

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**GUILHERME MANDELO OLIVEIRA**

**Potencial de Geração de Eletricidade Proveniente dos Gases Efluentes da Produção de  
Carvão Vegetal em Minas Gerais**

**UNIFEI**  
**Itajubá/MG**  
**2021**

GUILHERME MANDELO OLIVEIRA

**Potencial de Geração de Eletricidade Proveniente dos Gases Efluentes da Produção de Carvão Vegetal em Minas Gerais**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em ciências em Engenharia Mecânica. Itajubá

Área de concentração: Térmica, Fluidos e Máquinas de Fluxo

Orientador: Prof. Dr. Jose Carlos Escobar Palacio  
Coorientador: Prof. Dr. Osvaldo José Venturini

**UNIFEI**  
**Itajubá/MG**  
**2021**

# DEDICATÓRIA

*Aos meus Pais  
À minha Família  
Aos meus amigos  
Aos bons Professores*

## **AGRADECIMENTOS**

*Agradeço à minha família mais próxima; meus pais Maria Otilia Mandelo e José Renato Preto de Oliveira e ao meu irmão Renan Mandelo Oliveira, que são a base do que vivo hoje.*

*Aos meus orientadores, José Carlos Escobar Palacio e Osvaldo José Venturini, pelo conhecimento passado a mim, amizade e apoio durante todo o curso deste trabalho.*

*Aos amigos da Rep n' Roll, minha segunda família em Itajubá.*

## RESUMO

Minas Gerais é o Estado brasileiro que mais produz carvão vegetal, e esta produção se dá através de fornos de carbonização que emitem gases nocivos à atmosfera, desperdiçando energia útil e causando um impacto ambiental. Este trabalho se propõe a realizar uma avaliação do potencial de geração de eletricidade proveniente dos gases efluentes da produção de carvão vegetal em Minas Gerais a partir de diferentes tecnologias de conversão de eletricidade. Foi realizado um levantamento dos produtores de carvão vegetal no Estado e da sua produção a fim de conhecer o potencial energético disponível em 2020 com uma projeção até 2030. Nos estudos de geração de eletricidade, foram consideradas três tecnologias, a saber: o ciclo Rankine à vapor (SRC), o ciclo Rankine orgânico (ORC) e a turbina a gás de queima externa (EFGT). Para cada tecnologia, calcularam-se as eficiências de conversão que foram aplicadas em cada um dos empreendimentos previamente levantados. As eficiências variaram de 5% à 24%, dependendo do tipo de tecnologia para as faixas de potência de 100 kW à 2000kW. Mapas temáticos dos potenciais de geração em Minas Gerais foram criados, evidenciando uma concentração da produção nas regiões Norte e Nordeste do Estado. O maior potencial de geração para o estado foi de 1348 GWh/ano utilizando o ciclo ORC com regeneração e superaquecimento tendo como fluido de trabalho o n-decano. Também foi conduzida uma análise econômica levando em conta a venda de energia em leilões no mercado de energia, juntamente com uma análise de sensibilidade para cada variável de potência, preço de venda da energia, taxa mínima de atratividade, impostos, horas de operação da planta e preço de aquisição de bens consideradas. Os menores custos específicos de investimento foram do SRC, variando de 2.371,03 US\$/kW à 2000 kW e 3.795,25 US\$/kW à 500 kW. Os resultados demonstram que os atuais cenários técnicos e econômicos não são favoráveis para a implantação de usinas de geração de eletricidade baseadas na recuperação de gases residuais em plantas de produção de carvão vegetal no Estado de Minas Gerais, sendo praticamente impossível a viabilidade em plantas menores que 10 MW em um horizonte de 10 anos. Todas as tecnologias apresentaram preços de venda de energia acima dos 100 US\$/MWh, que é acima da média dos últimos 3 anos. Contudo, o amadurecimento tecnológico dos meios de produção de carvão e tecnologias de conversão de eletricidade, aliados à um incentivo econômico baseado nos benefícios ambientais, podem propiciar uma melhora deste cenário futuramente.

**Palavras-Chave:** carvão vegetal, recuperação de calor residual, ciclo rankine orgânico, ciclo rankine a vapor, turbina a gás de queima externa.

## ABSTRACT

Minas Gerais is the biggest charcoal producer in Brazil. This production happens in carbonization kilns that emit waste gases to the atmosphere, wasting useful energy and causing an environmental impact. In this work, an evaluation of the electricity generation potential from the effluent gases of the charcoal production in Minas Gerais was carried out using different electricity conversion technologies. A survey of charcoal producers in the State and their production was conducted in order to calculate the energy potential available in 2020 with a projection until 2030. For the electricity generation studies, three technologies were considered, namely: The Steam Rankine Cycle (SRC), the Organic Rankine Cycle (ORC) and the Externally Fired Gas Turbine (EFGT). For each technology, the efficiencies were calculated and applied for each of the previously surveyed producers. Efficiencies ranged from 5% to 24% depending on the type of technology power, ranging from 100kW to 2000kW. Maps of the power generation potentials in Minas Gerais were created, showing a concentration in the North and Northeast regions of the state. The highest power generation potential for the state was 1348 GWh/year using the ORC cycle with regeneration, superheating and n-decane as the working fluid. An economic analysis was also made, taking into account auctions for the energy sale in the energy market, together with a sensitivity analysis for each variable considered: Power, energy sale price, minimum attractiveness rate of return, taxes, plant operation time, and capital expenditure. The results demonstrate that the current technical and economic scenarios are not favorable for the implementation of electricity generation plants based on waste heat recovery from gases in charcoal production plants in the State of Minas Gerais, making feasibility in plants smaller than 10 MW practically impossible over a 10-year horizon. All technologies had energy sales prices above 100 US\$/MWh, which is higher than the average of the last 3 years. However, the technological development in the charcoal production kilns and electricity conversion technologies, combined with an economic incentive based on environmental benefits, may provide an improvement in this scenario in the future.

**Keywords:** charcoal, waste heat recovery (WHR), organic Rankine cycle (ORC), steam Rankine cycle (SRC), externally fired gas turbine (EFGT).

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema e diagrama T-s para um ciclo Rankine a vapor (adaptado de BORGNAKKE e SONTAG, 2009).....	28
Figura 2: Funcionamento do Ciclo Básico ORC com superaquecimento (adaptado de DO VAL, SILVA & OLIVEIRA JR., 2017) .....	29
Figura 3: fluxograma geral das etapas do trabalho .....	36
Figura 4: Informações e filtros de pesquisa utilizados no SIDRA.....	37
Figura 5: Informações e filtros de pesquisa utilizados no SISEMA .....	38
Figura 6: Informações e filtros de pesquisa utilizados no PNLA .....	39
Figura 7: Gráfico de Pareto da quantidade de carvão produzida por município em 2019.....	54
Figura 8: Mapa de Calor das Regiões Produtoras de Carvão Vegetal em MG para o ano de 2020 ..	55
Figura 9: Gráfico de Pareto da quantidade de empreendimentos por município em 2019.....	56
Figura 10: Comparação da produção real em 2019 e da licenciada em 2020.....	57
Figura 11: Produção de carvão vegetal por Município em 2017 .....	58
Figura 12: Comparação dos períodos de dados para validação da projeção.....	60
Figura 13: Projeções da Produção de Carvão Vegetal em MG.....	62
Figura 14: Potencial máximo teórico de geração de energia elétrica no estado de Minas Gerais .....	64
Figura 15: Potencial de geração de energia elétrica no estado de minas gerais no ano 2020 utilizando ciclo a vapor convencional.....	65
Figura 16: Potencial de geração de energia elétrica no estado de minas gerais no ano 2020 utilizando ciclo ORC A (sem regeneração, com superaquecimento e R245fa como fluido de trabalho) .....	66
Figura 17: Potencial de geração de energia elétrica no estado de minas gerais no ano 2020 utilizando ciclo ORC B (com regeneração, sem superaquecimento e MDM como fluido de trabalho) .....	67
Figura 18: Potencial de geração de energia elétrica no estado de minas gerais no ano 2020 utilizando ciclo ORC C (com regeneração, com superaquecimento e n-decano como fluido de trabalho) .....	67
Figura 19: Potencial de geração de energia elétrica no estado de minas gerais no ano 2020 utilizando ciclo EFGT.....	68
Figura 20: Resultados da projeção dos potenciais de geração .....	69
Figura 21: Variação das potências com o PCI dos gases .....	70
Figura 22: Total de energia gerada anualmente por tecnologia de conversão .....	74
Figura 23. Variação dos custos específicos de instalação (US\$/kW) para cada cenário. (a) Cenário com Superaquecimento; (b) Cenário com Regeneração; (c) Cenário com Superaquecimento e Regeneração. ....	79
Figura 24: Frequência de valores para VPL no 10º ano para o empreendimento de Montes Claros utilizando SRC .....	88
Figura 25: Contribuição de cada variável nas simulações para o empreendimento de Montes Claros utilizando SRC .....	89
Figura 26: Frequência de valores para VPL no 10º ano para um empreendimento fictício de 10.000 kW utilizando SRC .....	90
Figura 27: Contribuição de cada variável nas simulações para um empreendimento fictício de 10.000 kW utilizando SRC .....	90
Figura 28: Frequência de valores para VPL no 10º ano para um empreendimento fictício de 10.000 kW utilizando SRC com desconto de 10% no CAPEX.....	92

Figura 29: Frequência de valores para VPL no 10º ano para um empreendimento fictício de 10.000 kW utilizando SRC com desconto de 25% no CAPEX..... 92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Projeções de produção de carvão vegetal até 2027 (adaptado de Superintendência de Abastecimento e Economia Agrícola, 2017) .....	22
Tabela 2: Informações quantitativas sobre fornos de carbonização em alvenaria (adaptado de RODRIGUES & BRAGHINI JUNIOR, 2019).....	24
Tabela 3: Informações quantitativas sobre fornos de metal (adaptado de RODRIGUES & BRAGHINI JUNIOR, 2019).....	25
Tabela 4: Informações quantitativas sobre retortas (adaptado de RODRIGUES & BRAGHINI JUNIOR, 2019) .....	26
Tabela 5: Parâmetros considerados para o cálculo da área estimada de plantio de eucalipto .....	40
Tabela 6: Características dos fornos utilizados no trabalho.....	41
Tabela 7: Valores obtidos dos modelos termodinâmicos para o SRC (UNIFEI, 2020) .....	43
Tabela 8: Valores obtidos dos modelos termodinâmicos para os ORC (UNIFEI, 2020) .....	44
Tabela 9: Coeficientes e Correlações para a estimativa do custo de aquisição de equipamentos (TURTON, BAILE et al., 2009). .....	49
Tabela 10. Parâmetros para o cálculo do custo específico total de investimento (BEJAN, TSATSARONIS e MORAN, 1995).....	49
Tabela 11. Parâmetros econômicos selecionados para análise do ciclo à vapor.....	51
Tabela 12: Impostos e Taxas Considerados no Trabalho .....	53
Tabela 13: Municípios mineiros com maior produção de carvão vegetal em 2019 .....	55
Tabela 14: Municípios mineiros com maiores quantidades de empreendimentos em 2019.....	56
Tabela 15: Produção de carvão vegetal em Minas Gerais em 2017 (SUPERINTENDÊNCIA DE ABASTECIMENTO E ECONOMIA AGRÍCOLA, 2017).....	58
Tabela 16: Validação para os 10 últimos anos de dados reais .....	60
Tabela 17: Erro relativo da previsão baseada nos 10 últimos anos do histórico de dados .....	61
Tabela 18: Projeção para a produção de carvão vegetal em MG com base nos 10 últimos anos de dados reais.....	62
Tabela 19: Potenciais de geração de energia elétrica no ano 2020 no estado de Minas Gerais considerando diferentes sistemas ORC.....	66
Tabela 20: Resultados da projeção dos potenciais de geração.....	69
Tabela 21: Consumo específico de gás por MWh gerado .....	71
Tabela 22: Energia elétrica gerada (MWh) por tonelada de carvão produzido .....	72
Tabela 23: Produção de carvão vegetal (mdc/ano) para determinadas faixas de potência com diferentes tecnologias de conversão.....	72
Tabela 24: Número de empreendimentos inseridos em cada faixa de potência .....	73
Tabela 25. Custos de investimentos para as tecnologias de ciclo a vapor. ....	75
Tabela 26. Custos estimados para o ciclo ORC sem regenerador .....	76
Tabela 27. Custos estimados para o ciclo ORC com regenerador e sem superaquecimento.....	77
Tabela 28. Custos estimados para o ciclo ORC com regenerador e com superaquecimento .....	78
Tabela 29: Custos de investimentos para as EFGTs .....	80
Tabela 30: OPEX e CAPEX finais para as diferentes tecnologias adotadas .....	81
Tabela 31: Preços de venda de energia para viabilidade econômica dos empreendimentos com fornos avançados em 2020.....	83
Tabela 32: Preços de venda de energia para viabilidade econômica dos empreendimentos com fornos avançados em 2030.....	84
Tabela 33: Preços de venda praticados em leilões para geração com gases de processos entre 2018 e 2020 (CCEE, 2021).....	86



# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. OBJETIVOS	15
1.1.1. OBJETIVO GERAL	15
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.2. JUSTIFICATIVA	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL	19
2.1.1. PRODUÇÃO EM MINAS GERAIS	20
2.1.2. TECNOLOGIAS DE CARBONIZAÇÃO	22
2.2. TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	27
2.2.1. O CICLO SRC	27
2.2.2. O CICLO ORC	28
2.2.3. O CICLO EFGT	30
2.2.4. CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO	30
3. METODOLOGIA	35
3.1. ETAPA 1: ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL EM MG	37
3.1.1. LEVANTAMENTO DA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL EM MG	37
3.1.2. LEVANTAMENTO DAS UNIDADES DE CARBONIZAÇÃO EM MG (SISEMA)	38
3.1.3. PORTAL NACIONAL DE LICENCIAMENTO AMBIENTAL (PNLA)	38
3.1.4. ÁREA ESTIMADA DE PLANTIO DE EUCALIPTO	40
3.2. ETAPA 2: CLASSIFICAÇÃO DAS UNIDADES DE CARBONIZAÇÃO	40
3.3. ETAPA 3: PROJEÇÃO DA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL EM MG	41
3.4. ETAPA 4: POTENCIAL ENERGÉTICO DISPONÍVEL NO ESTADO	42
3.4.1. TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE CONSIDERADAS NA SELEÇÃO	42
3.4.2. MODELOS TERMODINÂMICOS DE SIMULAÇÃO E INDICADORES DE DESEMPENHO CONSIDERADOS	43
3.4.3. CENÁRIOS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	46
3.5. ETAPA 5: ANÁLISE ECONÔMICA	47
3.5.1. CICLO A VAPOR - SRC	47
3.5.2. CICLO RANKINE ORGÂNICO - ORC	48
3.5.3. TURBINA A GÁS DE QUEIMA EXTERNA - EFGT	50
3.5.4. CUSTOS DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO (OPEX)	50
3.5.5. CUSTOS DO SISTEMA DE COLETA E TRANSPORTE DE GASES E DO QUEIMADOR (CAPEX)	51
3.5.6. IMPOSTOS E TAXAS	52

	11
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1. RESULTADOS DO LEVANTAMENTO DAS UNIDADES DE CARBONIZAÇÃO	54
4.2. PROJEÇÃO DA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL EM MG	59
4.3. TECNOLOGIA DE CARBONIZAÇÃO E ÁREA PLANTADA	63
4.4. ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO ELÉTRICA EM MINAS GERAIS	63
4.4.1. POTENCIAL PROJETADO DO CICLO SRC	65
4.4.2. POTENCIAIS PROJETADOS DOS CICLOS ORC	66
4.4.3. POTENCIAL PROJETADO PARA EFGT	68
4.4.4. POTENCIAL DE GERAÇÃO PROJETADO	69
4.4.5. INDICADORES DE COMPARAÇÃO	70
4.5. RESULTADOS DA ANÁLISE ECONÔMICA	74
4.5.1. CUSTOS DO CICLO A VAPOR – SRC	74
4.5.2. CUSTOS DO CICLOS RANKINE ORGÂNICO – ORC	75
4.5.3. CUSTOS DA TURBINA A GÁS DE QUEIMA EXTERNA – EFGT	80
4.5.4. RESULTADOS DE CAPEX E OPEX MAIS IMPOSTOS	81
4.5.5. VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DOS EMPREENDIMENTOS LEVANTADOS	82
4.5.6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE ECONÔMICA	87
5. CONCLUSÕES	94
REFERÊNCIAS	98
ANEXO 1: RELAÇÕES ENTRE EFICIÊNCIA E CONSUMO DE GÁS PARA CADA TECNOLOGIA	104

# 1. INTRODUÇÃO

De acordo com o Ministério de Minas e Energia – MME (2020), a indústria de aço no Brasil é responsável por fazer do país o maior produtor de carvão vegetal no mundo e o único a produzir ferro-gusa ecológico em grande escala. O carvão vegetal renovável é uma alternativa mais limpa ao carvão mineral e provém da carbonização do eucalipto em grandes fornos que operam por batelada. Como produtos, obtém-se o carvão vegetal e a produção de gases que atualmente não são aproveitados pela indústria, desperdiçando-se mais de 30% do potencial energético da madeira e causando impactos ambientais.

Em um contexto global, a indústria de ferro é um dos grandes emissores de gases de efeito estufa. De acordo com a WorldSteel (2020), a produção de aço baseado no carvão é um grande responsável pelas emissões de CO<sub>2</sub> anualmente. Como relatado pela instituição, cerca de 1,83 toneladas de CO<sub>2</sub> são emitidos para cada tonelada de aço bruto produzido no mundo.

O carvão vegetal é produzido atualmente em fazendas que fazem o plantio e reflorestamento do eucalipto, tornando uma opção mais viável ambientalmente. Se comparado com o carvão mineral, o carvão vegetal apresenta mais vantagens além da ambiental: ele contém pequenas quantidades de enxofre, o que torna o seu preço mais atrativo na indústria. No Brasil, a produção de ferro-gusa proveniente do carvão vegetal foi de 6,95 milhões de toneladas, responsável por cerca de 22,5% da produção nacional (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2020).

Segundo a Associação Brasileira de Árvores (2019), o estado de Minas Gerais tem a maior área de florestas plantadas do Brasil. Isso devido às grandes indústrias de metal, aço, fibra de madeira e lápis. De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2015), Minas Gerais representa 49% de toda a produção de ferro-gusa ecológico do país. Arima, Barreto et al. (2011) afirmaram que grupos ambientalistas, regulações e procedimentos de certificação têm trabalhado em um esforço conjunto para promover a sustentabilidade e a boa imagem do produto brasileiro.

No entanto, a indústria de ferro-gusa ainda enfrenta problemas quanto ao uso de florestas nativas para a produção de carvão. De acordo com o Brazil Steel Institute – BSI (2017), iniciativas estão sendo tomadas pelo governo e grandes empresas para mudar esse cenário. O estado de Minas Gerais aprovou uma lei em 2018 que proíbe a exploração de florestas nativas para a produção de carvão vegetal. Além disso, as maiores companhias de aço do país lançaram o Protocolo de Sustentabilidade do Carvão Vegetal (*Charcoal Sustainability Protocol – CSP*), se comprometendo a erradicarem o uso de florestas nativas em 4 anos.

O processo de produção de carvão vegetal no Brasil é pouco desenvolvido e ineficiente. O carvão vegetal renovável é produzido a partir da pirólise lenta da biomassa plantada e apresenta como subproduto gases condensáveis e não-condensáveis que são liberados para a atmosfera, reduzindo a qualidade do ar e perdendo uma fonte de energia renovável. Esses gases representam cerca de 25% da energia inicial contida na madeira (FAGBÉMI, KHEZAMI e CAPART, 2001; SANTOS, 2017; DONATO, 2017).

Tendo em conta a importância do processo de carbonização, alguns trabalhos têm sido realizados visando melhorar sua eficiência. Bustos-Vanegas, Martins et al. (2018), avaliaram o efeito da inércia térmica dos elementos estruturais de fornos de tijolos para a produção de carvão vegetal. Os autores utilizaram CFD (Computational Fluid Dynamics) para simular o aquecimento e resfriamento do sistema composto por madeira, gases de carbonização, paredes de tijolos e piso. Para isso, modelaram um forno industrial típico com capacidade de 700 m<sup>3</sup> e validaram usando um conjunto de medições experimentais de temperaturas durante uma etapa de carbonização de 4 dias com temperatura final de 400 °C e uma etapa de resfriamento de 8 dias. O perfil de temperatura nas paredes foi linear, correspondendo a um estado pseudo-estacionário, onde a carga térmica aumenta com o tempo de pirólise. A análise do fluxo de calor através dos elementos estruturais do forno permitiu a quantificação das perdas de calor em cada etapa do processo e o modelo apresentou uma previsão adequada da distribuição de temperatura das paredes, piso e material poroso. Segundo os autores, tais informações são importantes para as melhorias na operação dos fornos e permitem estabelecer condições iniciais consistentes de temperatura e fluxo de calor para modelos cinéticos de resfriamento de carvão nos fornos.

Cardona et al. (2019) fizeram uma avaliação dos gases de exaustão durante a torrefação de árvores de eucalipto e constataram a presença de compostos como CO<sub>2</sub>, CO, tolueno, ácido acético, furfural, entre outros. Tais compostos reativos são prejudiciais para os trabalhadores e comunidades locais, o que reforça a ideia da necessidade de um destino apropriado para os gases efluentes do processo de produção de carvão vegetal.

Sangsuk, Buathong e Suebsiri (2020) analisaram a eficiência de conversão de fornos de tambor com tubo de distribuição de calor para a produção de carvão vegetal e biocarvão. Os autores utilizaram madeira tamarindo e sabugo de milho como biomassa e obtiveram de 11 kg a 12 kg de carvão vegetal com teor de umidade de 5% para um forno de 200 litros. O carvão vegetal de madeira tamarindo apresentou de 20 a 21% de matéria volátil, 68,7 a 69,8% de carbono fixo, 3,8 a 5,6% de cinzas e PCI de 30 a 31 MJ/kg. A eficiência de conversão de energia dos fornos de tambor com tubo de distribuição de calor foi entre 40 e 48%.

Tintner, Preimesberger et al. (2020) estudaram o perfil de temperatura em um forno retangular de pirólise através do padrão espectral infravermelho e de medições com termopares. As temperaturas variaram de 400 a 700 ° C e atingiram patamares mais elevados principalmente na parte frontal, onde o forno é aceso, do que na parte central. Análises elementares foram realizadas e modelos de previsão para o conteúdo de carbono, hidrogênio e oxigênio baseados no espectro infravermelho foram estabelecidos, alcançando coeficientes de determinação muito altos (acima de  $R=0,93$ ). Os autores concluíram propondo que a espectroscopia infravermelha seja usada como base e técnica padrão na descrição das características do carvão, uma vez que a técnica foi capaz de prever o grau de pirólise e análises elementares conjuntamente.

Recentemente, pesquisas relacionadas ao reaproveitamento dos gases efluentes do processo de carbonização da madeira para a geração de eletricidade têm ganhado maior notoriedade. Castro (2014), por exemplo, evidencia que várias indústrias brasileiras de carvão estão preocupadas com as restrições ambientais relacionadas aos gases de pirólise e estão investindo no desenvolvimento de tecnologias para controlar as emissões e avaliar a melhor maneira de se beneficiar de sua energia, incluindo opções como secagem de madeira, fornos autossustentáveis e geração de eletricidade. Neste último caso, esses gases podem ser usados para produzir calor e energia em ciclos termodinâmicos, como Ciclo Orgânico de Rankine (ORC), Ciclos de Vapor (SRC) ou Turbinas a Gás de Queima Externa (EFGT).

Leme, Venturini et al. (2018) desenvolveram um estudo em uma usina de produção de carvão vegetal com fornos retangulares em que avaliaram o potencial energético do sistema utilizando as três tecnologias citadas por Castro (2014). Os autores estudaram a recuperação energética dos gases da carbonização de madeira por meio de sua queima, utilizando o calor gerado para a produção de energia, a partir de dados recuperados de uma Unidade de Carbonização (UC) da Plantar Siderúrgica SA. O potencial energético de um conjunto de fornos de carbonização em batelada trabalhando em sincronia foi acessado por meio de uma ferramenta computacional considerando três tecnologias de geração de eletricidade Ciclos Rankine Convencional, Turbina a Gás de Queima Externa e Ciclo Rankine Orgânico. Os autores concluíram que tais tecnologias podem trazer benefícios de redução das emissões de CO<sub>2</sub> equivalente além da produção de eletricidade.

Pereira, Martins et al. (2017) realizaram um estudo com o propósito de levantar os principais fatores críticos inerentes à cadeia produtiva do carvão vegetal no Brasil. O trabalho também discute extensivamente a tecnologia de queima de gases de pirólise, analisando a história dessa tecnologia e listando os principais desafios e oportunidades para seu uso.

Vilela, Lora et al., (2014) apresentaram o desenvolvimento de um estudo técnico-econômico de um processo de pirólise semicontínuo, caracterizada pela utilização de fornos metálicos com sistema de exaustão forçada (*Rima Container Kiln* - RCK) cujos gases podem ser aproveitados para a geração de eletricidade utilizando Ciclo Rankine Convencional e Ciclo Rankine Orgânico.

De Mirand, Bailis e Vilela (2013) apresentaram uma revisão técnica da situação das tecnologias de cogeração que podem ser utilizadas no setor de produção de carvão vegetal, considerando as características dos gases residuais do processo de carbonização.

Apesar desses trabalhos abordarem análises termodinâmicas, econômicas ou ambientais, o escopo de alcance dos resultados de cada um deles é limitado, não permitindo calcular a partir dos resultados apresentados os seguintes aspectos:

- Potencial de geração de eletricidade no Estado de Minas Gerais
- Mapas do potencial de geração de eletricidade por regiões no Estado de Minas Gerais
- Estado de maturidade das tecnologias de geração de eletricidade que podem ser utilizadas
- Levantamento econômico detalhado de cada tecnologia de geração de eletricidade

Logo, este trabalho propõe um levantamento do potencial de geração de eletricidade proveniente dos gases efluentes de usinas de produção de carvão vegetal em Minas Gerais através de uma análise da produção atual de carvão vegetal e tecnologias de conversão de eletricidade disponíveis. Para tanto, realizou-se avaliações tecno-econômicas do ciclo Rankine a vapor (SRC), ciclo Rankine Orgânico (ORC) e turbina a gás de queima externa (EFGT), baseados no atual potencial de produção de carvão vegetal em Minas Gerais. Além disso, foram criados mapas temáticos do potencial de geração no estado, destacando as potencialidades das principais regiões produtoras.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo geral**

Levantar o potencial de geração de eletricidade proveniente dos gases efluentes de usinas de produção de carvão vegetal em Minas Gerais considerando diferentes tecnologias de geração de eletricidade e suas viabilidades econômicas.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Caracterizar e classificar as usinas de produção de carvão vegetal no estado de Minas Gerais;
- Levantar o potencial de produção de carvão vegetal e a quantidade de gases efluentes disponíveis para a geração de eletricidade;
- Classificar os produtores de acordo com o porte e tecnologias de produção de carvão vegetal;
- Definir as tecnologias de geração de eletricidade que serão utilizadas nos sistemas de carbonização baseados na produção de carvão e disponibilidade das usinas;
- Considerar modelos termodinâmicos de simulação das tecnologias de geração de eletricidade analisados e estabelecer indicadores de desempenho;
- Calcular os potenciais energéticos disponíveis através de simulações com as diferentes tecnologias de conversão energética;
- Avaliar economicamente os ciclos de geração a fim de determinar a viabilidade financeira da aplicação dos sistemas;
- Considerar diferentes cenários de produção de carvão vegetal a fim de estabelecer a situação ótima para a produção de eletricidade utilizando as diferentes tecnologias de conversão;
- Elaborar mapas temáticos que ilustrem o potencial de geração de eletricidade em MG atual e futuramente.

## **1.2. Justificativa**

O Brasil é maior produtor mundial de carvão vegetal com uma produção de mais de 6 milhões de toneladas em 2019, o que representa 12% do total mundial. Desse total, mais de 90% são utilizados no setor industrial, sendo que o setor de metalurgia consome mais de 80%. Além disso, o país continua aumentando as plantações de eucalipto para suprir tais demandas (FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION FAO, 2017).

Na escala industrial, os fornos retangulares de alvenaria são os mais utilizados. Tais equipamentos possuem um melhoramento quanto à capacidade volumétrica, instrumentação, otimização do processo e mão de obra, que se deu por meio da mecanização e melhoria no layout das plantas e do aproveitamento dos gases do processo para secagem da madeira e geração de energia elétrica. Além destes, outros tipos de fornos, tais como os fornos metálicos e as retortas

contínuas, têm sido desenvolvidos no país, sendo capazes de aproveitar os gases do processo com a diminuição de tempo no ciclo de produção (SANTOS, 2017).

Cerca de 98,8% do total do carvão vegetal produzido no Brasil é proveniente da madeira de eucalipto. Só em Minas Gerais a produção de carvão vegetal totalizou 5.207.152 de toneladas em 2019 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2020). A grande quantidade de vegetação nativa, aliada à falta de reservas de carvão mineral, facilitaram as condições para a utilização em escala comercial do carvão vegetal como termo redutor na produção siderúrgica em meados do XIX em Minas Gerais. Já na primeira metade do século XX, as siderúrgicas mineiras já respondiam por 90% da produção de ferro-gusa do país. Minas Gerais viria tornar-se o maior polo siderúrgico a carvão vegetal do mundo na década de 1970. A utilização da madeira dos reflorestamentos propiciou o aumento da produção de carvão vegetal. Em meados da década de 1990, cerca de 80% do carvão vegetal brasileiro foi consumido em Minas Gerais (REZENDE e SANTOS, 2010).

O investimento em pesquisa e desenvolvimento em novas tecnologias capazes de obter maior rendimento da madeira, menor tempo no processo de produção, maior homogeneidade do carvão, ganho de escala e aproveitamento dos gases da pirólise para geração de energia é realizado por parte de grandes empresas no Brasil. Tais tecnologias ainda estão em fase de consolidação, e provém da evolução dos fornos metálicos na indústria. Além disso, para tecnologias convencionais de carbonização, a recuperação de energia dos gases de escape é complexa devido à variação de sua composição durante os diferentes estágios de carbonização (VILELA, LORA, *et al.*, 2014).

É estimado que, no Brasil, há um potencial anual de geração de energia elétrica de 3 a 5 TWh de eletricidade, considerando o volume histórico anual de produção de carvão vegetal (DE MIRANDA; BAILIS; VILELA, 2013). Apesar da aparente grande produção, ainda há uma prevalência do modelo artesanal de produção, que resulta em uma menor produtividade. Isto acontece devido ao baixo custo e simplicidade construtiva do modelo artesanal, diferentemente dos modelos industriais que utilizam tecnologias mais avançadas e ainda encontram dificuldades de implementação. As novas tecnologias dependem de um alto investimento e são um grande desafio até mesmo para grandes produtores (SANTOS, 2017).

Segundo Albuquerque (2019), a oferta, o custo-benefício e a qualidade do produto são os três principais motivos da preferência pelo consumo de carvão mineral pela indústria siderúrgica. Ou seja, é de grande interesse aumentar a produção, reduzir os custos operacionais e aprimorar a qualidade do carvão vegetal de forma sustentável e respeitando todas as leis e normas ambientais vigentes para que haja uma substituição à nível industrial. Além disso, qualquer investimento é muito influenciado pelo custo, sendo que qualquer melhoria ou adequação tende a fazer o preço

do produto final subir. Dessa forma, o planejamento, execução, controle e melhorias podem reduzir o custo do produto e torná-lo mais competitivo. Para que essa melhora ocorra de forma efetiva, é necessário atuar em toda a cadeia produtiva, desde a qualidade da madeira utilizada como matéria-prima na produção de carvão, até o escoamento da produção, passando por todo o processo produtivo.

Pensando nisso, pesquisas que avaliam o reaproveitamento dos gases efluentes da carbonização para a geração de eletricidade utilizando diferentes tecnologias de conversão estão sendo desenvolvidas. Além da geração, tais pesquisas também dão enfoque nas restrições ambientais relacionadas aos gases de pirólise. Ciclos termodinâmicos como o Ciclo Orgânico de Rankine (ORC), os Ciclos à Vapor (SRC) e as Turbinas a Gás de Queima Externa (EFGT) têm sido objeto de estudo por alguns autores como Castro (2014) e Leme, Venturini et al. (2018).

Considerando a existência de um grande mercado de aço no Brasil e nas vantagens econômicas e ambientais do carvão vegetal como alternativa ao carvão fóssil, nota-se uma deficiência na consolidação de novas tecnologias que possam suprir as necessidades energéticas no Brasil. Baseado na notável produção de carvão vegetal renovável em Minas Gerais e nos possíveis ganhos energéticos resultantes de sua produção, um levantamento do potencial energético proveniente dos gases efluentes das usinas de produção de carvão vegetal em Minas Gerais através das diferentes tecnologias de conversão energética disponíveis atualmente é justificável.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Produção de Carvão Vegetal

O Brasil é o maior produtor mundial de carvão vegetal, chegando à marca de cerca de 6 milhões de toneladas produzidas e consumidas no ano de 2019 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2020). O carvão vegetal representa 8,4% de toda a oferta de energia interna no país sendo a indústria siderúrgica o principal consumidor de, com mais de 90% de toda a produção nacional. (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA EPE, 2019).

