



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NUCLEAR  
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES

MORJANA MOREIRA DOS ANJOS

O PAPEL DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS NO PROCESSO DE  
TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DO ESTADO DE MINAS GERAIS:  
MODELAGEM DE SISTEMAS ENERGÉTICOS PARA O  
HORIZONTE 2030-2050

BELO HORIZONTE

2019

MORJANA MOREIRA DOS ANJOS

O PAPEL DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS NO PROCESSO DE  
TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DO ESTADO DE MINAS GERAIS:  
MODELAGEM DE SISTEMAS ENERGÉTICOS PARA O  
HORIZONTE 2030-2050

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação  
em Ciências e Técnicas Nucleares como requisito  
parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências e  
Técnicas Nucleares.

Área de concentração: Engenharia Nuclear e da Energia

Orientadora: Dra. Antonella Lombardi Costa

Co-orientadora: Dra. Elizabeth Marques Duarte Pereira

BELO HORIZONTE

2019

A599p

Anjos, Morjana Moreira dos.

O papel das energias renováveis no processo de transição energética do Estado de Minas Gerais [recurso eletrônico] : modelagem de sistemas energéticos para o horizonte 2030-2050 / Morjana Moreira dos Anjos. - 2019.

1 recurso online (119 f.: il., color.) : pdf.

Orientadora: Antonella Lombardi Costa.

Coorientadora: Elizabeth Marques Duarte Pereira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 118-119.

Bibliografia: f. 110-117.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia nuclear - Teses. 2. Energia - Fontes alternativas - Teses. 3. Energia renovável - Teses. 4. Política energética - Teses. 5. Eficiência energética - Teses. I. Costa, Antonella Lombardi. II. Pereira, Elizabeth Marques Duarte. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.039(043)



## FOLHA DE APROVAÇÃO

O PAPEL DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS NO PROCESSO DE TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DO ESTADO DE MINAS GERAIS: MODELAGEM DE SISTEMAS ENERGÉTICOS PARA O HORIZONTE 2030-2050

### MORJANA MOREIRA DOS ANJOS

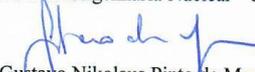
Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, área de concentração ENGENHARIA NUCLEAR E DA ENERGIA.

Aprovada em 10 de junho de 2019, pela banca constituída pelos membros:

  
Prof. Antonella Lombardi Costa - Orientadora  
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG

  
Prof. Elizabeth Marques Duarte Pereira - Coorientadora  
UFMG

  
Prof. Carlos Eduardo Velasquez Cabrera  
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG

  
Prof. Gustavo Nikolaus Pinto de Moura  
Departamento de Engenharia de Produção - UFOP

  
Prof. Sônia Seger Pereira Mercedes  
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG

Belo Horizonte, 10 de junho de 2019.

*Ao meu querido irmão Jeferson, que foi o meu primeiro exemplo de vida acadêmica e que me provou que a dedicação aos estudos traz recompensas duradouras e valiosas.*

*“I do not believe in a fate that falls on men however they act; but I do believe in a fate that falls on them unless they act”.*

*G.K.Chesterton*

## AGRADECIMENTOS

A presente dissertação de mestrado não poderia ter sido tão bem apreciada se não fosse o precioso apoio de várias pessoas.

Primeiramente, agradeço a Deus, pelo dom da vida e pelo privilégio de ter uma família e amigos maravilhosos, que são a base da minha existência e razão pela qual me levanto todos os dias.

Aos meus pais, Epami e Elizabete, que me ensinaram desde cedo a importância da educação como o principal instrumento catalisador de mudanças e que sempre me apoiaram em meus objetivos e sonhos. Ao meu irmão, Jeferson, meu maior exemplo do que eu quero ser quando crescer, e que nesse ano nos presenteou com a bonequinha mais linda de nossas vidas: Liz! Às minhas avós, tios, tias, primos, primas, sogro e sogra, que sempre foram a minha maior torcida.

Ao meu esposo, Rafael, o grande companheiro da minha vida, que sempre sonhou meus sonhos, que sempre dividiu minhas conquistas e derrotas, e que sempre escolheu olhar para mesma direção que a minha, você é peça primordial do meu sucesso.

À minha amiga Larissa, parceira de longa data, que me permite ter amizade e espelho profissional na mesma pessoa, e que torce por mim como se torcesse por ela mesma.

Ao professor Gustavo Moura pela cooperação no desenvolvimento desse trabalho, o seu apoio foi fundamental.

Aos colegas de mestrado que de certa forma fazem parte da construção desse trabalho, e que tem o mesmo objetivo de contribuição para comunidade científica e acadêmica, especialmente, em um momento tão difícil da educação no Brasil.

À Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM e aos colegas de trabalho, que sempre incentivaram a busca pelo conhecimento por meio da Academia.

Aos professores e funcionários do Dep. de Engenharia Nuclear da UFMG, em especial a professora Ângela Fortini, que foi uma das primeiras a comprar a ideia deste trabalho.

Agradeço imensamente as minhas orientadoras Antonella Lombardi e Elizabete Duarte, pelo apoio, ensinamentos e compreensão em todos os momentos, vocês são verdadeiros exemplos de inspiração.

À FAPEMIG pelo apoio financeiro.

Por fim, a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização de mais uma etapa da minha vida acadêmica e profissional.

## RESUMO

É de amplo conhecimento que o desenvolvimento está conectado ao consumo de energia e, essa dependência, associada ao crescimento da população e à expansão das atividades econômicas, faz com que conseqüentemente a demanda por energia aumente. Tradicionalmente, as necessidades energéticas da maioria dos países vêm sendo supridas por combustíveis de origem fóssil, porém existem diversos problemas associados a essas fontes e suas formas de produção. Diante disso, e em face dos riscos relacionados à segurança energética e dos desafios impostos pela mudança do clima, pensar em novas alternativas energéticas, em vista da promoção de uma transição energética, parece razoável. Dessa forma, o presente trabalho realizou uma modelagem do sistema energético de Minas Gerais para subsidiar uma transição energética com vistas à expansão das energias renováveis e promoção da eficiência energética a nível estadual e municipal, bem como o combate às mudanças climáticas. Foram realizadas projeções no horizonte 2030 – 2050, por meio da ferramenta *Long-range Energy Alternatives Planning System – LEAP*, para estabelecer um modelo de política de transição energética para o estado de Minas Gerais. Também foi feita uma análise de efetividade da principal política de promoção de energias renováveis do estado, o Programa Mineiro de Energias Renováveis – PMER. A modelagem considerou premissas-chaves baseadas em dados históricos de origem demográfica e econômica, que subsidiaram a elaboração de três cenários: um de Referência (REF), que considera o que irá acontecer se nenhuma política energética de intervenção adicional for criada; outros dois cenários alternativos que incorporam o cenário REF e contempla políticas adicionais – Transição Energética Moderada (ETM), que tem o objetivo de contribuir com as metas do setor de energia da *Nationally-Determined Contributions – NDC* brasileira, e o Transição Energética Avançada (ETA), que vai além dos objetivos da NDC, sendo ainda mais ambicioso em termos de energias renováveis e penetração de veículos elétricos no setor de transporte. As análises demonstraram que as políticas vigentes não são suficientes para promover a transição estadual para sistemas sustentáveis de energia, e que esse processo dependerá amplamente das políticas energéticas iniciadas e implementadas no futuro. No cenário REF é esperado que a demanda de energia aumente 55% em 2030, e que esse montante quase triplique em 2050. Já a matriz elétrica será composta majoritariamente por combustíveis fósseis, 75%, até o fim do período analisado. Os cenários ETM e ETA se mostraram opções viáveis em termos de mudar as perspectivas futuras, intensivas em carbono e com custos elevados, por meio da implantação de políticas de médio e longo prazo visando sistemas energéticos mais sustentáveis. O cenário ETA apresentou a melhor relação de custo-benefício, e por isso foi utilizado para embasar a Política Estadual de Transição Energética – PETE, que demonstrou ser uma política capaz de garantir um ambiente saudável com acesso à energia segura e confiável para todos.

**Palavras-chave:** Transição Energética; Energias Renováveis; Eficiência Energética; Política Energética.

## ABSTRACT

It is widely known that development is connected to energy consumption, and this dependence, associated with population growth and the expansion of economic activities, consequently increases the demand for energy. Traditionally, the energy supply of most countries has been met by fossil fuels, but there are several problems associated with these sources and their production. In this way and considering the risks related to energy security and the challenges posed by climate change, thinking about energy alternatives to promote an energy transition seems to be reasonable. Thus, the present work carried out a modeling of the Minas Gerais energy system to subsidize an energy transition with a view to expanding renewable energies and promoting energy efficiency at the state and municipal levels, as well as combating climate change. Projections, in the 2030-2050 horizon, were made using the tool Long-range Energy Alternatives Planning System (LEAP) to establish a model of energy transition policy for Minas Gerais State. An effectiveness analysis of the state's main renewable energy policy, the Minas Gerais Renewable Energy Program (PMER, in Portuguese), was also made. The modeling considered key assumptions based on historical data of demographic and economic origin, which subsidized the elaboration of three scenarios. The first one is the Reference Scenario (REF), which considers what will happen if no additional energy policy is created. The two others are alternatives scenarios that incorporate the REF scenario and contemplates additional policies. Thus, the Moderate Energy Transition Scenarios (ETM) aims to contribute to the energy sector goals of the Brazilian Nationally-Determined Contributions – NDC, and the Advanced Energy Transition Scenarios (ETA) goes beyond of NDC's goals, being even more ambitious in terms of renewable energy and penetration of electric vehicles in the transportation sector. The analyzes have shown that current policies are not sufficient to promote the state transition to sustainable energy systems, and that this process will largely depend on the energy policies initiated and implemented in the near future. In the REF scenario, energy demand is expected to increase 55% by 2030, and this amount will almost triple by 2050. The electric matrix will be composed mostly of fossil fuels, 75%, by the end of the period analyzed. The ETM and ETA scenarios have proven to be viable options in terms of changing the future perspectives that are carbon intensive and costly, by implementing medium-long-term policies towards more sustainable energy systems. The ETA scenario presented the best cost-benefit ratio and was used to support the State Energy Transition Policy (PETE, in Portuguese), which proved to be a policy capable of guaranteeing a healthy environment with access to safe and reliable energy for all.

**Keywords:** Energy Transition; Renewable energy; Energy Efficiency; Energy Policy.

## LISTA DE SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica  
ANP – Agência Nacional de Petróleo  
BIG ANEEL – Banco de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica  
CGH – Central Geradora  
COP 21 – 21ª Conferência das Partes  
EOL – Usina eólica  
EPE – Empresa de Pesquisa Energética  
ETA – Transição Energética Avançada  
ETM – Transição Energética Moderada  
GD – Geração Distribuída  
GEE – Gases de Efeito Estufa  
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas  
IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*  
IRENA – *International Renewable Energy Agency*  
LEAP – *Long-range Energy Alternatives Planning System*  
MCTIC – Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações  
MME – Ministério de Minas e Energia  
NDC – *Nationally-Determined Contributions*  
NRW – *North Rhine-Westphalia*  
PCH – Pequenas Centrais Elétricas, Central Geradora Hidrelétrica  
PDE – Plano Decenal de Energia  
PIB – Produto Interno Bruto  
PMER – Programa Mineiro de Energias Renováveis  
PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica  
REF – Referência  
SEF/MG – Secretaria de Estado de Fazenda de Minas Gerais  
SEI – *Stockholm Environment Institute*  
SEMAD – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável  
SIN – Sistema Interligado Nacional  
TED – Database Ambiental e Tecnológica

UFV – Central Geradora Solar Fotovoltaica

UHE – Usina Hidrelétrica

UNFCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change*

UTE – Usina Termelétrica

## LISTA DE SÍMBOLOS

$tep$  = tonelada equivalente de petróleo

$Mtep$  = milhões de tonelada equivalente de petróleo

$EE$  = Energia Específica

$PR$  = Performance Média

$KWp$  = quilowatt pico

$MWh$  = megawatt hora

$TWh$  = terawatt hora

$EC$  = consumo de energia agregado para um determinado setor

$AL$  = nível de atividade, que é uma medida da atividade econômica ou social para qual a energia é consumida

$EI$  = Intensidade Energética, que é o consumo final de energia anual por unidade de nível de atividade

$ET$  = consumo líquido de energia para transformação

$ETP$  = produto oriundo da transformação, por exemplo, eletricidade

$f$  = eficiência do processo de transformação

$CEC$  = emissão de GEE para o consumo final de energia do sistema

$EI$  = intensidade energética

$EF$  = fator de emissão para combustível  $n$  da tecnologia  $j$  do setor  $i$ .

$CET$  = emissão de carbono para o módulo de transformação

$EF$  = fator de emissão para uma unidade de energia primária  $s$ , consumida para produzir energia secundária  $t$  por meio da tecnologia  $m$ .

$ep_n$  = preço unitário para combustível tipo  $n$ ;

$m_{k,j,i}$  = demanda por matéria-prima  $k$  por unidade de produção usada no equipamento  $j$  dentro do processo de produção  $i$ ;

$mp_k$  = preço unitário da matéria-prima  $k$ ;

$fc_{j,i}$  = preço fixo por unidade de produção por meio do equipamento  $j$  (dentro do processo de produção  $i$ ).

