.
- ANEELc. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Informações gerenciais** – Brasília: ANEEL, 2021. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/informacoes-gerenciais> Acesso em Julho 2021.
- ANEELd. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Postos tarifários** – Brasília: ANEEL, 2021. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/postos-tarifarios> Acesso em julho de 2021.
- ANEELe. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Relatórios de consumo e receita** – Brasília: ANEEL, 2021. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/relatorios-de-consumo-e-receita>
- BATISTA, J. C. **Micro-geração de Energia Elétrica (Abaixo de 100 kW) Utilizando Turbina Tesla Modificada**. 107f. Doutorado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá. Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.
- BAZZO, E. **Geração de vapor**. 2a. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995.
- BCB. Banco central do Brazil. **Calculadora do cidadão**. Disponível em: <https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADA0/jsp/index.jsp>. Acesso em 22 Abr 2021.
- BODIE, Z, KANE, A, MARCUS, A. **Fundamentos de investimentos**. AMGH Editora, 2014.
- BNDES. **Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social**. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/pronaf-bioeconomia>. Acesso em 21 Abr 2021.
- BSCA. **Associação Brasileira de Cafés Especiais**, 2018. Disponível em: <https://www.bsca.com.br/index/home> Acesso em Maio 2020.
- ÇENGEL, Y. A., BOLES, M. A. **Termodinâmica**. Porto Alegre: AMGH, 2013. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580552010/>. Acesso em: 06 Nov 2020.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acomp. safra brasileira de café**, v. 6– Safra 2019, n. 3 - Terceiro levantamento, Brasília, p. 1-54, setembro 2019.
- CUNHA, W. L. **Impacto da Inserção Massiva de Microgeração Distribuída em Consumidores Sensíveis a Distúrbios no Fornecimento de Energia**. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2019.
- DUTRA, R. M. **Viabilidade Técnico-Econômica da Energia Eólica Face ao Novo Marco Regulatório do Setor Elétrico Brasileiro Rio de Janeiro**. Dissertação de Mestrado em Ciências em Planejamento Energético. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.

EPE. **Empresa de Pesquisa Energética**. Balanço Energético Nacional (BEN) 2019: Ano base 2017, 2018. Disponível em: < <https://ben.epe.gov.br> >. Acesso em nov/2020.

EPE. **Empresa de Pesquisa Energética**. Balanço Energético Nacional (BEN) 2020: Ano base 2018, 2019. Disponível em: < <https://ben.epe.gov.br> >. Acesso em nov/2020.

FARIAS, L. M, SELLITTO, M. A. Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras. **Revista Liberato**, v. 12, n. 17, p. 07-16, 2011.

GALANTE, R. M. **Análise termodinâmica de uma planta termoeétrica a biomassa assistida por energia solar**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

GALANTE, R. M. **Análise e otimização termoeconômica de sistemas de geração de energia por incineração de resíduos com filtro biológico de emissões**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

HAKME, R. **Otimização da logística de produção e uso de biocombustíveis sólidos a partir de resíduos agrícolas**. Brasília. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica. Universidade de Brasília, 2015.

IEA. **International Energy Agency**. Key World Energy Statistics, 2018. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2018.pdf>>. Acesso em nov/2020.

LAMPART, P, KOSOWSKI, K, PIWOWARSKI, M, JEDRZEJEWSKI, Ł. Design analysis of Tesla micro-turbine operating on a low-boiling medium. **Polish Maritime Research**, p. 28-33, 2009.

LORA, E. E. S, NASCIMENTO, M. A. R. Geração Termelétrica: Planejamento, Projeto e Operação. Rio de Janeiro, **Editora Interciência**, v. 2, p. 2, 1296 p., 2004.

MAGALHÃES E. A., SILVA J. S, SILVA J. N, OLIVEIRA FILHO D, DONZELES S. M. L. 2008. Casca de café associada à lenha como combustível para aquecimento indireto do ar de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento – Especial Café**, v.10, p.66-72.

MARQUEZAN, Luiz Henrique Figueira; BRONDANI, Gilberto. Análise de investimentos. **Revista Eletrônica de Contabilidade**, v. 3, n. 1, p. 35, 2006.

NUNES, E. C, SILVEIRA, M. A. N. **Estudo do aproveitamento da palha de café como combustível nos fornos de secagem**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004.

OLIVEIRA, J. L. **Potencial energético da gaseificação de resíduos da produção de café e eucalipto**. Mestrado em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2010.

RFB, Receita Federal do Brasil. **Instrução Normativa SRF No 162 de 31 de dezembro de 1998. Fixa prazo de vida útil e taxa de depreciação dos bens que relaciona**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, v. 7, p. 5, 1998.

RIBEIRO, A. E. D. **Análise da Influência da Localização, Área e Forma de Sítios no Potencial de Geração de Energia Elétrica de Pequena Escala no Brasil: Um Método para as Fontes Solar e Eólica.** Tese de Doutorado do Programa de Planejamento Energético. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

RICE, W. An Analytical and Experimental Investigation of Multiple-Disk Turbines. **Journal of Engineering for Power. Trans. ASME**, Vol. 87, No. 1 Jan. 1965, pp. 29-36.

RICE, W. Tesla Turbomachinery. **Conference Proceedings of the International Tesla Symposium**, September 22-25, 1991.

SVIECH, V, MANTOVAN, E. A. Análise de investimentos: controvérsias na utilização da TIR e VPL na comparação de projetos. **Percurso**, v. 1, n. 13, p. 270-298, 2013.

URTADO, E. S, SANTO, V. D. S, QUINTAIROS, P. C. R., OLIVEIRA, E. D. A. Aplicação do método do valor presente líquido (VPL) na análise da viabilidade econômica de projetos na indústria metal mecânica: um estudo de caso. **Encontro Latino Americano De Pós-Graduação**, v. 9, p. 1-4, 2009.

WAGNER, P. V, MIGLIO M. V, BEUREN, I. M. Cálculo da depreciação de máquinas e equipamentos com a aplicação do método do custo anual uniforme equivalente e da interpolação linear, associado ao direcionador de custo tempo. **Contabilidade Vista & Revista**, v. 11, n. 2, p. 26-42, 2000.