A cadeia de valor do carvão vegetal envolve a coleta ou corte de madeira na fonte (por exemplo, florestas, bosques, arbustos, sistemas agroflorestais e lotes florestais ou de operações de processamento de madeira), a carbonização da madeira em fornos, a distribuição e comercialização de carvão vegetal e o consumo por famílias ou empresas (FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION FAO, 2017).

A lenha pode ser produzida em uma ampla variedade de sistemas florestais e agrícolas, incluindo plantações de árvores, sistemas agroflorestais, árvores fora das florestas e florestas naturais. A maneira como a madeira é produzida para energia depende das condições climáticas, cobertura vegetal, demanda local, infraestrutura, força de trabalho disponível e suas habilidades de manejo e direitos de uso da terra. Dos estimados 8 milhões de hectares de plantações de madeira para combustível em todo o mundo, 6,7 milhões de hectares estão na Ásia, principalmente na China e na Índia. Na América Latina, o Brasil está cada vez mais se voltando para as plantações de eucalipto para atender sua demanda por carvão industrial (GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT (GIZ), 2015).

Após o corte das árvores, o tronco e os galhos principais são cortados em toras de tamanho apropriado e empilhados para formar um forno para carbonização em carvão. Pequenos galhos da copa da árvore raramente são usados na produção de carvão, resultando em grandes quantidades de resíduos de madeira nos locais. Quando a madeira é cortada e coletada, geralmente é exposta ao sol para reduzir o teor de umidade de cerca de 50% para 18-20%. Quando a demanda é alta, no entanto, os carvoeiros muitas vezes omitem esta etapa, resultando em uma perda de eficiência no processo (FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION FAO, 2017).

A carbonização inicia-se com o aquecimento de uma pilha de madeira sob condições de baixo oxigênio em um espaço fechado e com o fornecimento limitado de ar. Isso desencadeia reações endotérmicas e exotérmicas. As altas temperaturas induzem a absorção de calor, o que leva à decomposição da biomassa, separando-a em gases voláteis, vapor e carvão sólido. A

eficiência da produção de carvão vegetal de um forno é normalmente definida como a razão de carvão vegetal produzido por insumo de madeira em uma base de peso seco (também conhecida como taxa de conversão de madeira em carvão). O rendimento de carbono é a massa de carbono no carvão em relação à massa inicial de carbono na madeira, desconsiderando as entradas de energia no processo de carbonização (FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION FAO, 2017).

### **2.1.1. Produção em Minas Gerais**

Minas Gerais é o maior consumidor de carvão vegetal e possui a maior área de florestas plantada do Brasil. O estado tem um grande papel no setor siderúrgico para a produção de ferro e aço, logo Minas Gerais ocupa posição estratégica na matriz energética nacional. Cerca de 350 municípios mineiros, 2,0% da área total do estado, têm plantações florestais para produção de carvão e outros fins industriais (REZENDE e SANTOS, 2010).

Os maiores consumidores de matéria-prima florestal no estado e, também, os maiores agentes reflorestadores, entre 2004 e 2008 foram as indústrias siderúrgicas, as produtoras de celulose e as produtoras de ferroliga. Além disso, no Triângulo Mineiro e Noroeste de Minas Gerais, a quase totalidade das plantações de eucalipto destinam-se principalmente à produção de carvão vegetal e celulose. Apenas uma pequena parcela é destinada à geração de energia térmica e vapor em aplicações industriais, comerciais e residenciais (REZENDE e SANTOS, 2010).

As instabilidades macroeconômicas provocam frequentes alterações nos investimentos públicos, privados e na produção industrial. Isso reflete em grandes oscilações no mercado de carvão vegetal e na menor ou maior utilização dessa matéria-prima. Em Minas Gerais, enquanto as plantações florestais espalham-se por metade dos municípios do estado, a produção de carvão vegetal concentra-se em alguns municípios do Vale do Jequitinhonha e norte de Minas. Apesar da significativa produção, uma parte do carvão ainda é proveniente de estados como Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Tocantins, Goiás e Bahia e até mesmo de países vizinhos como o Paraguai (REZENDE e SANTOS, 2010).

Em 2018, 15 municípios foram responsáveis por 50,9% da produção estadual, com destaque para João Pinheiro, Itamarandiba, Três Marias, Lassance, Carbonita, Buritizeiro, Turmalina e Curvelo (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2020).

Minas Gerais apresenta um elevado potencial para a produção de carvão vegetal a partir de plantações florestais. Há estimativa que as florestas plantadas contribuam com 82,0% do carvão

consumido pelas siderúrgicas, evidenciando a importância deste segmento (SUPERINTENDÊNCIA DE ABASTECIMENTO E ECONOMIA AGRÍCOLA, 2017).

Com o objetivo de manter o suprimento de madeira para o setor florestal, incluindo a produção de ferro-gusa para exportação as florestas plantadas foram implantadas como um mecanismo para a preservação e a conservação das florestas nativas, cada vez mais escassas em torno das plantas industriais (TEIXEIRA e RODRIGUES, 2021).

A silvicultura é muito importante na economia do estado e, na tentativa de integrar pequenos e médios produtores na cadeia produtiva com o objetivo de atender diversos ramos consumidores de madeira, o estado de Minas Gerais tem investido bastante em programas de fomento ao reflorestamento. As maiores áreas de plantio se dão nas regiões geográficas intermediárias de Montes Claros e Teófilo Otoni (TEIXEIRA e RODRIGUES, 2021).

A cultura do eucalipto tem tomado um papel cada vez mais importante nas últimas décadas. Ele concorre diretamente com as áreas de pastagens e culturas de cereais. Porém, o setor apresenta vários obstáculos como, por exemplo, as questões de licenciamento ambiental. Entretanto, a demanda por produtos florestais é crescente em todo o mundo e deverá sustentar o crescimento do setor ao longo de muitos anos. Há uma projeção de crescimento de 36,6% de carvão vegetal até 2027, com uma taxa média de crescimento anual de 3,17% (SUPERINTENDÊNCIA DE ABASTECIMENTO E ECONOMIA AGRÍCOLA, 2017). Na Tabela 1 são apresentadas as projeções de produção de carvão vegetal até 2027.

Segundo a Indústria Brasileira de árvores (2019), existem mais de 130 indústrias que utilizam carvão vegetal no processo de produção de ferro-gusa, de ferro-ligas e de aço. Porém, apenas 70% deste total de indústrias estavam operando em 2018.

A área total de árvores plantadas no Brasil foi de 7,83 milhões de hectares em 2018, enquanto os plantios de eucalipto ocuparam 5,7 milhões de hectares. Além disso, 36% do total da área plantada de árvores no Brasil pertence às empresas do segmento de celulose e papel. Já o segmento de siderurgia a carvão vegetal corresponde somente à 12% dessa área (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2019).

Tabela 1: Projeções de produção de carvão vegetal até 2027 (adaptado de Superintendência de Abastecimento e Economia Agrícola, 2017)

<b>ano</b>	<b>carvão vegetal (milhões ton.)</b>
2017	4,5
	<b>projeção</b>
2018	4,7
2019	4,9
2020	5,0
2021	5,2
2022	5,4
2023	5,5
2024	5,7
2025	5,9
2026	6,0
2027	6,2
<b>2017/2027</b>	<b>carvão vegetal (milhões ton.)</b>
variação no período (%)	36,60
taxa de cresc. Anual (%)	3,17

### 2.1.2. Tecnologias de Carbonização

A eficiência do forno é um dos fatores mais importantes na sustentabilidade da produção de carvão vegetal e seu impacto nas mudanças climáticas. A eficiência varia entre os tipos de forno e entre as fontes da literatura.

Cerca de 80% do carvão vegetal usado comercialmente no Brasil é produzida em fornos “rabo quente” feitos de tijolos, que têm eficiências de conversão entre 25% e 30%. Alguns fornos modernos têm eficiências de até 40%, mas os métodos de carbonização mais comumente usados para carvão não industrial em países em desenvolvimento são os fornos tradicionais de terra com eficiências de 10% a 22% (BAILIS, RUJANAVECH, *et al.*, 2013).

Aproximadamente 30% da madeira é convertida em carvão vegetal e o restante de sua massa é convertida em gases durante o processo convencional de produção de carvão vegetal. No Brasil, a maior parte da produção nacional são lançados para atmosfera, sendo que aproximadamente 25% destes gases são compostos não condensáveis e 45% são compostos orgânicos condensáveis (DONATO, 2017).

De acordo com Rodrigues & Braghini Junior (2019<sup>a</sup>), os fornos de carbonização variam em relação à dimensão e capacidade de produção, materiais de construção (alvenaria, metal, uma mistura de ambos), forma, número de chaminés, mecanização, níveis de controle do processo e fonte de calor (fonte de energia) necessária para aquecer a madeira. Nesse contexto, os fornos de

carbonização podem ser classificados de várias maneiras, tais como: fonte de energia (interna ou externa); mobilidade (forno fixo ou portátil); processo de produção (contínuo ou em bateladas); tamanho; e tecnologia de produção (primitiva ou convencional). Na Tabela 2 são apresentadas informações sobre os fornos de carbonização em alvenaria.

Em relação ao rendimento (% em massa) apresentado na Tabela 2, valores superiores a 32% são considerados altos valores de rendimento. Nesse sentido, os fornos com os maiores valores de rendimento são: Forno colmeia, Forno JG, Forno retangular, retorta de Adam e Forno argentino.

Note-se que, devido ao tamanho do forno retangular de alvenaria, ele é muito mais alto que os demais. É também o forno cujo desempenho e qualidade do carvão vegetal são mais variáveis, pois um grande desafio é o controle do processo de carbonização. Deste modo, são necessários maiores investimentos em instrumentação para o monitoramento e controle do processo de carbonização e, conseqüentemente, para garantir menor variabilidade e maior rendimento, exigindo muito mais investimento que os demais.

Segundo Pereira, Martins et al. (2017), apesar do avanço da cadeia produtiva do carvão vegetal, são necessários mais investimentos para a evolução e consolidação das melhores técnicas de produção sustentável de carvão vegetal. Desse modo, os autores recomendam políticas públicas de incentivo ao uso de tecnologias para redução da emissão de gases de efeito estufa durante a produção do carvão vegetal e linhas de crédito aos agricultores para facilitar a implementação dessas tecnologias. Além disso, os autores ressaltam a importância do desenvolvimento de uma câmara de combustão adequada para queima dos gases de carbonização, mitigando impactos negativos e otimizando a produção e a qualidade do carvão vegetal.

Devido à impedimentos técnicos e ao grande desconhecimento por parte da sociedade e do setor produtivo, atualmente as câmaras de combustão não conseguem atingir toda a cadeia produtiva de forma consistente e abrangente. Logo, é evidente a necessidade de pesquisas a fim de melhorar o sistema de combustão de gás e seu uso para a produção de calor e eletricidade (PEREIRA, MARTINS, *et al.*, 2017).

## **Fornos metálicos de carbonização**

Os fornos metálicos podem operar em um processo intermitente (batelada) ou de semi-batelada. Os principais fornos metálicos são: Isomóvel, Magnien, DPC e Bricarbras. Algumas informações quantitativas sobre os principais fornos metálicos e híbridos (mistura de metal com alvenaria) são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Informações quantitativas sobre fornos de carbonização em alvenaria (adaptado de RODRIGUES & BRAGHINI JUNIOR, 2019)

	Capacidade volumétrica	Dimensões (C × L × A) ou (D × A)	Vida Útil	Capacidade de produção por ano	Relação entre lenha, carvão vegetal e tempo de ciclo			Rendimento (% massa)
					Lenha	Carvão	Tempo de ciclo	
<b>"Rabo Quente"</b>	9 m <sup>3</sup> * a 50 m <sup>3</sup>	2,9-3,8 × 2,3 m	2-3 anos	192-240 mdc	16st	8-10 mdc	10 dias	25-30
				20st	8 mdc	5-7 dias	20-28	
<b>Forno de encosta</b>	~20 m <sup>3</sup>	3-4 × 2,5-2,8 m	3 anos	288 mdc	20st	8,7 mdc	7-8 dias	25-32
<b>Forno colmeia</b>	s.i.	5 × 3-4 m	3-5 anos	600-620 mdc	36st	20 mdc	10-12 dias	28-34
	s.i.	3-8 × 3,2-5 m		600-720 mdc	5,0-200,0st	s.i.	8-9 dias	
<b>Forno de superfície JG®</b>	s.i.	3 × 2,3 m	2-3 anos	264-336 mdc	10,40-12,5	s.i.	5-7 dias	30-35
				264 mdc	10-11st			
<b>Forno retangular de alvenaria</b>	s.i.	s.i.	15 anos	4560 mdc ou 955 t	360 st ou 283 m <sup>3</sup>	200 mdc ou 41,9 t	16 dias	34
	133 m <sup>3</sup>	13 × 4 × 4 m	10 anos	1512 mdc	106 m <sup>3</sup>	58 mdc	14 dias	28
<b>Forno MF1-UFV</b>	8,6 m <sup>3</sup>	s.i.	s.i.	s.i.	10,4st	s.i.	5 dias	29
<b>Retorta de Adam</b>	3 m <sup>3</sup>	3,7 × 3,7 × 1,5 m	s.i.	s.i.	0,75 t	s.i.	24-30 h	30-42
<b>Missouri</b>	4-350 m <sup>3</sup> ; 180 m <sup>3</sup> *	11 × 7 × 4 m	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	30-33 dias	20-30
<b>Forno argentino</b>	s.i.	5-7 × 3 m	5-8 anos	234-260 t	30 t	9-10 t	13-14 dias	

\* Capacidade volumétrica que é mais comum.

s.i. = sem informação.

Dimensões: C × L × A = comprimento × largura × altura ou D × A = diâmetro base × altura.

t = tonelada métrica; kg = quilograma; m<sup>3</sup> = metro cúbico; st = medidor estérico; mdc = medidor de carvão; m = metro e h = hora.

De acordo com a Tabela 3, a partir dos dados disponíveis de rendimento (% em massa), os fornos com maior rendimento médio são: Forno DPC e Forno Isomóvel. Deve-se notar que o rendimento varia de acordo com a madeira utilizada e o controle do processo; portanto, alguns

autores citam valores médios ou faixas de valores. O tempo de ciclo em fornos de metal geralmente é menor porque o resfriamento é mais rápido.

Tabela 3: Informações quantitativas sobre fornos de metal (adaptado de RODRIGUES & BRAGHINI JUNIOR, 2019)

	Capacidade volumétrica	Dimensões	Vida útil	Capacidade de produção por ano	Relação entre lenha, carvão vegetal e tempo de ciclo			Rendimento (% massa)
					Lenha	Carvão	Tempo de ciclo	
<b>Forno Isomóvel</b>	27 m <sup>3</sup>	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	24 h	35–40
<b>Forno Magnien</b>	4–16 m <sup>3</sup>	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	10–24 h	15–30
<b>Forno Bricarbras</b>	s.i.	s.i.	10 anos	2433 mdc	31.2 st	20.8 mdc	24 h	33–35
<b>Forno DPC</b>	24 m <sup>3</sup>	s.i.	10 anos	600–684 t	s.i.	s.i.	72–90 h	35–40

## Retortas

As retortas podem operar em semi-batelada e contínua, cuja fonte de energia é geralmente externa ou de gás recirculado. As principais retortas são: Retorta de Contêiner, Polikor, Retorta Horizontal Clássica, Retorta Contínua, Forno CLM Francês, Retorta de Van Marion (VMR).

De acordo com a Tabela 4, a partir dos dados disponíveis, a Retorta Contínua é a que possui a maior capacidade de produção anual (10.000 toneladas) de carvão. De acordo com o rendimento (% em massa), a Carbonização Contínua de Carboval tem o maior rendimento médio.

Deve-se notar que o rendimento varia de acordo com a madeira utilizada e o controle do processo; portanto, alguns autores citam valores médios ou faixas de valores. O tempo de ciclo em fornos metálicos geralmente é menor porque o resfriamento é mais rápido. A partir dos dados disponíveis, o forno com menor tempo de ciclo de produção é o forno Container.

Tabela 4: Informações quantitativas sobre retortas (adaptado de RODRIGUES & BRAGHINI JUNIOR, 2019)

	Capacidade volumétrica	Dimensões	Vida útil	Capacidade de produção por ano	Relação entre lenha, carvão vegetal e tempo de ciclo			Rendimento (% massa)
					Lenha	Carvão	Tempo de ciclo	
<b>Retorta Contêiner</b>	40 m <sup>3</sup>	s.i.	s.i.	s.i.	28st	20 mdc	3–5 h	34
<b>Retorta Horizontal Clássica</b>	55 m <sup>3</sup>	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	24–48 h	35
<b>Carbonização Contínua de Carboval</b>	50 m <sup>3</sup>	2.5 m × 25 m	25 anos	7200 t	s.i.	s.i.	12–14 h	40–42
<b>Retorta Contínua</b>	n.i	n.i	10 anos	2000–10,000 t	450 t/mês	s.i.	5 h*	33
<b>Forno Polikor</b>	s.i.	s.i.	s.i.	71 t	10–12 m <sup>3</sup>	1 t	s.i.	25
<b>Forno CML Francês</b>	s.i.	s.i.	s.i.	2500 t	5st	2 mdc	24 h	20–25
<b>Forno VMR</b>	2 m <sup>3</sup>	s.i.	s.i.	312.5 t	s.i.	s.i.	8–12 h	27–33

\* O tempo de carbonização não considera o tempo para carregar e descarregar o forno, nem o tempo de resfriamento.  
s.i. = sem informação.

Dimensões: C × L × A = comprimento × largura × altura ou D × A = diâmetro base × altura.

t = tonelada métrica; kg = quilograma; m<sup>3</sup> = metro cúbico; st = medidor estérico; mdc = medidor de carvão vegetal; m = metro e h = hora.

Existem receios quanto à adoção de novas tecnologias devido ao fato de ainda não terem demonstrado eficiência técnica suficiente em termos de durabilidade por longos períodos de produção. Como resultado, atualmente as tecnologias tradicionais para a produção de carvão são adotadas não apenas pelos pequenos e médios produtores, mas também pelos grandes. É improvável que uma nova tecnologia seja adotada se ela não for mais econômica do que as tecnologias tradicionais já em uso (RODRIGUES e JUNIOR, 2019 b).

Rodrigues & Braghini Junior (2019<sup>b</sup>) também ressaltam que algumas características importantes para o desenvolvimento de novas tecnologias são: a reutilização de gases e vapores; a mecanização de carga e descarga; o resfriamento rápido do carvão vegetal; os custos viáveis de implantação, operação e manutenção; a operação simples; o monitoramento de temperatura do forno; o uso de novos materiais resistentes à oxidação e deformação. Assim, na consolidação de novas tecnologias, os obstáculos que precisam ser superados têm caráter tanto técnico quanto econômico.

## 2.2. Tecnologias de Conversão de Energia Elétrica

Como apresentado nos capítulos anteriores, a produção de carvão vegetal tem um potencial térmico para a geração de eletricidade. Tal geração é feita a partir de diferentes tecnologias de conversão de energia elétrica. Os ciclos a vapor tradicional (*Steam Rankine Cycle – SRC*), ciclo Rankine orgânico (*Organic Rankine Cycle – ORC*) e turbina a gás de queima externa (*Externally Fired Gas Turbine – EFGT*) são três das tecnologias já bastante utilizadas e estudadas na geração de eletricidade a partir dos gases efluentes da produção de carvão vegetal e de outros tipos de calor residual (LEME, VENTURINI, *et al.*, 2018; CASTRO, 2014; VILELA, LORA, *et al.*, 2014; MIRANDA, BAILIS e VILELA, 2013)

### 2.2.1. O Ciclo SRC

O ciclo Rankine a Vapor (SRC) emprega a água como o fluido de trabalho e apresenta vantagens no que diz respeito à segurança, estabilidade e simplicidade de operação por ser uma tecnologia já bem conhecida e confiável (SINGH e PEDERSEN, 2016).

Os processos pelos quais o SRC passa são demonstrados na Figura 1, sendo eles:

- 1-2: Processo de bombeamento adiabático reversível na bomba
- 2-3: Transferência de calor a pressão constante na caldeira
- 3-4: Expansão adiabática reversível na turbina (ou outro motor principal, como uma máquina a vapor)
- 4-1: Transferência de calor a pressão constante no condensador

O ciclo de Rankine também inclui a possibilidade de superaquecer o vapor, como o ciclo *1-2-3-4-1*. O calor transferido para o fluido de trabalho é representado pela área *a-2-2-3-b-a* e o calor transferido do fluido de trabalho pela área *a-1-4-b-a* (BORGNAKKE e SONTAG, 2009).

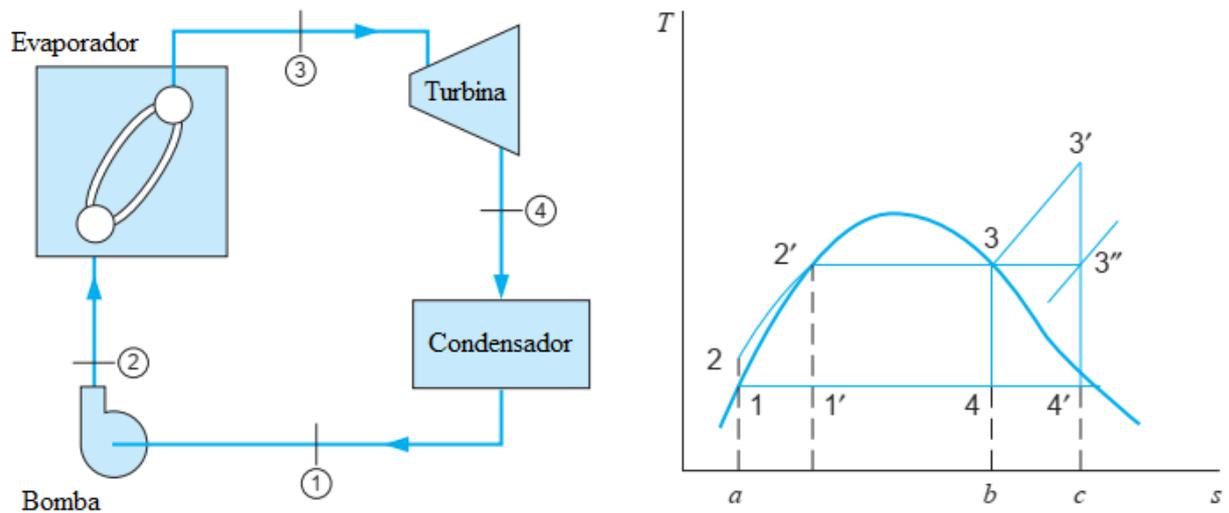


Figura 1: Esquema e diagrama T-s para um ciclo Rankine a vapor (adaptado de BORGNAKKE e SONTAG, 2009)

Rad e Mohammadi (2018) projetaram um SRC para recuperar o calor residual do gás de combustão de uma fábrica de cimento, para melhorar o desempenho termodinâmico geral. O processo de simulação indicou que um aumento na pressão de evaporação da caldeira leva a um aumento na temperatura de saída dos gases de combustão, reduzindo a energia total recuperável na caldeira.

De acordo com Su, Zhang et al. (2021), o SRC está maduro e tem sido amplamente usado para a recuperação de calor residual de gás de combustão na indústria de transporte marítimo e tem mostrado benefícios econômicos consideráveis. Porém, por ser limitado pelos parâmetros físicos da água, o desempenho termodinâmico e os benefícios econômicos do SRC diminuem rapidamente com uma diminuição na temperatura da fonte de calor.

### 2.2.2. O Ciclo ORC

O ciclo Rankine orgânico (ORC) é como um ciclo Rankine convencional à vapor (SRC), porém utiliza uma variedade de fluidos de trabalho orgânicos com elevada massa específica. Esse fluido apresenta baixo ponto de ebulição e calor de vaporização inferior ao da água, o que permite sua evaporação em menores temperaturas.

Tipicamente, a temperatura do calor de admissão em um ciclo ORC é de 300°C a 350°C, comparado com os 500°C a 600°C do vapor comumente utilizado nos ciclos SRC água-vapor tradicionais (IFC, 2017). Essa temperatura pode ser ainda menor como nos estudos conduzidos por Le, Feidt et al. (2014) em que utilizaram uma temperatura da fonte de calor de 150°C, ou

Kosmadakis, Manolakos et al. (2015) à 95°C. O funcionamento do ciclo básico ORC para aproveitamento de calor residual com superaquecimento é mostrado na Figura 2.

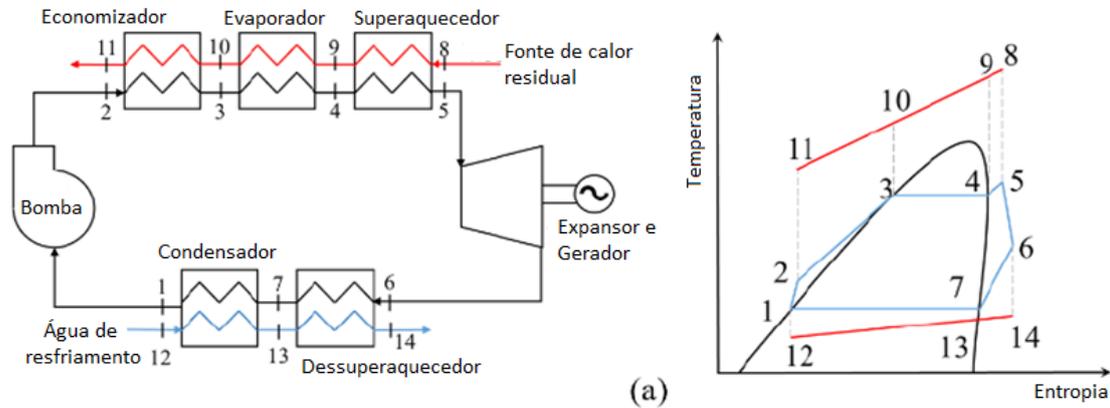


Figura 2: Funcionamento do Ciclo Básico ORC com superaquecimento (adaptado de DO VAL, SILVA & OLIVEIRA JR., 2017)

- O fluido de trabalho é bombeado (1→2) para o economizador e evaporador como líquido saturado.
- A alta temperatura da fonte de calor pré-aquece o fluido no economizador até se tornar líquido saturado (2→3)
- O fluido então é vaporizado no evaporador até o ponto de vapor saturado (3→4).
- O fluido de trabalho é então superaquecido e sofre expansão na turbina até a pressão de condensação (4→5→6).
- O vapor de exaustão flui através do dessuperaquecedor (6→7) onde ele é resfriado até se tornar vapor saturado.
- O vapor é condensado no condensador (7→8) completando o ciclo fechado.

Por apresentar essa característica, os ORC se tornam interessantes em aplicações de recuperação de calor usando fontes de calor com temperatura relativamente baixa, especialmente na recuperação de resíduos térmicos (*Waste Heat Recovery* – WHR) para a geração de energia elétrica. (REIS, 2018).

De acordo com Ribeiro (2017), o ORC é o ciclo de baixa temperatura mais comercialmente desenvolvido, sendo as maiores fabricantes: Turboden (Itália), ORMAT (EUA), Maxxtec (Alemanha), Bosch KWK (Alemanha), Opcon (Suécia) e Tri-o-gen (Holanda).

### **2.2.3. O Ciclo EFGT**

Em um ciclo com turbina a gás de queima externa (EFGT), o gás de combustão vindo do combustor através do trocador de calor de alta temperatura aquece o ar comprimido. O ar comprimido é então expandido na turbina, que por sua vez aciona um gerador elétrico. Devido ao fato de que a combustão ocorre à pressão atmosférica e fora do ciclo, os gases de combustão não estão em contato direto com a turbina. Isso faz com que a EFGT seja uma opção interessante para a produção de eletricidade e calor, pois possibilita a utilização de uma variedade de combustíveis incluindo a biomassa sólida e/ou gases efluentes de um processo como o da carbonização da madeira.

O ar quente e limpo na exaustão da turbina também pode ser utilizado diretamente para aplicações térmicas sem nenhum equipamento adicional de recuperação de calor. Logo, a configuração EFGT pode ser considerada uma boa opção para aplicações combinadas de calor e eletricidade, com uma contribuição positiva para a redução de emissões de gases de efeito estufa (KAUTZ e HANSEN, 2007).

Enagi, Al-attab e Zainal (2018) fizeram uma revisão de estudos sobre diferentes métodos de produção de biocombustíveis líquidos e sua utilização em turbinas a gás, incluindo a EFGT. Eles concluíram que o trocador de calor de alta temperatura com temperatura de entrada da turbina mais baixa de 700–900 ° C é geralmente o principal fator limitante para esta tecnologia. Logo, o aproveitamento da energia de gases residuais utilizando a EFGT é ainda um desafio.

Os estudos de Leme, Venturini et al. (2018) demonstram a aplicação da tecnologia em uma unidade de carbonização em Minas Gerais para a geração de eletricidade. Os resultados demonstram que a eficiência variou entre 11,4% e 19,3%, dependendo se o ciclo é regenerativo ou não e da temperatura do ar na entrada da turbina. Os autores também evidenciam que a EFGT ainda não é uma tecnologia disponível comercialmente no Brasil, o que pode dificultar sua futura utilização.

### **2.2.4. Custos de implantação**

Os principais custos de investimento em uma planta de geração a biomassa incluem despesas com planejamento, engenharia, custos de construção, manejo e preparo de equipamento – gerador, sistema de controle e emissões – e combustível. Custos extras são associados com conexão à rede elétrica e infraestrutura. O custo dos equipamentos representa os maiores valores, mas existem projetos que podem ter altos custos com infraestrutura e logística, ou mesmo conexão à rede elétrica, quando estes são alocados em áreas remotas (IRENA, 2019).

Tais valores dependem das regiões onde são implementados os projetos, principalmente devido ao custo de tecnologia e ao local da instalação. Sistemas instalados em economias emergentes tendem a apresentar investimentos menores quando comparados a países da OECD. Isso se dá porque em economias emergentes, pode-se contar com menores custos de mão-de-obra e commodities, e se beneficiar de políticas menos restritivas do ponto de vista ambiental. Portanto, é possível aplicar tecnologias de menor custo com controle de emissões reduzido, embora em alguns casos isso possa resultar em maiores índices de poluição local.

Uma Unidade de Produção de Carvão (UPC) de médio ou grande porte, que atualmente emprega a tecnologia de fornos retangulares de alvenaria em seu processo de carbonização da madeira normalmente adota um pátio de produção onde os fornos de carbonização são distribuídos em várias fileiras.

Tradicionalmente as UPC tem distribuído os fornos em seu pátio de produção tendo em conta basicamente o espaço disponível e facilitação do processo de carregamento e descarregamento dos fornos, bem como o armazenamento do carvão produzido. Assim, o espaçamento entre os fornos normalmente é muito variável, com distâncias entre fornos que variam de poucos metros (12 m) até situações nas quais o espaçamento pode chegar a 40 m ou mais.

No entanto, com a crescente preocupação em reduzir as emissões gasosas do processo de produção de carvão vegetal através da queima dos gases residuais, as unidades de carbonização têm optado por um layout mais compacto, onde os fornos são adensados em conjuntos formados por duas fileiras de fornos, cada uma contendo em média 30 fornos espaçados de 7,0 a 10 m. As chaminés dos fornos são instaladas na parte traseira deles, que fica voltada para um corredor que separa as duas fileiras de fornos. Este projeto visa facilitar a condução dos gases da carbonização até um queimador, o qual normalmente fica localizado, ou tem previsão de instalação, no centro do corredor que separa as fileiras de fornos. Neste formato as perdas de energia com a tubulação de condução de gases e seus custos são minimizados.

Em relação aos dutos, entre os produtores de carvão vegetal é consenso a adoção de dutos subterrâneos fabricados em alvenaria. Segundo informações levantadas com os fabricantes, há grande preocupação com construções aéreas, dado ao potencial de acidentes decorrentes da intensa circulação de maquinário e caminhões de grande porte, bem como ao aumento dos custos, devido a necessidade de sustentação dos dutos, ao material usado e à necessidade de isolamento térmico. Instalações superficiais também não são vistas com bons olhos, dado a limitação de acesso os fornos e circulação de maquinário que podem causar.

### **Custos de sistemas SRC**

A maioria das plantas geradoras que utilizam o ciclo a vapor usam sistemas de queima direta de biomassa para a produção de vapor de alta pressão, o qual é usado numa turbina para acionar o gerador e produzir eletricidade. Para o uso de um ciclo a vapor, os seguintes sistemas são primordiais (FEMP, 2016):

- Sistema de armazenamento de combustível;
- Caldeira;
- Bombas;
- Ventiladores;
- Turbina a vapor;
- Gerador;
- Condensador;
- Torre de refrigeração;
- Exaustor / controlador de emissões;
- Sistema de controle (automação).

Para sistemas a vapor de geração única de potência (sem cogeração) com faixas de produção de potência entre 5 e 25 MW, os custos de investimento variam em torno de 3,000 e 5,000 US\$/kW de eletricidade (FEMP, 2016).