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Empregos no mundo nos setores de energias renováveis .....	30
Figura 2 Custos nivelados da produção de eletricidade na Alemanha .....	37
Figura 3: Demanda de energia por fonte e por setor em mil tep. ....	46
Figura 4: Radiação Solar Média Anual de Minas Gerais .....	47
Figura 5: Média anual de radiação solar (KWh/KWp).....	49
Figura 6: Potencial total médio de biomassa em Minas Gerais.....	52
Figura 7: Áreas favoráveis para implantação de empreendimentos de energia eólica. ....	53
Figura 8: Estrutura do LEAP .....	59
Figura 9: Estrutura de um sistema de transformação no LEAP .....	64
Figura 10: Estratégia para promoção da transição energética. ....	72
Figura 11: Matriz energética em 2030 - Cenário ETA.....	92
Figura 12: Matriz energética em 2050 - Cenário ETA.....	93
Figura 13: Matriz energética em 2030 - Cenário REF .....	118
Figura 14: Matriz energética em 2050 - Cenário REF .....	118
Figura 15: Matriz energética em 2030 - Cenário ETM .....	119
Figura 16: Matriz energética em 2050 - Cenário ETM .....	119

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Estrutura da demanda .....	63
Quadro 2: Principais Premissas dos cenários REF, ETM e ETA.....	71
Quadro 3: Indicadores e suas vantagens e desvantagens.....	74
Quadro 4: Visão geral dos principais tipos de instrumentos e medidas adotados em políticas de energia renováveis. ....	75
Quadro 5: Classificação dos Instrumentos Abordados pelo PMER .....	98

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Política transição energética alemã – metas presentes e futuras .....	35
Tabela 2: EE e PR para as 12 mesorregiões estabelecidas pelo IBGE.....	48
Tabela 3: Média do potencial e energia disponível para Minas Gerais.....	51
Tabela 4: Premissas Gerais - LEAP – caso de Minas Gerais .....	62
Tabela 5: Dados técnicos para o módulo geração de eletricidade do modelo LEAP para Minas Gerais.....	66
Tabela 6: Dados para outros módulos de transformação.....	67
Tabela 7: Preço nominal dos recursos energéticos de origem fóssil .....	68
Tabela 8: Número médio de empregos gerados por MW/ano no Brasil. ....	76
Tabela 9: Fator de emissão do sistema elétrico do Brasil.....	76
Tabela 10: Capacidade Instalada (GW) por cenários .....	85
Tabela 11: Análise de Custo-benefício dos cenários alternativos em comparação com o cenário REF.....	91
Tabela 12: Capacidade total de geração instalada em Minas Gerais por fonte em MW, 2010-2016 .....	94
Tabela 13: Total de Pessoas Que trabalhou no Setor de Energia Renováveis .....	100
Tabela 14: Emissões Evitadas do Setor Elétrico em Minas Gerais.....	100
Tabela 15: Metas de Transição Energética para o horizonte 2030-2050 .....	102

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Consumo final de energia por setores – REF, ETM e ETA.....	78
Gráfico 2: Uso final de energia por combustíveis – REF.....	79
Gráfico 3: Uso final de energia por combustíveis – ETM.....	79
Gráfico 4: Uso final de energia por combustíveis – ETA. ....	80
Gráfico 5: Demanda por eletricidade.....	81
Gráfico 6: Produção de energéticos – REF .....	82
Gráfico 7: Produção de energéticos – ETM .....	83
Gráfico 8: Produção de energéticos – ETA .....	83
Gráfico 9: Projeção de geração de eletricidade por cenários.....	84
Gráfico 10: Matriz elétrica em 2010 por cenários .....	85
Gráfico 11: Matriz elétrica em 2030 por cenários .....	86
Gráfico 12: Matriz elétrica em 2050 por cenários .....	87
Gráfico 13: Demanda de recursos energéticos por cenários.....	88
Gráfico 14: Importação de recursos energéticos por cenários.....	89
Gráfico 15: Evolução das Emissões de GEE no horizonte 2030-2050 por cenários.....	90
Gráfico 16: Entrada Anual de Energia Renovável, exceto UHE, na Matriz Elétrica de MG, por fonte, 2011 a 2017 (MW). ....	95
Gráfico 17: Participação de Energia Renovável, exceto UHE, na matriz elétrica de Minas Gerais, 2010 a 2016 (%).....	96
Gráfico 18: Potência instalada de micro e mini geração em Minas Gerais, 2013 a 2017 (kW) .....	96
Gráfico 19: Quantidade de instalações de geração distribuída, Unidades Consumidoras atendidas e Potência Instalada por estado, 2017 (KW, nº).....	97

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	21
1.1 Justificativa.....	22
1.2 Objetivos.....	23
1.2.1 Objetivo Geral .....	23
1.2.2 Objetivos Específicos .....	23
1.3 Organização da dissertação .....	24
2 ESTADO DA ARTE .....	25
2.1 Transição energética: Histórico e Conceituação .....	25
2.1.1 Breve Histórico das Transições Energéticas Mundiais .....	25
2.1.2 Conceituação da Transição Energética Atual.....	26
2.1.2.1 O combate às mudanças climáticas .....	27
2.1.2.2 Independência Energética.....	28
2.1.2.3 Inovação Tecnológica e Economia Verde.....	29
2.1.2.4 Segurança Energética .....	30
2.1.2.5 Fortalecimento de Economias Locais e Promoção da Igualdade Social .....	32
2.1.2.6 Redução e Eliminação de Riscos de Fontes Impactantes ao Meio Ambiente .....	33
2.2 Principais Transições Energéticas no Mundo.....	34
2.2.1 Transição Energética Alemã.....	34
2.2.1.1 Energias Renováveis como Protagonistas da Transição Energética Alemã.....	36
2.2.1.2 Custos e Benefícios da Transição Energética Alemã .....	37
2.2.1.3 Coordenação da Transição Energética Alemã.....	38
2.2.1.4 Suporte Legislativo da Transição Energética Alemã .....	39
2.2.2 Transição Energética na França.....	40
2.2.2.1 Metas da Transição Energética Francesa.....	40

2.2.2.2 Financiamento de projetos.....	41
2.2.3 Transição Energética no Brasil e em Minas Gerais.....	42
2.2.4 Competências legais à nível regional e local.....	43
2.3 Perfil e Potencial Energético de Minas Gerais .....	45
2.3.1 Potencial de Energia Solar no Estado de Minas Gerais.....	46
2.3.1 Potencial de Biomassa no Estado de Minas Gerais .....	49
2.3.2 Potencial de Energia Eólica no Estado de Minas Gerais.....	52
2.4 Ferramenta para modelagem de cenários e políticas energéticas .....	54
2.4.1 Algoritmo do LEAP .....	54
2.4.1.1 Consumo de energia .....	55
2.4.1.2 Transformação .....	55
2.4.1.3 Emissões de gases de efeito estufa .....	56
2.4.1.4 Custos .....	56
3 METODOLOGIA.....	58
3.1 Metodologia de cenários energéticos .....	58
3.1.1 LEAP .....	58
3.1.2 Desenvolvimento dos cenários e premissas adotadas.....	60
3.1.2.1 Premissas Gerais.....	61
3.1.2.2 Premissas Demanda.....	62
3.1.2.3 Premissas Transformação .....	63
3.1.2.4 Premissas dos Recursos .....	67
3.1.2.5 Premissas adotadas nos cenários REF, ETM e ETA.....	68
3.1.2.6 Premissas de Análise de Custo-benefício.....	70
3.2 Elaboração da Política Estadual de Transição Energética - PETE.....	72
3.2.1 Avaliação do Programa Mineiro de Energias Renováveis .....	73
3.2.1.1 Número de projetos implementados pelo PMER .....	73
3.2.1.2 Inovação .....	75

3.2.1.3 Criação de Empregos.....	75
3.2.1.4 Mitigação de gases de efeito estufa .....	76
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	77
4.1 Modelagem do Sistema Energético de Minas Gerais no horizonte 2030-2050 .....	77
4.1.1 Demanda de Energia.....	77
4.1.1.2 Uso final de energia por combustíveis .....	78
4.1.2 Transformação .....	81
4.1.2.1 Geração de Eletricidade.....	84
4.1.3 Recursos .....	87
4.1.4 Emissões de Gases de Efeito Estufa.....	89
4.1.5 Análise de Custo-benefício.....	90
4.1.6 Sistemas de Energia no Futuro .....	91
4.2 Avaliação do PMRE no processo de expansão de energias renováveis no estado de Minas Gerais.....	93
4.2.1 Número de projetos implementados pelo PMER .....	93
4.2.2 Inovação .....	98
4.2.3 Criação de Empregos .....	99
4.2.4 Mitigação de gases de efeito estufa .....	100
4.2.5 Análise da Efetividade do PMER.....	100
4.3 Discussão - Proposta Política Estadual de Transição Energética de Minas Gerais – PETE.....	102
4.3.1 Metas de Transição Energética para o Horizonte 2030-2050.....	102
4.3.2 Diretrizes da PETE .....	102
4.3.3 Eixos da PETE.....	103
4.3.4 Linhas de Ação Política Estadual de Transição Energética de Minas Gerais – PETE .....	103
4.3.4.1 Regulação .....	104
4.3.4.2 Sensibilização .....	104

4.3.4.3 Pesquisa e Desenvolvimento e Inovação (P&D&I) .....	104
4.3.4.4 Demonstração de Projetos .....	105
4.3.4.5 Capacitação de Recursos Humanos .....	105
4.3.4.6 Mercados e financiamento .....	105
4.3.4.7 Cooperação .....	105
4.3.5 Principais Produtos Esperados .....	106
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	107
5.1 Sugestão para trabalhos futuros .....	109
6 REFERÊNCIAS .....	110
ANEXO I.....	118

## 1 INTRODUÇÃO

Planejar um futuro sustentável não é uma tarefa fácil. A forma de se conduzir tomadas de decisão pode impactar profundamente os aspectos econômicos, sociais e ambientais de um país. Nesse sentido, energia possui um papel crucial para assegurar o crescimento e desenvolvimento de uma sociedade. Considerada um insumo vital para vários setores da economia, além de ser imprescindível para manutenção da qualidade de vida da sociedade moderna, a capacidade de provimento de energia é um quesito de sobrevivência em um mundo globalizado.

É de amplo conhecimento que o desenvolvimento está conectado ao consumo de energia e, essa dependência, associada ao crescimento da população e à expansão das atividades econômicas, faz com que conseqüentemente a demanda por energia aumente.

Tradicionalmente, os combustíveis fósseis são os principais recursos utilizados no mundo para geração de energia. A alta disponibilidade de recursos, no presente, e o seu baixo custo de exploração, fez com que vários países baseassem a sua matriz energética nesses insumos energéticos. Tomando como exemplo os países da Europa e os Estados Unidos, evidencia-se a predominância do petróleo, carvão mineral e gás natural como os principais responsáveis pelo fornecimento de energia.

Ainda que existam benefícios inegáveis em relação ao uso de combustíveis fósseis para geração de energia, também existem diversos problemas associados a essas fontes e suas formas de produção. Dentre esses, podemos citar, principalmente, que são fontes não renováveis de energia, e conseqüentemente, são recursos limitados. Além disso, estima-se que entre os anos de 1970 até 2010, a emissão de CO<sub>2</sub> por meio da queima de combustíveis fósseis e processos industriais representou cerca de 78% das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) totais em todo mundo (IPCC, 2014). Esse dado permite inferir que combustíveis fósseis são um dos principais responsáveis pela emissão de GEE, e por isso contribuem substancialmente para intensificação do aquecimento global, e conseqüentemente, para aceleração dos efeitos das mudanças climáticas, segundo diversas linhas de pesquisa.

Em face dos riscos relacionados à segurança energética<sup>1</sup> e dos desafios impostos pela mudança do clima, pensar em novas alternativas energéticas, em vista da promoção de uma transição energética, parece razoável. Nesse contexto, o Brasil possui uma das mais ambiciosas contribuições nacionalmente determinadas (NDC, na sigla em inglês, *nationally-determined*

---

<sup>1</sup> Segurança energética reflete capacidade de prover energia à população a preços acessíveis (IEA, 2007).

*contributions*) para consecução do Acordo de Paris, firmado na 21ª Conferência das Partes (COP-21), em Paris, em dezembro de 2015, que visa limitar o aumento da temperatura global ao máximo de 2°C em relação aos níveis da era pré-industrial por meio de substancial redução das emissões de GEE. No que tange os esforços para redução de GEE no setor de energia, a NDC brasileira prevê alcançar uma participação estimada de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030, incluindo: “expandir o uso de fontes renováveis, além da energia hídrica, na matriz total de energia para uma participação de 28% a 33% até 2030” (BRASIL, 2015).

Para que as metas da NDC brasileira sejam implementadas de forma efetiva e no prazo acordado é necessário reunir esforços e dividir responsabilidades entre os Estados, setor privado e sociedade civil, de modo a promover uma descentralização das metas. No entanto várias competências relacionadas à implementação da NDC estão restritas ao âmbito federal, conferindo aos Estados pouca autonomia para executar suas parcelas do compromisso nacional, especialmente no que se refere ao setor de energia. Dessa forma, o presente trabalho apresenta o estado da arte sobre transição energética e descentralização das competências de regulamentação do setor de energia para o nível subnacional, bem como a proposta de criação de uma política de médio e longo prazo para o Estado de Minas Gerais para promover uma transição energética com vistas à expansão das energias renováveis e promoção da eficiência energética a nível territorial.

### **1.1 Justificativa**

O mundo inteiro tem voltado sua atenção para envidar esforços na luta contra as mudanças climáticas. O setor de energia desempenha um importante papel como o principal emissor de GEE em todo mundo, cerca de 34,6% das emissões totais mundiais (IPCC, 2014). Seguindo essa mesma linha, no Brasil e em Minas Gerais, o setor contribuiu para o balanço total de emissões no ano de 2014 com o montante de 26% (IEMA, 2016) e 37% (FEAM, 2016), respectivamente. É inegável o papel da energia como impulsionador do desenvolvimento da economia e da vida moderna. Os efeitos das mudanças climáticas podem trazer consequências catastróficas aos sistemas econômicos, sociais e ambientais (SANCHEZ, 2009). Dessa forma, se faz necessário encontrar um equilíbrio para assegurarmos o desenvolvimento econômico e social e o suprimento energético para tal, e ao mesmo tempo, atuar no combate às mudanças climáticas.

Observa-se que vários entes subnacionais ao redor do mundo já tomam medidas descentralizadas para regular o setor de energia de forma a promover uma transição energética

visando uma economia sustentável e de baixo carbono em seus territórios (STATE & REGIONS, 2005). Como dito anteriormente, o Brasil possui como resposta às mudanças climáticas uma arrojada NDC, entretanto, esse compromisso ainda não teve as repartições de responsabilidades definidas entre os estados e a sociedade. Ainda, no que tange ao setor de energia, os Estados possuem pouca autonomia para regulamentar suas atividades desse em seus territórios. Dessa forma, é razoável discutir a implementação de uma política energética à nível estadual, tomando Minas Gerais como referência, a fim de se verificar a importância e necessidade da descentralização das competências energéticas em face da transição energética como uma das ações para o cumprimento de acordos climáticos internacionais, bem como uma forma de garantir uma oferta segura e diversa de energia à sociedade mineira.

Adicionalmente, criar uma estratégia de transição energética, que vise atingir metas claras e objetivas no médio e longo prazo, é de suma importância para atuar na resolução de um dos principais problemas das políticas públicas: a falta de continuidade (ESTIF, 2007).

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

O objetivo principal é realizar uma modelagem do sistema energético de Minas Gerais no médio e longo prazo para subsidiar uma transição energética com vistas à expansão das energias renováveis e promoção da eficiência energética à nível estadual e municipal, bem como o combate às mudanças climáticas.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Realizar uma revisão bibliográfica do potencial de energias renováveis no estado de Minas Gerais;
- Identificar o perfil de consumo e suprimento energético de Minas Gerais no presente e traçar cenários para o médio e longo prazo;
- Identificar modelos de transição e de políticas energéticas a nível nacional e subnacional ocorridos no mundo;
- Realizar uma análise da Política Energética Brasileira, bem como de sua regulamentação, com o objetivo de conhecer, em relação aos estados e municípios, os pontos de autonomia e propor novos;

- Propor metodologia para embasamento de políticas públicas regionais e municipais, com potencial de replicação.
- Criar uma proposta de modelo de Política de Transição Energética com a definição de metas e diretrizes para o horizonte de médio e longo prazo.
- Propor metas de eficiência energética visando alcançar os objetivos da NDC brasileira para o setor de energia;
- Contribuir para o cumprimento de acordos nacionais e internacionais no âmbito da área energia e mudanças climáticas, principalmente o Acordo de Paris.

Ademais, espera-se que o presente trabalho sirva como ferramenta de difusão do conhecimento técnico-científico para o embasamento de tomadas de decisão e planejamento estratégico do estado de Minas Gerais e possivelmente para as demais unidades da federação do Brasil.

### **1.3 Organização da dissertação**

A presente dissertação está organizada em 5 capítulos:

O primeiro capítulo fornece uma visão geral do trabalho e seus principais desdobramentos, bem como a justificativa e objetivos da dissertação. Dessa forma, nesse primeiro momento são esclarecidas as intenções e motivações que levaram à construção desse trabalho, e o que é pretendido alcançar em forma de resultados.

No segundo capítulo, apresenta-se a revisão bibliográfica referente à parte técnica da pesquisa, focando nos principais conceitos e exemplos de transições energéticas ocorridas à nível mundial, bem como em estudos de casos correlacionados a temática.

O terceiro capítulo, descreve a metodologia adotada para execução da modelagem do sistema energético de Minas Gerais, bem como as principais premissas e dados adotados para consecução das projeções no horizonte 2030-2050. Também é abordada a metodologia para análise da efetividade Programa Mineiro de Energias Renováveis - PMER, bem como a forma em que foi construída a proposta da política de transição energética de Minas Gerais.

Os resultados e a discussão são apresentados no quarto capítulo, que foi subdividido conforme as etapas adotadas na metodologia, apresentando os cenários traçados, o resultado da análise do PMER, e a proposta de política de transição energética.

Por fim, no quinto capítulo, apresentam-se as conclusões e recomendações a respeito do trabalho desenvolvido nesta dissertação.

## **2 ESTADO DA ARTE**

Neste capítulo serão abordados os temas referentes ao desenvolvimento desta dissertação, particularmente o conceito de transição energética e a sua aplicação a nível internacional, nacional e subnacional.

### **2.1 Transição energética: Histórico e Conceituação**

O presente tópico trata da análise da transição energética no que concerne à sua história e conceituação.

#### **2.1.1 Breve Histórico das Transições Energéticas Mundiais**

Antes da revolução industrial, há mais de 200 anos, as necessidades energéticas da economia e da sociedade eram praticamente supridas por meio de energias renováveis. O carvão mineral já era usado, mas em pequenas proporções, assim como os demais combustíveis fósseis, tais como o gás natural e o petróleo. Nessa época, energia consistia basicamente em gerar calor, prioritariamente por meio de madeira, e em aproveitar a força motriz dos moinhos de água e de vento, em martelos ou em navios. A força muscular humana e de animais também era a principal forma de transporte de cargas, operação de utensílios e execução de outros trabalhos. O entendimento de que calor é transformado em movimento foi disseminado quando as máquinas a vapor levaram à industrialização e à noção de energia e seu uso, caracterizando uma das primeiras transições energética sofridas no mundo (BRÜGGEMEIER, 2017).

A recorrente preocupação com o esgotamento das reservas de carvão em um curto espaço de tempo, e simultaneamente, as críticas aos poluentes advindos dessa fonte, marcaram a era do carvão. Dessa forma, em meados dos anos da década 1950, o petróleo, gás natural e a energia nuclear ganharam força como uma opção de energia mais sustentável em relação ao carvão, trazendo novamente, uma modificação no suprimento das demandas energéticas mundiais. Inicialmente, a energia nuclear, para geração de eletricidade, causou mais expectativas do que a transição para petróleo e gás natural, já que essa prometia uma energia limpa, de baixo custo e de alta disponibilidade no longo prazo, resolvendo, portanto, todas as preocupações concernentes à temática. No entanto, os riscos associados a possíveis acidentes nucleares permitiram a ascensão da era dos combustíveis fósseis, especialmente o petróleo (BRÜGGEMEIER, 2017).

As mudanças vivenciadas ocorreram ao longo de décadas e foram resultados do desenvolvimento gradual da sociedade e da economia, assim como da adoção de novas tecnologias, na maioria das vezes, energointensivas, que culminaram na crescente demanda mundial por energia. Mas foi apenas na década de 1970, com a crise de petróleo, que o conceito de transição energética atual foi colocado em foco, impulsionado principalmente: por questões de segurança energética; pela crescente consciência ambiental; pela ameaça constante do esgotamento das fontes tradicionais de energia; e por fim, a preocupação de que os preços permaneceriam em constante elevação, prejudicando assim o desenvolvimento econômico e social (WEF, 2013).

Segundo Irena (2017a) o setor de energia atual necessita de uma grande reforma, com uma transição de uma matriz energética intensiva em combustíveis fósseis para uma produção de energia com zero emissões até o fim desse século a fim de evitar problemas ambientais e econômicos irreversíveis. Essa situação nos leva a transição energética atual.

### **2.1.2 Conceituação da Transição Energética Atual**

A transição energética, assim como o nome sugere, é a substituição estrutural ou diversificação dos insumos de uma matriz energética por outros tipos de fonte. No contexto atual, o nome refere-se a uma reorientação dos padrões de produção e consumo de energia (FORTIN, 2015). Os sistemas energéticos estão entrando em uma fase de transformação em todo o mundo, vários países estão estabelecendo metas ambiciosas para migrarem de sistemas intensivo em combustíveis fósseis para fontes alternativas e mais sustentáveis, com o objetivo de promover uma economia de baixo carbono. Nesse sentido, a transição energética atual possui objetivos bem definidos: promover a descarbonização de matrizes energéticas por meio da substituição gradual de fontes fósseis para fontes de energias renováveis, bem como aumentar a eficiência energética de modo a reduzir demanda de energia e garantir segurança de fornecimento (AGORA, 2015).

Os motivos para que um país realize uma transição energética são vários. Entre eles podemos citar, principalmente, o combate às mudanças climáticas, independência energética, promoção de inovações tecnológicas e da economia verde, segurança energética, o fortalecimento de economias locais bem como a promoção da igualdade social, e também a redução e eliminação de riscos de fontes altamente impactantes ao meio ambiente.

### 2.1.2.1 O combate às mudanças climáticas

No contexto atual, pensar a política energética sob a perspectiva do conjunto das políticas públicas significa incorporar de forma plena a questão da mudança climática à discussão sobre a segurança energética (BICALHO e QUEIROZ, 2012).

Mudança climática é definida pela Convenção-Quadro das Nações Unidas Sobre Mudança do Clima, em inglês UNFCCC<sup>2</sup>, como “uma mudança de clima que possa ser direta ou indiretamente atribuída à atividade humana que altere a composição da atmosfera mundial e que se some àquela provocada pela variabilidade climática natural observada ao longo de períodos comparáveis”. Tomando como base esse conceito, temos que as ações antropogênicas estão no centro das causas da mudança do clima e que para combatê-la é necessário mudar a forma com que interagimos com o meio ambiente.

As mudanças climáticas podem incorrer em consequências catastróficas que vão desde a intensificação do aquecimento global, que contribui significativamente para o aumento da incidência de eventos extremos, causando severos impactos nos ecossistemas presentes no meio ambiente, até o crescimento de migrações, destruição dos meios de sustento, alteração de economias, debilitação do desenvolvimento, comprometimento da saúde humana, e até mesmo o aumento da desigualdade entre os sexos (JACOBI et al., 2013).

Em 2015, durante a 21ª Conferência das Partes, representantes dos 195 países Parte da UNFCCC reconheceram que as mudanças climáticas representam uma urgente e potencialmente irreversível ameaça às sociedades humanas e ao planeta como um todo. Dessa maneira, países do mundo inteiro se juntaram em uma ampla cooperação para criarem uma efetiva e apropriada resposta global com o objetivo de acelerarem a redução das emissões de gases de efeito estufa. Nesse sentido, foi adotado o Acordo de Paris, que estabelece o compromisso de manter o aumento da temperatura média global em bem menos de 2°C acima dos níveis pré-industriais e de envidar esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais (FCCC, 2015).

---

<sup>2</sup> United Nations Framework Convention on Climate Change - UNFCCC

### 2.1.2.2 Independência Energética

Independência energética possui várias conceituações, sendo que uma das mais famosas é a definição dada em 1973, pelo então presidente dos Estados Unidos, Richard Nixon, quando lançou o “*Project Independence Plan*”, que “consistia em um projeto que tinha como meta, até o final da referida década, desenvolver o potencial energético dos Estados Unidos de modo a atender toda necessidade energética do país sem depender de qualquer recurso estrangeiro” (ABELSON, 1973). Para outros autores, o conceito é baseado pela noção de que governos soberanos deveriam reduzir a sua confiança em recursos energéticos advindos de fontes não amigáveis, em outras palavras, independência energética é um componente central para alcançar tanto segurança no fornecimento de energia quanto na economia (TERZIC, 2013; ABRAHAM & MILLS, 2013).

Essa discussão possui como base a larga dependência de importação de energia de economias desenvolvidas para atenderem suas demandas. A exemplo disso, podemos citar a União Europeia que possui uma alta e crescente dependência em gás natural para atender suas necessidades energéticas (RADEMAEKERS, NUFFEL e YEARWOOD, 2017). Na mesma situação, a Alemanha, em 2015, importava quase dois terços dos recursos energéticos consumidos no país (AGORA, 2015). Já nos Estados Unidos a dependência no petróleo representa uma preocupação nacional, o que significa uma séria ameaça aos sistemas econômicos do país (YARROS, 2013).

A taxa de importação de energia do Brasil em 2017 foi de aproximadamente 24%, sendo que as principais fontes importadas foram o carvão mineral, gás natural e petróleo (EPE, 2018). Embora a dependência externa de energia do Brasil seja relativamente pequena, o mesmo não se pode dizer de Minas Gerais. De acordo com (CEMIG, 2018), “a importação global de energia pelo Estado em 2016, 21,3 milhões de tep, representou 60,8% da demanda total”. O expressivo montante de importação de energéticos em Minas Gerais é devido, principalmente, pela necessidade de petróleo e seus derivados e de carvão mineral. A dependência externa do estado é basicamente de combustíveis fósseis, e os principais responsáveis por essa demanda são os setores de transporte e indústria, consumidores de 87,5% da demanda total de energia do Estado.

Na busca pela independência energética, a transição para sistemas de energia diversificados, tanto em fontes quanto em rotas, é um fator chave para o aumento da segurança energética de governos soberanos. Nesse sentido, as energias renováveis, com geração local, e

eficiência energética são poderosas aliadas para reduzir a dependência externa de energia (AGORA, 2015).

### 2.1.2.3 Inovação Tecnológica e Economia Verde

O manifesto “Economia Verde” apresentado durante a Conferência RIO +20 em 2012 dedica-se ao crescimento na geração de empregos e renda por meio do investimento público e privado que reduza a emissão de carbono e poluição, e ao mesmo tempo aumente a eficiência energética e de recursos, prevenindo a perda da biodiversidade. De maneira mais simples, a economia verde consiste na otimização, racional e equitativa, das atividades que consomem recursos naturais, de forma a descarbonizar a economia e impactar minimamente o meio ambiente. Nesse sentido, a inovação tecnológica é uma das principais ferramentas para o desenvolvimento de tecnologias que permitam os diferentes setores da economia migrarem para sistemas mais eficientes com menos emissão de carbono e consumo de energia (INPE, 2012).

A transição energética permite o desenvolvimento da economia verde, criando empregos, promovendo inovações e criando todo um mercado de “tecnologias verdes”. A exploração global de energias renováveis tem crescido rapidamente nos últimos anos. O banco de dados e estatísticas da IRENA revela que desde 2010 o número de registros de patentes de tecnologias de energias renováveis aumentou em mais de 50 vezes, sendo que em 2016 havia mais de 570 mil patentes registradas (IRENA, 2018a).

De acordo com Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, desde 2007 muitas tecnologias de energias renováveis demonstraram substancial melhoria de desempenho e redução de custos, e um número crescente dessas tem alcançado um nível de maturidade que permite a implantação em larga escala (IPCC 2014).

O crescimento da popularidade das energias renováveis tem produzido uma série de oportunidades. Uma das mais importantes é que uma posição forte nos mercados de tecnologias verdes, locais e globais, criam empregos. Na Alemanha, por exemplo, cerca de 370 mil pessoas trabalharam no setor de energias renováveis em 2014, e a Federação Alemã de Energia Renovável estima que esse número possa subir para 500 mil até 2020 (MORRIS & PEHNT, 2015).

Dados mais recentes, provenientes da IRENA, demonstram um crescente aumento na geração de empregos, à nível mundial, no mercado de energias renováveis; em 2017, havia 10,3 milhões de postos de trabalhos no setor, um aumento de 45% quando comparado a 2012. Esses dados estão ilustrados na Figura 1, que mostra que o setor de solar fotovoltaico foi o que

mais cresceu no período observado e que gera o maior número de empregos no setor de energia renovável, com 3,37 milhões de empregos no mundo, em 2017.



Figura 1: Empregos no mundo nos setores de energias renováveis  
Fonte: Adaptado IRENA, 2018b

O cenário de investimentos em energia “verde” tem criado uma espécie de “corrida do ouro”; pela evolução dos números de empregos, podemos inferir que ao promover agressivamente a eficiência ao lado de novos mercados de energia que demandem combustíveis alternativos e desenvolvimento de tecnologias renováveis, a oferta de energia pode ser combinada com a redução da emissão de carbono, com o crescimento econômico, e com a criação líquida de emprego. Na verdade, o principal é que quanto mais forte a política climática, maior a recompensa econômica.

#### 2.1.2.4 Segurança Energética

Segurança energética reflete capacidade de prover energia à população a preços acessíveis. A prestação de serviços de energia a partir de uma variedade de fontes para atender as necessidades da sociedade deveria idealmente proporcionar um fornecimento seguro, acessível e ter um impacto mínimo sobre o meio ambiente. No entanto, esses três objetivos de governança, frequentemente, competem entre si (IEA, 2007).