Na China, que utiliza diferentes tipos de biomassa em seus ciclos a vapor, podem ser encontrados custos de investimento entre 620 US\$/kW para casca de arroz até 4094 US\$/kW para uma planta abastecida com gás de aterro. Na Índia, a variação ocorreu dentre 508 US\$/kW, para uma planta operando com bagaço, até 4305 US\$/kW para projetos de plantas operando com gás de aterro. O intervalo de custos de instalação é ainda maior para projetos situados na Europa e na América do Norte, onde os custos variam de 591 US\$/kW, para projetos com gás de aterro na América do Norte, até 7960 US\$/kW, para projetos com madeira residual na Europa. Os custos maiores para os continentes europeu e norte-americano estão associados às opções usadas para o desenvolvimento de cada projeto nessas áreas, sendo que em média esses são mais caros para essas regiões. Os dados disponíveis por matéria-prima para o restante do mundo são mais limitados, entretanto, pode-se dizer que os custos de instalação para bagaço são projetados entre 422 e 5654 US\$/kW. Pode-se afirmar que a média ponderada do custo total de instalação para o mundo, comumente, varia entre os baixos custos de China e Índia até os valores altos encontrados para Europa e América do Norte.

## **Custos de sistemas ORC**

Os custos dos equipamentos principais de um ciclo orgânico são usualmente calculados através de correlações empíricas devido a que não há informação suficiente disponível, quanto ao custo real de sistemas ORC no mercado. Portanto, a maioria dos pesquisadores usam correlações matemáticas para cada equipamento específico do ciclo: o evaporador, o conjunto expensor gerador, o condensador e o sistema de bombeamento.

Lemmens (2015), realizou uma revisão bibliográfica fornecendo uma visão dos sistemas ORC de um ponto de vista econômico. Segundo a autora, inovações técnicas são fundamentais para a evolução para setores de energia mais simplificados e baseados em energias renováveis, mas os processos de adoção e difusão de tecnologias inovadoras são fortemente influenciados por fatores econômicos. Uma breve revisão do conhecimento da literatura sobre os custos de investimento de módulos ORC e projetos ORC revela que a maioria está na faixa de 2.000 a 4.000 €/kW. A principal conclusão do estudo, segundo o autor, é ter cuidado ao interpretar os resultados obtidos a partir de estimativas de custo. Em vez de serem usadas como resultados exatos, essas estimativas podem fornecer orientação ao comparar várias alternativas, estimadas com o mesmo método.

Ainda de acordo com Lemmens (2015), um número crescente de referências utiliza técnicas de otimização termo econômica e técnico-econômica aplicando técnicas de estimativa de baixo para cima para estimar os custos de módulos ou projetos de ORC. As estimativas de custo dos componentes podem ser feitas simplesmente usando métodos de expoentes de escala, enquanto estimativas mais detalhadas usam técnicas de estimativa fatorial. A precariedade do uso de técnicas fatoriais para aproximar os custos reais da planta foi demonstrada e confirmada para um ORC existente aplicado para recuperação de calor residual. Os custos específicos estimados de equipamentos adquiridos divergem dos custos reais do projeto em quase 44%. Isso implica que os resultados em tais configurações não devem ser interpretados como finais, mas sim como uma ideia sobre a faixa esperada de custos de investimento. Este tipo de estimativa pode ser útil para comparar mutuamente vários designs de sistema, onde a comparação proporcional é mais importante do que os resultados exatos.

Também é importante levar em consideração a diferença entre custos e preços nesse tipo de estudo. Os custos refletem a quantia necessária para produzir um determinado item, o preço é a quantia que você paga para comprá-lo. Os custos associados à produção de um sistema ORC serão, portanto, diferentes do preço pago para adquirir esse sistema. Muitas correlações usadas para estimar custos são obtidas usando preços de fornecedores. Isso não é um problema no caso

de o desenvolvedor do ORC comprar a maioria dos equipamentos em vez de desenvolvê-los (LEMMENS, 2015).

### **Custos de sistemas EFGT**

Os gastos de capital (CAPEX) dos sistemas EFGT ainda são difíceis de avaliar devido ao estágio atual da tecnologia ainda imaturo, porém pode ser considerado um aumento de 50% em comparação com uma turbina a gás padrão (RICCIO, MARTELLI e MALTAGLIATTI, 2014). Kautz e Hansen (2007) consideram um custo de microturbinas a gás na faixa de € 1000–1200 por  $\text{kW}_{el}$ , o que levaria a € 1500–1800 por  $\text{kW}_{el}$  para o EFGT.

Em outro estudo, Camporeale, Pantaleo et al. (2015) extrapolaram o custo total das fábricas EFGT por meio de entrevistas e coleta de dados dos fabricantes das tecnologias selecionadas. Os autores calcularam um CAPEX específico de € 2530/ $\text{kW}_{el}$  considerando turbina a gás, caldeira de biomassa, trocador de calor, obras civis, conexão à rede e motor, desenvolvimento e seguros.

Mirandolla, Pedrazzi et al. (2021) investigaram turbinas a gás de queima externa padrão e híbridas aplicadas a um aterro sanitário e uma instalação de gestão de resíduos. Em sua análise econômica, consideraram a venda de biomassa de madeira e a análise do Valor Presente Líquido mostrou um tempo de retorno de 7 anos para o investimento utilizando EFGT padrão e 5,5 anos para o sistema com EFGT híbrido. O valor presente líquido foi de 1.310.600,00 € para EFGT padrão e 6.655.792,00 € para a configuração com EFGT híbrido.

### 3. METODOLOGIA

No desenvolvimento do trabalho, foram consideradas 5 etapas:

A 1ª etapa deste trabalho é a Estimativa de Produção de Carvão Vegetal em Minas Gerais, que se constituiu da caracterização dos produtores de carvão vegetal em Minas Gerais. Para atingir esse objetivo, fez-se um levantamento da produção de carvão vegetal a partir de diferentes bases de dados. Primeiramente, os dados consolidados do IBGE para produção de carvão vegetal em Minas Gerais foram levantados utilizando o Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA). Porém, os dados do IBGE são desagregados até o nível municipal, não sendo possível obter o número de unidades de carbonização nem sua produção no Estado. Fez-se, então, um levantamento das unidades de carbonização baseando-se nos processos de licenciamento ambiental deferidos pelo Estado para produção de carvão vegetal oriunda de floresta plantada e nativa. Tais dados foram obtidos a partir do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SISEMA) e do Portal Nacional de Licenciamento Ambiental (PNLA). Os dados coletados pelos três órgãos foram cruzados a fim de obter-se uma estimativa real do número de unidades de carbonização e produção de carvão vegetal em Minas Gerais.

A 2ª etapa é a Classificação das Unidades de Carbonização, em que, de posse das informações disponíveis sobre os produtores e estimativa da produtividade, classificou-se as unidades de carbonização quanto à produção e quanto às tecnologias de carbonização. Como muitas das informações relativas ao número e tipo de fornos não estavam explícitas nos documentos analisados, fez-se uma estimativa do tipo de tecnologia de carbonização utilizada por cada produtor. Isso foi feito com a intenção de fixar valores de eficiência para cada unidade produtora e, assim, estimar a quantidade e poder calorífico dos gases residuais disponíveis para a geração de eletricidade.

Além disso, também foi calculada a área plantada de eucalipto necessária para suprir a produção de carvão estimada para 2020. Tal cálculo foi feito com base em valores médios de eficiência de produção e área plantada para árvores de eucalipto no Brasil.

A 3ª Etapa é a Projeção da Produção de Carvão Vegetal em Minas Gerais. A projeção foi fundamentada nos dados consolidados de produção de carvão vegetal do IBGE para o Estado. A projeção foi feita utilizando-se uma função de suavização exponencial disponível no Excel e validada utilizando-se os 10 últimos anos de dados disponíveis e de projeções semelhantes realizadas por outras entidades em Minas Gerais.

A 4ª Etapa é o Cálculo do Potencial Energético Disponível no Estado. Tal cálculo foi baseado na quantidade de carvão produzido, na eficiência dos fornos de carvão, na quantidade e

de gases efluentes em cada unidade, no PCI médio desses gases e nas eficiências das tecnologias de conversão adotadas.

Após isso, os resultados de produção e potencial energético foram extrapolados para os anos seguintes, baseado na projeção realizada anteriormente. Foram considerados alguns cenários, do mais otimista ao mais pessimista quanto à geração de eletricidade. Como forma de melhor ilustrar cada resultado e cenário estabelecido, as informações foram exportadas para o QGis e aplicados em mapas base do Estado de Minas Gerais.

Finalmente, a 5ª Etapa Análise Econômica: foi realizada uma análise econômica a fim de adequar os aspectos técnicos à implementação no cenário atual existente no setor. Para isso, fez-se os cálculos de custos de aquisição (CAPEX) e operação (OPEX). Além disso, calculou-se o preço de venda de energia e payback para a viabilização dos empreendimentos.

Um fluxograma geral das etapas do trabalho pode ser visualizado na Figura 3.

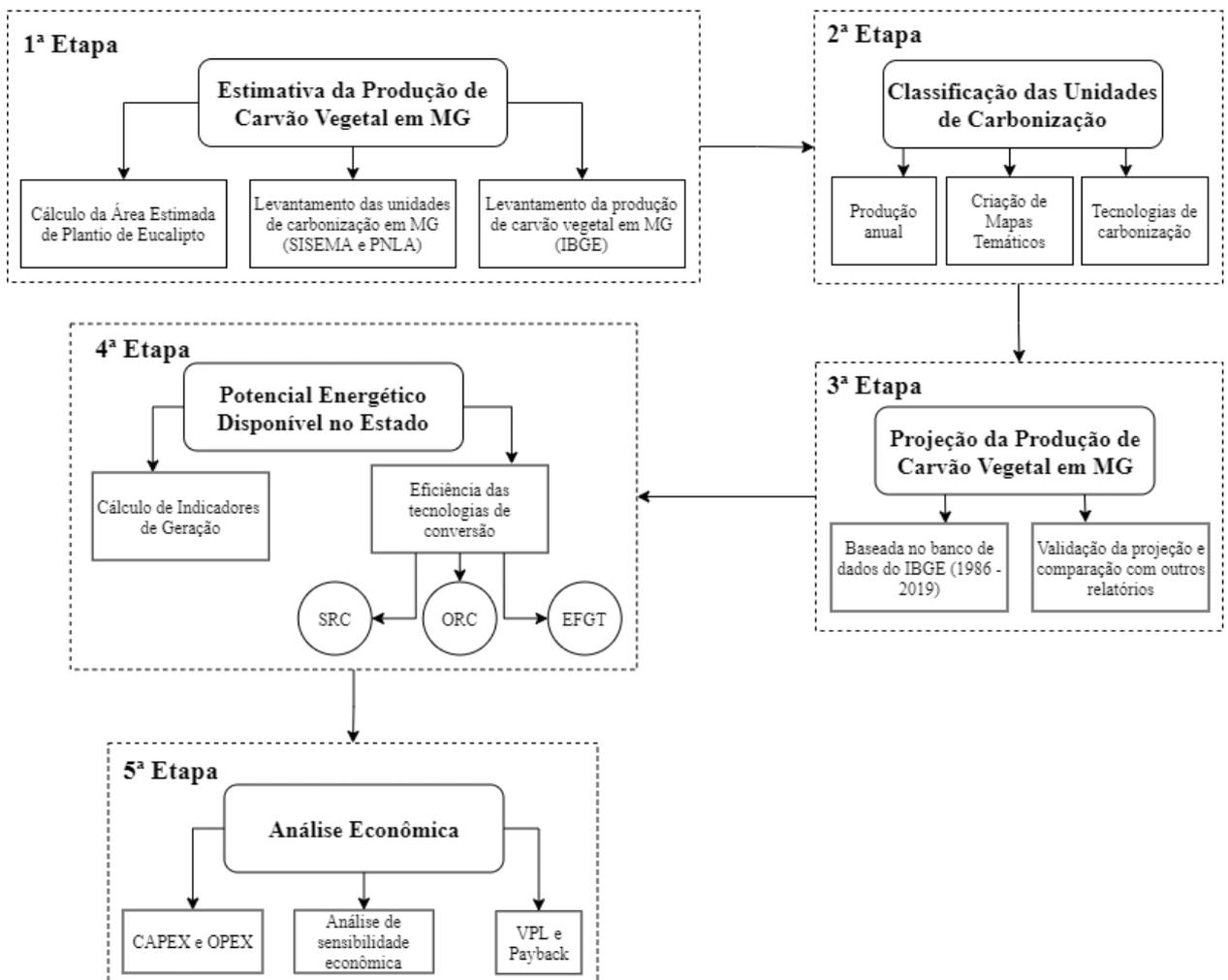


Figura 3: fluxograma geral das etapas do trabalho

### 3.1. Etapa 1: Estimativa da Produção de Carvão Vegetal em MG

#### 3.1.1. Levantamento da produção de carvão vegetal em MG

A informação de quantidade produzida de carvão vegetal em Minas Gerais pôde ser acessada pelo Sistema IBGE de Recuperação Automática. Os dados foram consultados em novembro de 2020, estando disponíveis informações relacionadas à produção de carvão vegetal em MG do período de 1986 a 2019.

A consulta foi realizada levando em consideração a Tabela 291: Quantidade produzida e valor da produção na silvicultura, por tipo de produto da silvicultura (Figura 4). A tabela contém informações da quantidade produzida de carvão vegetal à nível municipal, de onde retirou-se os dados reais que serviu como base de cálculos e comparações nas etapas seguintes.

The image shows a screenshot of the IBGE SIDRA system interface. The interface is in Portuguese and displays various search filters. Red arrows point to specific elements with labels:

- Tabela de Referência:** Points to the table selection dropdown, which is set to 'Tabela 291 - Quantidade produzida e valor da produção na silvicultura, por tipo de produto da silvicultura (Vide Notas)'.
- Variável de:** Points to the variable selection dropdown, which is set to 'Quantidade produzida na silvicultura (unidade de medida: vide classificação "Tipo de produto da silvicultura")'.
- Variável do tipo de produto:** Points to the product type selection dropdown, which is set to 'Total' and '1.1 - Carvão vegetal (Toneladas)'.
- Anos contabilizados (1986 - 2019):** Points to the year selection dropdown, which is set to 'Todos' and shows a list of years from 2019 down to 2012.
- Desagregado à nível municipal em MG:** Points to the territorial unit selection dropdown, which is set to 'Município'.

Figura 4: Informações e filtros de pesquisa utilizados no SIDRA

### 3.1.2. Levantamento das unidades de carbonização em MG (SISEMA)

A fim de obter-se o número de unidades produtoras de carvão vegetal e melhor caracterizar a produção em Minas Gerais, utilizou-se o Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SISEMA). A partir desse sistema, procurou-se por licenciamentos ambientais enquadrados na listagem G-03 da Deliberação Normativa COPAM n° 217, de 06 de dezembro de 2017. A listagem G-03 foi estabelecida pelo Conselho Estadual de Política Ambiental de Minas Gerais (COPAM – MG) e refere-se às licenças para produção de carvão vegetal no Estado.

Como critério de pesquisa, considerou-se processos de licenciamentos ambientais deferidos com licenças de até 10 anos, que é o período máximo licenciado no Estado (Figura 5). Portanto, procurou-se por empreendimentos que continham as listagens G-03-03-4 Produção de carvão vegetal oriunda de floresta plantada e G-03-04-2 Produção de carvão vegetal de origem nativa/aproveitamento do rendimento lenhoso como atividade principal ou secundária.

Consulta de Decisões de Processos de Licenciamento Ambiental

Para geração de relatórios específicos por Regional, Empreendimento, CNPJ, Modalidade, Atividade, Classe, Ano, Mês, Data de Publicação, Decisão:

1. Ao clicar no botão  será possível selecionar os dados que farão parte do relatório;

2. Depois de selecionar os dados, clicar no botão  na opção Excel 2007+ para o download das informações.  
A exibir 1-20 de 3.580 itens.

Atividade G-03 da  
Deliberação Normativa  
COPAM n° 217

2010 a 2020

Decisões  
Deferidas

Regional	Município	Empreendimento	CNPJ/CPF	Processo Adm	N° de Protocolo	Modalidade	Classe	Atividade	Ano	Mês	Data de Publicação	Decisão
<input type="text"/>												

Figura 5: Informações e filtros de pesquisa utilizados no SISEMA

### 3.1.3. Portal Nacional de Licenciamento Ambiental (PNLA)

A fim de averiguar as informações levantadas no SISEMA, utilizou-se o Portal Nacional de Licenciamento Ambiental (PNLA) como fonte alternativa e adicional. Nesse portal, realizou-se uma pesquisa dos empreendimentos de acordo com a Classificação Nacional de Atividades Econômicas 2.1 (CNAE).

Foram considerados as licenças ambientais dos empreendimentos designados como 0220-9/02 Produção de Carvão Vegetal – florestas nativas e 0210-1/08 Produção de Carvão Vegetal – florestas plantadas com data de vencimento do período de 31/12/2020 até 31/12/2030; período referente aos 10 anos limite da licença (Figura 6).

Todas as licenças vigentes encontradas, sendo elas licenças federais, outorgadas pelo IBAMA, ou licenças Estaduais, outorgadas pelo SEMAD, foram consideradas neste trabalho.

BRASIL CORONAVÍRUS (COVID-19) Simplifique! Participe Acesso à informação Legislação Canais

Ir para o conteúdo Ir para o menu Ir para a busca Ir para o rodapé

ACESSIBILIDADE ALTO CONTRASTE MAPA DO SITE

Portal Nacional de Licenciamento Ambiental  
**PNLA**  
 MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE

Buscar no portal

Perguntas frequentes Links relacionados Contato Ajuda

PÁGINA INICIAL > PESQUISA DE LICENCIAMENTO AMBIENTAL

### Pesquisa de Licenciamento Ambiental

**Filtros por tipologia/atividade**

Escolher tipologia/atividade

Classificações:  
 CNAE - Classificação Nacional de Atividades Econômicas (versão 2.1) **Classificação Considerada**

Digite a atividade ou tipologia de acordo com a classificação selecionada acima:

Elementos selecionados

Nome	Código	Tipo		
Produção de carvão vegetal - florestas nativas	0220-9/02	Atividade do CNAE	X Remover	Ver correlações
Produção de carvão vegetal - florestas plantadas	0210-1/08	Atividade do CNAE	X Remover	Ver correlações

**Produção de carvão vegetal**

**Filtros por data do processo de licenciamento**

Data de protocolo De: Até:

Data de emissão De: Até:

Data de vencimento De: 31/12/2020 Até: 31/12/2030 **Data de vencimento considerada**

**Filtros avançados de pesquisa**

Esfera da licença  
 Licenças Federais (IBAMA)  Licenças Estaduais **Busca por licenças federais e estaduais**

Tipo da licença  
 Autorização ambiental  Dispensa do licenciamento  Documentos Associados  Licença de alteração/ampliação  
 Licença de instalação  Licença de instalação e operação  Licença de operação  Licença prévia  Licença prévia e de instalação  
 Licença simplificada/única

Situação da licença  
 Em análise técnica  Licença suspensa  Licença vencida  Licença vigente  Processo arquivado  Processo cancelado  
 Processo concluído  Processo suspenso  Solicitação pendente

Região:  
 Seleccione...

Estados:  
 Amazonas Bahia Ceará Distrito Federal Espírito Santo Goiás Maranhão Mato Grosso Mato Grosso do Sul Pará

Estados selecionados:  
 Minas Gerais **Filtro de licenças vigentes**  
**Filtro para o estado de Minas Gerais**

Figura 6: Informações e filtros de pesquisa utilizados no PNLA

### 3.1.4. Área estimada de plantio de eucalipto

A área de plantio de eucalipto estimada para suprir a produção encontrada foi calculada de acordo com o rendimento médio das tecnologias adotadas (Equação 1), o peso específico médio do eucalipto à 50% de umidade, a massa média de uma árvore e a área média de plantio em m<sup>2</sup>.

$$\text{Área de plantio [m}^2\text{]} = \frac{\text{quantidade de carvão [m}^3\text{]}}{\text{eficiência média dos fornos}} \times \frac{\text{peso específico [kg/m}^3\text{]}}{\text{massa média [kg]}} \times \text{área média de plantio [m}^2\text{]} \quad [1]$$

Na Tabela 5, são apresentados os principais parâmetros considerados no cálculo.

Tabela 5: Parâmetros considerados para o cálculo da área estimada de plantio de eucalipto

Parâmetro	Valor	Referência
Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	720	OLIVEIRA, HELLMEISTER e FILHO (2005)
Massa [kg]	500	FOELKEL (2020)
Área de Plantio para 1 árvore [m <sup>2</sup> ]	6	EMBRAPA (2020)

## 3.2. Etapa 2: Classificação das Unidades de Carbonização

A maioria das licenças encontradas não continham as informações do tipo de tecnologia de carbonização usadas pelos empreendimentos. Logo, foram atribuídas às unidades de carbonização alguns tipos de tecnologia baseado nos dados de produção de carvão vegetal por forno em cada unidade.

Como critério de atribuição, utilizou-se o trabalho de Rodrigues e Braghini Junior (2015). Os valores de tipo de forno, produção média de carvão e eficiência de produção foram retirados das Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4 do item 2.1.2. Tecnologias de Carbonização Os valores considerados estão resumidos na Tabela 6.

Tabela 6: Características dos fornos utilizados no trabalho

<b>Tipo de Forno</b>	<b>Produção de carvão [MDC]</b>	<b>Rendimento [%]</b>
Rabo Quente	192 - 240	25-30
Forno de superfície	246 - 336	30-35
Forno Polikor	257	25-35
Forno de encosta	288	25-35
Forno colmeia	600 - 720	27-35
Forno argentino	848 - 942	27-35
Forno VMR	1132	27-33
Forno retangular de alvenaria	1512 - 4560	34-40
Forno de metal	2174 - 2478	34-40
Retorta Contínua	7246 - 36232	33
Forno CML Francês	9058	20-25
Carbonização Contínua de Carboval	26087	40-42

### 3.3. Etapa 3: Projeção da produção de carvão vegetal em MG

Para a projeção da produção de carvão vegetal em Minas Gerais, utilizou-se o Banco de dados do IBGE com dados de 1986 até 2019. O acumulado da produção dos municípios para cada ano foi disposto em ordem crescente e utilizou-se a função “PREVISÃO.ETS” do Excel (MICROSOFT, 2016). Segundo o próprio software, a função:

Calcula ou prevê um valor futuro com base em valores existentes (no histórico), usando a versão AAA do algoritmo de Suavização Exponencial (ETS). O valor previsto é uma continuação dos valores históricos na data-alvo especificada, que deve ser uma continuação da linha do tempo. Você pode usar essa função para prever vendas futuras, requisitos de estoque ou tendências do consumidor. (MICROSOFT, 2016)

Como forma de validação da função, previu-se os valores de produção de 2009 a 2019 e comparou-se com os valores reais. Dessa forma, foi possível calcular o erro relativo médio para uma projeção de 10 anos baseado no histórico de dados disponível.

Além disso, também foi feito um paralelo com os valores da projeção realizada pela Superintendência de Abastecimento e Economia Agrícola (2017), disposta na Tabela 1. Isso foi feito com a intenção de comparar os erros relativos da projeção deste trabalho com a previamente citada.

### **3.4. Etapa 4: Potencial Energético Disponível no Estado**

Para o cálculo do potencial energético em MG, são considerados alguns cenários que dependem da produção de carvão vegetal e das tecnologias de conversão.

#### **3.4.1. Tecnologias de Geração de Eletricidade Consideradas na Seleção**

As principais tecnologias para a geração de eletricidade a partir da biomassa, que em princípio poderiam ser aplicadas na recuperação de energia dos gases de carbonização, e a utilização dos resíduos florestais da plantação de eucaliptos, são:

- Ciclo Rankine a Vapor - SRC
- Ciclo Rankine Orgânico - ORC
- Motores de pistão a vapor
- Expansor de parafuso
- Turbina a vapor axial e radial
- Turbina a gás de queima externa - EFGT
- Motores Stirling
- Gaseificador / motor de combustão interna
- Gaseificador / Microturbina
- Ciclos Combinados com Gaseificação Integrada da Biomassa- BIGCC

No entanto, nem todas estas tecnologias listadas acima apresentam as características e/ou o grau de maturidade adequados para serem empregadas utilizadas com a finalidade de aproveitamento energético dos gases produzidos durante a carbonização da madeira para a produção de carvão vegetal. Assim, foi considerada a Avaliação de Prontidão Tecnológica, TRA do inglês *Technology Readiness Assessment*, e um estudo do Nível de Prontidão Tecnológica, TRL do inglês *Technology Readiness Levels*, realizado por Filho (2021) visando identificar as melhores tecnologias que poderiam atender às necessidades do projeto pelo seu nível de maturidade tecnológica.

Como resultado das Análises TRA e TRL foi obtido que de todas as tecnologias consideradas atualmente as únicas com nível de maturidade suficiente para serem utilizadas no aproveitamento energético dos gases de carbonização são o Ciclo a Vapor Convencional (SRC) e o ciclo Rankine Orgânico (ORC), sendo que todas as outras não possuem ainda o suficiente nível de desenvolvimento tecnológico para sua utilização no curto prazo. No entanto, além desses ciclos

anteriormente mencionados foi considerado também a Turbina a Gás de Queima Externa (EFGT) por existir um fabricante que comercializa a tecnologia.

### 3.4.2. Modelos termodinâmicos de simulação e indicadores de desempenho considerados

Foram considerados os modelos termodinâmicos desenvolvidos no Relatório Técnico n° 4 (UNIFEI, 2020) que consideram a geração de eletricidade utilizando Ciclos SRC, ORC e EFGT nas faixas de potências de 100 – 2000 kW<sub>el.</sub> e Poder Calorífico Inferior médio dos gases residuais de 1579 kJ/kg; valor médio obtido a partir de medições realizadas no relatório.

Os valores obtidos dos modelos termodinâmicos desenvolvidos para o SRC são apresentados na Tabela 7. Os principais parâmetros considerados foram a eficiência e o consumo de GNC.

Tabela 7: Valores obtidos dos modelos termodinâmicos para o SRC (UNIFEI, 2020)

SRC				
eficiência	0,1041	0,1251	0,1355	0,146
potência [kW]	500	1000	1500	2000
consumo gás [kg/s]	4,14	6,89	9,53	11,80

Para os ciclos ORC foram consideradas 3 configurações distintas: sem regeneração e com superaquecimento (ORC A), com regeneração e sem superaquecimento (ORC B), com regeneração e com superaquecimento (ORC C). Os fluidos de trabalho considerados foram o R245fa, o MDM e o n-decano.

Na Tabela 8 são apresentados os valores de eficiência e consumo de GNC para as distintas configurações dos ciclos ORC analisadas.

Para o cálculo do potencial de geração de eletricidade existente em cada município é necessário ter em conta que a eficiência dos ciclos SRC e ORC mudam em função dos parâmetros de operação do ciclo os quais dependem da capacidade de geração escolhida. Tendo em conta que a produção de carvão muda de município para município e que, portanto, a eficiência do ciclo a vapor vai mudar em função da quantidade de gás disponível para a geração de eletricidade, foi necessário elaborar uma correlação da eficiência do ciclo a vapor em função do consumo de gás.

O cálculo da potência elétrica líquida em kW foi realizado utilizando a Equação 2:

$$Pot [kW] = eficiência \times PCI_{GNC} \left| \frac{kJ}{kg} \right| \times vazão_{GNC} \left| \frac{kg}{s} \right| \quad [2]$$

Tabela 8: Valores obtidos dos modelos termodinâmicos para os ORC (UNIFEI, 2020)

<b>ORC A - MDM</b>	Correlação da eficiência pelo consumo e gás: $y = 0,0325\ln(x) + 0,0867$					
Potência [kW]	100	200	500	1000	1500	2000
Eficiência	0,07048	0,1057	0,1198	0,1374	0,148	0,1515
Consumo Gás [kg/s]	0,90	1,20	2,64	4,61	6,42	8,36
<b>ORC A - R245fa</b>	Correlação da eficiência pelo consumo e gás: $y = 0,0309\ln(x) + 0,081$					
Potência [kW]	100	200	500	1000	1500	2000
Eficiência	0,06714	0,1007	0,1141	0,1309	0,141	0,1443
Consumo Gás [kg/s]	0,94	1,26	2,78	4,84	6,74	8,78
<b>ORC A - n-Decano</b>	Correlação da eficiência pelo consumo e gás: $y = 0,042\ln(x) + 0,1229$					
Potência [kW]	100	200	500	1000	1500	2000
Eficiência	0,09114	0,1367	0,1549	0,1777	0,1914	0,1959
Consumo Gás [kg/s]	0,69	0,93	2,04	3,56	4,96	6,47
<b>ORC B - MDM</b>	Correlação da eficiência pelo consumo e gás: $y = 0,034\ln(x) + 0,1527$					
Potência [kW]	100	200	500	1000	1500	2000
Eficiência	0,1174	0,1616	0,1713	0,1956	0,2059	0,2093
Consumo Gás [kg/s]	0,54	0,78	1,85	3,24	4,61	6,05
<b>ORC B - R245fa</b>	Correlação da eficiência pelo consumo e gás: $y = 0,02\ln(x) + 0,0593$					
Potência [kW]	100	200	500	1000	1500	2000
Eficiência	0,05398	0,07777	0,08677	0,09763	0,1039	0,106
Consumo Gás [kg/s]	1,17	1,63	3,65	6,49	9,14	11,95
<b>ORC B - n-Decano</b>	Correlação da eficiência pelo consumo e gás: $y = 0,0365\ln(x) + 0,1807$					
Potência [kW]	100	200	500	1000	1500	2000
Eficiência	0,1356	0,1844	0,2015	0,2211	0,2321	0,2356
Consumo Gás [kg/s]	0,47	0,69	1,57	2,86	4,09	5,38

Para o cálculo da vazão de GNC, considerou-se que 21% da produção é realizada em fornos de alto rendimento. Tal porcentagem provém do cruzamento de dados de produção anual e número de fornos levantados para cada empreendimento; de acordo com a produção anual por forno e dos dados das Tabelas Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4 obtém-se o tipo de forno mais provavelmente utilizado em cada empreendimento. O número também está de acordo com o fornecido por Bailis, Rujanavecj et al. (2013), que estimam que apenas 20% da produção nacional se dá em fornos de alto rendimento, sendo 80% em fornos rudimentares.

A vazão de GNC para os fornos de alto rendimento, foi calculada de acordo com o trabalho de Leme (2016) para fornos metálicos de 200 toneladas de madeira em cluster, através da Equação 3:

$$n^{\circ} \text{ de fornos} = 3,0368 \times \text{Potência Térmica GNC [MWt]} + 2,6689 \quad [3]$$

Partindo do dado de produção anual por empreendimento, calculou-se o número estimado de fornos metálicos de 200 toneladas e então a potência térmica gerada. A partir da potência e do PCI médio, calculou-se a vazão de GNC para os fornos de alto rendimento (Equação 4).

$$\text{Vazão GNC}_{\text{alto rendimento}} [\text{kg/s}] = \frac{\text{Potência Térmica GNC [MWt]}}{\text{PCI}_{\text{médio}} [\text{kJ/kg}]} \quad [4]$$

Já a vazão de GNC para os 79% empreendimentos com fornos rudimentares de baixa eficiência provém dos estudos de Bailis, Rujanavecj et al. (2013). Os autores calcularam que em fornos do tipo “rabo-quente”, são produzidos cerca de 3167 kg de GNC por tonelada de carbono-carvão produzido. De acordo com o mesmo trabalho, cada forno tem capacidade de produzir 1,4 toneladas de carbono-carvão por fornada, totalizando uma produção de 4,37 toneladas de GNC por forno.

O número estimado de fornos de baixa eficiência foi calculado considerando a produção anual de cada empreendimento e que cada forno produz bateladas de 2,3 toneladas de carvão em 5 dias de pirólise, em um total de 62 fornadas por ano. A vazão de GNC para os fornos de baixo rendimento foi calculada através da Equação 5:

$$\text{Vazão GNC}_{\text{baixo rendimento}} [\text{kg/s}] = \frac{62 \times n^{\circ} \text{ de fornos} \times \frac{\text{kg GNC}}{\text{forno}}}{\text{horas de operação anual} * 3600} \quad [5]$$

Este trabalho considerou que as plantas de geração de eletricidade teriam 7447 horas de operação anuais (85% do ano).

De posse da potência estimada em cada unidade de carbonização, obtém-se o potencial de geração térmica por município para 2020. Contudo, vale ressaltar que o valor calculado é baseado nos empreendimentos levantados nos itens 0 e 3.1.3. Logo, não corresponde ao potencial total do Estado, pois os valores de produção encontrados por empreendimento foram abaixo do esperado ou projetado para 2020.

### 3.4.3. Cenários para a Geração de Energia Elétrica

Os cenários considerados foram baseados na variação de parâmetros inerentes à produção de carvão vegetal e às tecnologias de conversão de energia elétrica. Os parâmetros relacionados à produção de carvão vegetal são o PCI dos gases efluentes e a vazão baseada na produção de carvão ao longo dos anos projetados. Os relacionados às tecnologias de conversão são as tecnologias em si com diferentes eficiências térmicas.

Para o cálculo do potencial máximo de geração de eletricidade total do estado, inicialmente foi considerada a máxima eficiência elétrica que pode ser alcançada através das tecnologias de geração consideradas no estudo. Adotou-se um valor de eficiência elétrica de 30% tendo em conta que através de melhoras nos projetos dos ciclos ORC e SRC é possível alcançar esse valor de eficiência nos próximos anos.

Com a intenção de comparar os resultados em cada cenário, também foram criados alguns indicadores. Baseado nas potências, eficiências e consumo de gás em cada tecnologia, calculou-se os indicadores de consumo específico de gás por MWh gerado e energia elétrica gerada por tonelada de carvão produzido.