O termo segurança energética pode ser analisado sob a ótica de duas perspectivas básicas. A primeira delas é a perspectiva econômica, em que como já dito, representa o acesso

à quantidade suficiente e preço justo à energia necessitada. Não se ter acesso implica em uma elevação na exposição do país ou região aos impactos econômicos negativos advindos do aumento considerável dos preços da energia ou da sua volatilidade. A outra é a perspectiva em termos físicos, associada à interrupção temporária ou permanente, parcial ou total do fornecimento de energia. Os riscos implicam não somente em custos econômicos e sociais, bem como pode ameaçar toda sustentabilidade do modelo econômico vigente no país. Em termos mais expressivos, interrupções físicas podem configurar uma ameaça a toda segurança do país, isto é, à sua existência, à sua autonomia, à sua independência; à sua própria existência como nação autônoma, independente e soberana (FRANCÉS, 2011).

Tradicionalmente, os combustíveis fósseis desempenham um papel fundamental na garantia de fornecimento de energia necessária para o desenvolvimento econômico e social; isso se deve a um conjunto de atributos associados a esses combustíveis, que permitem sua utilização em larga escala e a preços favoráveis. Embora para o setor de energia esse represente uma solução fácil e eficaz, para o meio ambiente é uma grande ameaça. O *trade-off* mudanças climáticas versus segurança energética é um dos grandes antagonismos da atualidade, já que para combater a mudança climática é necessário diminuir o uso dos combustíveis fósseis, mas para garantir a segurança energética é preciso recorrer a eles (BICALHO e QUEIROZ, 2012).

Para eliminar ou reduzir esse *trade-off*, a transição energética trabalha basicamente com duas linhas de ação: Eficiência Energética e Energias Renováveis. A primeira se refere a difusão de tecnologias mais eficientes tanto no consumo quanto na geração de energia, que em termos energéticos significa reduzir o consumo de energia final sem reduzir a correspondente parcela de energia útil. Assim as necessidades energéticas essenciais para o desenvolvimento econômico e garantia do bem-estar social continuam sendo atendidas, porém com uma quantidade de energia menor graças à efficientização de processos. Já as energias renováveis são insumos que não possuem os inconvenientes ambientais associados aos combustíveis fósseis, podendo ser utilizadas em substituição a esses. Em muitas circunstâncias, diversificar a oferta aumentando a capacidade de oferta interna utilizando fontes de energia locais, como o sol, vento e biomassa, para atender o crescimento futuro de demanda pode ocasionar contribuições positivas para o papel da segurança energética e combate a mudanças climáticas. Nesse sentido, as oportunidades apresentadas pelas tecnologias de energia renovável podem atenuar os riscos para o fornecimento de energia, tais como: instabilidades do mercado; falhas técnicas do sistema; dependência externa de energia e ameaças à segurança física e econômica, incluindo o terrorismo e eventos climáticos extremos (BICALHO e QUEIROZ, 2012; OZTURK, 2013).

### 2.1.2.5 Fortalecimento de Economias Locais e Promoção da Igualdade Social

Quando comunidades fazem investimentos em projetos próprios, o retorno econômico é muito maior do que quando empresas de fora fazem os investimentos por eles. À exemplo disso, comunidades que importam gás natural para aquecimento de água de uso doméstico estão gastando verba que está saindo do seu local de imersão ou até mesmo do seu país. Mas comunidades que instalam coletores solares para cobrir parte de sua necessidade de calor, desconsiderando os gastos com instalações do sistema, terão a energia gratuita e uma parcela muito maior de suas despesas com energia vai ficar dentro do seu município e do seu país e, possivelmente, até mesmo dentro de sua comunidade. Alguns de seus investimentos poderão voltar para beneficiá-lo indiretamente, como investimentos fiscais em infraestruturas (escolas, estradas, pesquisas, etc.) (AGORA, 2015).

A Alemanha tem criado uma série de programas específicos para fortalecimento de economias locais que contemplam energias renováveis e os benefícios já estão aparecendo. Um exemplo é o “Programa de Renovação de Edifícios”, financiado pelo Banco de Desenvolvimento da Alemanha, que estima que para cada euro recolhido de impostos e investido no programa, esse gerará de 3 a 5 euros de receitas fiscais. E o programa não só ajuda a diminuir as importações de combustíveis, mas também protege e cria vários postos de trabalho no setor da construção (MORRIS & PEHNT, 2015).

O fortalecimento de economias locais por meio da adoção de energias renováveis também pode favorecer mudanças positivas no comportamento da comunidade, que tende a se organizar melhor visando alcançar objetivos para o bem comum. Outro exemplo que também já vem acontecendo na Alemanha é o surgimento de centenas de cooperativas de energia, em que os cidadãos se reúnem para investir coletivamente em energias renováveis e em ações de eficiência energética. Além de inúmeros projetos de usinas, redes de transmissões locais também estão sendo compradas de grandes operadoras para que as comunidades possam ter mais controle de suas próprias redes. O crescimento do número de cooperativas de energia nos últimos anos na Alemanha é notório sendo que, em 2015, chegou a 1000 cooperativas criadas (MORRIS & PENTH, 2015).

Outro aspecto importante da transição energética é a promoção da igualdade social, em especial, por meio da eficiência energética, que não só ajuda a melhorar o PIB do país, mas

também pode contribuir para facilitar o acesso à energia da população mais carente. A alta dos preços dificulta a compra de energia, tornando isso um problema, uma vez que o impacto sobressai em sua maioria em famílias de baixa renda, já que, em média, eles gastam uma parcela maior de sua renda em necessidades de energia e são os menos propensos a ser capaz de bancar os investimentos em eficiência energética, tais como obras de renovação de energia, eletrodomésticos eficientes e veículos mais eficientes.

No longo prazo, o custo da energia renovável permanecerá estável (não há custos de combustível para a energia eólica ou solar, e os custos com instalação continuarão a cair), ao passo que o custo do combustível fóssil e nuclear continuará a flutuar; por isso a transição energética em si é uma contribuição para o aumento da igualdade social ao ajudar a promover o acesso universal à energia (IRENA, 2018c).

#### 2.1.2.6 Redução e Eliminação de Riscos de Fontes Impactantes ao Meio Ambiente

Os impactos ambientais gerados pela produção de energia consistem em um sério problema para o desenvolvimento sustentável, e por isso é necessário conhecê-los para se fazer uma análise de instalação e planejamento energético ambientalmente correto. A crescente preocupação em relação aos impactos ambientais vem da conscientização de que é preciso preservar os recursos naturais para que a existência de vida na terra seja possível por um período prolongado de tempo (AGORA, 2015)

É consenso que para manter os padrões de qualidade de vida nos dias de hoje o homem precisa de energia, e por isso ele precisa encontrar meios de produzi-la de forma a minimizar os impactos ao meio ambiente, que é o maior gerador de recursos naturais, e por isso vital à nossa sobrevivência e dos ecossistemas.

O Setor Elétrico Brasileiro é constituído por um sistema basicamente hidrotérmico que, historicamente, vem sendo suprido, predominantemente, por empreendimentos hidrelétricos. No que tange às termelétricas, a principal consequência ambiental associada a essa geração são as emissões de GEE e poluentes, advindo principalmente da queima de combustíveis fósseis, e que causam impactos como o aquecimento global, aumento do nível do mar, chuva ácida, dentre outros.

Já as hidrelétricas, por muito tempo consideradas como uma fonte limpa e pouco impactante do ponto de vista ambiental, hoje induz uma percepção diferente. As construções de represas impactam significativamente o meio ambiente, uma vez que provocam alagamentos em áreas de grandes matas, interferem no percurso de rios, prejudicam tanto fauna quanto a

flora, e ainda interferem na ocupação humana. Também, as vegetações inundadas, quando em decomposição, liberam gás metano, um dos gases responsáveis pelo efeito estufa.

Promover a transição gradual para fontes de energia renovável como eólica e solar, que possuem impactos ambientais de pequenas proporções associados a elas, é atuar efetivamente no combate às mudanças climáticas e na garantia da existência de recursos naturais na Terra.

## **2.2 Principais Transições Energéticas no Mundo**

Neste tópico serão abordadas as transições energéticas de países que já estão com a temática consolidada e respaldada por suportes legislativos, e por fim será retratada a política energética do Brasil e de Minas Gerais e suas interfaces com a Transição Energética Atual.

### **2.2.1 Transição Energética Alemã**

As estratégias para realização da transição energética alemã foram iniciadas nos anos 1970, retomadas com mais força nos anos 1990, e novamente em 2010, quando a política em si começou a tomar forma. Isso se deu principalmente por um consenso geral de que uma política de longo prazo para diversificação da matriz elétrica era crucial para a manutenção da segurança energética alemã.

Historicamente, o sistema elétrico alemão era suprido basicamente por carvão mineral, que representava em torno de 80% da geração de eletricidade em 1960. Em 1970, a crise do petróleo levou a Alemanha e outros países europeus a adotarem novas políticas para promover a eficiência energética, diversificar a grade elétrica, e incentivar pesquisas para o desenvolvimento das fontes de energias renováveis.

No final da década de 80, outro problema se tornou essencial para formulação das políticas energéticas: a mudança climática. A população novamente se posicionou pela a necessidade do enfrentamento e combate à essa, sendo o sistema elétrico o principal alvo de mitigação dos gases de efeito estufa.

A transição energética alemã surge então como a resposta aos problemas enfrentados, sendo essa uma estratégia de longo prazo para promoção de um sistema energético de baixo carbono, baseado no desenvolvimento de energias renováveis e aumento da eficiência energética. Na Alemanha, a transição energética é uma política integrada que abrange todos os setores da economia alemã e que possui quatro objetivos principais: lutar contra as mudanças

climáticas, por meio da redução da emissão de gases de efeito estufa; desligar todas as usinas nucleares do país; aumentar a segurança energética, reduzindo a importação de combustíveis fósseis e garantir competitividade e crescimento da economia ao promover políticas específicas para o setor industrial, desenvolvimento de tecnologias e geração de empregos (AGORA 2015).

A transição energética alemã é uma política ambiciosa de médio e longo prazo com pretensão de ter os seus objetivos alcançados até 2050. na Tabela 1 são mostradas as metas alcançadas em 2017 e o escalonamento até 2050.

Tabela 1: Política transição energética alemã – metas presentes e futuras

		Status quo (2017)	2020	2025	2030	2035	2040	2050
<b>Emissões de GEE</b>	Redução da emissão de CO <sub>2</sub> em todos os setores comparada aos níveis de 1990	-27,7%	-40%		-55%		-70%	-80-95%
	<b>Desligamento das Usinas Nucleares</b>	Desligamento gradual de todas usinas nucleares até 2022	12 unidades desligadas	Desligamento gradual das remanescentes 7 usinas nucleares até 2022				
<b>Energias Renováveis</b>	Participação no consumo final de energia	14,8%	18%		30%		45%	min. 60%
	Participação no consumo final de energia elétrica	38,2%		40-45%		55-60%		min.80%
<b>Eficiência Energética</b>	Redução consumo de energia primária comparada aos níveis de 2008	-6,5%	-20%					-50%
	Redução consumo de energia elétrica comparada aos níveis de 2008	-3,6%	-10%					-25%

Fonte: Adaptado AGORA, 2015 e CHVANOVA, 2019.

As emissões de CO<sub>2</sub> foram reduzidas em 27,7% em 2017; tomando como base o ano de 1990, pretende-se que esse número seja de 55% em 2030, e que em 2050 o total de emissões seja reduzido entre 80 a 95%. Em 2018, já haviam sido desligadas 12 centrais

nucleares e espera-se que até 2022 os 7 reatores remanescentes também sejam desligados. Em 2017 as energias renováveis representaram uma parcela 14,8% do consumo de energia final do país, e espera-se que em 2030 esse valor passe para 30% e em 2050 alcance o mínimo de 60%. Já no que tange à matriz elétrica do país, a participação das renováveis é ainda mais expressiva, sendo que em 2017 elas já representavam 28,2% da geração, e espera-se que já em 2025 esse número salte para entre 40-45% e em 2050 a participação mínima seja de 80%. Em relação à eficiência energética, espera-se uma redução no consumo de energia primária de 50%, e de 25% no consumo de eletricidade até 2050.

### 2.2.1.1 Energias Renováveis como Protagonistas da Transição Energética Alemã

As energias renováveis, especialmente a eólica e a solar, têm experimentado um desenvolvimento tecnológico intensivo e uma significativa redução de custos nas últimas duas décadas. Isso fez com que a Alemanha apostasse fortemente nessas duas principais fontes para resguardarem sua matriz energética. Em 2014, a energia eólica já era uma tecnologia madura e estabelecida no mercado, com uma capacidade instalada na Alemanha de 38 GW, na Europa de 137 GW, e no mundo todo ela já alcança os 370 GW. A solar fotovoltaica, ainda que não tão madura quanto a eólica, já apresentava consideráveis contrações de custos desde 2006, e nesse período até 2014, os custos caíram em torno de 70%, principalmente, devido ao aumento do desenvolvimento da tecnologia e da consolidação global desse mercado (AGORA, 2015). Em todo mundo a capacidade instalada de usinas fotovoltaicas equivale a 480 GW (IRENA, 2018d).

A Alemanha conseguiu que, nos dias de hoje, usinas eólicas *onshore* (operadas na terra) e usinas fotovoltaicas sejam competitivas, em termos de custos nivelados de geração de eletricidade, com as outras fontes convencionais existentes no país. Ainda, é esperado que os custos decaiam ainda mais, principalmente para solar fotovoltaica, com um custo estimado de 5.5 até 8 euros por cada quilowatt-hora em 2025. Na Figura 2 é mostrada a relação de custos nivelados<sup>3</sup> e custos totais por quilowatt-hora dos principais energéticos do país e os custos da geração nuclear e a carvão internacionalmente. Como pode ser observado, as tecnologias fotovoltaica e eólica possuem custos competitivos em relação às tecnologias convencionais empregadas no setor elétrico.

---

<sup>3</sup> É calculado contabilizando todos os custos esperados ao longo da vida de uma usina, incluindo construção, financiamento, combustível, manutenção, impostos, seguros, incentivos e inflação. O valor total é dividido pela potência (kWh) que será produzida durante a vida útil do sistema (<http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/glossario/lcoe>).



Figura 2 Custos nivelados da produção de eletricidade na Alemanha  
 Fonte: Apatado AGORA, 2015

#### 2.2.1.2 Custos e Benefícios da Transição Energética Alemã

Conforme o relatório AGORA, 2015, a transição energética alemã é tida como um processo socioeconômico de transformação e é um importante programa de investimento, que objetiva crescimento e inovação dos novos setores de uma economia de baixo carbono, que são as energias renováveis, eficiência energética, novos serviços de energia e transportes alternativos.

Até o ano de 2014, a Alemanha investiu cerca de 220 bilhões de euros em energias renováveis. Na próxima década, é esperado que os investimentos no setor energético sejam da ordem de 15 bilhões de euros por ano; desses, em torno de 10 bilhões serão para aumentar a capacidade da geração por meio de energias renováveis. Esses investimentos contribuem para o desenvolvimento efetivo dos chamados setores “verdes” alemães.

Em se tratando dos benefícios, a transição energética alemã tem impacto positivo na estrutura de emprego do setor de energia do país. Em 2013, somente a indústria de energias renováveis gerou aproximadamente 370 mil empregos, o dobro quando comparado a 2004, sendo que o setor de energia eólica é o que mais contrata, seguido pela biomassa em segundo, e pelo solar fotovoltaico em terceiro.

Dada a sua natureza transformadora, a transição energética também impacta outros setores da economia alemã. O desenvolvimento da energia renovável e eficiência energética tem preterido os setores de energia convencionais, nesse caso, o carvão e a nuclear, e por isso criado alguns efeitos negativos sobre os seus investimentos e sua estrutura de empregos. Apesar do aumento

dos custos de energia relacionados ao desenvolvimento das energias renováveis ter sido moderado, observou-se uma redução no poder de compra de certos consumidores alemães e de negócios, com exceção de indústrias energointensivas, que os levaram a diminuir seus gastos e investimentos. Este efeito é parcialmente compensado por uma redução da importação líquida de combustíveis fósseis e pelo desenvolvimento de novas exportações de bens manufaturados. A combinação destes três efeitos tem impactos diretos e indiretos sobre a estrutura do emprego nacional. Entretanto, um estudo, encomendado pelo Ministério da Economia Alemã, aponta um resultado líquido do impacto da transição energética no emprego como moderadamente positivo, com um aumento líquido anual de 18.000 postos de trabalho até 2020, quando comparado a um cenário sem a transição energética.

Distribuir os custos e os benefícios da transição energética de uma forma justa e transparente é um dos principais tópicos do debate da política energética na Alemanha. Dessa forma, diferentes grupos de consumidores, como residências, comércio e indústria, pagam também diferentes preços de eletricidade, dependendo do seu nível de consumo e localização. Geralmente, quanto maior o consumo, menor o valor pago pela energia elétrica.

Em 2013, foram investidos um total de 23,6 bilhões de euros no projeto de transição energética; desses, o setor residencial arcou com uma fatia de 8,3 bilhões de euros, ainda que o seu consumo equivalha a apenas um quarto do total do consumo nacional. Já o setor de negócios contribuiu com quase a metade dos custos, 11,8 bilhões de euros, incluindo 7,4 bilhões de euros pagos pela indústria, que ainda que essa seja responsável por 40% do consumo total, pagou menos de um terço do custo. O restante dos custos foi arcado pelo setor terciário.

### 2.2.1.3 Coordenação da Transição Energética Alemã

A transição energética é uma tarefa nacional que envolve todos os cidadãos e que afeta todos os níveis de formulação de políticas públicas. Pensando assim, a coordenação da *Energiewende* envolve não só o governo federal, mas como também todos os governos estaduais, atores dos diversos negócios existentes no país, bem como toda sociedade, para que assim seja possível transformar de forma eficaz o fornecimento energético do país.

Para uma coordenação melhor junto com o governo federal, competências relacionadas à política energética estão sendo reunidas em um novo Ministério de Assuntos Econômicos e Energia. O objetivo dessa reformulação é evitar perdas por atritos, consolidar uma política energética de apenas fontes renováveis, e oferecer a vantagem de ser capaz de cobrir o mercado de energia em sua totalidade.

O governo federal e os estados alemães estão coordenando a implementação da transição energética em uma base contínua. São realizadas reuniões semestrais entre a Chanceler, o Ministro de Assuntos Econômicos e Energia, e os governadores do país, a fim de discutir a situação da implementação da transição energética e de estabelecer suas prioridades e os próximos passos.

Embora a reunião entre os chefes de estados seja feita apenas semestralmente, o Ministério de Assuntos Econômicos e Energia troca informações constantemente com os representantes dos estados alemães, setor comercial e indústria, sociedade, e academia por meio de plataformas sobre a transição energética. Ao todo, são cinco plataformas (Redes Elétricas, Mercado de Energia Elétrica, Eficiência Energética, Transição Energética: Edifícios, Pesquisa e Inovação) que facilitam o desenvolvimento de soluções e de estratégias para formulação de ações chaves do campo de transição energética (BMW, 2015).

#### 2.2.1.4 Suporte Legislativo da Transição Energética Alemã

A política energética alemã se apoia no “Conceito de Energia de 28 de Setembro de 2010”, em que o governo federal definiu orientações para garantia de um fornecimento de energia ambientalmente saudável, confiável e acessível, mapeando assim, a transição para a era das energias renováveis. A partir desse conceito foram criadas leis, diretrizes e regulamentos específicos para promoção da transição energética nos variados setores da economia alemã, como comércio, indústria, residências e serviços públicos (BMW, 2011).

Dentre esses, um dos principais atos legislativos que suporta a transição energética alemã é a “Lei sobre o Desenvolvimento das Fontes de Energias Renováveis”. A lei possui três objetivos básicos. O primeiro é permitir que o fornecimento de energia seja desenvolvido de uma maneira sustentável, com particular interesse na mitigação às mudanças climáticas e proteção ao meio ambiente, na redução de custos para economia, na conservação de recursos energéticos de origem fóssil, e na promoção do desenvolvimento de tecnologias para gerar eletricidade a partir de fontes de energias renováveis. Já o segundo, em ordem de atender o objetivo do primeiro, planeja aumentar a quota de eletricidade gerada a partir de fontes de energia renovável para, ao menos, 80% do consumo final de eletricidade até 2050, de uma forma estável e eficiente em termos de custos. Para este fim, a participação é fixada em 40 - 45% até o ano de 2025 e 55 - 60 até o ano de 2035. Por fim, o terceiro objetivo também consiste em aumentar a participação de energias renováveis em termos de consumo final bruto de energia global em 18% até 2020.

## 2.2.2 Transição Energética na França

Assim como Alemanha, a França também deu os primeiros passos para realização de uma transição energética no país, que é suportada pela recém-criada “Lei de Transição Energética para o Crescimento Verde”, de 2015, e pelo seu respectivo plano de ação. Tanto a lei quanto o plano, foram projetados para dar à França as ferramentas necessárias para contribuir ainda mais com o combate às mudanças climáticas, enquanto reforçam a sua independência energética, por meio da diversificação de sua matriz energética (FRANCE, 2015).

A lei baseia-se nas conclusões do debate nacional das partes interessadas sobre a transição energética realizada entre 2012 e 2013, que tinha o objetivo de construir uma estratégia global para a transição energética, a partir dos desafios estruturais que a França enfrenta para construir um sistema energético sustentável.

Apresentada pela então Ministra de Energia, Ségolène Royal, como o projeto de lei mais ambicioso para tornar “verde” a economia francesa, a lei permite que cidadãos, empresas e regiões tomem medidas concretas em ordem de:

- Aumentar o poder de compra das famílias, reduzindo a conta de energia;
- Proteger o planeta e a saúde pública;
- Aproveitar as oportunidades do crescimento verde, proporcionando uma vantagem competitiva para a indústria de hoje e para as indústrias de ponta do futuro e, ao mesmo tempo, garantir postos de trabalho na França e a contínua melhoria da qualidade de vida.

A lei estabelece os principais objetivos deste novo modelo energético e mobiliza os recursos necessários para alcançá-los. Adicionalmente, determina uma estratégia para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>, conhecida como estratégia de baixo carbono, na forma de um plano de energia de longo prazo, que indica as condições em que devem ser alcançados os objetivos da lei (FRANCE, 2015).

### 2.2.2.1 Metas da Transição Energética Francesa

A transição energética francesa é um plano para a era pós-petróleo e um passo rumo a um novo modelo energético francês, que será mais forte e mais sustentável em ordem de

responder aos desafios chaves do fornecimento de energia, às flutuações no preço de energia, ao esgotamento de recursos e aos requisitos de proteção ambiental.

As metas da transição energética francesa são organizadas em um quadro que prevê as ações conjuntas de cidadãos, empresas, territórios e do Estado, pelo estabelecimento de objetivos de médio e longo prazo:

- Redução de 40% das emissões de gases de efeito de estufa até 2030, em comparação com 1990, e de 75% até 2050.
- Reduzir o consumo final de energia em 50% até 2050, em comparação a 2012;
- Redução de 30% no consumo de combustíveis fósseis até 2030, em comparação a 2012;
- Aumentar a quota de fontes de energia renováveis para 32% no consumo final de energia até 2030, e para 40% da produção de eletricidade;
- Redução de 50% de resíduos de aterro até 2025;
- Diversificar a produção de energia elétrica e reduzir a quota de energia nuclear para 50% até 2025.

Em adição, pretende-se que o projeto de transição promova o crescimento econômico sustentável e a criação de postos de trabalhos verdes. Estima-se que no curto prazo sejam criados 100.000 novos empregos, incluindo 75.000 na renovação do setor de energia, e que no médio prazo, até 2030, esse número cresça para 200.000 postos de trabalhos. Os esforços a serem feitos devem aumentar o PIB em 0,8% em 2020 e 1,5% em 2030.

No que tange à estratégia de baixo carbono, a lei determina as bases para a redução das emissões nacionais de gases de efeito estufa e as metas de redução de GEE de médio e longo prazo. Para tanto, as metas são definidas da seguinte forma: 29% de redução das emissões de GEE nos transportes, 54% na construção, 12% na agricultura, 24% na indústria, 33% nos resíduos. Em relação ao setor de energia, a meta é bastante ambiciosa, uma vez que prevê uma redução de 96% dos GEE na produção de energia até 2050 (FRANCE, 2015).

#### 2.2.2.2 Financiamento de projetos

Para reduzir as emissões de carbono, o financiamento de projetos públicos agora deve levar em conta os impactos desses projetos em termos de emissões, bem como a inclusão dos cálculos de emissões diretas e indiretas causadas por uma atividade ou território nos balanços de emissões de GEE para serem igualmente incentivados. Os cidadãos, por sua vez,

estão cientes do impacto de suas escolhas de consumo, podendo tomar decisões fundamentadas em aspectos de sustentabilidade. E por fim, os investimentos serão direcionados para projetos que estão envolvidos na transição energética (FRANCE, 2015).

### **2.2.3 Transição Energética no Brasil e em Minas Gerais**

O Brasil, quando comparado com outros países que possuem matrizes energéticas intensivas em combustíveis fósseis, possui um perfil energético bem diferente. Segundo o último balanço de energia do Brasil (EPE, 2018), em 2015, a matriz energética do país é composta por 58,1% de combustíveis fósseis, e os 42,9% restantes são oriundos de fontes renováveis, das quais as fontes hídrica, lenha e produtos da cana-de-açúcar representam 37% desse montante. Outras renováveis, como eólica e solar, possuem participação praticamente inexpressiva, alcançando uma ordem de 5% do total da produção de energia primária nacional.

Um pouco diferente do cenário nacional, o balanço energético do estado de Minas Gerais (CEMIG, 2018), para o mesmo período, revela que do total da demanda energética estadual, 52,7% referiram-se a fontes de energia renováveis e o restante a fontes não renováveis. Os derivados da cana-de-açúcar representaram 36,1% da demanda de energias renováveis.

O cenário energético atual encontra-se distante do cenário futuro almejado pela NDC brasileira, que prevê um suprimento energético total de 30% advindo de fontes de energia renovável até 2030, excetuando-se a hídrica, bem como expandir o uso das fontes eólica, solar e biomassa no fornecimento de energia elétrica para uma participação de 23% para o mesmo período (BRASIL, 2015).

A exemplo de outros países que já engajam políticas públicas para combater as mudanças climáticas e promover uma transição energética para uma matriz mais “verde”, na esfera federal brasileira nota-se a ausência de um plano efetivo para consecução das metas do Acordo de Paris. As ações para o fomento das fontes de energias renováveis concentram-se basicamente em programas como o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica - PROINFA (ANEEL, 2015a), o Plano Nacional de Eficiência Energética (MME, 2011) e o RENOVA BIO (MME, 2017). O primeiro possui ações para o fomento das fontes de energias renováveis, que abrange a eólica e a solar; o segundo possui premissas e diretrizes para aumento da eficiência energética na matriz energética brasileira; já o último é um programa que prevê incentivos para os biocombustíveis. No contexto estadual, Minas Gerais possui como estratégia o Plano Estadual de Energia e Mudanças Climáticas – PEMC (FEAM, 2015) e o Programa Mineiro de Energia Renovável (ALMG, 2013), que abordam ações para o

desenvolvimento de energias renováveis e eficiência energética. Ainda, o Decreto nº 47.231, de 4 de agosto de 2017 estabelece isenção do ICMS para mini e microgeração a partir de fontes renováveis de energia.

No que tange a regulamentação do setor energético no Brasil, principalmente o setor elétrico, as competências se concentram basicamente no âmbito federal, sendo o Ministério de Minas e Energia – MME, Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP, a Empresa de Pesquisa Energética – EPE, o Conselho Nacional de Política Energética e o Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS os principais responsáveis pelo planejamento estratégico e formulação de políticas públicas do setor de energia. Estados e municípios não possuem autonomia para legislar em termos de geração, distribuição, transmissão e comercialização de energia, sendo essa competência direta, mas não exclusiva, da ANEEL (ANEEL, 2015b).

#### **2.2.4 Competências legais à nível regional e local**

A descentralização das competências relacionada à energia tem sido observada em diversos países ao redor do mundo. Governos à níveis regional e local têm se mobilizado para construir suas próprias políticas energéticas, almejando uma economia mais sustentável e de baixo carbono. Como exemplo disso, podemos citar a iniciativa *The Climate Group*, que reúne entes subnacionais de diversas partes do globo com objetivo de criar e compartilhar modelos de políticas para transição energética a nível local e regional; entre os seus membros, os governos subnacionais de North Rhine-Westphalia - NRW, na Alemanha, Hauts-de-France e Califórnia se destacam por possuírem suas próprias políticas de transição energética, de forma consolidada e em implementação (ETP, 2016a).

O estado de North Rhine-Westphalia desempenha um papel importante no contexto energético da Alemanha, uma vez que é responsável por grande parte da produção industrial e de energia do país, e conseqüentemente, o estado que apresenta o maior consumo energético. Dada as suas atividades econômicas, a transição para uma economia de baixo carbono é um grande desafio para a região de NRW. Dessa maneira, o governo do estado desenvolveu uma série de políticas, programas e ferramentas para alcançar seus objetivos de migração para uma matriz energética e economia mais sustentáveis (ETP, 2016a). Entre esses podemos citar:

- Reduzir as emissões de GEE em pelo menos 25% até 2020 e pelo menos 80% até 2050, em comparação com os níveis de 1990;

- Aumentar a proporção de eletricidade gerada pela energia eólica para pelo menos 15% até 2020;

As metas são subsidiadas principalmente pelo Programa de Proteção Climática de NRW e por um decreto sobre energia eólica, que possuem ações para mitigação e adaptação às mudanças climáticas, bem como para expansão de usinas eólicas. Em 2013, foi publicada a Lei Estadual de Proteção Climática, que é o principal arcabouço legal para transição energética do estado (ETP, 2016a).