Os cálculos das conversões e indicadores foram feitos da seguinte maneira:

- Indicador *Vazão específica de GNC pela Potência*:

$$\frac{\text{Vazão GNC [ton/h]}}{\text{Potência [MW]}}$$

- Indicador *Potência específica por tonelada de carvão*:

$$\frac{\text{Potência [MW]}}{\text{Carvão [ton/h]}}$$

- Indicador *Produção específica de GNC*:

$$\frac{\text{Vazão GNC [ton/ano]}}{\text{carvão produzido [ton/ano]}}$$

- Indicador *Energia gerada específica*:

$$\frac{\text{Energia [MWh]}}{\text{carvão produzido [ton]}}$$

Também se estimou a quantidade de carvão vegetal anual necessária para atingir uma certa faixa de potência com cada tecnologia de conversão. O cálculo baseia-se na produtividade média de GNC em kg/h por tonelada de carvão produzido nos empreendimentos. A quantidade de carvão pôde ser calculada com a Equação 6:

$$\text{Carvão} \left| \frac{\text{mdc}}{\text{ano}} \right| = \frac{\left( \frac{\text{GNC} \left| \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right| * 1000}{\text{Produtividade} \left| \left( \frac{\text{kgGNC}}{\text{h}} \right) / \left( \frac{\text{ton. carvão}}{\text{ano}} \right) \right|} \times \frac{1}{d_{\text{carvão}} \left| \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right|} \right)}{1,2^*} \quad [6]$$

\* 1 mdc de carvão vegetal = 1,2 m<sup>3</sup> de carvão vegetal

## 3.5. Etapa 5: Análise Econômica

### 3.5.1. Ciclo a vapor - SRC

#### Levantamento de custos (CAPEX)

Para realizar a estimativa dos custos de investimento requeridos para a tecnologia de ciclo a vapor, escolheu-se como método de cálculo de investimento o recomendado por Silveira (1998), baseado nas equações propostas no trabalho de Valero, Lozano et al. (1994), as quais foram atualizadas por Villela (2007) e aplicadas em estudos de uma planta termelétrica por Pinto (2020). Essa metodologia leva em consideração os investimentos nos principais componentes do ciclo termodinâmico a vapor (caldeira, turbina, condensador e bombas) no consumo de combustível e, então, para o cálculo do custo total de investimento admite-se um fator de proporção (20 % das despesas com os principais componentes) representativo aos custos com equipamentos auxiliares (PINTO, 2020). As Equações 7, 8, 9, 10 e 11 abaixo representam o cálculo do investimento na aquisição de tais componentes e o cálculo do Investimento Total (IT).

- Caldeira

$$I_{\text{CALD}} = 784 \cdot \dot{Q}_{\text{cald}} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{1 - 0,90}{1 - \eta_{\text{cald}}} \right)^7 \right] \cdot \left[ 1 + 5 \exp \left( \frac{T_s - 866}{10,42} \right) \right] \left[ \exp \left( \frac{P_s - 28}{150} \right) \right] \quad [7]$$

- Turbina

$$I_{TV} = 7490 \cdot E_p^{0,70} \left[ 1 + \left( \frac{1 - 0,95}{1 - \eta_{s,TV}} \right)^3 \right] \cdot \left[ 1 + 5 \exp\left(\frac{T_s - 866}{10,42}\right) \right] \quad [8]$$

- Condensador

$$I_{COND} = 1173 \dot{m}_v \quad [9]$$

- Bomba

$$I_B = 3540 \cdot \dot{W}_B^{0,71} \left[ 1 + \left( \frac{1 - 0,80}{1 - \eta_{s,B}} \right)^3 \right] \cdot 1,41 \quad [10]$$

- Investimento Total

$$I_T = 1,2 \cdot (I_{CALD} + I_{TV} + I_{COND} + I_B) \quad [11]$$

### 3.5.2. Ciclo Rankine Orgânico - ORC

#### Levantamento de custos (CAPEX)

Para calcular o custo de aquisição de equipamentos (CAE) foram utilizadas as correlações de Turton, Baile et al. (2009) para ciclos orgânicos. As expressões matemáticas foram desenvolvidas com base nos parâmetros técnicos de operação de cada componente do sistema de geração. Para calcular os custos com evaporador, turbina e bombas, utiliza-se da correlação de Turton apresentada na Equação 12:

$$\log_{10} C_p^0 = k_1 + k_2 \log_{10}(A) + k_3 [\log_{10}(A)]^2 \quad [12]$$

Em que  $C_p^0$  é o custo de aquisição do referente equipamento, A é o parâmetro técnico que caracteriza o equipamento, tal qual, para o evaporador é o calor trocado e para bombas a potência de acionamento, todos em kW. Os valores dos coeficientes  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  para cada um dos componentes, assim como, a correlação para condensadores e conjunto turbina e gerador são apresentadas na Tabela 9, em que Q é o calor desprendido pelo sistema de condensação e P é a potência elétrica produzida no gerador. Portanto, a soma de todos os componentes apresentados no ciclo compõe o custo de aquisição de equipamento.

A abordagem para definir os custos totais de instalação dos ciclos ORC é baseada na metodologia apresentada em Lemmens (2016), em que são definidas as estimativas a partir de porcentagens do custo de aquisição de equipamentos para o ciclo. As porcentagens aplicadas para

definição dos custos associados à instalação, operação e manutenção do sistema de geração pelo ciclo ORC, foram baseadas na média das porcentagens aplicadas por Bejan, Tsatsaronis e Moran (1995) e estão apresentadas na Tabela 10.

Tabela 9: Coeficientes e Correlações para a estimativa do custo de aquisição de equipamentos (TURTON, BAILE et al., 2009).

Componente	Coeficientes e Correlações
Evaporador	$k_1 = 4,6656 \quad k_2 = -0,5157 \quad k_3 = 0,1547$
Bomba	$k_1 = 3,3892 \quad k_2 = 0,0536 \quad k_3 = 0,1538$
Condensador	$C_P^0 = 12300 \cdot \left(\frac{Q}{50}\right)^{0,76}$ para Q em kW
Turbina e Gerador	$C_P^0 = 1850000 \cdot \left(\frac{P}{11800}\right)^{0,94}$ para P em kW

Tabela 10. Parâmetros para o cálculo do custo específico total de investimento (BEJAN, TSATSARONIS e MORAN, 1995).

Capacidade da Planta (kW)	
Custo Fixo de Investimento (CFI)	
<b>- Custo Fixo Direto (CFD)</b>	
- Custos locais	
Custo de Aquisição de Equipamento (CAE)	
Instalação de equipamento	45 % do CAE
Encanamento	31 % do CAE
Instrumentação e controle	10 % do CAE
Equipamento e materiais elétricos	11 % do CAE
- Custos off-site	
Trabalho estrutural, construção civil e arquitetura	44 % do CAE
Instalações de trabalho	20 % do CAE
<b>- Custo Fixo Indireto</b>	
Engenharia e Supervisão	30 % do CAE
Custos de Construção	15 % do CFD
Contingências	10 % CFI
Custos legais	2 % do CFI
<b>- Outros custos</b>	
Custos de inicialização da planta	10 % do CFI

A razão da soma de todos os custos apresentados pela capacidade instalada da planta de geração dá o indicador chamado custo específico de investimento (CEI), um parâmetro comumente utilizado em análises econômicas preliminares de sistemas ORC (KLEEF, OYEWUNMI e MARKIDES, 2019).

$$CEI = \frac{CTI}{\dot{W}}$$

Em que os custos totais de investimento, CTI, compõe-se pela soma dos custos da Tabela 10 e  $\dot{W}$  é a capacidade de geração da planta. Além disso, as correlações de Turton, Baile et al. (2009) são representativas a custos em dólares americanos referentes ao ano de 2001, exceto para as expressões do conjunto turbina gerador e do condensador que são referentes ao ano de 2013 (TOFFOLO, LAZZARETTO, *et al.*, 2014). Diante disso, os custos devem ser atualizados de acordo com a conjuntura econômica do presente. Para isso utiliza-se o índice CEPCI (*Chemical Engineering Plant Cost Index*), tal qual o valor mais atual é referente ao ano de 2019 (607,5) e os índices de 2001 e 2013 são, respectivamente, 397 e 567,3.

### 3.5.3. Turbina a gás de queima externa - EFGT

No caso das microturbinas a gás de queima externa, seu estágio atual de desenvolvimento tecnológico é considerado embrionário e hoje somente a Ansaldo Energia Spa fabrica este tipo de unidade. A metodologia usada é a mesma empregada para o caso dos ciclos ORC, na qual os custos totais são calculados como estimativas (porcentagens) do custo de aquisição dos equipamentos principais (vide Tabela 10), conforme apresentado por Lemmens (2016). Para o caso da turbina fabricada pela Ansaldo Energia, cuja potência líquida é de 85 kW, Pantaleo, Camporeale et al. (2017) apresentam um custo específico de U\$/kW 4.600,00 para o conjunto formado pela turbina (U\$/kW 2.370) e pelo trocador de calor de alta temperatura (U\$/kW 3.420,00). É notório que o trocador de alta temperatura desempenha papel fundamental na composição dos custos deste equipamento.

Aplicando-se os percentuais típicos listados na Tabela 10, relativos aos custos indiretos e direto, para a turbina a gás de queima externa os custos específicos seriam de 8.600,00 U\$/kW.

### 3.5.4. Custos de Operação e Manutenção (OPEX)

Os custos fixos de operação e manutenção das plantas incluem: custo de mão-de-obra, seguro, manutenção e substituição de equipamentos. Em suma, esses custos variam entre 2% e 6% do custo total de instalação por ano (VISSER, THOPIL e BRENT, 2019). Plantas geradoras que

trabalham com combustível renovável tendem a apresentar menores custos de operação e manutenção por kW, devido à escala da planta. Os custos variáveis de operação e manutenção, em média são de 0,0005 US\$/kWh, e, portanto, é notavelmente menor do que os custos fixos (GHOSH, 2016). Locais onde a biomassa de baixo custo está disponível em larga escala e apresenta valores acessíveis, a biomassa pode se mostrar muito competitiva como opção para geração de eletricidade.

Na Tabela 11 são apresentados os parâmetros adotados para a análise econômica realizada para o sistema estudado, apresentando os dados de custos de combustível, também custos fixos e variáveis de operação e manutenção, as horas de operação e a vida útil da planta.

Tabela 11. Parâmetros econômicos selecionados para análise do ciclo à vapor

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Referência</b>
Horas de operação	7447	-
Vida útil	20 anos	-
Custo com gás combustível	\$ 0,00 <sup>a</sup>	-
C <sub>O&amp;M</sub> fixo	6 % I <sub>T</sub>	(VISSER, THOPIL e BRENT, 2019)
C <sub>O&amp;M</sub> variável	0,0005 US\$/ kW	(GHOSH, 2016)

<sup>a</sup> O combustível são os gases residuais, portanto não há custos com a aquisição do combustível

### **3.5.5. Custos do sistema de coleta e transporte de gases e do queimador (CAPEX)**

Levando em conta as considerações explicitadas no item 2.2.4. Custos de implantação, fica evidente que os custos do sistema de coleta e transporte de gases depende muito do layout adotado no pátio de produção de carvão. No entanto, constatou-se, a partir de consulta aos principais produtores de carvão vegetal que já instalaram dutos de coleta e transporte de gases, que o custo de instalação destes dutos é de aproximadamente US\$125,00 por metro linear de duto.

Em relação à queima dos gases com fins exclusivos de redução de emissões e melhoria da qualidade do ar no ambiente de produção, a solução normalmente empregada é a construção de um grande queimador, também construído em alvenaria, que recebe e queima os gases do conjunto de fornos a ele conectados. Porém, diferente de combustíveis convencionais, os gases da carbonização possuem difícil combustão devido ao fato de estarem excessivamente diluídos em

gases inertes como o nitrogênio, gás carbônico e a água, o que é crítico nos estágios iniciais da pirólise (LEME, VENTURINI, *et al.*, 2018). Assim, deve-se adotar um esquema de sincronização dos fornos, de forma que sempre a composição média dos gases que entram no queimador, esteja acima do limite inferior de inflamabilidade. Desta forma, os queimadores são construídos para operar com a vazão de um número mínimo de fornos e, conseqüentemente, de vazão de gases residuais.

Os custos do queimador dependem da quantidade de fornos conectados ao mesmo e da capacidade de produção de cada forno, o que pode ser diferente para cada unidade de carbonização. Assim, como referência, considerou os custos de um queimador capaz de processar (queimar) a vazão de 18 fornos, tendo cada forno a capacidade de processar 200 toneladas de madeira, a cada ciclo de carbonização. Para esta situação, os custos do queimador remontam a aproximadamente US\$380.000,00. Para outras situações, com diferentes números de fornos conectados ao queimador, será utilizada uma relação direta entre o número de fornos e o custo do queimador construído para 1 forno de 200 toneladas, já que a quantidade de fornos em operação define a vazão de gases e, conseqüentemente o volume do queimador.

### **3.5.6. Impostos e Taxas**

Além dos valores brutos de CAPEX e OPEX, a legislação brasileira prevê a cobrança de certos impostos sobre produtos e lucro de uma empresa. A seguir, são descritos os principais impostos e alíquotas considerados neste trabalho.

Os impostos federais são o IRPJ (Imposto de Renda Pessoa Jurídica), CSLL (Contribuição Social sobre o Lucro Líquido), COFINS (Contribuição para Financiamento da Seguridade Social), PIS (Programa de Integração Social) /PASEP (Programa de Formação do Patrimônio do Servidor Público) e IPI (Imposto sobre Produtos Industrializados).

O IRPJ incide sobre o lucro da empresa, com uma alíquota de 25% e é retido pelos clientes no momento do pagamento das faturas. A CSLL, assim como o IRPJ, incide sobre o lucro real do negócio, com alíquota de 9%.

COFINS e PIS/PASEP são contribuições que incidem sobre a receita bruta da empresa, em geral, com alíquota combinada de 3,65% (3% de COFINS e 0,65% de PIS/PASEP). O PIS/COFINS também é retido pelos clientes no momento do pagamento das faturas.

O IPI é um imposto sobre produtos industrializados, que são tributados no momento em que saem da fábrica. As alíquotas variam bastante por produto e, em média, ficam entre 10% e 12%.

O principal imposto Estadual é o ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços), que também incide sobre produtos. O valor praticado em MG para o ano de 2020 é de 18%.

Na Tabela 12 estão expostos os valores considerados para os impostos e taxas neste trabalho.

Tabela 12: Impostos e Taxas Considerados no Trabalho

	<b>Impostos e Taxas</b>	<b>Valor</b>
<b>Sobre lucro</b>	IRPJ	25,0%
	CSLL	9,0%
	CONFINS	3,0%
	PIS/PASEO	0,65%
<b>Sobre produto</b>	IPI	12%
	ICMS	18%

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Resultados do levantamento das unidades de carbonização

De acordo com os dados consolidados pelo IBGE, a produção de carvão vegetal em MG foi de 5.207.154 toneladas, espalhada por 434 municípios em 2019. Os resultados estão expressos nas Figura 7 e Figura 9 e Tabela 13 e Tabela 14.

As informações levantadas pelo SISEMA resultaram em mais de 4 mil licenças verificadas com um total de 136 empreendimentos licenciados a produzir 14.010.674 mdc ou 3.222.455 toneladas de carvão vegetal. Já a pesquisa feita no PNLA resultou em apenas 32 licenciamentos, sendo apenas 18 deles novos em relação ao SISEMA. Dos 18, apenas 5 apresentavam dados de produção disponíveis, adicionando 7.144 toneladas ao número anterior.

De forma geral, foram encontrados 154 empreendimentos com licenças ambientais ativas em 78 municípios, com uma produção licenciada de 3.229.599 ton. para o ano de 2020. Os empreendimentos englobam pelo menos 186 unidades de produção de 7.080 fornos. O total de fornos provavelmente é bem menor que o real, pois grande parte das licenças não apresentavam a informação do número de fornos, sendo 7.080 o número contado a partir das informações disponíveis.

É importante destacar que a produção licenciada para 2020 é cerca de 2.000.000 de toneladas menor que a produção de real de 2019. Tal diferença é mostrada na Figura 10, onde são comparados o número e intensidade da produção de carvão vegetal em cada município do Estado.

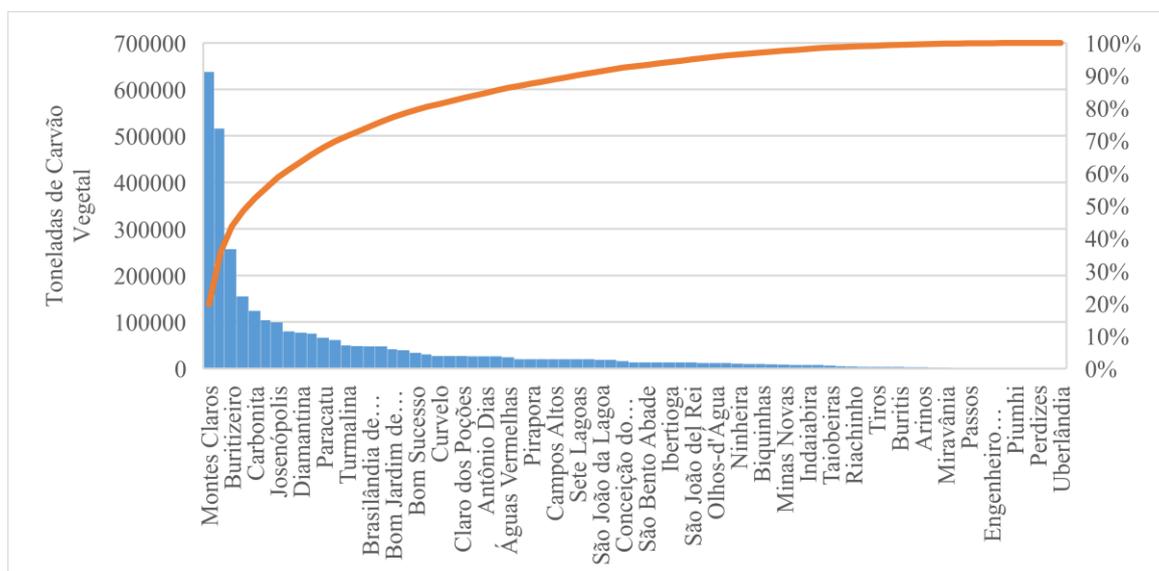


Figura 7: Gráfico de Pareto da quantidade de carvão produzida por município em 2019

Tabela 13: Municípios mineiros com maior produção de carvão vegetal em 2019

<b>Município</b>	<b>Ton. 2020</b>	<b>%</b>	<b>% acum.</b>
Montes Claros	637915	20%	20%
João Pinheiro	516395	16%	36%
Buritizeiro	256732	8%	44%
Grão Mogol	155465	5%	49%
Carbonita	124200	4%	52%

Nota-se que cinco municípios são responsáveis por mais de 50% da produção do Estado. A saber, Montes Claros (20%), João Pinheiro (16%), Buritizeiro (8%), Grão Mogol (5%) e Carbonita (4%). Ou seja, apesar da quantidade expressiva de carvão vegetal, a produção concentra-se em poucos municípios de Minas Gerais.

A região Norte / Nordeste do Estado destaca-se como maior produtora, sendo a zona de maior interesse não só em relação ao carvão vegetal, mas também com relação à possível geração de eletricidade. Baseado na produção de 2020, criou-se um mapa de calor (Figura 8). No mapa são mostradas as zonas mais “quentes”, ou seja, que produzem mais carvão. Isso facilita a visualização das zonas de interesse para a produção de carvão vegetal.

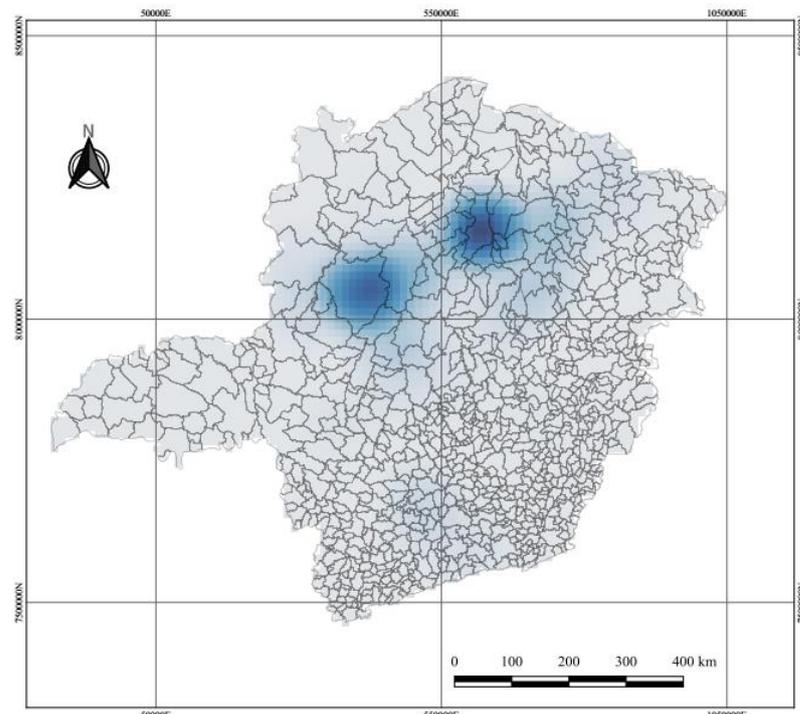


Figura 8: Mapa de Calor das Regiões Produtoras de Carvão Vegetal em MG para o ano de 2020

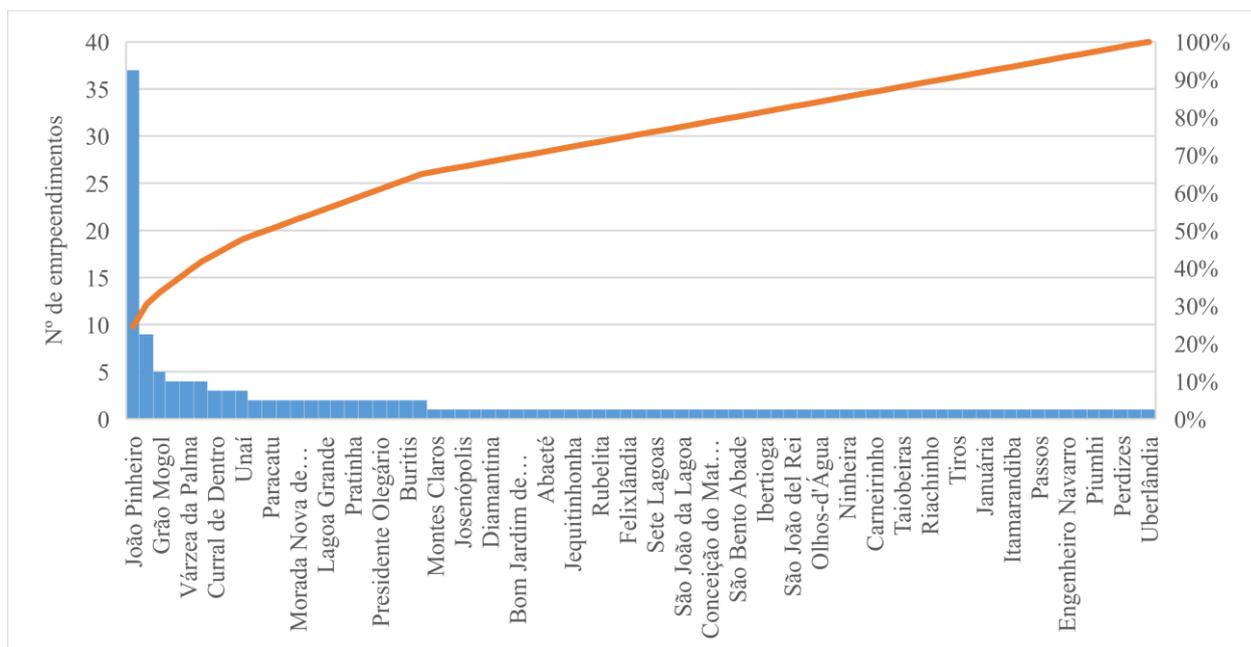


Figura 9: Gráfico de Pareto da quantidade de empreendimentos por município em 2019

Tabela 14: Municípios mineiros com maiores quantidades de empreendimentos em 2019

<b>Município</b>	<b>nº de empreendimentos</b>	<b>%</b>	<b>% acum.</b>
João Pinheiro	37	24,5%	24,5%
Buritizeiro	9	6,0%	30,5%
Grão Mogol	5	3,3%	33,8%
Santo Antônio do Amparo	4	2,6%	36,4%
Várzea da Palma	4	2,6%	39,1%
Brasilândia de Minas	4	2,6%	41,7%
Curral de Dentro	3	2,0%	43,7%
Montezuma	3	2,0%	45,7%
Unai	3	2,0%	47,7%
São Gonçalo do Abaeté	2	1,3%	49,0%
Paracatu	2	1,3%	50,3%

A partir da Figura 9 e Tabela 14 nota-se que, diferentemente da produção, 50% dos empreendimentos estão espalhados por 11 Municípios. Destaque para João Pinheiro que é o 2º maior produtor, além de município com maior número de empreendimentos. Já Montes Claros é o maior produtor com apenas 1 empreendimento licenciado.

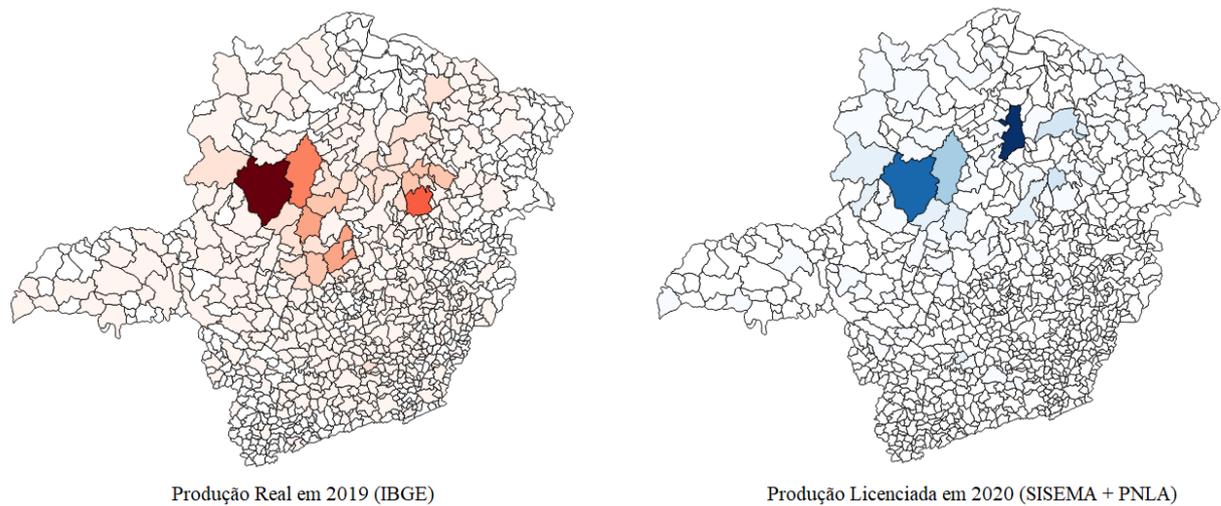


Figura 10: Comparação da produção real em 2019 e da licenciada em 2020

As diferenças de produção real em Minas Gerais registrada pelo IBGE em 2019 e da produção licenciada em 2020 de acordo com os dados encontrados no SISEMA e PNLA fica explícita na Figura 10. Fica claro que há uma concentração da produção na região Central e Noroeste do Estado, principalmente no Município de João Pinheiro, que é um destaque em ambos os mapas.

Se comparados com a produção de 2017, apresentada na Figura 11 e Tabela 15, a produção de 2019 apresenta-se bem mais concentrada na região Noroeste, sendo João Pinheiro ainda uma constante na produção. O Município de Itamarandiba, porém, não aparece como destaque em nenhum dos anos analisados. De maneira semelhante, outros Municípios que se apresentavam como grandes produtores em 2017 e 2019, não aparecem em 2020. Isso demonstra uma certa esporadicidade e inconstância na produção de carvão vegetal, com exceção de alguns nomes, como Três Marias e o já citado João Pinheiro.

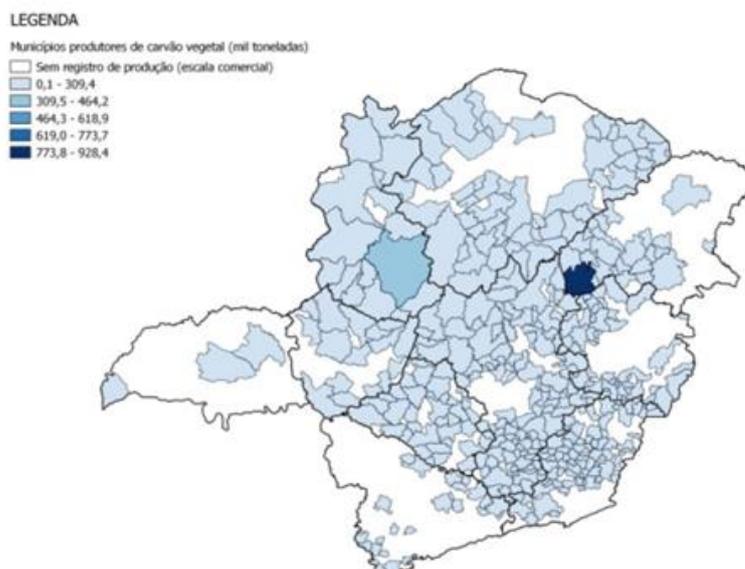


Figura 11: Produção de carvão vegetal por Município em 2017 (IBGE/PEVS, 2016)

Tabela 15: Produção de carvão vegetal em Minas Gerais em 2017 (*SUPERINTENDÊNCIA DE ABASTECIMENTO E ECONOMIA AGRÍCOLA, 2017*)

Município	Regiões	Produção (mil t)	% em MG
Itamarandiba	Jequitinhonha/Mucuri	928,5	2,1
João Pinheiro	Noroeste de Minas	354,9	0,8
Três Marias	Central	272,6	0,6
Curvelo	Central	195,8	0,4
Itacambira	Norte de Minas	150,5	0,3
<b>Total</b>		<b>1902,3</b>	<b>4,2</b>

A partir dos resultados obtidos com o levantamento descrito, foi possível observar alguns problemas. Dentre eles, algumas licenças não possuem a produção anual expressa no documento ou o documento da licença não está disponível. Isso dificulta a estimativa da produção de carvão vegetal, pois os resultados tendem a estar abaixo do real.

Junto a isso, apenas uma pequena parcela das licenças apresenta produção de carvão vegetal como atividade principal, fazendo com que todas as licenças levantadas pelo SISEMA fossem realizadas de forma manual; no total, foram verificados mais de 4 mil documentos de

licenciamento ambiental. Isso dá margem a falhas humanas no levantamento, sendo que algumas licenças podem não ter sido percebidas durante o levantamento. Porém, estima-se que seja um erro muito pequeno, pois os maiores produtores estão todos listados com a produção de carvão vegetal como atividade principal.

Ademais, muitas licenças não descrevem as quantidades ou tipos de fornos e quantidades de plantas de carbonização, não sendo possível obter muitas informações acerca do número de unidades produtoras e fornos em operação. A esses problemas, soma-se o fato de que há um desencontro de dados entre os diferentes sistemas (SISEMA e PNLA), onde 18 empreendimentos não foram listados no SISEMA e apenas 32 estavam disponíveis no PNLA.

Também se observa que os valores licenciados para 2020 estão muito abaixo do valor real obtido em 2020 (cerca de 38% abaixo). Tudo isso leva a crer que existe uma grande diferença entre o valor licenciado e a provável produção real para 2020.

Com relação à diferença de produção entre 2019 e a licenciada em 2020, pode-se especular algumas razões. Dentre elas:

- Licenças não encontradas nos sistemas de aquisição de dados;
- Empreendimentos produzindo mais que o licenciado;
- Empreendimentos produzindo sem licença ou com licença vencida;
- Diminuição da produção devido à situação econômica e sanitária de 2020 consequência do COVID-19.

## **4.2. Projeção da Produção de Carvão Vegetal em MG**

Para a validação da previsão, uma projeção para os 10 últimos anos de dados reais (2009 a 2019) foi feita levando em consideração alguns períodos de dados anteriores. A função PREVISÃO.ETS calcula ou prevê um valor futuro com base em valores existentes (no histórico). Dessa maneira, testou-se a função com diferentes valores do histórico de dados, a saber: todo o período de dados (1988-2008), 10 últimos anos (1999-2008), 8 últimos anos (2001-2008), 5 últimos anos (2004-2008), e 3 últimos anos (2006-2008). Para cada período, o erro relativo médio quando comparado com os dados reais foi calculado. Os resultados estão presentes na Tabela 16 e Figura 12.