A região de Hauts-de-France, na França, é também uma região que representa um dos maiores consumos energéticos do país, devido ao seu background industrial e sua intensiva malha rodoviária. Atualmente, a região supre suas necessidades energéticas basicamente por meio da geração nuclear e a participação das renováveis na matriz regional é apenas de 3,7%, que é bastante inferior aos 19% da matriz nacional (ETP, 2016b).

Rumo a uma transição energética própria, a região lançou em 2013 o Master Plano da Terceira Revolução Industrial, que prevê ações que incluem uma mudança para fontes de energia renováveis, reformas em grande escala de edifícios, planejamento de armazenamento de energia, desenvolvimento de redes inteligentes e expansão de transportes mais limpos. Além disso, a Hauts-de-France conta com uma Estratégia Climática Regional organizada em 4 pilares (ETP, 2016b):

- Melhorias de modos de vida e métodos de produção;
- Continuação da transição energética;
- Integração de ações de mitigação e adaptação no planejamento territorial e
- Governança aprimorada e participação de atores locais.

Já a Califórnia tem liderado não só os Estados Unidos, mas o mundo, em termos de produção de energias renováveis. Em 2014, 25% da matriz energética do estado era suprida por fontes renováveis, das quais eólica e solar representavam um montante de 58%. Em 2015, a publicação da Lei Energia Limpa e Redução da Poluição reforçou a já existente estratégia para atingir seus objetivos ambiciosos de clima e energia mais limpos (ETP, 2016c). A Lei prevê:

- Os fornecedores de energia e eletricidade devem adquirir pelo menos 50% do seu abastecimento de recursos energéticos por meio de fontes renováveis elegíveis até 2030;
- Metas devem ser desenvolvidas para cada fornecedora de energia elétrica e de gás natural para conseguir uma duplicação cumulativa de economia de energia em todo o estado e em todos os usos finais de energia até 2030;

- Transição para veículos mais limpos e de emissão zero e
- Promover a criação de um sistema elétrico integrado regional, onde o influxo intermitente de recursos de energia renovável seja gerenciado eficientemente, de forma a equilibrar melhor excedentes e escassez.

No Brasil, as projeções de cenários energéticos realizadas pelo Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações - MCTIC mostram que em um *Business as Usual*, ou seja, em que não se prevê nenhuma medida adicional, o consumo de energia primária no país aumentará em torno de 40% em 2030, comparado ao ano base de 2010 (MCTIC, 2017). Já na esfera estadual, as projeções apontam que para o mesmo período é esperado um aumento da ordem de 75% (FEAM, 2016). As políticas nacionais e estaduais aqui apresentadas, não possuem metas e ações específicas para modificarem esses possíveis cenários.

A transição energética está fundamentalmente ligada à questão geográfica, moldada por uma série de fatores espaciais que incluem a localização dos recursos energéticos, infraestrutura, padrões variáveis de consumo/oferta de energia e especificidades territoriais. A forma como matérias sociais, políticas e econômicas são organizadas no espaço territorial impacta diretamente o desenho e a governança do processo de transição energética. Nesse sentido, provisões legislativas referentes à regulamentação do setor energético, criação de políticas públicas e de incentivos econômicos deveriam ser compartilhadas com os níveis subnacional e local da administração pública. De fato, a descentralização das competências é primordial para construir a governança energética e envidar os esforços na luta contra as mudanças climáticas almejando a descarbonização e segurança dos sistemas energéticos (MUIZNER e ELLIS, 2017).

### **2.3 Perfil e Potencial Energético de Minas Gerais**

Em 2016, a demanda energética primária do estado de Minas Gerais foi da ordem de 35 Mtep. Esse montante representa cerca de 12,1% da demanda total de energia primária do Brasil. Entre os anos de 1978 e 2016, a demanda estadual cresceu a uma taxa média de 2,1% ao ano. No que tange à importação, o estado importou cerca de 61% da sua demanda total; esse valor se deve principalmente à importação de petróleo e seus derivados, bem como de carvão mineral. Em termos de composição da demanda, as energias renováveis possuem participação expressiva, com destaque para a fonte hidráulica e os derivados da cana-de-açúcar (CEMIG, 2018). A Figura 3 fornece um panorama da demanda por fonte e por setor.

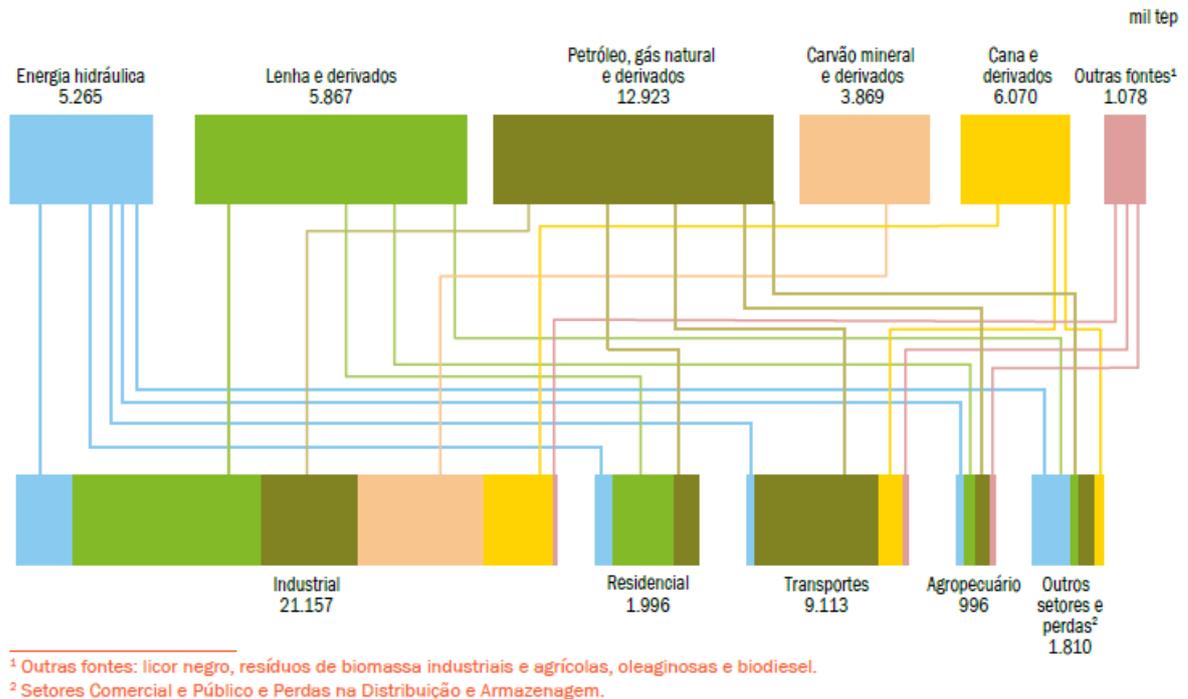


Figura 3: Demanda de energia por fonte e por setor em mil tep.<sup>4</sup>  
Fonte: CEMIG, 2018

O setor industrial é o que possui a participação mais expressiva, em torno de 60% do total da demanda, consumindo majoritariamente lenhas e derivados, derivados de petróleo e carvão mineral. Já o segundo maior consumidor, é setor de transportes, com 25%, em que os energéticos mais consumidos são os derivados de petróleo.

A Figura 3 mostra que as fontes hidráulica e biomassa, essa última aqui representada pela cana-de-açúcar e lenha e derivados, possuem uma representatividade importante no sistema energético de Minas Gerais, podendo considerar que essas fontes estão suficientemente desenvolvidas no estado. As fontes solar e eólica, possuem praticamente nenhuma expressividade dentro do sistema.

### 2.3.1 Potencial de Energia Solar no Estado de Minas Gerais

Em 2016, a CEMIG publicou o Atlas Solarimétrico de Minas Gerais Volume II, em que analisou o potencial energético do estado no que tange a radiação solar incidente no território mineiro. O principal objetivo foi avaliar o desenvolvimento de projetos que visem o aproveitamento desse recurso natural.

<sup>4</sup> Considera o setor energético.

O estudo revelou que a radiação em Minas varia de 4,5 e 6,5 kWh/m<sup>2</sup>/dia. A faixa de valores máximos está concentrada na região Norte de Minas Gerais e os mínimos na região Sudeste, que coincide com áreas de maior altitude (Serra do Caparaó e Mantiqueira) onde o regime pluviométrico é mais intenso, com uma média total anual de precipitação superior a 1.400 mm.

Os maiores índices de radiação estão concentrados em uma pequena área da região Noroeste, ao norte da cidade Januária, como pode ser observado na Figura 4. Ainda, valores significativos da ordem de 6,0 a 7,0 kWh/m<sup>2</sup>/dia, ocorrem em uma área considerável localizada acima da latitude 18°, que corresponde à metade superior do estado.

As 6 microrregiões com as maiores incidências de radiação solar correspondem às áreas dos municípios de Januária, Janaúba, Montes Claros, Pirapora, Ituiutaba e Unaí, com média anual entre 5,4 e 5,7 kWh/m<sup>2</sup>/dia.

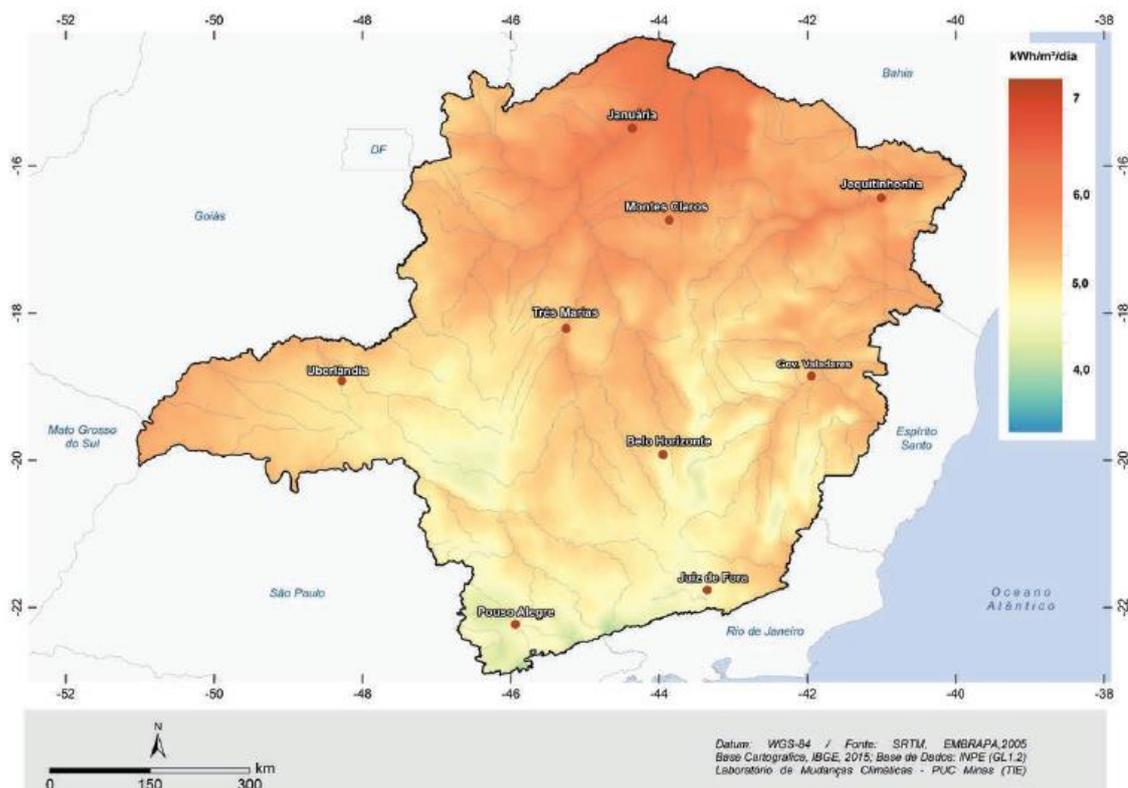


Figura 4: Radiação Solar Média Anual de Minas Gerais  
Fonte: CEMIG, 2016

### 2.3.1.1 Estimativa de Geração Fotovoltaica

No que tange à geração fotovoltaica, o Atlas Solarimétrico apresenta uma estimativa de geração para o estado baseada no potencial de radiação. O estudo considerou as

12 mesorregiões do estado de Minas Gerais estabelecidas pelo IBGE. Os resultados estão na Tabela 2, que apresenta os valores para Energia Específica (EE) e para Taxa de Performance – PR (Performance Ratio, em inglês ). A Figura 5, consiste no mapa do estado dividido pelas mesorregiões estudadas.

A mesorregião do Norte de Minas é a que possui maior viabilidade para tecnologias de aproveitamento da energia solar, uma vez que apresenta médias anuais de 1489 kWh/kWp e um PR de 0,8, sendo uma área de grande interesse para implantação de empreendimentos de energia fotovoltaica. Essa região contempla as cidades de Jaíba e Janaúba, que possuem valores médios energéticos próximos aos melhores valores do Brasil, como a cidade de Petrolina, em Pernambuco, com EE anual 1574 kWh/kWp e PR igual a 0,81; Caetité, na Bahia, EE anual 1569 kWh/kWp e PR igual a 0,80, e Tauá no Ceará, EE anual 1646 kWh/kWp e PR igual a 0,817.

Embora a mesoregião da Zona Mata tenha ficado na última colocação quando comparada no âmbito estadual, ela possui um ótimo aproveitamento quando compara com outras regiões/cidades do Brasil, como por exemplo Florianópolis, Santa Catarina, com EE anual média 1092 kWh/kWp e PR médio igual a 0,78, e Curitiba, Paraná, com EE anual média 1124 kWh/kWp e PR médio igual 0,77.

Tabela 2: EE e PR para as 12 mesorregiões estabelecidas pelo IBGE

Mesorregiões	Média Anual (kWh/kWp)	Média Anual - PR
Norte	1489	0,8
Noroeste	1469	0,8
Central de Minas	1407	0,8
Triângulo Mineiro	1400	0,8
Jequitinhonha	1364	0,79
Oeste	1341	0,79
Mucuri	1323	0,79
Metro BH	1322	0,79
Rio doce	1309	0,8
Sul/Sudoeste	1287	0,79
Campos das Vertentes	1279	0,78
Zona da Mata	1258	0,79
<b>Média Anual Estado MG</b>	<b>1354</b>	<b>0,79</b>

Fonte: Adaptado CEMIG, 2016

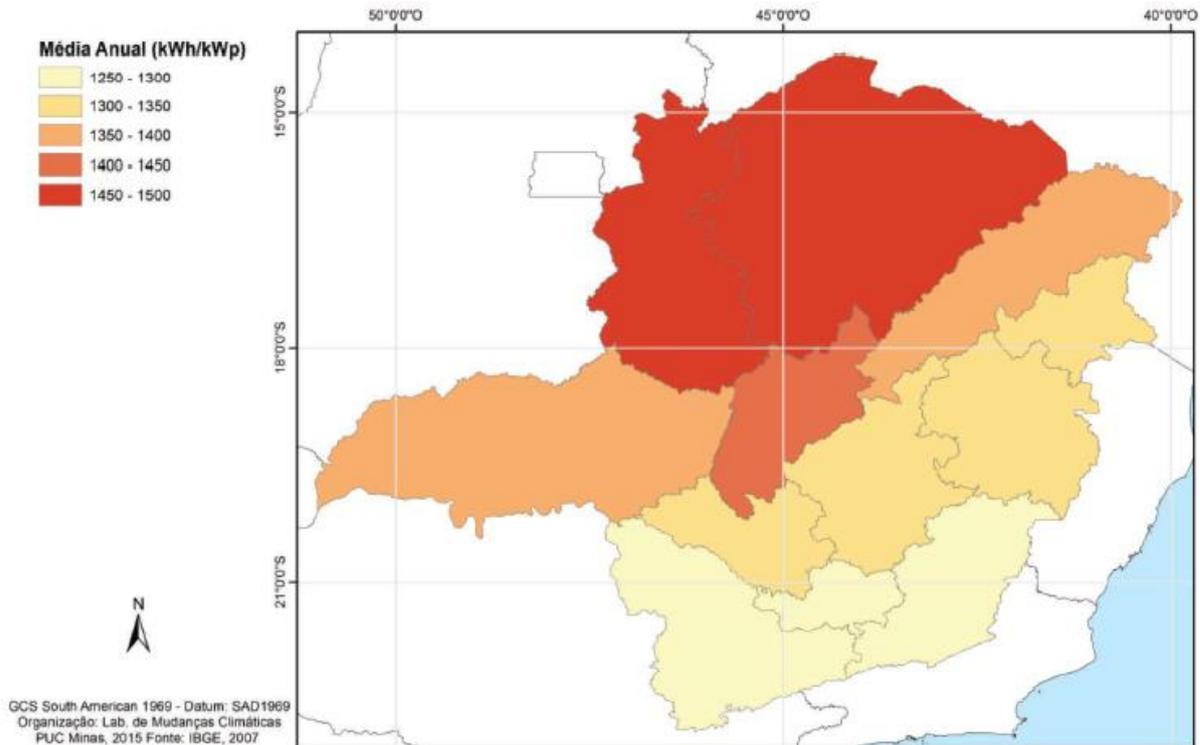


Figura 5: Média anual de radiação solar (KWh/KWp)  
Fonte: Cemig, 2016

Como pode ser observado pelo mapa da Figura 5, o maior potencial para o aproveitamento de tecnologias solares no estado está concentrado na metade superior do território, onde a média anual energética é da ordem de 1400 a 1500 KWh/KWp.

### 2.3.1 Potencial de Biomassa no Estado de Minas Gerais

A biomassa, termo empregado para o conjunto de matérias orgânicas que podem servir de fonte energia, possui um potencial relevante no Brasil, uma vez que o país conta com condições naturais privilegiadas para produção desses energéticos (CEMIG, 2017). Em que pesem, podemos citar:

- Grande extensão territorial, em que apenas 9% (76,6 milhões de ha) está ocupada por culturas anuais perenes e florestas plantadas, podendo ser disponibilizada ainda mais 12% (102 milhões de hectares) para cultivo de novas lavouras;
- Clima tropical com bons índices de precipitação e elevada radiação solar;

- Grande variedade de espécies nativas e exóticas com alto potencial para produção de biomassa energética como algodão, coco, amendoim, dendê, eucalipto, macaúba, girassol, mamona, cana-de-açúcar, etc.

A produção de energia por meio de biomassa apresenta uma significativa dependência espacial devido à grande diversidade edafoclimática do território brasileiro ligada a questão espacial. Isso quer dizer que a viabilidade econômica de usina está intrinsecamente atrelada a sua localização (CEMIG, 2017).

A localização geográfica de Minas Gerais corresponde a uma região do território brasileiro que apresenta condições termodinâmicas com diferentes regimes de chuva e radiação solar. Porém algumas regiões possuem uma excelente distribuição pluviométrica, o que faz do estado um dos principais produtores agropecuários do Brasil (CEMIG, 2017).

O Atlas da Biomassa de Minas Gerais compilou os principais potenciais de biomassa do estado, que foram agrupados nas seguintes categorias:

- Resíduos agrícolas, produzidos na colheita das lavouras e pelas indústrias agropecuárias;
- Resíduos florestais, basicamente indústria madeireira e exploração das florestas;
- Cultivo Energético, árvores e lavouras que são integralmente destinadas a produção de energia;
- Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).

O potencial de geração de energia elétrica por meio dessas categorias no estado foi de 2680 MW, o que corresponde a uma energia disponível de aproximadamente 21 milhões de MWh. A Tabela 3 apresenta as principais biomassas disponíveis no território mineiro e seus respectivos potenciais.

Tabela 3: Média do potencial e energia disponível para Minas Gerais

Fontes de biomassa	Produção	Unidade	Potencial Energético (MW)	Energia Disponível (MWh)	Nº Equivalente de Residências (150kWh.mês <sup>-1</sup> )
Café (casca)	1.458.062	Tonelada	42	345.846	192.136
Cana-de-açúcar (bagaço)	63.758.976	Tonelada	688	3.825.539	2.125.299
Cana-de-açúcar (vinhaça)	31.879.488	Tonelada	67	589.410	327.450
Milho (resíduos)	6.917.527	Tonelada	452	3.763.833	2.091.018
Soja (palha)	3.193.685	Tonelada	92	765.620	425.345
Resíduos de Madeira em Tora	11.662.395	m <sup>3</sup> madeira em tora	98	815.046	452.803
Efluentes Líquidos de Bovino	23.708.263	m <sup>3</sup> de metano	917	8.032.109	4.462.283
Efluentes Líquidos de Aves	116.353.651	m <sup>3</sup> de metano	120	1.054.737	585.965
Efluentes Líquidos de Suínos	5.091.824	m <sup>3</sup> de metano	82	715.426	397.459
Efluentes Líquidos de Domésticos	60.587.891	m <sup>3</sup> de metano	19	169.725	94.292
Resíduos Sólidos Urbanos	320.786.047	m <sup>3</sup> de metano	103	898.619	499.233
<b>Total</b>			<b>2.680</b>	<b>20.975.910</b>	<b>11.653.284</b>

Fonte: Adaptado CEMIG, 2017

As fontes de biomassa que representaram maior potencial energético foram efluentes bovinos, 917 MW, bagaço de cana-de-açúcar, 688 MW, e resíduos do milho com 452 MW. No que tange à distribuição desses potenciais por municípios, o mapa da Figura 6 apresenta os potenciais do estado; as cidades com maiores potenciais são Uberaba (118MW),

Uberlândia (59 MW) e Paracatu (53 MW). A região do triângulo mineiro é a que possui maior potencial quando comparada às demais, e isso se deve a indústria agropecuária fortemente desenvolvida nesse território.

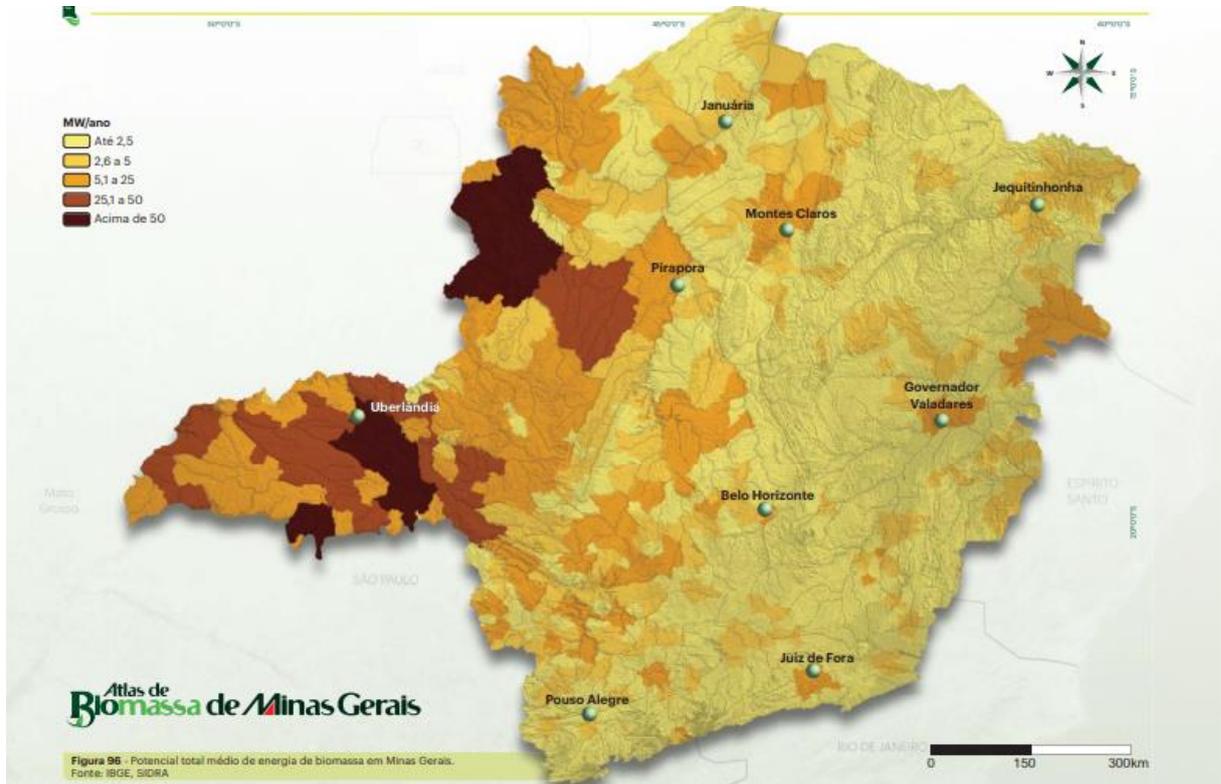


Figura 6: Potencial total médio de biomassa em Minas Gerais  
Fonte: CEMIG, 2017

Apesar da grande variedade de fontes de biomassa e de tecnologias de aproveitamento, a participação da biomassa como recurso renovável na matriz energética mineira e brasileira não é tão explorada em relação ao potencial existente, principalmente para a geração de energia elétrica (CEMIG, 2017).

### 2.3.2 Potencial de Energia Eólica no Estado de Minas Gerais

Nos dias atuais, um dos principais usos da energia eólica é para produção de energia elétrica por intermédio de sistemas descentralizados e grandes parques eólicos. A energia do vento é consistente em longos períodos, mas geralmente apresenta variações significativas em curtas escalas de tempo (FEAM, 2014a).

O estado de Minas Gerais não possui grandes empreendimentos de energia eólica, sendo o único parque localizado no Morro do Camelinho, no município de Gouveia, com uma

capacidade instalada de 1 MW. Esse parque é de origem experimental e foi o primeiro parque eólico ligado ao sistema elétrico integrado do Brasil em 1994 (FEAM, 2014a).

O estudo do potencial de energia eólica realizado pela CEMIG estimou que para torres com alturas de 50 m, 75 m e 100 m, existe um potencial de 10,6 GW, 24,7 GW e 39 GW, respectivamente, de potência instalada, com uma geração de 25,8 TWh/ano, 57,8 TWh/ano e 92,1 TWh/ano para áreas em que as velocidades médias anuais do vento são superiores a 7 m/s (CEMIG, 2010).

O estudo também identificou quatro áreas como favoráveis tecnicamente para instalação de empreendimentos eólicos, em que considerou três principais fatores restritivos para o desenvolvimento desses projetos:

- A proximidade dos parques eólicos aos principais centros de consumo de energia;
- A existência de infraestruturas de transporte;
- A proximidade das principais linhas de transmissão e distribuição elétrica.

As áreas escolhidas todas possuem velocidade do vento acima de 6 m/s, e são elas Janaúba e Grão Mogol; Montes Claros; Curvelo, Diamantina e Sete Lagoas; e o Triângulo Mineiro.

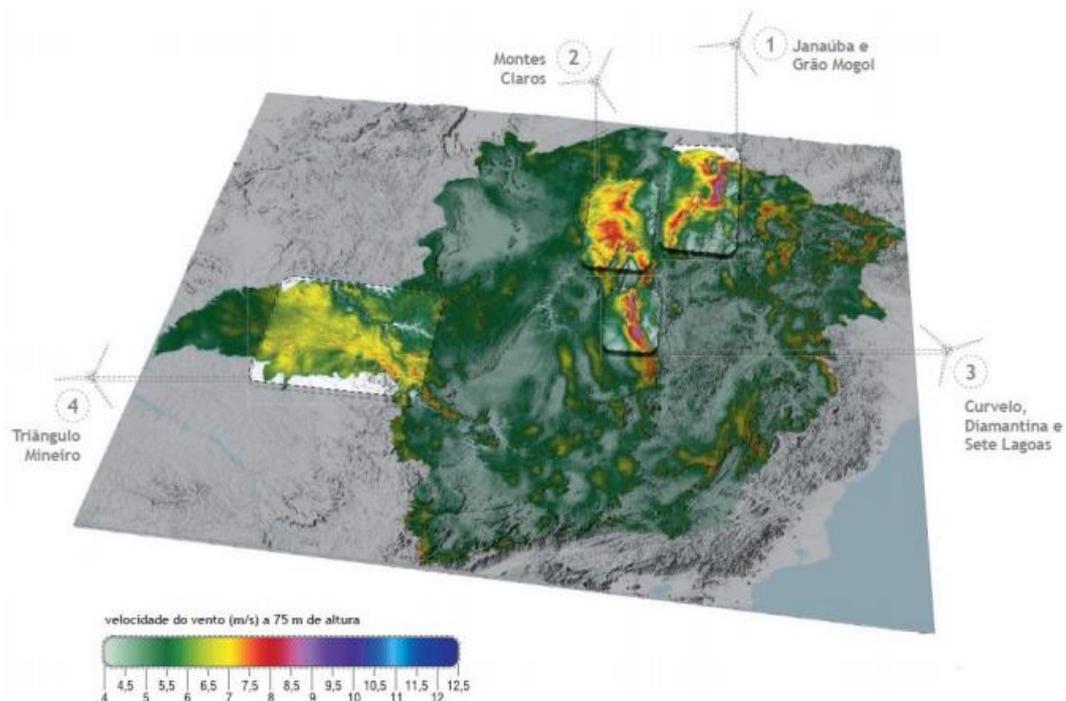


Figura 7: Áreas favoráveis para implantação de empreendimentos de energia eólica.  
Fonte: CEMIG, 2017

Em relação ao potencial econômico, os custos para geração elétrica por meio da fonte eólica caíram entre 30-40% desde 2009, com reduções tanto na instalação do empreendimento quanto no preço das turbinas eólicas (IRENA, 2018c). Em 2018, o Leilão de Geração 03/2018, empreendimentos eólicos tiveram o preço médio final de R\$ 90,45 / MWh (ANEEL, 2018), sendo a fonte mais competitiva do leilão.