Tabela 16: Validação para os 10 últimos anos de dados reais

Anos	Período	Erro relativo médio
1988-2008	21	20,4%
1999-2008	10	12,2%
2001-2008	8	14,5%
2004-2008	5	17,1%
2005-2008	4	16,3%
2006-2008	3	15,9%

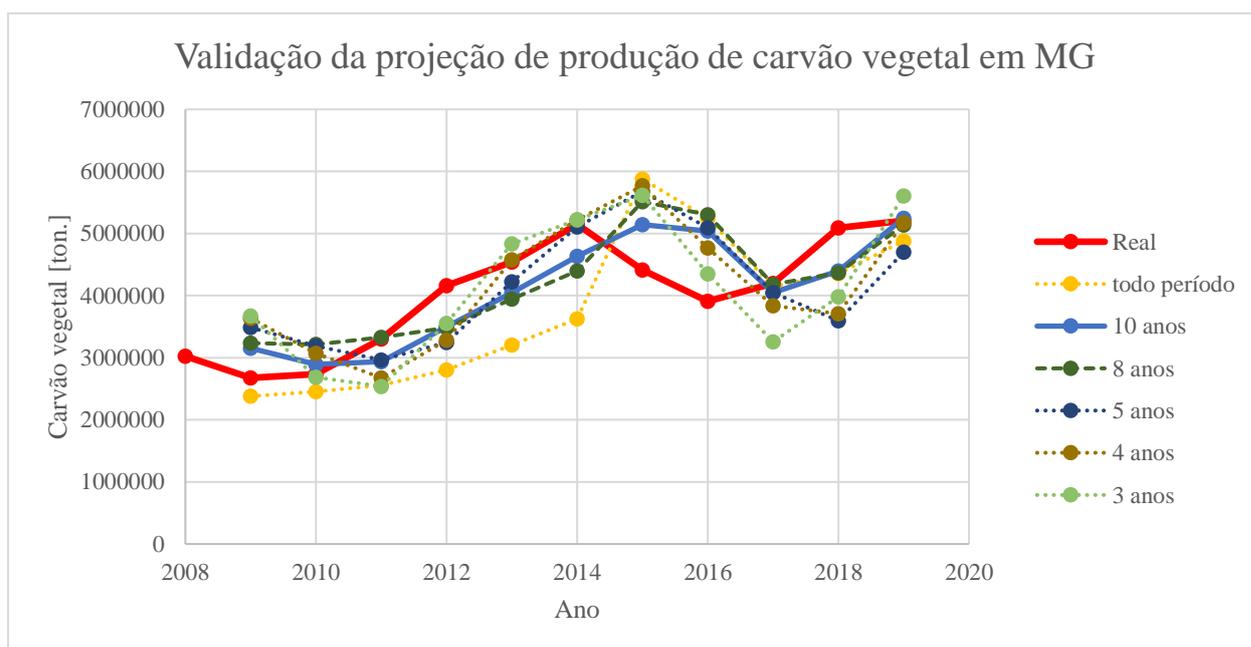


Figura 12: Comparação dos períodos de dados para validação da projeção

Nota-se que a previsão baseada nos 10 últimos anos do histórico de dados foi a que obteve o menor erro relativo médio dentre as demais. Além disso, o erro relativo para 2019 foi de apenas 0,8% em relação ao dado real (Tabela 17).

Através da Figura 12 também fica visível que a previsão considerando o período dos 10 últimos anos do histórico (linha azul) é a que mais se aproxima dos dados reais (linha vermelha).

Logo, as previsões futuras (2000 a 2030) foram baseadas nos 10 últimos anos do histórico de dados (2010 a 2019).

Tabela 17: Erro relativo da previsão baseada nos 10 últimos anos do histórico de dados

<b>Ano</b>	<b>Produção Real [ton.]</b>	<b>Previsão com base nos 10 últimos anos [ton.]</b>	<b>erro relativo</b>
2009	2.677.496	3.152.430	17,7%
2010	2.735.289	2.893.371	5,8%
2011	3.304.639	2.939.544	11,0%
2012	4.159.426	3.499.894	15,9%
2013	4.540.483	4.050.361	10,8%
2014	5.149.861	4.635.829	10,0%
2015	4.414.696	5.144.363	16,5%
2016	3.908.733	5.042.634	29,0%
2017	4.194.986	4.046.686	3,5%
2018	5.094.267	4.396.668	13,7%
2019	5.207.154	5.247.301	0,8%

Os resultados da projeção da produção total de carvão vegetal para Minas Gerais até 2030 estão dispostas na Tabela 18 e Figura 13.

A taxa de crescimento médio da produção obtida com a projeção é de 2,64% ao ano, sendo que há uma produção prevista de cerca de 7 milhões de toneladas de carvão vegetal em Minas Gerais para o ano de 2030.

É possível perceber, através da Figura 13, uma tendência exponencial no crescimento da produção no Estado ao longo dos anos. As projeções de 2017 e 2020, porém, apresentam um crescimento anual menos acentuado. Percebe-se, também, a grande discrepância do valor total licenciado em comparação com a série histórica e projeções. Tal fato corrobora o descrito no item 4.1.

Tabela 18: Projeção para a produção de carvão vegetal em MG com base nos 10 últimos anos de dados reais

Ano	Carvão Vegetal (milhões de ton.)
2019	5,2
<b>Projeção</b>	
2020	5,4
2021	5,6
2022	5,4
2023	5,7
2024	5,8
2025	6,1
2026	6,3
2027	6,5
2028	6,7
2029	6,8
2030	7,0
<b>Taxa de cresc. anual (%)</b>	<b>2,64%</b>

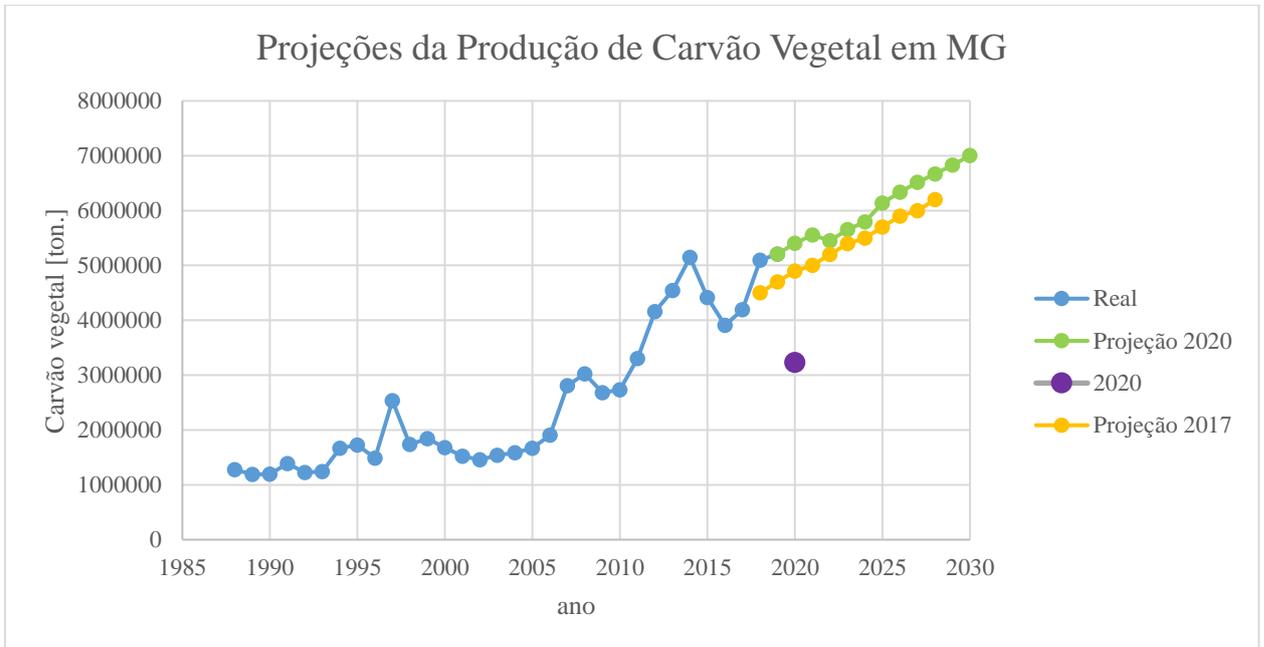


Figura 13: Projeções da Produção de Carvão Vegetal em MG

### **4.3. Tecnologia de Carbonização e Área Plantada**

As tecnologias de carbonização para cada empreendimento foram estimadas de acordo com as informações adquiridas do levantamento feito no SISEMA e PLNA. Foram considerados as unidades de carbonização que apresentavam o número de fornos por planta de produção e a quantidade produzida de carvão vegetal por ano.

Os dados foram cruzados com os das Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4 de Rodrigues & Braghini Junior (2019<sup>a</sup>) para obter-se o tipo de tecnologia adotada, tipo de operação e rendimentos médios de cada empreendimento.

Os resultados apresentam 29 unidades (78,4%) que possivelmente utilizam tecnologias primitivas (fornos colmeia, superfície e rabo-quente) e 8 unidades (21,6%) com tecnologias mais avançadas (fornos retangulares de alvenaria ou metal, VMR). Isso corrobora os números estimados por Bailis, Rujanavech et al. (2013) para o Brasil, citado no item 2.1.2.

O rendimento médio dos fornos é de cerca de 30%, sendo necessária uma plantação de 67.400.326 árvores para suprir a produção de carvão vegetal levantada. Isso representa uma área plantada de 404.401.956 m<sup>2</sup> ou 40.440 ha., considerando que cada árvore despense de 6 m<sup>2</sup> para o plantio.

De acordo com a Indústria Brasileira de Árvores (2019), o segmento de siderurgia e carvão vegetal concentra 12% da produção madeireira total do país e cerca de 24% da área total de plantio de eucalipto se concentra em MG. Logo, o valor encontrado deveria representar 3,4% da produção nacional.

Segundo a Associação Mineira da Indústria Florestal (2020), há cerca de 2 milhões de hectares de floresta plantada em Minas Gerais. Se seguir a mesma tendência nacional (12% no segmento de siderurgia e carvão vegetal), 280 mil hectares foram destinados à produção de carvão vegetal no Estado. Contudo, levando em consideração que o corte do eucalipto se dá aos 6 anos de idade, a área correspondente à produção de 2020 seria cerca de 6 vezes menor; aproximadamente 46.000 ha., valor próximo dos 40.440 ha. calculados.

### **4.4. Estimativa do Potencial de Geração Elétrica em Minas Gerais**

O ajuste logarítmico das eficiências e coeficiente de determinação R<sup>2</sup> de cada tecnologia estão dispostos no ANEXO 1.

De posse da potência estimada em cada unidade de carbonização, obtém-se o potencial de geração elétrica por município para 2020. Contudo, vale ressaltar que o valor calculado é baseado

nos empreendimentos levantados através dos licenciamentos ambientais. Tais valores de produção encontrados por empreendimento foram abaixo do projetado para 2020 em cerca de 40%. Porém, supõe-se que os empreendimentos não listados são produtores de muito pequeno porte, que não viabilizaria a produção de eletricidade.

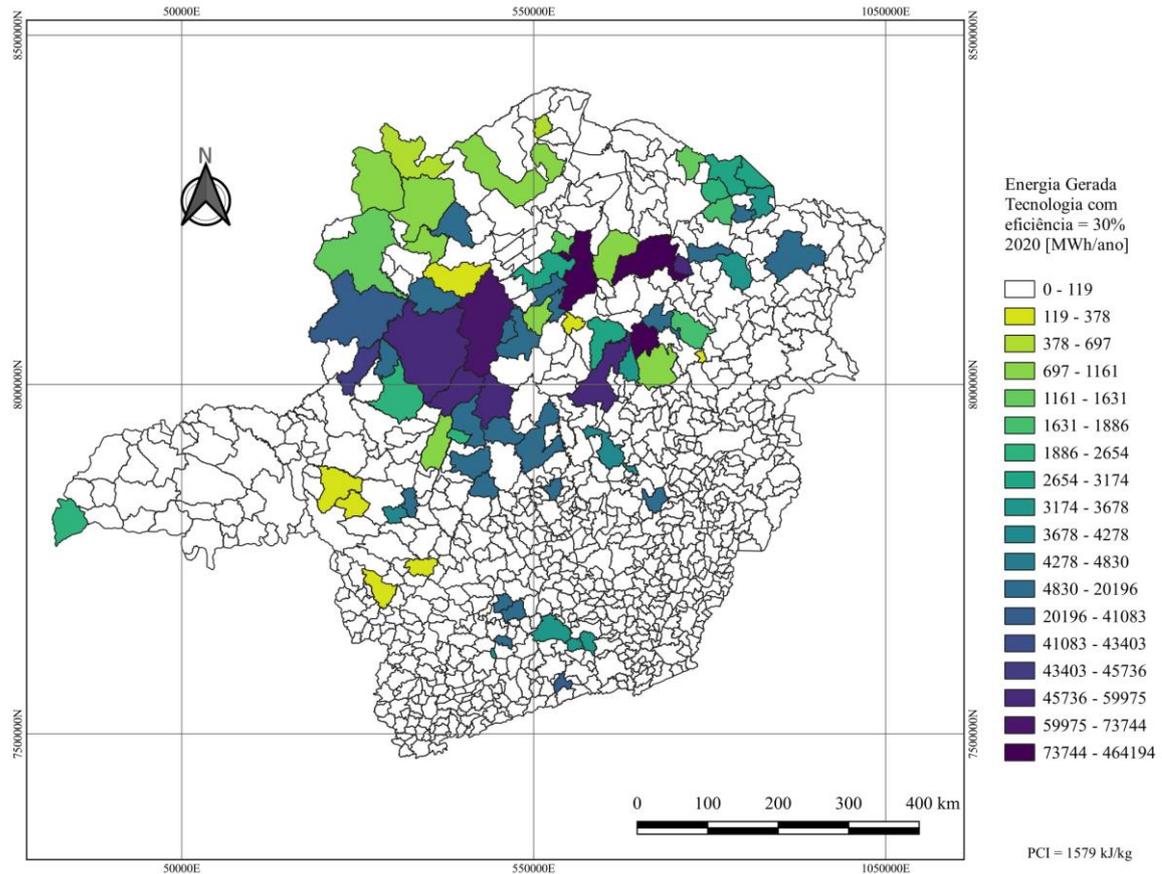


Figura 14: Potencial máximo teórico de geração de energia elétrica no estado de Minas Gerais

A partir dos valores de potencial por município, foi possível construir os mapas da distribuição dos potenciais de geração das diferentes tecnologias de conversão por município em 2020.

Com o potencial máximo de geração de eletricidade (utilizando tecnologias capazes de alcançar 30% de eficiência) foi realizada uma classificação dos potenciais de geração por municípios em 11 categorias de geração de energia elétrica sendo a menor 0 e a máxima de 73.744 a 464.194 MWh/ano. Desta forma é possível comparar de uma forma mais clara os potenciais de geração existentes por município e observar os benefícios da seleção das tecnologias (Figura 14, Figura 15, Figura 16, Figura 17, Figura 18 e Figura 19).

O potencial de geração de energia elétrica máxima para todo o Estado corresponde a um valor 1.457 GWh/ano caso os ciclos alcancem eficiências médias de 30% (Figura 14). A energia gerada específica média foi de 0,451 MWh gerado por tonelada de carvão produzido.

#### 4.4.1. Potencial Projetado do Ciclo SRC

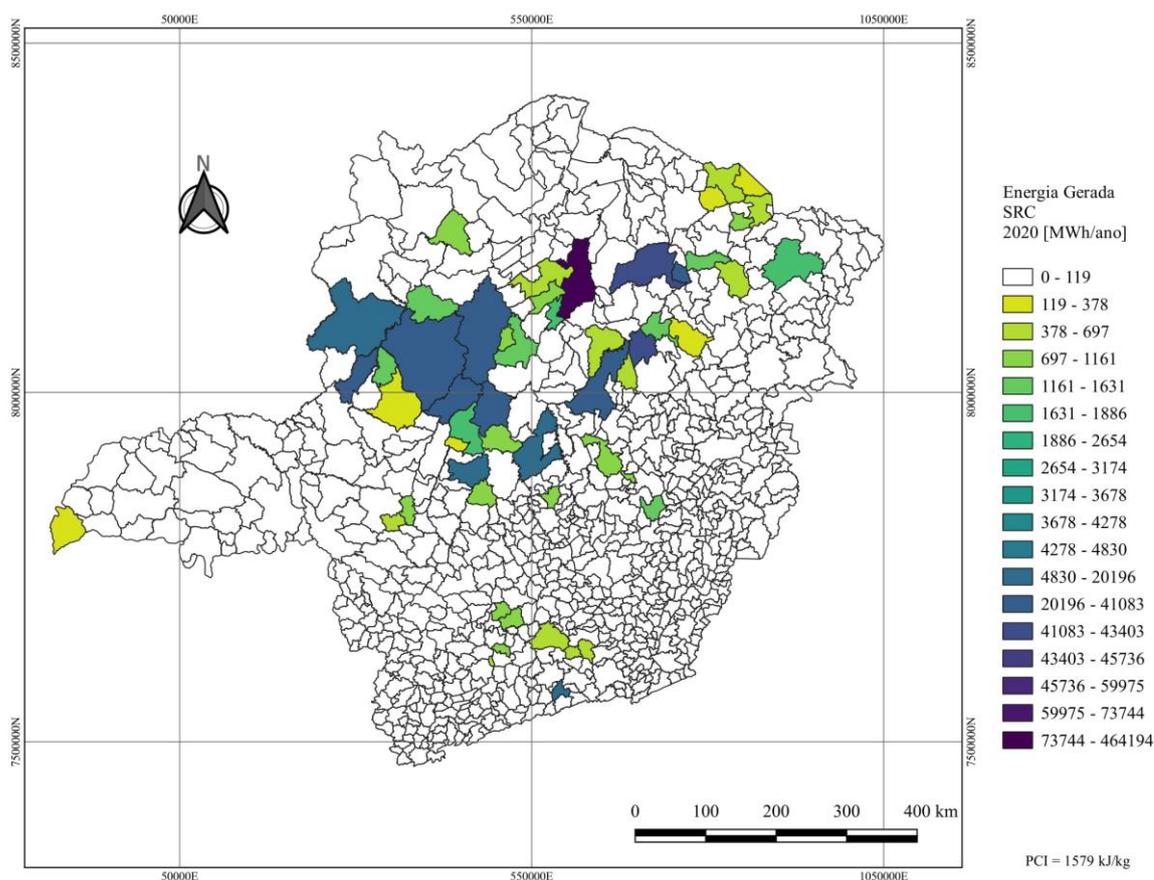


Figura 15: Potencial de geração de energia elétrica no estado de Minas Gerais no ano 2020 utilizando ciclo a vapor convencional

O potencial total de geração de eletricidade calculado para o SRC é de 718 GWh/ano considerando uma operação do ciclo de 7.447 horas por ano (Figura 15). A energia gerada específica média foi de 0,222 MWh gerado por tonelada de carvão produzido.

O maior potencial de geração de energia elétrica encontra-se no município de Montes Claros com um potencial de 302.443 MWh/ano e os menores potenciais nos municípios de Francisco de Sá, Jequitaiá e Tiros com 7 MWh/ano. Valores intermediários de geração encontram-se nos municípios de Bom Sucesso, Martinho Campos e Santo Antônio do Amparo com valores de 1085 MWh/ano.

#### 4.4.2. Potenciais Projetados dos Ciclos ORC

Os potenciais máximos, mínimos e médios referentes às tecnologias de ORC, juntamente com os respectivos municípios são apresentados na Tabela 19. A energia gerada específica média foi de 0,131 MWh/ton. de carvão, 0,359 MWh/ton. de carvão e 0,417 MWh/ton. de carvão para o ORC A R245fa, ORC B MDM e ORC C n-decano, respectivamente.

Tabela 19: Potenciais de geração de energia elétrica no ano 2020 no estado de Minas Gerais considerando diferentes sistemas ORC

	A – R245fa		B - MDM		C - n-Decano	
	Energia [MWh/ano]	Município	Energia [MWh/ano]	Município	Energia [MWh/ano]	Município
<b>Maior</b>	199.192	Montes Claros	405.819	Montes Claros	464.194	Montes Claros
<b>Menor</b>	7	Ninheira	5	Uberlândia	10	Uberlândia
<b>Mediano</b>	350	Campos Altos	1.754	Águas Vermelhas	2.121	Águas Vermelhas
<b>Total</b>	<b>422.745</b>		<b>1.158.787</b>		<b>1.347.566</b>	

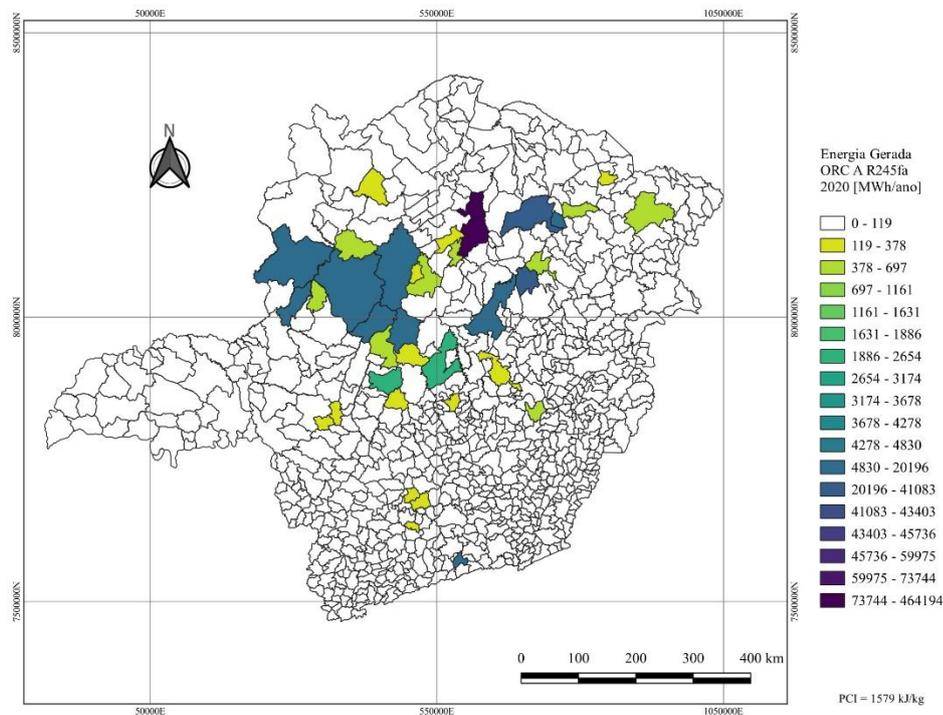


Figura 16: Potencial de geração de energia elétrica no estado de Minas Gerais no ano 2020 utilizando ciclo ORC A (sem regeneração, com superaquecimento e R245fa como fluido de trabalho)

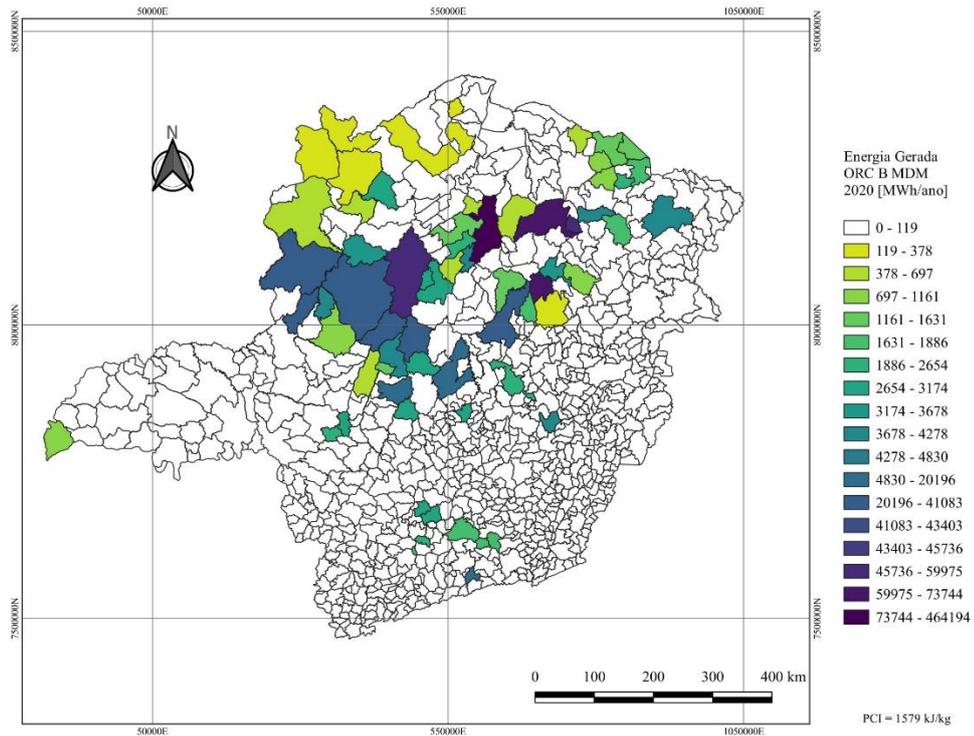


Figura 17: Potencial de geração de energia elétrica no estado de Minas Gerais no ano 2020 utilizando ciclo ORC B (com regeneração, sem superaquecimento e MDM como fluido de trabalho)

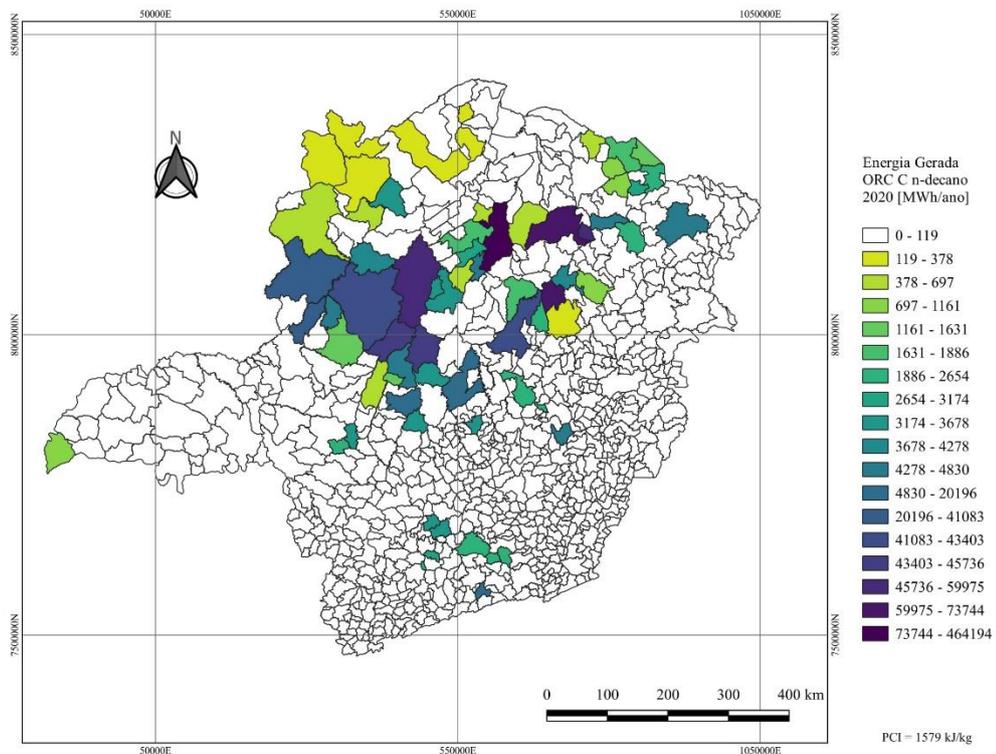


Figura 18: Potencial de geração de energia elétrica no estado de Minas Gerais no ano 2020 utilizando ciclo ORC C (com regeneração, com superaquecimento e n-decano como fluido de trabalho)

### 4.4.3. Potencial Projetado para EFGT

O potencial total de geração de eletricidade calculado é de 728 GWh/ano considerando uma operação do ciclo de 7.447 horas por ano com EFGT (Figura 19). A energia gerada específica média foi de 0,226 MWh gerado por tonelada de carvão produzido.

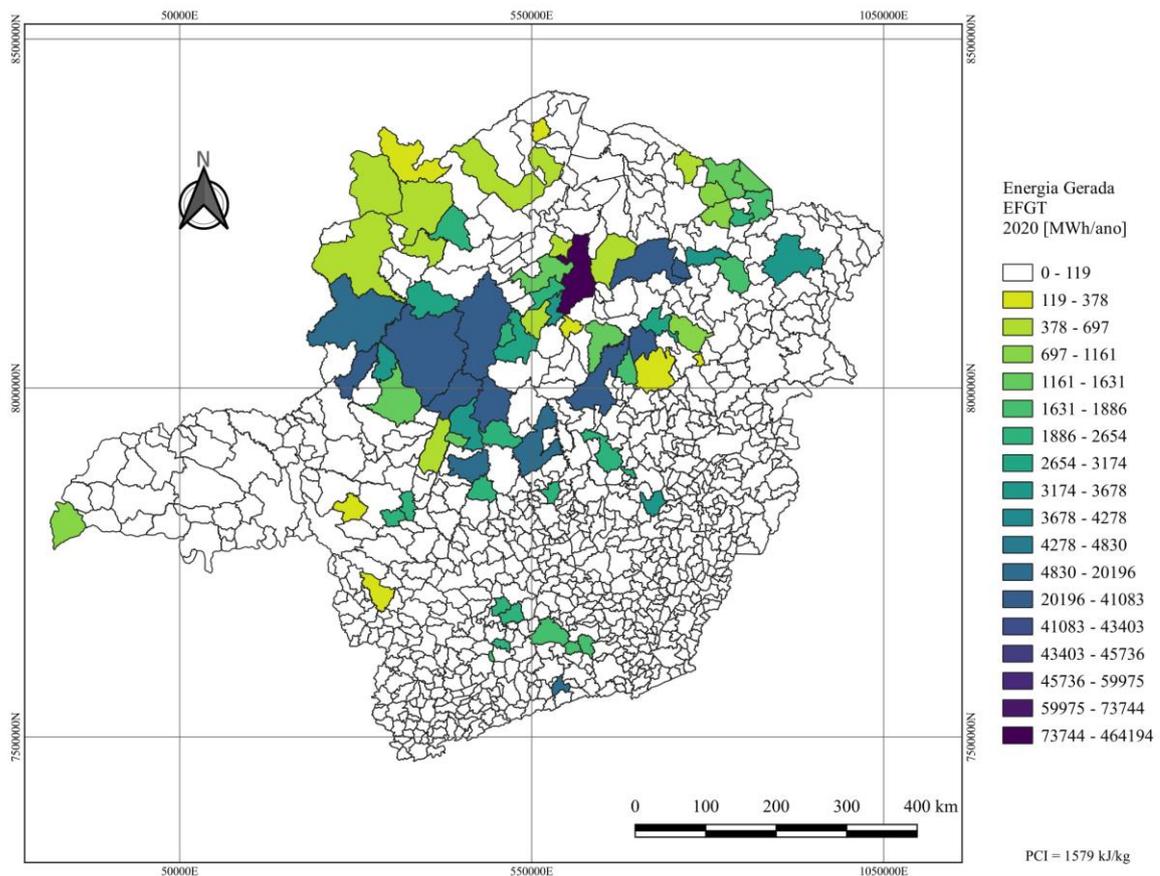


Figura 19: Potencial de geração de energia elétrica no estado de Minas Gerais no ano 2020 utilizando ciclo EFGT

O maior potencial de geração de energia elétrica encontra-se no município de Montes Claros com um potencial de 194.708 MWh/ano e o menor potencial no município de Uberlândia com um potencial de 36 MWh/ano. Valores intermediários de geração encontram-se nos municípios de Águas Vermelhas, Antônio Carlos, Ibiritoga, Ibitinga, São Bento Abade, São João Del Rei, Senador Modestino Gonçalves e Coração de Jesus com valores de 1731 MWh/ano.

Em suma, o maior potencial alcançado para o Estado em 2020 foi de 1.348 GWh/ano utilizando o ciclo ORC C tendo o n-decano como fluido de trabalho. Já o menor potencial foi de 423 GWh/ano com o ORC A tendo o R245fa como fluido de trabalho. O potencial considerando

uma tecnologia com 30% de aproveitamento seria de 1.457 GWh/ano. O PCI considerado nesses resultados foi o valor médio de 1579 kJ/kg.

#### 4.4.4. Potencial de Geração Projetado

Os resultados dos itens anteriores foram extrapolados levando em conta a previsão da produção no Estado até 2030. Os resultados são mostrados na Tabela 20 e Figura 20.

Tabela 20: Resultados da projeção dos potenciais de geração

ANO	ENERGIA [GWh/ano]						Disponível
	A R245fa	B MDM	C n-decano	SRC	EFGT	Tecnologia 30% de eficiência	
2020	423	1159	1348	718	728	1457	4856
2021	438	1195	1389	743	748	1496	4988
2022	411	1132	1317	700	733	1467	4889
2023	444	1208	1404	752	760	1521	5069
2024	436	1191	1384	740	779	1557	5191
2025	454	1232	1432	769	822	1643	5478
2026	441	1201	1396	747	848	1695	5651
2027	438	1195	1390	744	871	1742	5807
2028	436	1189	1382	739	891	1781	5938
2029	436	1191	1384	740	912	1824	6081
2030	437	1191	1385	741	935	1869	6231

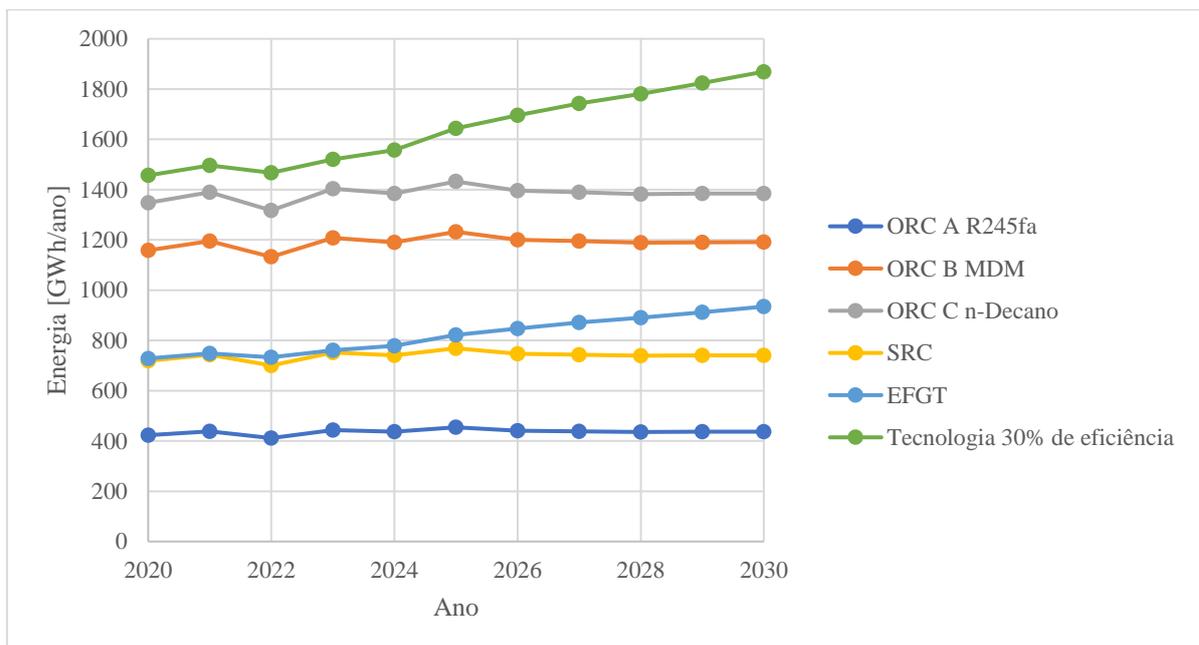


Figura 20: Resultados da projeção dos potenciais de geração

Também foi feita uma análise da variação da potência de acordo com o PCI. Variou-se os valores entre 1158 kJ/kg e 2000 kJ/kg para a produção em 2020 com as diferentes tecnologias. Os resultados do potencial disponível e a geração com cada tecnologia são apresentados na Figura 21.

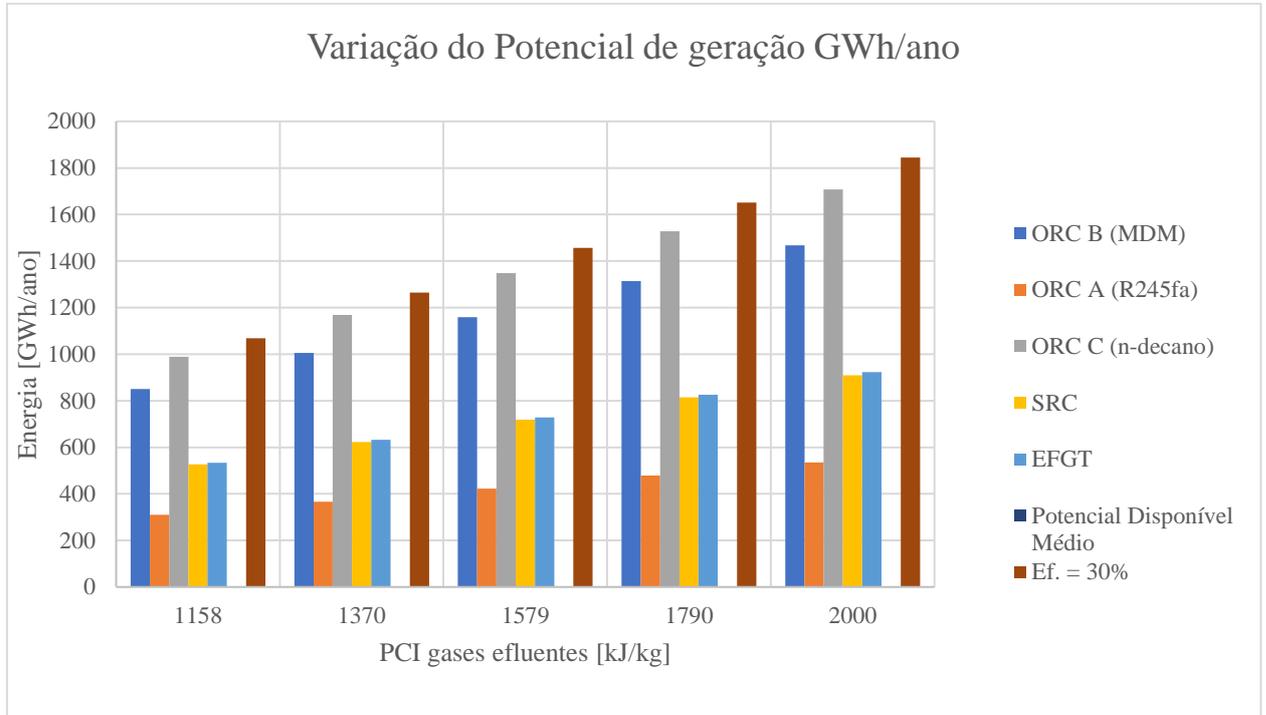


Figura 21: Variação do potencial com o PCI dos gases

É evidente o aumento da geração em função do aumento do poder calorífico dos gases não condensáveis, podendo haver uma variação de até 27% para mais ou para menos na energia gerada considerando o PCI médio de 1579 kJ/kg.

#### 4.4.5. Indicadores de Comparação

Cada um dos indicadores de consumo específico de gás por MWh gerado e Energia elétrica gerada (MWh) por tonelada de carvão produzido do item 3.4.3 estão presentes nas Tabela 21 e Tabela 22. Os indicadores foram calculados separadamente para os fornos de alto rendimento e fornos rudimentares.

Tabela 21: Consumo específico de gás por MWh gerado

Tecnologia	Consumo GNC específico [ton GNC / MWh]	
	forno de alto rendimento	forno rudimentar
<b>MDM</b>	11756	20990
<b>ORC A R245fa</b>	20711	71911
<b>n-Decano</b>	8719	15080
<b>MDM</b>	8607	12987
<b>ORC B R245fa</b>	18197	31331
<b>n-Decano</b>	7571	11109
<b>MDM</b>	8449	12667
<b>ORC C R245fa</b>	16857	28653
<b>n-Decano</b>	7453	10897
<b>SRC</b>	12813	30072
<b>EFGT</b>	15199	15199
<b>ef = 30%</b>	7600	7600

Como resultados gerais, o consumo específico de gás por MWh gerado pode variar de 7453 ton./ano até 31.331 ton./ano dependendo da tecnologia utilizada e do tipo de forno em que a tecnologia opera. Nota-se um menor consumo específico de gás por MWh gerado do ORC com n-decano. Provavelmente, esse resultado é decorrente da maior geração em relação às outras tecnologias. Logo em seguida, tem-se que o ORC B com n-decano apresenta os menores consumos de gás por MWh. O ORC A com R245fa é alternativa em que o consumo de gás é máximo; há um consumo mínimo de 18.197 ton./ano de GNC por MWh e um máximo de 31.331 ton./ano por MWh gerados.

Já com relação à energia elétrica gerada em MWh por tonelada de carvão produzido, o ORC C com n-decano se destaca com os maiores valores, variando de 0,22 (fornos rudimentares) até 0,56 MWh/ton. de carvão (fornos de alto rendimento). O ORC B com n-decano também se aproxima muito desses valores; 0,22 até 0,55 MWh/ton. de carvão. A menor relação de geração de eletricidade por quantidade de carvão produzido é do ORC A com R245fa, de 0,03 MWh/ton de carvão em fornos rudimentares.

Se comparados os resultados com os estudos de Leme, Venturini et al. (2018), que estimaram uma geração de 0,76 a 0,93 MWh/ton. de carvão produzido, este trabalho apresenta valores mais baixos. Isso pode ser devido ao fato de que os autores citados fizeram suas previsões baseadas em fornos de alto rendimento de somente uma planta, extrapolados para toda a produção. O que de fato não ocorre, pois apenas uma pequena parcela é produzida em tais fornos, e a maioria se dá em fornos rudimentares de baixo rendimento.

Tabela 22: Energia elétrica gerada (MWh) por tonelada de carvão produzido

Tecnologia	Energia gerada específica [MWh/ton carvão]	
	forno de alto rendimento	forno rudimentar
<b>MDM</b>	0,36	0,11
<b>ORC A R245fa</b>	0,20	0,03
<b>n-Decano</b>	0,48	0,16
<b>MDM</b>	0,48	0,18
<b>ORC B R245fa</b>	0,23	0,08
<b>n-Decano</b>	0,55	0,22
<b>MDM</b>	0,49	0,19
<b>ORC C R245fa</b>	0,25	0,08
<b>n-Decano</b>	0,56	0,22
<b>SRC</b>	0,33	0,08
<b>EFGT</b>	0,27	0,16
<b>ef = 30%</b>	0,55	0,32

Também foi possível calcular a produção de carvão necessária em mdc/ano para diferentes faixas de potência de acordo com cada tecnologia de conversão como descrito no item 3.4.3. Os resultados são apresentados na Tabela 23.

Nota-se que as tecnologias que geram menos energia são as que necessitam de uma produção de carvão maior para atingir uma determinada faixa de potência. Isso é devido ao fato de que uma menor eficiência de geração necessita maior vazão de GNC, conseqüentemente maior produção de carvão vegetal.

Tabela 23: Produção de carvão vegetal (mdc/ano) para determinadas faixas de potência com diferentes tecnologias de conversão (continua)

Pot [kW]	Produção de Carvão [mdc/ano]			
	ORC A			SRC
	MDM	R245fa	n-Decano	
100	22627	23770	17498	32955
200	37497	39397	29001	50452
500	75699	79548	58551	93958
1000	131500	138199	101716	155674
5000	499082	524591	386072	545740
10000	901787	947930	697609	961673

Tabela 23: Produção de carvão vegetal (mdc/ano) para determinadas faixas de potência com diferentes tecnologias de conversão (continuação)

Pot [kW]	Produção de Carvão [mdc/ano]			
	ORC B			EFGT
	MDM	R245fa	n-Decano	
100	13963	29788	12022	11972
200	24347	50654	21131	23944
500	51838	105030	45379	59859
1000	93004	185409	81852	119719
5000	373559	723591	331943	598594
10000	687743	1319430	613121	1197188

Pot [kW]	Produção de Carvão [mdc/ano]			
	ORC C			ef = 30%
	MDM	R245fa	n-Decano	
100	13614	27708	11797	5986
200	23787	47195	20758	11972
500	50754	98026	44629	29930
1000	91181	173225	80556	59859
5000	367114	677279	327108	299297
10000	676422	1235730	604457	598594

De acordo com o levantamento realizado no item 4.1 e os resultados da Tabela 23, pôde-se estimar a faixa de potência instalada em cada um dos 142 empreendimentos listados. Na Tabela 24, são apresentados o resumo do número de empreendimentos por cada faixa de potência em MG.

Tabela 24: Número de empreendimentos inseridos em cada faixa de potência

Faixa de Potência [kW]	Número de empreendimentos											
	ORC A			ORC B			ORC C			SRC	EFGT	ef = 30%
	MDM	R245fa	n-Decano	MDM	R245fa	n-Decano	MDM	R245fa	n-Decano			
<100	61	122	54	50	84	47	50	71	47	85	47	30
200-500	35	0	38	55	6	55	55	9	55	6	61	37
500-1000	2	2	0	6	6	9	6	6	9	5	0	38
1000-5000	15	15	14	12	13	10	11	13	10	12	17	9
5000-10000	2	2	5	7	0	9	8	0	9	2	2	8
10000	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3

Os resultados apresentados demonstraram que a opção energeticamente melhor é o ciclo ORC com regeneração e superaquecimento que utiliza o n-decano como fluido de trabalho pois apresenta maior geração de eletricidade com um menor consumo de GNC. Além disso, necessita

de uma menor produção de carvão vegetal na planta, viabilizando sua utilização em plantas de menor porte. Contudo, vale ressaltar que o ORC do tipo A com MDM e os ORC's do tipo B utilizando n-decano ou MDM, também apresentaram resultados semelhantes no quesito de geração e consumo de GNC. Na Figura 22, foi possível elencar as tecnologias de acordo com a geração de energia anual.

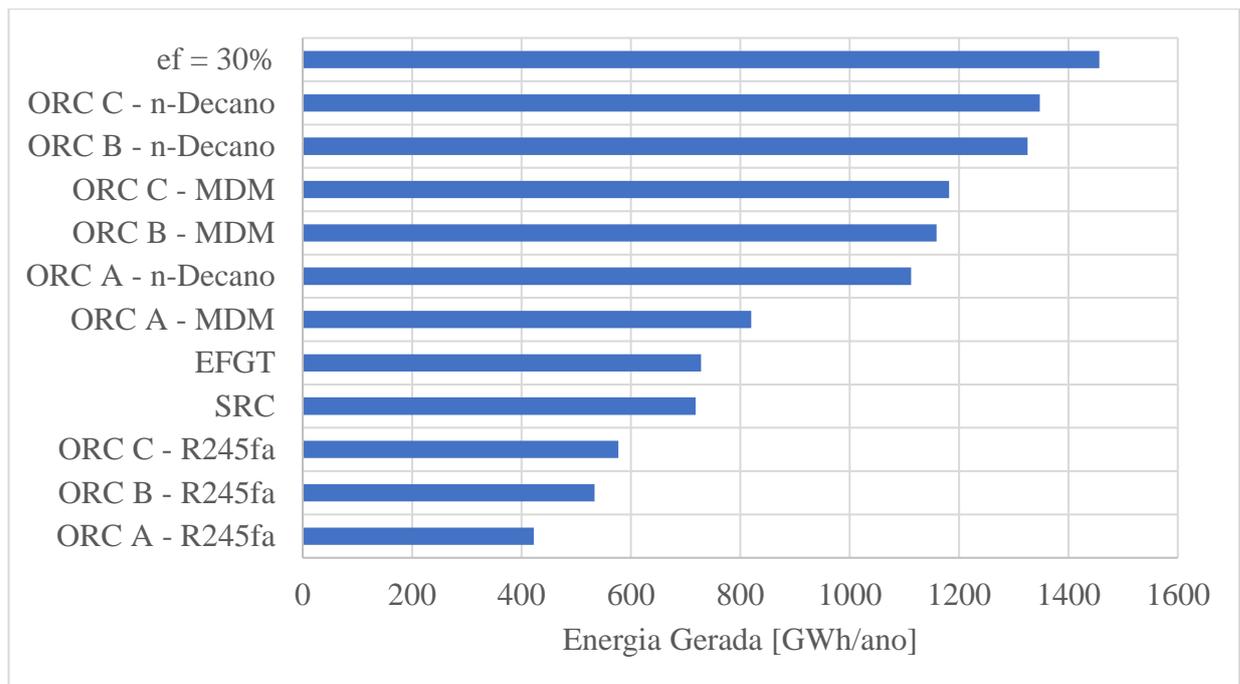


Figura 22: Total de energia gerada anualmente por tecnologia de conversão

## 4.5. Resultados da Análise Econômica

### 4.5.1. Custos do Ciclo a Vapor – SRC

#### Custos de instalação (CAPEX)

Para sistemas a vapor de geração única de potência (sem cogeração) com faixas de produção de potência entre 5 e 25 MW, os custos de investimento variam em torno de 3,000 e 5,000 US\$/kW de eletricidade (FEMP, 2016).

Para as faixas de potência escolhidas, considerando a capacidade de geração entre 500 até 2000 kW, os indicadores econômicos encontrados, investimento total, custos de operação e manutenção e custo específico de instalação, são apresentados na Tabela 25. É possível identificar que a faixa de variação dos custos específicos é de 2371,30 até 3795,25 US\$/kW, o que implica que para todas as capacidades geradoras os sistemas se encontram dentro da margem de custos especificados pela FEMP (2016).

Tabela 25. Custos de investimentos para as tecnologias de ciclo a vapor.

<b>Indicadores Econômicos</b>	<b>Capacidade da Planta (kW)</b>			
	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>1500</b>	<b>2000</b>
I <sub>T</sub> (US\$)	1.788.458,01	2.809.455,60	3.698.624,53	4.467.132,63
C <sub>O&amp;M</sub> fixo (US\$)	107.307,48	168.567,34	221.917,47	268.027,96
C <sub>O&amp;M</sub> variável (US\$)	1.861,75	3.723,50	5.585,25	7.447,00
<b>Investimento Específico (US\$/kW)</b>	<b>3.795,25</b>	<b>2.981,75</b>	<b>2.617,42</b>	<b>2.371,30</b>

#### 4.5.2. Custos do Ciclos Rankine Orgânico – ORC

##### Custos de instalação (CAPEX)

Os resultados referentes à estimativa de custos estão apresentados na Tabela 26, Tabela 27 e na Tabela 28, já com seus valores corrigidos para a atual conjuntura econômica. Os custos apresentados são referentes aos diferentes cenários de ciclo ORC avaliados, aos três fluidos de trabalho previamente selecionados (R-245fa, MDM e n-Decano) e consideram os custos de aquisição apenas dos componentes indispensáveis ao funcionamento do sistema de geração. As tabelas também apresentam o custo total do investimento ou custo específico de investimento (CEI) em US\$/kW.

De acordo com Lummens (2016) os resultados dessa metodologia são maiores do que o custo real de um sistema desse tipo. Entretanto, deixa claro que as estimativas desse gênero têm como objetivo incrementar discussões da ordem de grandeza dos custos e incorporar estudos econômicos preliminares, pois operam em uma estreita faixa de precisão.

Tabela 26. Custos estimados para o ciclo ORC sem regenerador

<b>Fluido: R245fa</b>		<b>Capacidade da Planta (kW)</b>			
<b>Custo de Aquisição (US\$)</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>1500</b>	<b>2000</b>	
Evaporador	422.360,72	713.646,02	999.283,44	1.286.011,32	
Condensador	314.378,44	532.396,95	724.544,25	901.609,24	
Bomba	14.267,03	22.323,81	29.899,17	37.265,54	
Turbina	101.477,08	194.686,64	285.011,20	373.511,81	
<b>Custo Específico de Investimento (US\$/kW)</b>	<b>6.867,32</b>	<b>5.892,93</b>	<b>5.474,46</b>	<b>5.232,95</b>	

<b>Fluido: MDM</b>		<b>Capacidade da Planta (kW)</b>			
<b>Custo de Aquisição (US\$)</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>1500</b>	<b>2000</b>	
Evaporador	422.360,72	713.646,02	999.283,44	1.286.011,32	
Condensador	298.069,68	504.778,21	686.957,64	854.837,17	
Bomba	7.273,14	10.077,26	12.563,39	14.888,03	
Turbina	101.477,08	194.686,64	285.011,20	373.511,81	
<b>Custo Específico de Investimento (US\$/kW)</b>	<b>6.679,60</b>	<b>5.732,36</b>	<b>5.326,98</b>	<b>5.093,69</b>	

<b>Fluido: n-Decano</b>		<b>Capacidade da Planta (kW)</b>			
<b>Custo de Aquisição (US\$)</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>1500</b>	<b>2000</b>	
Evaporador	323.351,40	526.710,98	722.000,80	915.284,25	
Condensador	235.476,13	398.844,81	542.760,90	675.439,95	
Bomba	6.592,10	8.932,13	10.991,37	12.905,09	
Turbina	101.477,08	194.686,64	285.011,20	373.511,81	
<b>Custo Específico de Investimento (US\$/kW)</b>	<b>5.372,29</b>	<b>4.548,12</b>	<b>4.191,00</b>	<b>3.981,79</b>	

Tabela 27. Custos estimados para o ciclo ORC com regenerador e sem superaquecimento

<b>Fluido: R245fa</b>		<b>Capacidade da Planta (kW)</b>			
<b>Custo de Aquisição (US\$)</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>1500</b>	<b>2000</b>	
Evaporador	287.353,67	460.240,88	624.615,34	786.332,97	
Condensador	298.817,02	506.043,82	688.680,02	856.980,47	
Turbina	101.477,08	194.686,64	285.011,20	373.511,81	
Bomba	14.965,84	23.599,80	31.725,41	39.661,98	
Regenerador	385.152,81	642.845,51	893.511,82	1.144.361,05	
<b>Custo Específico de Investimento (US\$/kW)</b>	<b>8.762,68</b>	<b>7.360,52</b>	<b>6.776,27</b>	<b>6.446,24</b>	

<b>Fluido: MDM</b>		<b>Capacidade da Planta (kW)</b>			
<b>Custo de Aquisição (US\$)</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>1500</b>	<b>2000</b>	
Evaporador	317.288,19	515.487,42	705.552,46	893.239,10	
Condensador	151.247,42	256.136,08	348.578,11	433.764,05	
Bomba	101.477,08	194.686,64	285.011,20	373.511,81	
Turbina	7.338,44	10.185,90	12.713,82	15.078,81	
Regenerador	672.618,21	1.203.317,38	1.742.973,31	2.297.567,39	
<b>Custo Específico de Investimento (US\$/kW)</b>	<b>10.069,33</b>	<b>8.779,92</b>	<b>8.310,30</b>	<b>8.082,17</b>	

<b>Fluido: n-Decano</b>		<b>Capacidade da Planta (kW)</b>			
<b>Custo de Aquisição (US\$)</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>1500</b>	<b>2000</b>	
Evaporador	1.261.159,19	2.419.314,85	3.649.190,46	4.950.628,13	
Condensador	131.854,46	223.376,19	303.957,70	378.285,48	
Bomba	101.477,08	194.686,64	285.011,20	373.511,81	
Turbina	6.655,52	9.036,68	11.135,23	13.086,59	
Regenerador	462.105,82	789.837,30	1.113.784,18	1.440.029,47	
<b>Custo Específico de Investimento (US\$/kW)</b>	<b>15.815,29</b>	<b>14.646,20</b>	<b>14.401,05</b>	<b>14.410,65</b>	

Tabela 28. Custos estimados para o ciclo ORC com regenerador e com superaquecimento

<b>Fluido: R245fa</b>		<b>Capacidade da Planta (kW)</b>			
<b>Custo de Aquisição (US\$)</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>1500</b>	<b>2000</b>	
Evaporador	955.420,21	1.779.264,86	2.637.643,21	3.534.050,89	
Condensador	129.526,49	219.269,53	298.443,42	371.400,64	
Turbina	101.477,08	194.686,64	285.011,20	373.511,81	
Bomba	14.267,03	22.323,81	29.899,17	37.265,54	
Regenerador	444.362,23	755.689,15	1.062.273,85	1.370.840,02	
<b>Custo Específico de Investimento (US/kW)</b>	<b>13.251,99</b>	<b>11.967,63</b>	<b>11.582,08</b>	<b>11.453,28</b>	

<b>Fluido: MDM</b>		<b>Capacidade da Planta (kW)</b>			
<b>Custo de Aquisição (US\$)</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>1500</b>	<b>2000</b>	
Evaporador	655.280,62	1.168.679,05	1.689.781,26	2.224.101,83	
Condensador	148.833,05	252.126,20	343.085,27	426.973,35	
Bomba	101.477,08	194.686,64	285.011,20	373.511,81	
Turbina	7.273,14	10.077,26	12.563,39	14.888,03	
Regenerador	675.820,55	1.209.722,92	1.752.822,11	2.311.083,95	
<b>Custo Específico de Investimento (US\$/kW)</b>	<b>12.797,90</b>	<b>11.420,08</b>	<b>10.964,46</b>	<b>10.775,57</b>	

<b>Fluido: n-Decano</b>		<b>Capacidade da Planta (kW)</b>			
<b>Custo de Aquisição (US\$)</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>1500</b>	<b>2000</b>	
Evaporador	686.154,82	1.231.054,93	1.784.935,49	2.355.223,39	
Condensador	129.526,49	219.269,53	298.443,42	371.400,64	
Bomba	101.477,08	194.686,64	285.011,20	373.511,81	
Turbina	6.592,10	8.932,13	10.991,37	12.905,09	
Regenerador	465.361,36	796.208,02	1.122.908,68	1.452.968,85	
<b>Custo Específico de Investimento (US\$/kW)</b>	<b>11.190,21</b>	<b>9.868,79</b>	<b>9.404,42</b>	<b>9.195,56</b>	

Diante os três cenários avaliados para quatro diferentes capacidades das plantas, a tendência comum é a de diminuição dos custos específicos com o aumento na capacidade da planta, sendo que o menor custo dentre os 12 calculados para o R-245fa foi de 5.232 US\$/kW e o maior foi de 13.251,99 US\$/kW, assim como para o MDM é de 5.093,69 até 12.797,90 US\$/kW, e para o n-Decano é de 3.981,79 para 15.815,29 US\$/kW. Portanto, nota-se que a maior variação acontece quando o fluido utilizado é o n-Decano, e nas simulações que consideram este fluido de trabalho são encontrados o maior e o menor valor de CEI, como ilustrado na Figura 23.

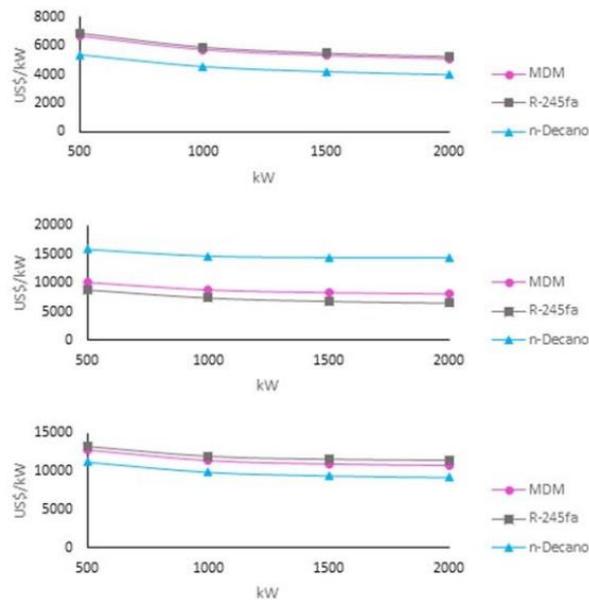


Figura 23. Variação dos custos específicos de instalação (US\$/kW) para cada cenário. (a) Cenário com Superaquecimento; (b) Cenário com Regeneração; (c) Cenário com Superaquecimento e Regeneração.

Ressalta-se que os equipamentos de troca de calor – evaporador, regeneradores e condensadores, nessa ordem – são os componentes com custos mais altos. Esses são maiores conforme a intensidade de troca de calor, portanto para sistemas com maior capacidade de geração, maiores são os custos com a aquisição de tais componentes. Para os fluidos MDM e R-245fa quando há regeneração e ausência de superaquecimento os custos são menores do que nos cenários em que esses dois componentes são considerados. Entretanto, o comportamento oposto é observado quando se trata do n-decano, sendo que o maior custo específico de instalação, acompanhado pelo maior custo de aquisição da caldeira em todos os cenários é observado para o cenário sem superaquecimento e com regeneração. Portanto, os altos custos dos equipamentos associados à transferência de calor indicam uma relação com os sistemas que têm regeneração. O fato mais representativo que sustenta essa afirmação está no CEI da planta de 500 kW sem regenerador (Tabela 26), ser menor que ambos os valores de CEI para as plantas de 2000 kW nos casos com regeneração (Tabela 27 e Tabela 28).

Em seu estudo, Tocci et al. (2017) concluiu que para plantas operando em ciclo ORC com capacidade menor que 100 kW, os custos específicos não devem exceder 3000 US\$/kW. Como o aqui definido parte de 500 kW, o comportamento esperado seria de uma redução nesse valor. Entretanto, como os valores encontrados são maiores que o indicado pelas conclusões dos autores, a recomendação do trabalho é que os aspectos termodinâmicos, econômicos e técnicos devam ser trabalhados para que em conjunto proponham uma otimização ao sistema e diminuição no custo

específico de investimento. No estudo de Ng et al. (2020), o valor encontrado para o CEI dentre todas as configurações avaliadas partiu de pouco mais de 5000 US\$/kW e chegou a valores próximos de 8000 US\$/kW. Os autores ao comparar esses valores com valores da literatura disponível, indicaram que a discrepância nos custos se dá devido à distância temporal dos estudos.

Tanto as justificativas de Tocci et al. (2017) quanto as de Ng et al. (2020) podem ser assimiladas para a presente análise. A distância entre os índices CEPCI de 18 anos para a maioria dos componentes do sistema acaba por elevar os custos calculados notavelmente, assim como, técnicas para otimizar o funcionamento de cada cenário podem ser implicadas para aumentar as eficiências, seja termodinâmica ou de troca de calor, e por consequência, diminuir o CEI.

### 4.5.3. Custos da Turbina a gás de Queima Externa – EFGT

Sabe-se que de forma geral, há uma tendência de queda dos custos específicos de aquisição/instalação dos equipamentos de geração de eletricidade à medida que sua potência aumenta, o que pode ser observado no caso dos sistemas SRC e ORC. No entanto, no caso das EFGTs, por existir atualmente um fabricante produzindo um único modelo, a redução dos custos específicos com a potência instalada dependeria exclusivamente de negociações com o fabricante, no momento de uma eventual aquisição de um lote de equipamentos. Assim, no caso das EFGTs, considerou-se a possibilidade de redução de 15% nos custos específicos de aquisição/instalação, à medida que a potência passa de 500 kW para 2000 kW. Assim, na Tabela 29, são apresentados os custos específicos para a EFGT para faixa de potências considerada:

Tabela 29: Custos de investimentos para as EFGTs

Indicadores Econômicos	Capacidade da Planta (kW)			
	500	1000	1500	2000
$I_T$ (US\$)	2.895.000,00	5.572.875,00	8.033.625,00	9.843.000,00
$C_{O\&M}$ fixo (US\$)	86.850,00	167.186,25	241.008,75	295.290,00
$C_{O\&M}$ variável (US\$)	18.610,00	37.220,00	55.830,00	74.440,00
<b>Investimento Específico (US\$/kW)</b>	<b>5.790,00</b>	<b>5.572,88</b>	<b>5.355,75</b>	<b>4.921,50</b>

#### 4.5.4. Resultados de CAPEX e OPEX mais impostos

Aos resultados dos itens 4.5.1, 4.5.2 e 4.5.3, foram adicionados os custos de dutos, queimador e trocador de calor auxiliar, além dos valores dos impostos e taxas sobre produto descritas no item 3.5.6. Os resultados estão dispostos na Tabela 30.

Tabela 30: OPEX e CAPEX finais para as diferentes tecnologias adotadas (continua)

Pot [kW]	500	1.000	1.500	2.000
<b>Ciclo a vapor SRC</b>				
Fornos em operação	18	28	36	44
Custo dos Dutos [US\$]	35.046,15	53.084,62	67.515,38	81.946,15
Custo do Queimador [US\$]	368.800,00	573.688,89	737.600,00	901.511,11
Custo do TC aux. [US\$]	20.856,06	29.154,50	36.781,31	43.152,84
Custo da Usina de Geração [US\$]	1.788.458,01	2.809.455,60	3.698.624,53	4.467.132,63
<b>CAPEX [US\$]</b>	<b>2.213.160,22</b>	<b>3.465.383,60</b>	<b>4.540.521,22</b>	<b>5.493.742,74</b>
<b>CAPEX + Impostos [US\$]</b>	<b>2.877.108,29</b>	<b>4.504.998,68</b>	<b>5.902.677,59</b>	<b>7.141.865,56</b>
<b>OPEX [US\$/ano]</b>	<b>72263,74</b>	<b>121503,67</b>	<b>166899,74</b>	<b>208453,98</b>
<b>Ciclo ORC R245fa</b>				
Fornos em operação	16	26	36	44
Custo dos Dutos [US\$]	31.434,46	49.476,92	67.515,38	81.946,15
Custo do Queimador [US\$]	440.621,27	716.009,56	991.397,85	1.211.708,48
Custo do TC aux. [US\$]	47.783,87	70.981,48	89.776,28	106.767,56
Custo da Usina de Geração [US\$]	3.433.660,00	5.892.930,00	8.211.690,00	10.465.900,00
<b>CAPEX [US\$]</b>	<b>3.953.503,60</b>	<b>6.729.397,96</b>	<b>9.360.379,52</b>	<b>11.866.322,00</b>
<b>CAPEX + Impostos [US\$]</b>	<b>5.139.554,68</b>	<b>8.748.217,35</b>	<b>12.168.493,38</b>	<b>15.426.218,60</b>
<b>OPEX [US\$/ano]</b>	<b>121.619,80</b>	<b>241.007,90</b>	<b>302.180,70</b>	<b>388.417,00</b>
<b>Ciclo ORC MDM</b>				
Fornos em operação	12	18	24	32
Custo dos Dutos [US\$]	24.223,08	35.046,15	45.869,23	60.300,00
Custo do Queimador [US\$]	330.465,95	495.698,92	660.931,90	881.242,53
Custo do TC aux. [US\$]	38.408,05	53.468,44	67.053,71	81.341,79
Custo da Usina de Geração [US\$]	3.339.800,00	5.732.360,00	7.990.470,00	10.187.380,00
<b>CAPEX [US\$]</b>	<b>3.732.897,08</b>	<b>6.316.573,52</b>	<b>8.764.324,84</b>	<b>11.210.264,32</b>
<b>CAPEX + Impostos [US\$]</b>	<b>4.852.766,20</b>	<b>8.211.545,58</b>	<b>11.393.622,29</b>	<b>14.573.343,62</b>
<b>OPEX [US\$/ano]</b>	<b>118.804,00</b>	<b>209.190,80</b>	<b>295.544,10</b>	<b>380.061,40</b>

Tabela 30: OPEX e CAPEX finais para as diferentes tecnologias adotadas (continuação)

Pot [kW]	500	1.000	1.500	2.000
<b>Ciclo ORC n-decano</b>				
Fornos em operação	10	16	22	28
Custo dos Dutos [US\$]	20.615,38	31.438,46	42.261,54	53.084,62
Custo do Queimador [US\$]	275.388,29	440.621,27	605.854,24	771.087,22
Custo do TC aux. [US\$]	33.957,40	49.563,24	62.069,71	75.024,18
Custo da Usina de Geração [US\$]	2.686.145,00	4.548.120,00	6.286.500,00	7.963.580,00
<b>CAPEX [US\$]</b>	<b>3.016.106,08</b>	<b>5.069.742,97</b>	<b>6.996.685,49</b>	<b>8.862.776,01</b>
<b>CAPEX + Impostos [US\$]</b>	<b>3.920.937,90</b>	<b>6.590.665,86</b>	<b>9.095.691,14</b>	<b>11.521.608,81</b>
<b>OPEX [US\$/ano]</b>	<b>99.194,35</b>	<b>173.663,60</b>	<b>244.425,00</b>	<b>313.347,40</b>
<b>Ciclo EFGT</b>				
Fornos em operação	14	24	34	44
Custo dos Dutos [US\$]	27.830,77	45.869,23	63.907,69	81.946,15
Custo do Queimador [US\$]	385.543,61	660.931,90	936.320,19	1.211.708,48
Custo do TC aux. [US\$]	41.896,24	64.427,16	85.387,10	105.681,84
Custo da Usina de Geração [US\$]	2.895.000,00	5.572.875,00	8.033.625,00	9.843.000,00
<b>CAPEX [US\$]</b>	<b>3.350.270,62</b>	<b>6.344.103,29</b>	<b>9.119.239,99</b>	<b>11.242.336,48</b>
<b>CAPEX + Impostos [US\$]</b>	<b>4.355.351,81</b>	<b>8.247.334,28</b>	<b>11.855.011,99</b>	<b>14.615.037,42</b>
<b>OPEX [US\$/ano]</b>	<b>105.460,00</b>	<b>204.406,25</b>	<b>296.838,75</b>	<b>369.730,00</b>

#### 4.5.5. Viabilidade técnico-econômica dos empreendimentos levantados

Os valores da Tabela 30 foram extrapolados para as potências e energias dos empreendimentos levantados em 2020 a fim de realizar uma análise de viabilidade técnico-econômica individual. Assim como nos itens anteriores, foi considerada uma vida útil de 20 anos e uma taxa mínima de atratividade de 10%. Variando o preço de venda de energia, procurou-se chegar à um valor em que pelo menos as usinas de maior porte, correspondente aos 21% da produção que detém fornos de maior tecnologia, pudessem ser viáveis e se pagarem em 10 anos. Os resultados estão dispostos na Tabela 31 considerando.

Os menores preços de venda são obtidos com o ciclo a vapor convencional (SRC). Mesmo não sendo a tecnologia que produz maior potência e energia, ainda é a de menor custo. Logo abaixo, tem-se o ORC com n-decano seguido pelo ORC com MDM. Para produções abaixo de 100.000 mdc/ano, o ciclo EFGT se mostra com custo menor que o ORC com R245fa. Acima desta produção, porém, o EFGT se torna mais caro, pois seus custos em tal faixa de potência superam os do ORC com R245fa.

Tabela 31: Preços de venda de energia para viabilidade econômica dos empreendimentos com fornos avançados em 2020

Empreendimento	Município	Preço de Venda da Energia [US\$]				
		SRC	ORC n-decano	ORC MDM	EFGT	ORC R245fa
Vallourec Florestal Ltda.	Montes Claros	55,33	111,11	149,43	226,36	180,74
Arcelormittal Bioflorestas Ltda	Carbonita	105,13	165,25	217,26	273,13	265,53
Viena Fazendas Reunidas Ltda/Fazenda Veredão	Grão Mogol	105,13	165,25	217,26	273,13	265,53
Gerdau Aços Longo Fazenda Biluca Gameleira Porto Alegre E Bom Retiro	Buritizeiro	113,23	172,80	226,62	278,90	277,36
Norflor Empreendimentos Agrícolas S.A.	Josenópolis	115,48	174,86	229,17	280,44	280,58
Fazenda São Francisco	São Gonçalo Do Abaeté	124,90	183,23	239,51	286,62	293,70
Gerdau Aços Longos S/A – Fazenda Cabana Santa Bárbara	Três Marias	126,48	184,60	241,21	287,62	295,86
Gerdau Aços Longos S/A	João Pinheiro	127,30	185,31	242,08	288,13	296,97
Gerdau Aços Longos S.A./Fazenda Inhacica	Diamantina	128,14	186,04	242,98	288,65	298,10
Arcelormittal Sul Fluminense S.A. / Fazenda Bom Sucesso E Riacho	Vazante	129,88	187,53	244,82	289,73	300,44
Fazenda Boa Sorte	Paracatu	136,70	193,29	251,91	293,82	309,48
Fazenda Aldeia Cachoeira E Amizade	João Pinheiro	155,42	208,33	270,40	304,18	333,12
Saint-Gobain Pam Bioenergia Ltda - Bloco Fazenda Areão E Outros	Bom Jardim de Minas	169,05	218,68	283,07	311,04	349,41
Upc Fazenda Santa Rita	João Pinheiro	169,05	218,68	283,07	311,04	349,41
Fazenda Centenário	João Pinheiro	179,05	225,97	291,98	315,76	360,90
Novas Fronteiras Agro Negócios Ltda./Fazenda Gameleira, Marangaba E Estela	Buritizeiro	188,08	232,35	299,77	319,81	370,98
Fazenda Santo Antonio	João Pinheiro	188,08	232,35	299,77	319,81	370,98
Fazenda Jacurutu	João Pinheiro	188,08	232,35	299,77	319,81	370,98
Floral Agropecuaria Ltda	Abaeté	207,49	245,46	315,75	327,92	391,74
Gerdau Aços Longos S/A - Fazenda Capão Do Retiro	Curvelo	207,49	245,46	315,75	327,92	391,74

A fim de avaliar um cenário futuro, fez-se um estudo econômico semelhante ao anterior, porém utilizando os dados da projeção da produção para 2030 (item 4.2). Nesse cenário, considerou-se uma implementação a partir de 2030, e que houve uma expansão da quantidade de empreendimentos utilizando fornos de alto rendimento; antes de 21% da produção, agora 30%. Analogamente, variou-se o preço de venda de energia, procurou-se chegar à um valor em que pelo menos as usinas de maior porte pudessem ser viáveis, zerando o valor presente líquido em 10 anos. Os mesmos valores de CAPEX, OPEX, impostos e taxa mínima de atratividade foram utilizados. Os resultados podem ser encontrados na Tabela 32.

Tabela 32: Preços de venda de energia dos empreendimentos com fornos avançados em 2030  
(continua)

Empreendimento	Município	Preço de Venda da Energia [US\$]				
		SRC	ORC n-decano	ORC MDM	EFGT	ORC R245fa
Vallourec Florestal Ltda.	Montes Claros	50,81	81,44	182,61	276,86	221,62
Arcelormittal Bioflorestas Ltda	Carbonita	95,96	121,31	266,86	334,42	327,93
Madereira Barreiros Ltda	Grão Mogol	95,96	121,31	266,86	334,42	327,93
Gerdau Aços Longo Fazenda Biluca Gameleira Porto Alegre E Bom Retiro	Buritizeiro	103,12	126,77	279,36	342,51	343,92
	Josenópolis	105,13	128,27	282,65	344,53	348,14
Fazenda Sao Francisco	São Gonçalo Do Abaeté	113,23	134,18	297,7	354,58	367,45
Gerdau Aços Longos S/A – Fazenda Cabana Santa Bárbara	Três Marias	114,9	135,38	298,33	354,05	368,29
Fazenda Aldeia Cachoeira E Amizade	João Pinheiro	115,48	135,79	300,32	355,72	370,84
Gerdau Aços Longos S.A./Fazenda Inhacica	Diamantina	116,68	136,63	298,92	353,44	369,08
Arcelormittal Sul Fluminense S.A. / Fazenda Bom Sucesso E Riacho	Vazante	117,91	137,5	303,06	356,88	374,4
Fazenda Boa Sorte	Paracatu	124,13	141,81	311,38	361,24	385,16
Fazenda Centenario	João Pinheiro	141,23	153,14	332,61	371,81	412,8
Saint-Gobain Pam Bioenergia Ltda - Bloco Fazenda Areão E Outros	Bom Jardim de Minas	152,17	160	354,6	386,67	441,46
Upc Fazenda Santa Rita	João Pinheiro	152,17	160	354,6	386,67	441,46
Novas Fronteiras Agro Negócios Ltda./Fazenda Gameleira, Marangaba E Estela	João Pinheiro	160,77	165,22	367,03	393,61	457,8
Fazenda Santo Antonio	Buritizeiro	169,05	170,09	375,39	397	468,9
Fazenda Jacurutu	João Pinheiro	169,05	170,09	375,39	397	468,9
Vienas Fazendas Reunidas Ltda	João Pinheiro	169,05	170,09	375,39	397	468,9
Floral Agropecuaria Ltda	Abaeté	184,89	179,05	401,2	412,36	503,1
Gerdau Aços Longos S/A - Fazenda Capão Do Retiro	Curvelo	184,89	179,05	401,2	412,36	503,1
Brascan Empreendimentos Florestais Ltda	Claro Dos Poções	184,89	179,05	993,68	890,96	1310,05
Sdt Mega Transportes Carvoejamento E Comercio Exterior Ltda	Morada Nova de Minas	184,89	179,05	1018,63	909,71	1345,09
Viena Fazendas Reunidas Ltda	Jequitinhonha	184,89	179,05	1031,55	919,39	1363,26
Florestal Bioflor Sa	Antônio Dias	188,08	180,8	1008,06	897,93	1331,29
Fazenda Pontal	Lagoa Grande	188,08	180,8	1008,06	897,93	1331,29
Vienas Fazendas Reunidas Ltda	Rubelita	188,08	180,8	1008,06	897,93	1331,29
Mistral Agroflorestal S/A / Fazenda São Mateus	Brasilândia de Minas	195,07	184,57	1004,66	887,3	1328,76
Cbf Indústria De Gusa S.A. – Upc Fazenda Caçara I	Turmalina	195,07	184,57	1004,66	887,3	1328,76
Cbf Indústria De Gusa S.A. – Upc Fazenda Campo Limpo	Turmalina	195,07	184,57	1004,66	887,3	1328,76
Gerdau Aços Longos S/A	João Pinheiro	203,05	188,78	1069,01	925,31	1422,75
Gvg Reflorestamento Ltda / Fazenda Trevo	Várzea da Palma	207,49	191,08	1030,37	892,52	1369,25

Tabela 32: Preços de venda de energia dos empreendimentos com fornos avançados em 2030  
(continuação)

Empreendimento	Município	Preço de Venda da Energia [US\$]				
		SRC	ORC n-decano	ORC MDM	EFGT	ORC R245fa
Fazenda Pica Pau E Trinca Ferro	São Gonçalo do Abaeté	207,49	191,08	1054,96	910,25	1404,29
Gildasio Sousa	Buritizeiro	207,49	191,08	1071,97	922,47	1428,58
Manga Reflorestamento E Agropecuaria Ltda	Grão Mogol	212,28	193,52	1048,16	900,28	1396,23
Viena Fazendas Reunidas Ltda./Fazendas Marambaia, Nova Estância, Coqueiro (Santa Marta), Pedras Brígidas (Boa Vista, Vista Alegre, Bela Vista), Gameleira E Irmãs Cristina	Pirapora	212,28	193,52	1048,16	900,28	1396,23
Sorel Sociedade Reflorestadora Sa / Fazenda Carafbas	Várzea da Palma	212,28	193,52	1048,16	900,28	1396,23
Fazenda Nossa Senhora Aparecida	João Pinheiro	212,28	193,52	1048,16	900,28	1396,23

Os preços de venda para cada tecnologia seguiram a mesma tendência anterior, com o SRC em primeiro lugar e o ORC com R245fa em último. No geral, porém, nota-se que enquanto há um decréscimo de do valor de venda da energia para o SRC e ORC com n-decano, os valores aumentam para as demais tecnologias. Tal fato pode ser devido ao grande aumento dos custos com o aumento da potência, não compensados suficientemente pela venda de energia.

Na Tabela 33 estão presentes os valores de venda de energia para gás de processo praticados em leilão pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) de 2018 a 2020. É notável o aumento gradativo do preço de leilão durante o período, porém devido à variação da cotação do dólar, o valor de venda acaba diminuindo. Adotando um preço de venda de US\$71,23, valor médio de venda entre 2018 a 2019, é evidente que os empreendimentos levantados na situação atual são praticamente todos inviabilizados, com somente a maior planta sendo viável utilizando SRC. O mesmo é observado na projeção de 2030.

Vale ressaltar que, apesar do aparente melhor cenário futuro, os preços de venda podem sofrer muitas variações devido a variações do dólar, do mercado internacional para compra dos equipamentos, do cenário hídrico brasileiro que impacta a geração de eletricidade, de alterações na matriz geradora de energia, de políticas de incentivo fiscal à determinados modos de geração e à alteração de impostos e isenções fiscais.

Tabela 33: Preços de venda praticados em leilões para geração com gases de processos entre 2018 e 2020 (CCEE, 2021)

mês/ano	Venda [R\$/MWh]	Cotação Dólar [US\$]	Venda [US\$/MWh]
dez/20	289,45	5,142	56,29
nov/20	286,90	5,422	52,91
out/20	284,45	5,632	50,51
set/20	282,65	5,403	52,31
ago/20	281,97	5,459	51,65
jul/20	280,96	5,287	53,14
jun/20	280,23	5,203	53,86
mai/20	281,30	5,640	49,88
abr/20	282,17	5,330	52,94
mar/20	281,97	4,894	57,62
fev/20	281,27	4,346	64,72
jan/20	280,68	4,152	67,60
		<b>MÉDIA</b>	<b>55,29</b>
dez/19	277,49	4,109	67,53
nov/19	276,08	4,159	66,38
out/19	275,81	4,086	67,50
set/19	275,92	4,125	66,89
ago/19	275,61	4,027	68,44
jul/19	275,09	3,783	72,72
jun/19	275,06	3,863	71,20
mai/19	274,71	4,005	68,59
abr/19	273,15	3,900	70,04
mar/19	271,12	3,837	70,66
fev/19	269,96	3,718	72,61
jan/19	269,09	3,735	72,05
		<b>MÉDIA</b>	<b>69,55</b>
dez/18	sem valor de leilão	3,884	NA
nov/18	sem valor de leilão	3,788	NA
out/18	268,05	3,761	71,27
set/18	266,77	4,108	64,94
ago/18	267,01	3,933	67,89
jul/18	266,13	3,823	69,61
jun/18	262,82	3,783	69,47
mai/18	261,77	3,634	72,03
abr/18	261,20	3,409	76,62
mar/18	260,96	3,277	79,63
fev/18	260,13	3,243	80,21
jan/18	259,38	3,213	80,73
		<b>MÉDIA</b>	<b>73,24</b>

#### 4.5.6. Análise de sensibilidade econômica

Com o propósito de analisar possíveis cenários econômicos e quais variáveis mais influenciam no preço de venda da energia, fez-se uma análise de sensibilidade econômica. Foram realizadas simulações variando a taxa mínima de atratividade, os impostos sobre produto, os impostos sobre lucro, as horas de operação, o preço de venda da energia gerada e a potência instalada de acordo com a variação de PCI.

Para cada uma dessas variáveis, considerou-se uma variação de acordo com uma distribuição normal, triangular ou uniforme, de acordo com os dados expostos na Tabela 34. A taxa mínima de atratividade recebeu uma variação uniforme entre 8% e 12%. Considerou-se que os impostos sobre produto variam de 0% (isenção de impostos por meio de incentivo) até 35% em uma distribuição triangular. Os impostos sobre lucro, de 30% a 40% com distribuição triangular. Às horas de operação, utilizou-se uma distribuição normal com desvio padrão de 4% do valor médio (ciclo operando entre 7147 e 7747 horas por ano).

Na variação do preço de venda, considerou-se uma distribuição normal com preço médio de US\$71,23 e desvio padrão de US\$4,47, de acordo com o histórico de 2018-2019. Finalmente, a potência variou em uma distribuição normal com desvio de 5280 kW para o SRC e 8103 kW para o ORC n-decano. Tais valores são referentes à variação em 13% para mais ou para menos de cada tecnologia de acordo com a variação de PCI mínimo e máximo do gás (Figura 21).

Tabela 34: Variáveis, Tipo de Distribuição e Variação Utilizados na Análise de Sensibilidade

Variável	Tipo de Distribuição	Variação
Taxa Mínima de Atratividade	Uniforme	8% - 12%
Impostos sobre produto	Traingular	0% - 35%
Impostos sobre Lucro	Triangular	30% - 40%
Horas de Operação	Normal	Desv.pad = 300 horas
Preço de Venda da Energia	Normal	Desv.pad = US\$ 4,47
Potência Instalada	Normal	Desv.pad = 5280 kW (SRC) Desv.pad = 8103 kW (ORC n-decano)

Foram realizadas 1000 simulações com diferentes cenários aleatórios baseados nas variações e distribuições mencionadas anteriormente. Tais simulações são referentes somente para os empreendimentos utilizando SRC que apresentaram valor de venda de energia de até 7 vezes o desvio padrão dos valores históricos de 2018 e 2019, ou seja, preços de venda até US\$103,52. Isso pois, após algumas simulações com valores fictícios, verificou-se que os empreendimentos com

preço de venda acima do estipulado apresentam apenas 1% de chance de um *payback* de 10 anos considerando as variações da Tabela 34 com SRC. Desta maneira, apenas o empreendimento de Montes Claros apresentou um valor satisfatório em relação ao preço de energia.

Os resultados estão expressos nos gráficos de distribuição de frequência e sensibilidade de cada empreendimento simulado (Figura 24 e Figura 25).

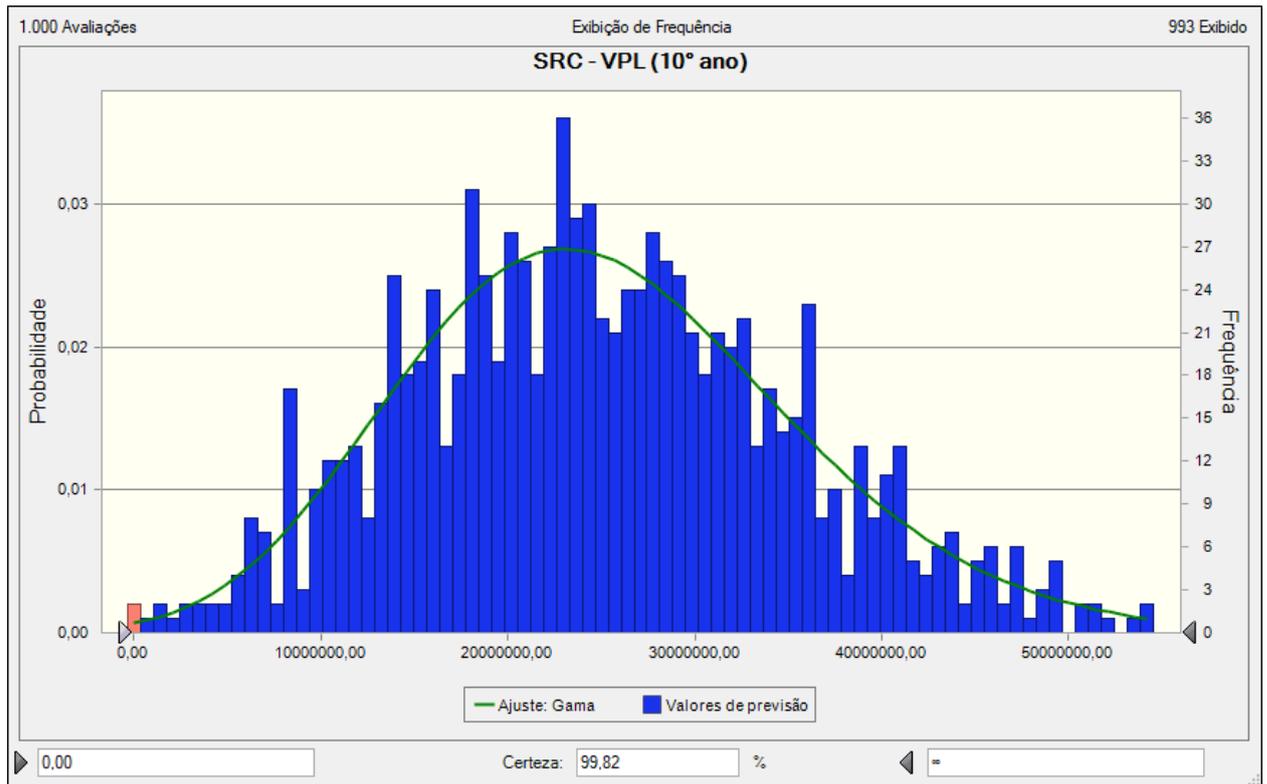


Figura 24: Frequência de valores para VPL no 10º ano para o empreendimento de Montes Claros utilizando SRC

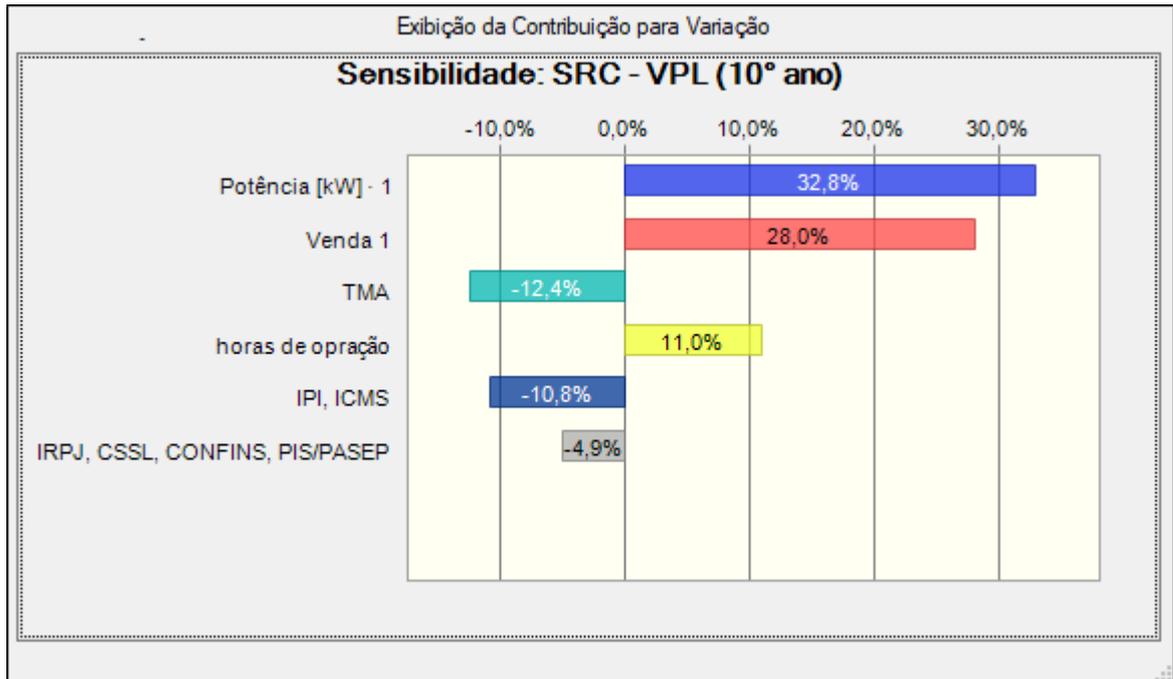


Figura 25: Contribuição de cada variável nas simulações para o empreendimento de Montes Claros utilizando SRC

Nota-se que o empreendimento utilizando SRC tem uma certeza de 99,81% de que o payback se dê em 10 anos de operação, considerando as variações mencionadas na Tabela 34. Neste cenário, a potência é a variável que exerce maior influência no VPL do 10º ano, seguido pelo preço de venda da energia, taxa mínima de atratividade, horas de operação, impostos sobre produto e impostos sobre lucro.

Como esperado, potência, preço de venda e horas de operação tem uma relação positiva com o VPL; se aumentam, o lucro também aumenta. Assim como a taxa mínima de atratividade e impostos têm uma relação negativa com o VPL; se aumentam, o lucro diminui.

Para efeitos de comparação, as mesmas simulações foram realizadas para um empreendimento fictício de 10 MW de potência instalada. Os resultados estão dispostos nas Figura 26 e Figura 27. Nota-se a drástica redução no *payback* em 10 anos com chance de apenas 18,64% nestas condições de operação (Figura 26).

Além disso, fica explícito na Figura 27 que o componente que apresenta maior influência para uma planta de 10 MW é o preço de venda da energia, sendo que a potência instalada aparece em penúltimo lugar. Os impostos sobre produto aparecem em 2ª colocação, seguidos pela taxa mínima de atratividade, potência e impostos sobre lucro.

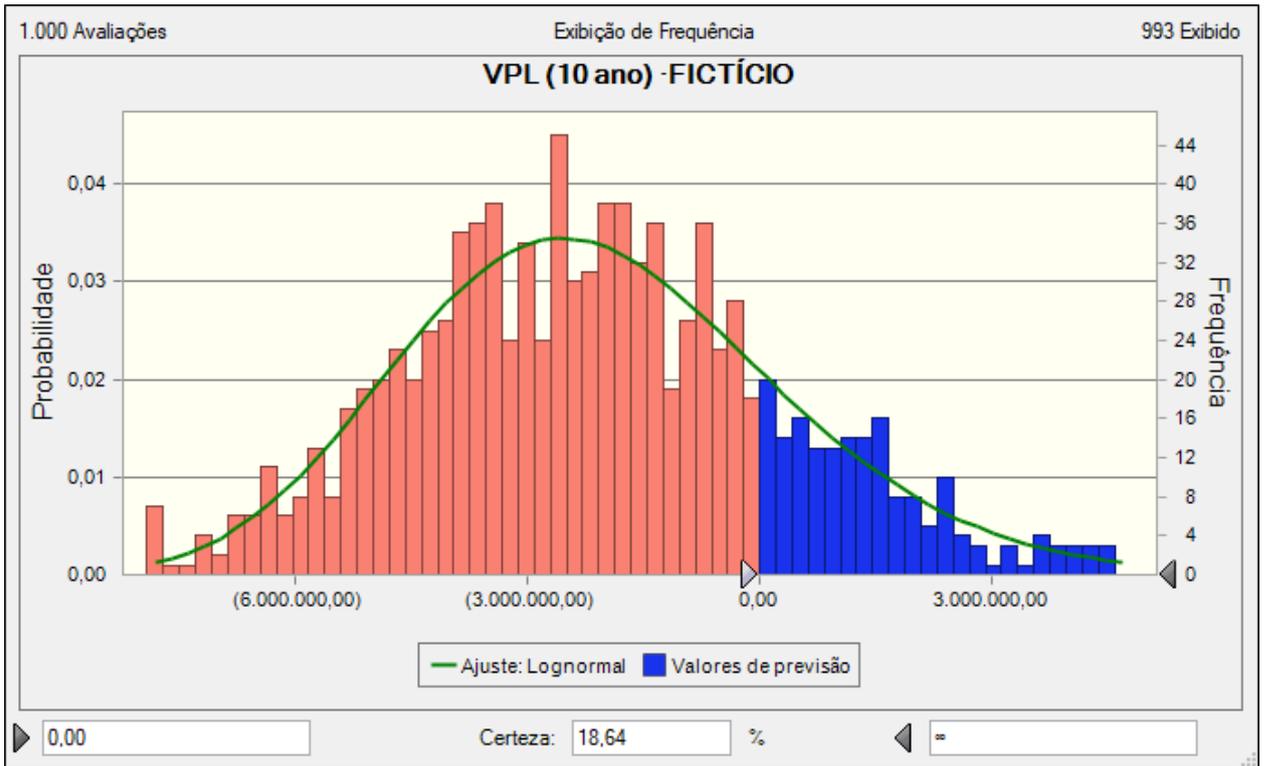


Figura 26: Frequência de valores para VPL no 10º ano para um empreendimento fictício de 10.000 kW utilizando SRC

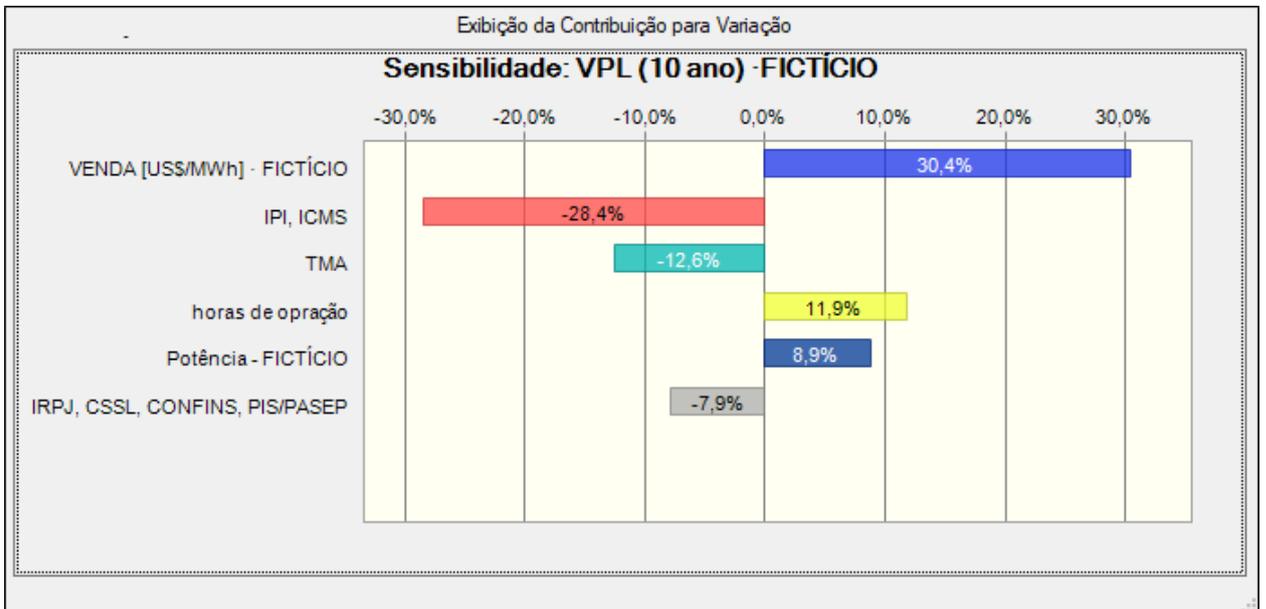


Figura 27: Contribuição de cada variável nas simulações para um empreendimento fictício de 10.000 kW utilizando SRC

A diferença na análise de sensibilidade entre o empreendimento de Montes Claros, com mais de 60 MW, e o empreendimento fictício de 10 MW pode ser devida à alguns fatores. Como o CAPEX e OPEX se relacionam através de um ajuste potencial, estes mostram-se mais significativos à maiores potências, sendo que à 10 MW os custos ainda oferecem grande peso no investimento inicial. Tal peso é ainda maior para potências menores, sendo talvez o maior empecilho à viabilidade dos empreendimentos. Ou seja, por mais que maiores potências gerem mais energia, seus custos ainda ultrapassam o lucro obtido da venda.

Como os impostos sobre produto influenciam diretamente sobre o CAPEX, é de se esperar que também contribuam muito na variação do investimento CAPEX inicial, especialmente para menores potências (Figura 27). De forma semelhante, os impostos sobre lucro também exercem influência negativa, abatendo parte das receitas obtidas, porém de uma forma mais branda como demonstraram as simulações.

No caso da planta de 60MW, os lucros acabam se tornando maiores devido ao grande volume de energia gerada. Dessa forma, uma variação positiva no PCI, exerceria uma grande influência no VPL, suplantando os investimentos iniciais de CAPEX e diminuindo a influência dos impostos na aquisição inicial de equipamentos (Figura 25).

Logo, o preço de venda também se torna uma variável fundamental na viabilidade dos empreendimentos que desejem operar usinas de geração de eletricidade a partir dos gases efluentes da pirólise da madeira. Em ambas as simulações, o preço de venda da energia exerce uma contribuição de cerca de 30% na variação do VPL.

A TMA apresenta influência semelhante nos dois empreendimentos, variando de 10% em 10 MW à 12% em 60 MW.

De maneira a estudar melhor a influência do preço de aquisição dos equipamentos na viabilidade dos empreendimentos, realizou-se as mesmas simulações no empreendimento fictício, porém com valores de CAPEX 10% e 25% menores que o calculado anteriormente para o SRC.

Com desconto de 10% no CAPEX, foi possível verificar um aumento na probabilidade de payback em 10 anos de 18,64% para 47,12% (Figura 28) e diminuição do preço de venda de energia em cerca de 8,5% para todos os empreendimentos.

Já para uma redução de 25% no CAPEX, houve um aumento na probabilidade de payback em 10 anos para 87,36% (Figura 29) e diminuição do preço de venda de energia em cerca de 19,9% para todos os empreendimentos.

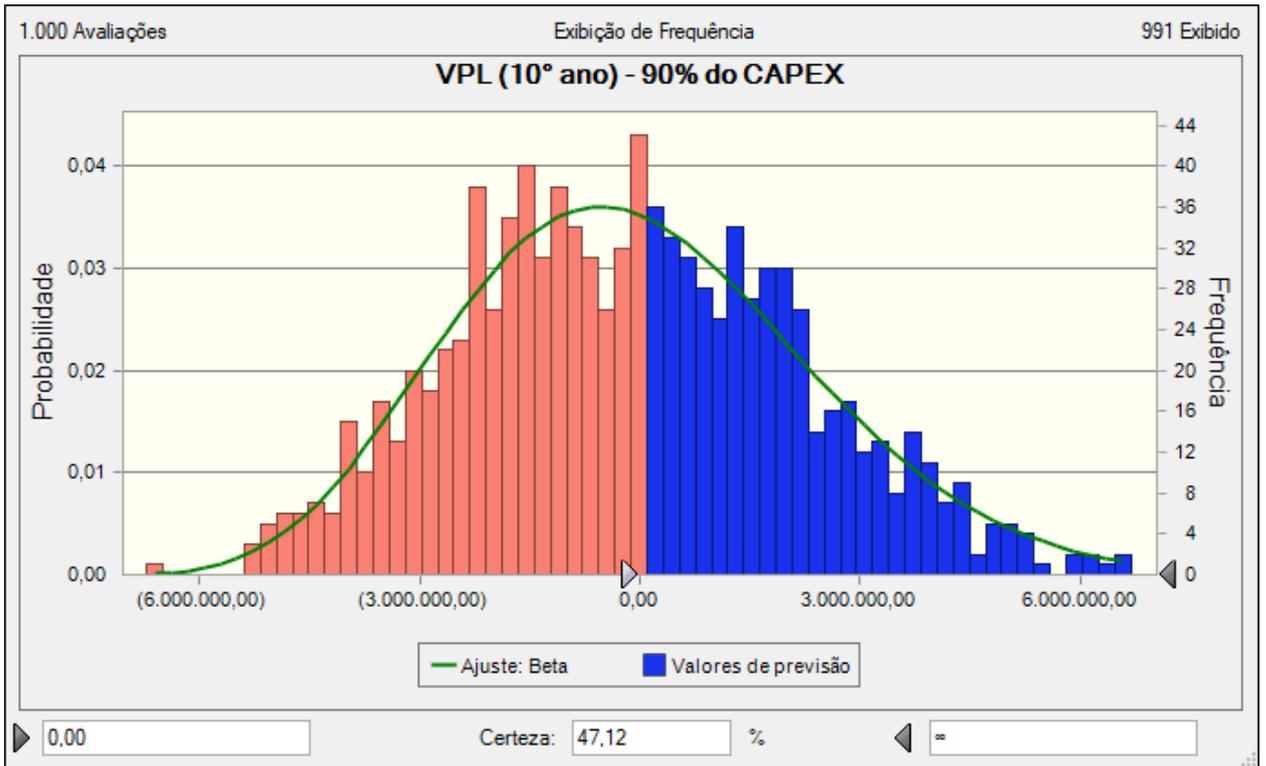


Figura 28: Frequência de valores para VPL no 10º ano para um empreendimento fictício de 10.000 kW utilizando SRC com desconto de 10% no CAPEX

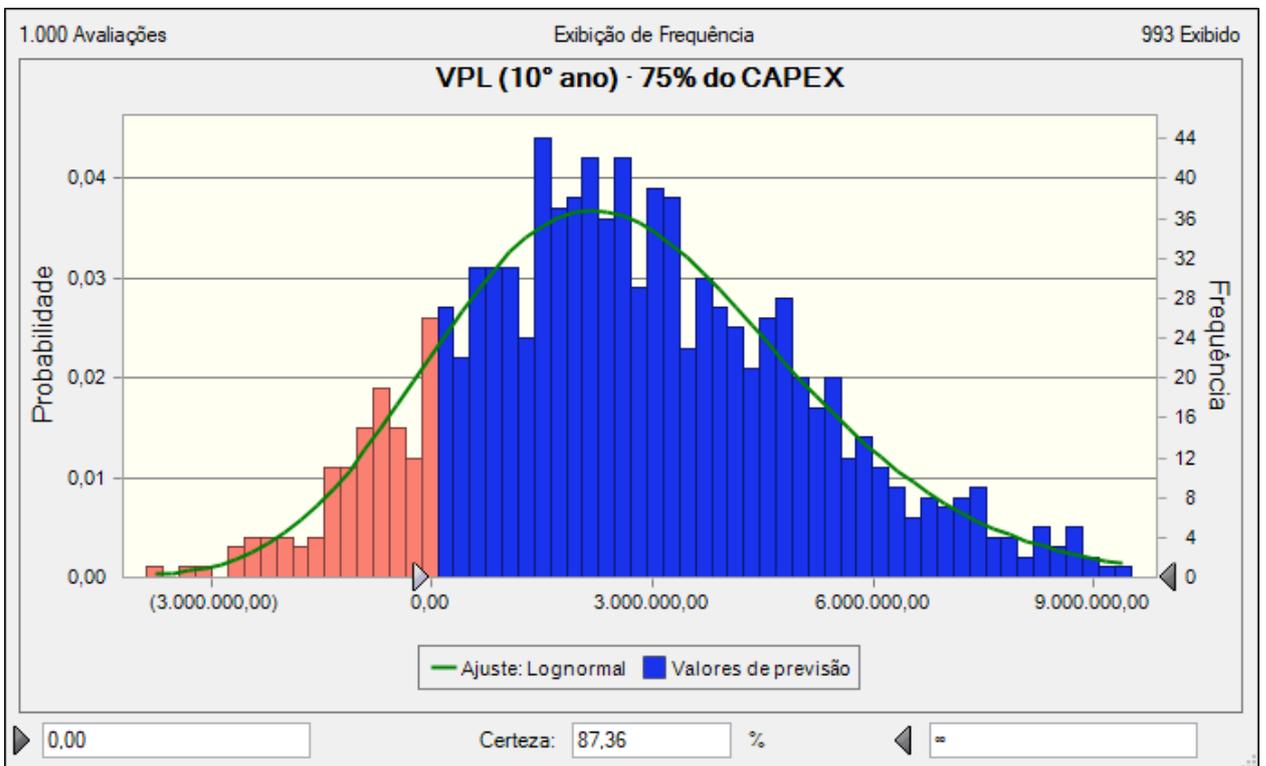


Figura 29: Frequência de valores para VPL no 10º ano para um empreendimento fictício de 10.000 kW utilizando SRC com desconto de 25% no CAPEX

Tais resultados evidenciam mais uma vez a importância do investimento inicial em equipamentos para a viabilidade de tais empreendimentos e demonstra a necessidade de um amadurecimento das tecnologias de conversão de eletricidade para gases efluentes. Amadurecimento este tanto no aspecto de melhora de eficiência de conversão, quanto no barateamento dos equipamentos e custos de operação.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposta uma avaliação do potencial de geração de eletricidade proveniente dos gases efluentes da produção de carvão vegetal em Minas Gerais a partir de diferentes tecnologias de conversão. Os principais objetivos foram caracterizar e classificar as usinas de produção de carvão vegetal no estado de Minas Gerais através de um levantamento do potencial de produção de carvão vegetal e a quantidade de gases efluentes disponíveis para a geração de eletricidade no ano de 2020. Também foi feita uma projeção do potencial até 2030 com o objetivo de avaliar os possíveis cenários futuros, além da elaboração de mapas temáticos que ilustraram o potencial de geração de eletricidade em MG.

Na mesma linha, classificou-se os produtores de acordo com o porte e tecnologias de produção de carvão vegetal. Para cada produtor listado, foram atribuídas diferentes tecnologias de conversão para efeito de comparação, sendo elas o Ciclo Rankine a Vapor (SRC), o Ciclo Rankine Orgânico (ORC) e a Turbina a Gás de Queima Externa (EFGT).

Baseado nisso, calculou-se os potenciais energéticos disponíveis através de simulações com as diferentes tecnologias de conversão energética e realizou-se uma avaliação econômica dos ciclos de geração a fim de determinar a viabilidade financeira da aplicação dos sistemas. Além disso, foram considerados diferentes cenários de produção de carvão vegetal a fim de estabelecer a situação ótima para a produção de eletricidade utilizando as diferentes tecnologias de conversão.

Finalmente, foi conduzida uma análise de sensibilidade econômica que avaliou a contribuição das principais variáveis técnicas e econômicas que influenciam na viabilidade dos empreendimentos que desejem gerar eletricidade utilizando os gases efluentes de sua produção de carvão.

Durante o levantamento das unidades produtoras de carvão, notou-se uma disparidade entre o valor consolidado pelo IBGE e o licenciado, consultado através dos portais estadual (SISEMA) e federal (PNLA). Tal disparidade pode ser devido à licenças não encontradas nos sistemas de aquisição de dados, empreendimentos produzindo mais que o licenciado, empreendimentos produzindo sem licença ou com licença vencida e a diminuição da produção devido à situação econômica e sanitária de 2020 consequência do COVID-19. Baseado nisso, recomenda-se uma melhoria dos sistemas de consulta aos documentos de licenciamento ambiental do SISEMA e PNLA, principalmente para as listagens de atividade secundária, que ainda precisam ser consultadas manualmente e de forma individual para cada empreendimento.

Os resultados do levantamento demonstram uma maior concentração da produção de carvão vegetal nas regiões Norte e Nordeste do Estado, sendo que apenas 5 municípios foram

responsáveis por mais de 50% da produção do Estado. Já a projeção para a produção até 2030 apresentou uma taxa de crescimento anual de 2,64%, com uma produção estimada de 7,0 milhões de toneladas para o ano de 2030.

Dos empreendimentos levantados, estima-se que 21,6% utilizam tecnologia de produção de carvão mais avançadas, sendo os 78,4% restantes ainda com tecnologias primitivas de produção. A área de eucalipto plantado para suprir a produção de 2020 foi calculada em 40.440 hectares.

O potencial de geração elétrica em Minas Gerais foi estimado para todos os empreendimentos levantados utilizando as três tecnologias mencionadas anteriormente, sendo o ORC com três fluidos de trabalho diferentes (n-decano, MDM e R245fa) em três configurações distintas (sem regeneração e sem superaquecimento A, com regeneração e sem superaquecimento B, e com regeneração e superaquecimento C). Além disso, fez-se uma simulação de geração para uma tecnologia fictícia que alcançasse 30% de eficiência. Os ciclos foram previamente simulados e extraiu-se uma curva de eficiência vs potência, aplicada a cada empreendimento. O PCI considerado nesses resultados foi de 1579 kJ/kg.

De maneira geral, o maior potencial alcançado para o Estado em 2020 foi de 1.348 GWh/ano utilizando o ciclo ORC com regeneração e superaquecimento tendo o n-decano como fluido de trabalho, seguido pelo ORC B com MDM, alcançando 1.159 GWh/ano. A EFGT e SRC apresentam valores intermediários de 728 GWh/ano e 718 GWh/ano, respectivamente. Já o menor potencial foi de 423 GWh/ano com o ORC A tendo o R245fa como fluido de trabalho. O potencial considerando uma tecnologia com 30% de aproveitamento seria de 1.457 GWh/ano. Baseado na projeção da produção de carvão vegetal, estimou-se que o potencial de geração elétrica disponível em 2030 será de 6.231 GWh/ano.

Também foi verificado que o PCI do gás exerce grande influência na geração, podendo haver uma variação de 27% na energia gerada considerando os PCIs mínimo (1158 kJ/kg) e máximo (2000 kJ/kg), comparado com o PCI médio (1579 kJ/kg).

Os resultados obtidos através do cálculo de indicadores demonstraram que a opção energeticamente melhor é o ciclo ORC com regeneração e superaquecimento que utiliza o n-decano como fluido de trabalho, pois este apresenta maior geração de eletricidade com um menor consumo de GNC. Além disso, necessita de uma menor produção de carvão vegetal na planta, viabilizando sua utilização em plantas de menor porte.

Na análise econômica, primeiramente calculou-se os custos de aquisição de bens (CAPEX) e custos operacionais (OPEX) para cada tecnologia na faixa de potência de 500 kW até 2000 kW. Os custos do ORC foram calculados apenas para os ciclos utilizando os fluidos que apresentaram

os melhores resultados, independente da configuração (A, B ou C). Os resultados de custos foram então extrapolados para as demais faixas de potência de cada empreendimento levantado.

Realizou-se uma análise considerando que a energia gerada seria vendida no mercado de energia através de leilões. A análise levou em conta o valor presente líquido de 2020 até 2040 (20 anos de vida útil), ajustando o preço de venda em cada empreendimento para que o *payback* se desse em 10 anos de operação à uma taxa mínima de atratividade de 12%. O mesmo foi feito considerando o potencial disponível em 2030. Conclui-se que os empreendimentos dotados de tecnologia rudimentar são totalmente inviáveis economicamente. Dos dotados de tecnologia avançada, apenas o empreendimento em Montes Claros utilizando SRC ou ORC com n-decano apresentou valor de venda de energia dentro do histórico praticado entre 2018 e 2020 (abaixo de US\$ 71,23).

Os resultados da análise de sensibilidade econômica demonstraram que dificilmente um empreendimento que venda sua energia abaixo dos US\$103,52 tem chances de ter um *payback* em 10 anos sob as circunstâncias consideradas. Isso descarta praticamente toda a produção de carvão do Estado, sendo economicamente possíveis apenas para produtores com uma produção de carvão capaz de instalar uma planta SRC de pelo menos 10 MW.

A análise também constatou que o preço de venda da energia é a variável que mais influenciam na viabilidade dos empreendimentos, principalmente abaixo dos 10 MW. Logo em seguida estão os impostos sobre produto, a taxa mínima de atratividade, as horas de operação da planta, a variação de potência de acordo com o PCI dos gases efluentes, e os impostos sobre lucro. Além disso, foi confirmado a necessidade de um amadurecimento das tecnologias de conversão de eletricidade para gases efluentes, tanto no aspecto de melhora de eficiência de conversão, quanto no barateamento dos equipamentos e custos de operação. Foi possível notar que a redução do CAPEX em 10% proporcionou uma redução de 8,5% no preço de venda da energia. Já uma redução de 25% no CAPEX ocasionou na redução de quase 20% no preço de venda da energia.

Em suma, os atuais cenários técnicos e econômicos não são favoráveis para a implantação de usinas de geração de eletricidade para o reaproveitamento da energia dos gases efluentes em plantas de produção de carvão vegetal. Os maiores empecilhos são a baixa eficiência da grande maioria dos fornos utilizados nas plantas de carbonização, as baixas eficiências de conversão e altos custos das tecnologias disponíveis atualmente.

Porém, vale ressaltar os benefícios energéticos e ambientais provenientes desse reaproveitamento. Seria necessário um esforço tecnológico, a fim de aumentar a eficiência e uniformidade dos fornos dos produtores e a maturidade das tecnologias de conversão, aliado à um incentivo econômico e ambiental, como isenção de impostos e incentivos fiscais baseados na

redução da emissão de gases de efeito estufa e aumento da eficiência energética que essas ações de podem trazer.

## REFERÊNCIAS

- ARIMA, E. Y. et al. Public policies can reduce tropical deforestation: Lessons and challenges from Brazil. **Land Use Policy**, v. 41, p. 465-473, Novembro 2014. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2014.06.026>.
- ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA AMS. Florestas Plantadas: um caminho para o desenvolvimento sustentável, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/7423839-Florestas-plantadas-um-caminho-para-o-desenvolvimento-sustentavel.html>>. Acesso em: 04 Agosto 2020.
- BAILIS, R. et al. Innovation in charcoal production: a comparative life-cycle assessment of two kiln technologies in Brazil. **Energy for Sustainable Development**, v. 17, n. 2, p. 189-200, Abril 2013. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.esd.2012.10.008>.
- BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MORAN, M. J. **Thermal Design and Optimization**. New York, NY: Wiley & Sons, 1995.
- BORGNAKKE, C.; SONTAG, R. E. **Fundamentals of Thermodynamics**. 7<sup>a</sup>. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- BRAZIL STEEL INSTITUTE BSI. Results of the Charcoal Sustainability Protocol. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site2015/eng/protocolo.asp>>. Acesso em: 26 Agosto 2019.
- BUSTOS-VANEGAS, J. D. et al. Thermal inertia effects of the structural elements in heat losses during the charcoal production in brick kilns. **Fuel**, v. 226, p. 508-515, Agosto 2018. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.024>.
- CAMPOREALE, S. M. et al. Cycle configuration analysis and techno-economic sensitivity of biomass externally fired gas turbine with bottoming ORC. **Energy Conservation and Management**, v. 105, p. 1239-1250, Novembro 2015. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.069>.
- CASTRO, A. F. N. M. Potencial dos resíduos florestais e dos gases da carbonização da madeira para geração de energia elétrica. **Dissertação de Doutorado**, Viçosa, Dezembro 2014.
- CASTRO, I. A. D. **Desenvolvimento de um modelo termoeconômico que considera os impactos ambientais. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)**. Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista, 2007.
- CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Modernização da produção de carvão vegetal no Brasil: subsídios para revisão do Plano Siderurgia**. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Brasília. 2015.

- DO VAL, C. G. F.; SILVA, J. A. M.; JUNIOR, S. D. O. Deep Water Cooled ORC for Offshore Floating Oil Platform Applications. **International Journal of Thermodynamics**, v. 20, n. 4, p. 229-237, 2017.
- DONATO, D. B. **Desenvolvimento e Avaliação de Fornalha Para Combustão dos Gases da Carbonização da Madeira**. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, p. 89. 2017.
- EHSAN AMIRI RAD, S. M. Energetic and exergetic optimized Rankine cycle for waster heat recovery. **Applied Thermal Engineering**, v. 132, p. 410-422, 2018.
- EMBRAPA. Perguntas e Respostas. **Embrapa**, 2020. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/eucalipto/perguntas-e-respostas>>. Acesso em: 15 jul. 2020.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA EPE. **Balanco Energético Nacional 2019: Ano base 2018**. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro, p. 292. 2019.
- FAGBÉMI, L. A.; KHEZAMI, L.; CAPART, R. Pyrolysis products from different biomasses: application to the thermal cracking of tar. **Applied Energy**, v. 69, n. 4, p. 293-306, Agosto 2001. ISSN [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(01\)00013-7](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(01)00013-7).
- FILHO, F. B. D. et al. Evaluation of the maturity level of biomass electricity generation technologies using the technology readiness level criteria. **Journal of Cleaner Production**, v. 295, Maio 2021. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126426>.
- FOELKEL, C. Peso de um metro cúbico estéreo de madeira de. **Eucalyptus Online Book & Newsletter**, 2020. Disponível em: <[https://www.eucalyptus.com.br/eucaexpert/1089\\_Peso%20de%20estere%20de%20madeira.pdf](https://www.eucalyptus.com.br/eucaexpert/1089_Peso%20de%20estere%20de%20madeira.pdf)>. Acesso em: 14 jul. 2020.
- FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION FAO. **The Charcoal Transition - Greening the charcoal value chain to mitigate climate change and improve local livelihoods**. Organização das Nações Unidas ONU. Roma, p. 184. 2017. (ISBN 978-92-5-109680-2 ).
- GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT (GIZ). **Towards sustainable modern wood energy development: stocktaking paper on uccessful initiatives in developing countries in the field of wood energy development**. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Eschborn. 2015.
- GHOSH, S. K. Biomass & Bio-waste Supply Chain Sustainability for Bio-energy and Bio-fuel Production. **Procedia Environmental Sciences**, v. 31, p. 31-39, 2016. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.005>.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Ibá 2019**. Brasília, p. 50. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Quantidade produzida e valor da produção na silvicultura, por tipo de produto da silvicultura. **Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA**, 2020. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/291>>. Acesso em: 30 jul. 2020.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2014: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. IPCC. Geneva, p. 151. 2014. (ISBN 978-92-9169-143-2).

INTERNATIONAL FINANCE CORPORATION (IFC). **Converting Biomass to Energy: A Guide for Developers and Investors**. International Finance Corporation. Washington DC. 2017. IRENA. International Renewable Energy Agency. **Renewable Capacity Statistics 2019**, 2019. ISSN ISBN: 978-92-9260-123-2. Disponível em: <[https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Mar/IRENA\\_RE\\_Capacity\\_Statistics\\_2019.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2019.pdf)>. Acesso em: 30 julho 2021.

JESUS, M. S. D. Atuais desafios da produção de carvão vegetal no Brasil. **Blog do Mata Nativa**, 2019. Disponível em: <<https://www.matanativa.com.br/blog/desafios-producao-carvao-vegetal-no-brasil/>>. Acesso em: 12 ago. 2020.

KAUTZ, M.; HANSEN, U. The externally-fired gas-turbine (EFGT-Cycle) for decentralized use of biomass. **Applied Energy**, v. 84, p. 795-805, 2007. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2007.01.010>.

KAUTZ, M.; HANSEN, U. The externally-fired gas-turbine (EFGT-Cycle) for decentralized use of biomass. **Applied Energy**, v. 84, n. 7-8, p. 795-805, Julho-Agosto 2007. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2007.01.010>.

KLEEF, L. M. T. V.; OYEWUNMI, O. A.; MARKIDES, C. N. Multi-objective thermo-economic optimization of organic Rankine cycle (ORC) power systems in waste-heat recovery applications using computer-aided molecular design techniques. **Applied Energy**, v. 251, Outubro 2019. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.071>.

KOSMADAKIS, G.; MANOLAKOS, D.; PAPADAKIS, G. Experimental investigation of a low-temperature organic Rankine cycle (ORC) engine under variable heat input operating at both subcritical and supercritical conditions. **Applied Thermal Engineering**, v. 92, p. 1-7, 2016.

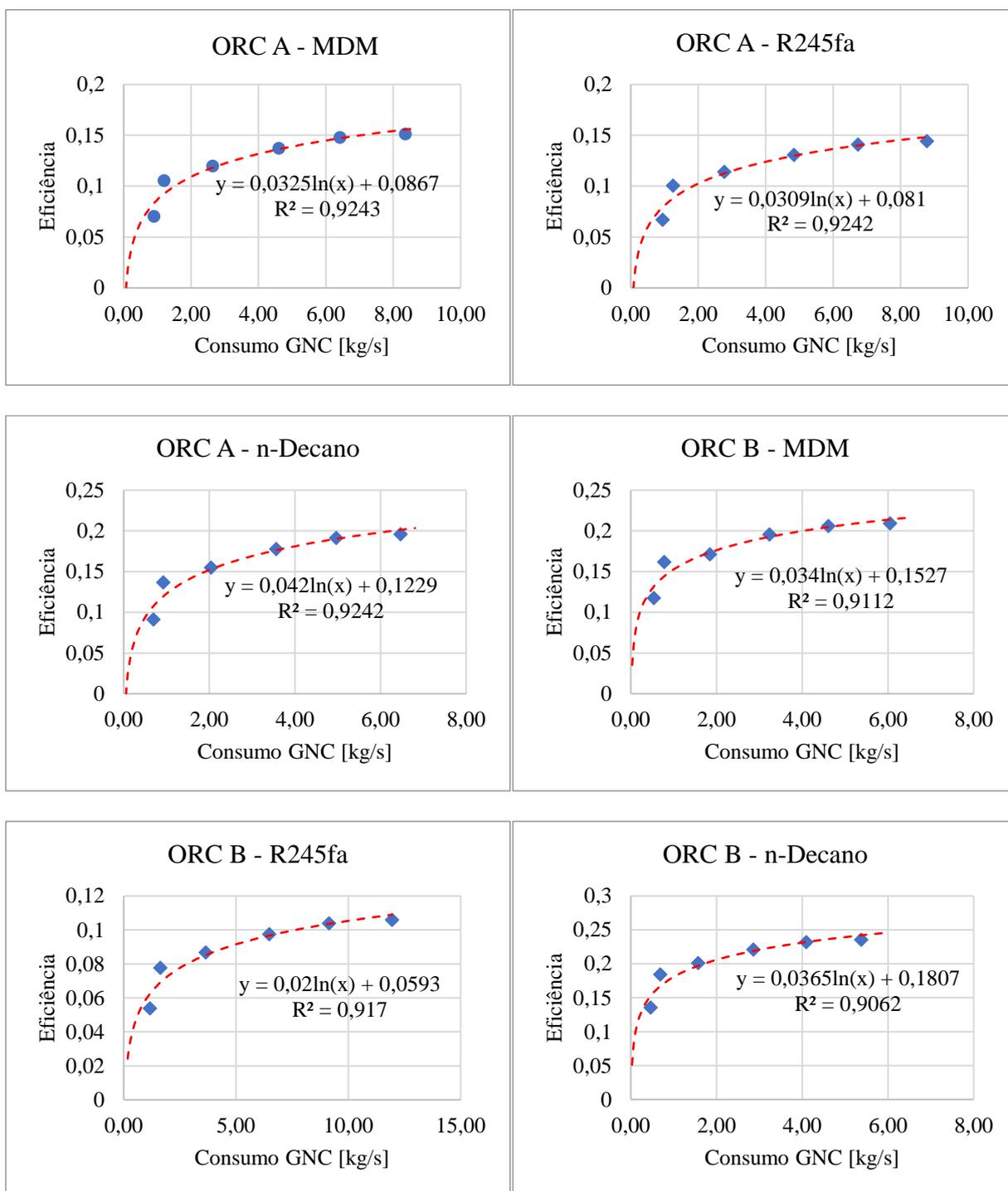
LE, V. L. et al. Performance optimization of low-temperature power generation by supercritical ORCs (organic Rankine cycles) using low GWP (global warming potential) working fluids. **Energy**, v. 67, p. 513-526, 2014.

- LEME, M. M. V. **Estudo Técnico, Econômico e Ambiental da Utilização de Alternativas Tecnológicas para a Geração de Eletricidade na Cadeia Produtiva do Carvão Vegetal no Brasil**. Tese de Doutorado. ed. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2016.
- LEME, M. M. V. et al. Electricity generation from pyrolysis gas produced in charcoal manufacture: Technical and economic analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 194, p. 219-242, Maio 2018. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.101>.
- LEMMENS, S. A perspective on costs and cost estimation techniques for organic Rankine cycle systems. **3 International Seminar on ORC Power Systems**, Bruxelas, 12-14 Outubro 2015.
- LEMMENS, S. Cost Engineering Techniques and Their Applicability for Cost Estimation of Organic Rankine Cycle Systems. **Energies**, v. 9, Junho 2016. ISSN doi:10.3390/en9070485.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Anuário Estatístico Brasileiro do Setor Metalúrgico**. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Brasília. 2020.
- MIRANDA, R. C.; BAILIS, R.; VILELA, A. D. O. Cogenerating electricity from charcoaling: A promising new advanced technology. **Energy for Sustainable Development**, v. 17, n. 2, p. 171-176, Abril 2013. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.esd.2012.11.003>.
- MIRANDOLA, S. et al. Modeling of a hybrid externally fired gas turbine applied to a landfill and green waste management facility. **Energy Conversion and Management**, v. 244, Setembro 2021. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114483>.
- NOGUEIRA, L. A. H.; COELHO, S. T.; UHLIG, A. Sustainable charcoal production in Brazil. In: NATIONS, F. A. A. O. O. U. **Criteria and Indicators for Sustainable Woodfuels**. 1ª. ed. Roma: FAO, 2009. Cap. 3, p. 31-46.
- OLIVEIRA, J. T. D. S.; HELLMMEISTER, J. C.; FILHO, M. T. Variação do Teor de Umidade e da Densidade Básica na Madeira de Sete Espécies de Eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa - MG, v. 29, n. 1, p. 115-127, 2005.
- PANTALEO, A. M. et al. Novel hybrid CSP-biomass CHP for flexible generation: Thermo-economic analysis and profitability assessment. **Applied Energy**, v. 204, p. 994-1006, Outubro 2017. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.019>.
- PEREIRA, E. G. et al. Pyrolysis gases burners: Sustainability for integrated production of charcoal, heat and electricity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 592-600, 2017.
- PINTO, G. M. **Análise termoeconômica de uma central de ciclo combinado de 826 mw - estudo de caso utilizando um simulador full-scope**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2020.
- REIS, M. M. L. D. Recuperação de energia e redução de emissões de CO<sub>2</sub> usando o ciclo Rankine orgânico (ORC) em plataformas FPSO. **Universidade Estadual de Campinas**, Campinas, 2018.

- REZENDE, J. B.; SANTOS, A. C. D. **A cadeia produtiva do carvão vegetal em Minas Gerais: pontos críticos e potencialidades**. Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais. Viçosa, p. 80. 2010. (ISSN 0101-062X).
- RIBEIRO, L. C. Determinação da Configuração Ótima de Ciclo Rankine Orgânico para Aproveitamento do Calor Rejeitado em Usinas Termelétricas com Motores de Combustão Interna. **Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade do Espírito Santo**, 2017.
- RICCIO, G.; MARTELLI, F.; MALTAGLIATTI, S. Study of an External Fired Gas Turbine Power Plant Fed by Solid Fuel. **Proceedings of the ASME Turbo Expo 2000: Power for Land, Sea, and Air. Volume 2: Coal, Biomass and Alternative Fuels; Combustion and Fuels; Oil and Gas Applications; Cycle Innovations**, Munique, 8-11 Maio 2014.
- RODRIGUES, T.; JUNIOR, A. B. Charcoal: A discussion on carbonization kilns. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 143, Outubro 2019 a. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.104670>.
- RODRIGUES, T.; JUNIOR, A. B. Technological prospecting in the production of charcoal: A patent study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 111, p. 170-183, Setembro 2019 b. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.080>.
- SANDRA CARDONA, L. J. G. V. V. E. M. L. A. R. Torrefaction of eucalyptus-tree residues: A new method for energy and mass balances of the process with the best torrefaction conditions. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 31, p. 17-24, Fevereiro 2019. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.11.002>.
- SANGSUK, S.; BUATHONG, C.; SUEBSIRI, S. High-energy conversion efficiency of drum kiln with heat distribution pipe for charcoal and biochar production. **Energy for Sustainable Development**, v. 59, p. 1-7, Dezembro 2020. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.08.008>.
- SANTOS, S. D. F. D. O. M. Modelo Ambiental e Econômico de Produção de Carvão Vegetal. **Dissertação de Doutorado**, Ponta Grossa, 2017.
- SILVEIRA, J. L. **Uma contribuição para a Modelagem termoeconômica: Otimização da Operação e do projeto de sistemas energéticos**. Tese (Livre Docência). Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista, 1998.
- SINGH, D. V.; PEDERSEN, E. A review of waste heat recovery technologies for maritime applications. **Energy Conversion and Management**, v. 111, p. 315-328, 2016.
- SUPERINTENDÊNCIA DE ABASTECIMENTO E ECONOMIA AGRÍCOLA. **Projeções do Agronegócio: Minas Gerais 2017 a 2027 - Projeções de Longo Prazo**. Governo do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 98. 2017.

- TEIXEIRA, G.; RODRIGUES, G. S. D. S. C. Trajetória Geográfica da Silvicultura em Minas Gerais. **Mercator**, Fortaleza, v. 20, Março 2021. ISSN <https://doi.org/10.4215/rm2021.e20004>.
- TINTNER, J. et al. Pyrolysis profile of a rectangular kiln – natural scientific investigation of a traditional charcoal production process. **Journal of Analytica and Applied Pyrolysis**, v. 146, Março 2020. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.104757>.
- TOFFOLO, A. et al. A multi-criteria approach for the optimal selection of working fluid and design parameters in Organic Rankine Cycle systems. **Applied Energy**, v. 121, p. 219-232, Maio 2014. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.089>.
- TURTON, R. et al. **Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes**. 3<sup>a</sup>. ed. Boston, MA: Pearson Education Inc., 2009.
- UNIFEI. **Technical Report nº 4 - Balanços de Massa e Energia em Fornos de Carbonização**. Itajubá. 2020.
- VALERO, A. et al. CGAM problem: Definition and conventional solution. **Energy**, v. 19, n. 3, p. 279-286, 1994. ISSN [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(94\)90112-0](https://doi.org/10.1016/0360-5442(94)90112-0).
- VILELA, A. O. et al. A new technology for the combined production of charcoal and electricity through cogeneration. **Biomass and Bioenergy**, v. 69, p. 222-240, Outubro 2014. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.06.019>.
- VISSER, H.; THOPIL, G. A.; BRENT, A. Life cycle cost profitability of biomass power plants in South Africa within the international context. **Renewable Energy**, v. 139, p. 9-21, Agosto 2019. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.080>.
- WORLDSTEEL ASSOCIATION. **Sustainable steel - Indicators 2020 and steel applications**. Worldsteel Association. [S.l.]. 2020. (<https://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2020/sustainable-steel--indicators-2020-and-steel-applications.html>).
- ZIXIANG SU, M. Z. P. X. Z. Z. W. H. H. T. O. Opportunities and strategies for multigrade waste heat utilization in various industries: A recent review. **Energy Conservation and Management**, v. 229, 2021. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113769>.

## ANEXO 1: Relações entre eficiência e consumo de gás para cada tecnologia (continua)



## ANEXO 1: Relações entre eficiência e consumo de gás para cada tecnologia (continuação)