Embora exista viabilidade econômica e técnica para instalação de empreendimentos eólicos no estado de Minas Gerais, de acordo com as previsões de expansão no Banco de Informações de Geração – BIG da ANEEL e do Plano Decenal de Expansão Energia – PDE 2027, não está prevista a construção de nenhum empreendimento dessa categoria no território mineiro. Esse fato se deve porque os investidores têm optado por áreas com maior potencial técnico, como o Sul e Nordeste do país, e porque Minas Gerais não tem tantos incentivos fiscais e econômicos quando comparado aos outros estados (FEAM, 2014a).

## **2.4 Ferramenta para modelagem de cenários e políticas energéticas**

Para analisar sistemas de energia com uma visão integrada sob um viés econômico e ambiental, a ferramenta LEAP (*Long-range Energy Alternatives Planning System*) tem sido empregada em vários estudos. Em Roiniot et al. (2012) o LEAP foi utilizado para modelar o sistema de energia da Grécia com o objetivo de construir cenários que refletissem a penetração de energias renováveis e suas implicações no médio-longo prazo. Da mesma forma, no trabalho de Park et al. (2013), é realizada a simulação de uma transição energética no setor elétrico da Coreia. Já em Emodi et al. (2017), o sistema é utilizado para avaliar a implementação de uma política para o desenvolvimento de baixo carbono na Nigéria.

O LEAP também pode ser utilizado para fazer análise em todas as esferas de administração, indo desde a modelagem para vários países até os níveis nacionais, subnacionais e local. Hu et al. (2019), por meio da ferramenta, criou cenários e políticas para subsidiar o desenvolvimento sustentável, depois de um longo período de industrialização, para cidade de Shenzhen na China.

### **2.4.1 Algoritmo do LEAP**

O modelo LEAP é baseado em um framework que é usado para calcular o consumo de energia, transformação e emissão de gases de efeito estufa. Os valores são inseridos no LEAP baseados nos dados requeridos por cada módulo.

### 2.4.1.1 Consumo de energia

Em Emodi et al. (2017) são apresentadas as equações que subsidiam o LEAP. O consumo total de energia final é calculado conforme a seguir:

$$EC_n = \sum_i \sum_j AL_{n,j,i} \times EI_{n,j,i} \quad (1)$$

Onde:

$EC$  = é o consumo de energia agregado para um determinado setor;

$AL$  = é o nível de atividade, que é uma medida da atividade econômica ou social para qual a energia é consumida;

$EI$  = Intensidade Energética, que é o consumo final de energia anual por unidade de nível de atividade.

$n, j, i = n$  é o tipo de combustível,  $j$  é o dispositivo de geração e  $i$  o setor.

O consumo de energia líquido para transformação é dado pela seguinte equação:

$$ET_s = \sum_m \sum_t ETP_{t,mi} \times \left( \frac{1}{f_{t,ms}} - 1 \right) \quad (2)$$

Onde:

$ET$  = consumo líquido de energia para transformação;

$ETP$  = produto oriundo da transformação, por exemplo, eletricidade;

$f$  = eficiência do processo de transformação;

$s, m, t = s$  é o tipo de energia primária,  $m$  é o equipamento, e  $t$  é a energia secundária.

### 2.4.1.2 Transformação

Os cálculos do módulo de transmissão e distribuição levam em consideração a demanda de combustível doméstico do módulo e mapeiam os correspondentes aos combustíveis de saída proporcionais aos combustíveis de entrada. Assim sendo, temos que para cada processo  $p$ :

$$Entrada_p = \frac{saída_p}{eficiência_p} \quad (3)$$

Para o módulo de transmissão e distribuição a eficiência é dada pela seguinte fórmula:

$$Eficiência_p = 1 - perdas_p \quad (4)$$

A Entrada é a energia primária, enquanto a saída é a energia secundária, como por exemplo a eletricidade ou a gasolina; já a eficiência mensura a eficácia na conversão realizada nas plantas ou refinarias, etc.

#### 2.4.1.3 Emissões de gases de efeito estufa

As estimativas de emissões de gases de efeito estufa do uso final de energia é calculado como a seguir:

$$CEC = \sum_n \sum_j \sum_i AL_{n,j,i} EI_{n,j,i} EF_{n,j,i} \quad (5)$$

Onde  $CEC$  é a emissão de GEE para o consumo final de energia do sistema,  $AL$  é o nível de atividade,  $EI$  a intensidade energética, e  $EF$  é o fator de emissão para combustível  $n$  da tecnologia  $j$  do setor  $i$ .

Já as emissões provindas do módulo de transformação são estimadas conforme:

$$CET = \sum_t \sum_m \sum_s ETP_{t,m} \times \frac{1}{f_{t,m,s}} \times EF_{t,m,s} \quad (6)$$

Em que  $CET$  é a emissão de carbono para o módulo de transformação,  $ETP$  é o produto do processo de transformação,  $f$  é a eficiência do processo, e  $EF$  é o fator de emissão para uma unidade de energia primária  $s$ , consumida para produzir energia secundária  $t$  por meio da tecnologia  $m$ .

#### 2.4.1.4 Custos

O custo  $C$  é dado pela eq. 7 e reflete o custo total do setor incluindo os custos fixos de equipamentos e os custos variáveis de matéria-prima e combustíveis.

$$C = \sum_i \sum_j \{ [\sum_n (e_{n,j,k} ep_n) + \sum_k (m_{k,j,i} mp_k) + fc_{j,i}] p_{j,i} \} \quad (7)$$

Onde:

$ep_n$  = preço unitário para combustível tipo  $n$ ;

$m_{k,j,i}$  = demanda por matéria-prima  $k$  por unidade de produção usada no equipamento  $j$  dentro do processo de produção  $i$ ;

$mp_k$  = preço unitário da matéria-prima  $k$ ;

$fc_{j,i}$  = preço fixo por unidade de produção por meio do equipamento  $j$  (dentro do processo de produção  $i$ ).

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo aborda-se a metodologia adotada para traçar os cenários energéticos que subsidiarão a elaboração de uma política pública estadual de transição energética.

Os cenários foram traçados por meio da ferramenta de modelagem LEAP, que como demonstrado no capítulo dois, é amplamente utilizada nos níveis de organização internacional, nacional, subnacional e local para modelar sistemas energéticos e explorar suas implicações no que tange à diferentes políticas energéticas para o futuro. Os dados e premissas para subsidiarem os cenários foram obtidos por meio da literatura disponível.

Também é abordada a metodologia utilizada para propor uma Política Estadual de Transição Energética, bem como analisar a efetividade do Programa Mineiro de Energia Renovável, que é a principal política de promoção de energias renováveis no estado de Minas Gerais.

#### 3.1 Metodologia de cenários energéticos

Neste item, será descrita a aplicação do modelo LEAP, bem como os cenários e premissas adotados para o desenvolvimento do trabalho e para as análises.

##### 3.1.1 LEAP

A base da política de transição energética do estado de Minas Gerais foi criada por meio dos cenários elaborados a partir da plataforma de modelagem LEAP, que permitiu avaliar os impactos da demanda e geração de energia do sistema energético de Minas Gerais, em um horizonte de médio e longo prazo. LEAP é uma ferramenta de modelagem sob o viés energético e ambiental, que foi desenvolvida pelo Instituto de Meio Ambiente de Estocolmo – *Stockholm Environment Institute* (SEI) – para avaliar os efeitos – físicos, ambientais e econômicos – de políticas alternativas de energia, tecnologias e outras iniciativas (SEI, 2011).

O sistema possui uma base de dados tecnológica e ambiental que oferece informações extensivas sobre características técnicas, custos e impactos ambientais de diversas tecnologias de energia, incluindo tecnologias existentes, melhores práticas atuais e próximos dispositivos de geração. O LEAP é um modelo de simulação *bottom up* que permite realizar análises de cenários desde a geração de energia até o uso final. Nesse sentido, o software contém uma estrutura contábil de sistemas de energia completos, que permite considerações tanto da demanda e do lado das tecnologias de suprimento, quanto do total de impactos gerados pelo

sistema. Isso, ligado à *database* ambiental, permite rastrear os componentes de poluição e emissão de todos os estágios da cadeia de suprimento de combustíveis, incluindo as emissões de gases de efeito estufa da extração, processamento, distribuição e atividades de combustão. Da mesma forma, é possível contabilizar as reduções de GEE oriundas de usos mais conscientes de energia ou substituição de tecnologias que usam fontes de energias renováveis. Dessa forma, a ferramenta LEAP é utilizada para analisar os padrões atuais do sistema de energia e para simular sistemas de energia alternativa no futuro, juntamente com as emissões de gases de efeito estufa associadas a esses, por meio de uma conjuntura de premissas definidas pelo usuário (SEI, 2011).

A estrutura do LEAP é apresentada na Figura 8 e é constituída por quatro componentes básicos: Demanda, onde é realizada a análise da demanda energética do sistema, bem como os tipos de uso final de energia; Transformação, avalia os recursos energéticos disponíveis bem como sua conversão; Meio Ambiente, realiza as estimativas de emissões associadas ao sistema energético; Avaliação, permite a comparação de cenários em termos de custos e impactos físicos.

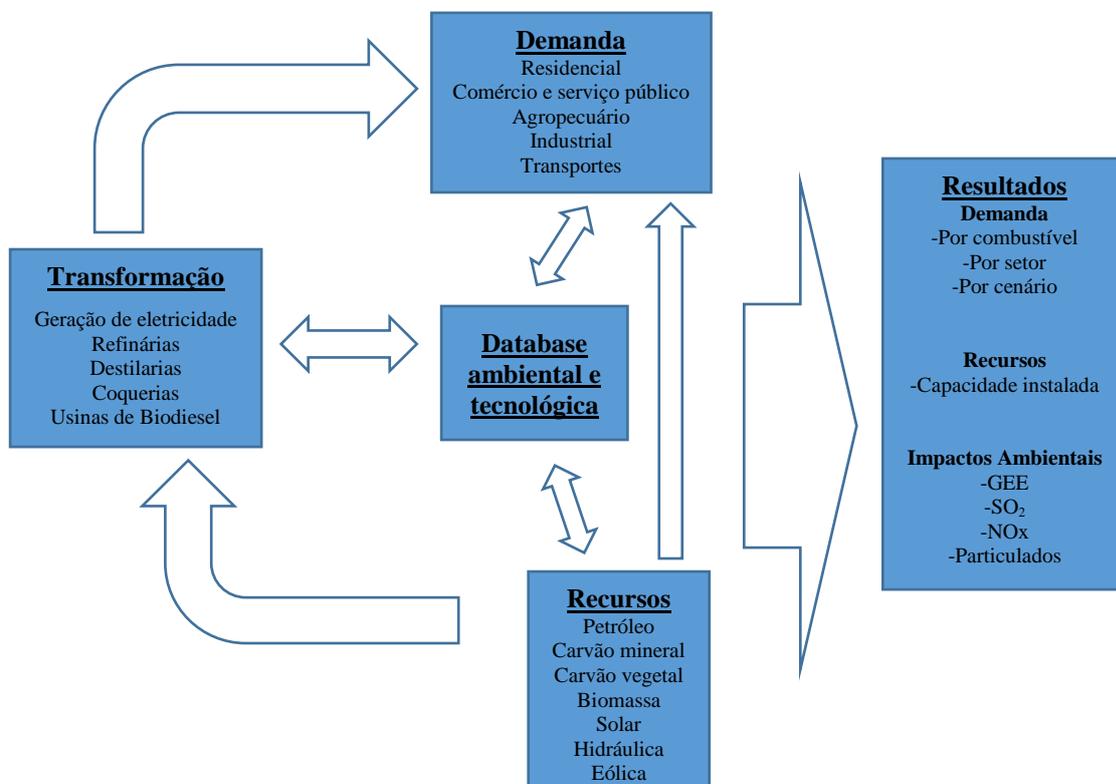


Figura 8: Estrutura do LEAP  
Fonte: Adpatado SEI, 2011.

### 3.1.2 Desenvolvimento dos cenários e premissas adotadas

Foram elaborados nesse trabalho três cenários, que têm como objetivo chave orientar a tomada de decisão para elaboração de políticas energéticas, no âmbito do estado de Minas Gerais para o horizonte 2030-2050. O primeiro cenário, chamado de Referência (REF), foi baseado nos planos do governo do Brasil, com um recorte para o estado de Minas Gerais, em relação a expansão da capacidade de geração de energia elétrica, demanda e consumo final de energia, e serviços de energia. A maioria da formulação do cenário REF foi feita com base no PDE 2027 e no Plano Nacional de Energia (PNE 2030 e PNE 2050), bem como na análise de séries históricas do sistema energético do estado, que estão disponíveis no banco de dados da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, e nos balanços energéticos do estado de Minas Gerais. Esse cenário realiza projeções baseadas no que poderá acontecer se nenhum esforço adicional for realizado para criação de novas políticas energéticas que visem sistemas energéticos mais sustentáveis.

A partir do cenário REF foram elaborados dois cenários alternativos, o primeiro tem o objetivo de contribuir com as metas do setor de energia na NDC brasileira e é chamado de Transição Energética Moderada (ETM). O segundo tem o objetivo de ir além dos objetivos da NDC, sendo ainda mais ambicioso, que é o cenário Transição Energética Avançada (ETA).

Enquanto o cenário REF representa projeções baseadas no que irá acontecer se nenhuma política energética de intervenção adicional for criada, os cenários alternativos consideram o aumento gradual de políticas estratégicas que busquem garantir a segurança energética ao mesmo tempo que garantam a segurança climática. Assim sendo, o cenário ETM possui políticas moderadas que visam atender os acordos climáticos firmados em âmbito internacional pelo Brasil, no que tange à parte correspondente ao estado de Minas Gerais. O cenário ETA possui estratégias políticas mais agressivas de modo a construir um sistema energético baseado majoritariamente em energias renováveis, bem como uma troca gradual dos combustíveis do setor de transporte para biocombustíveis e eletricidade.

O modelo do LEAP para Minas Gerais é dividido em quatro módulos, sendo o primeiro Premissas Gerais, que é composto por dados demográficos e econômicos, utilizados para projetar o crescimento da demanda. O segundo é o módulo Demanda, composto pelos setores residencial, comércio e serviços, agropecuário, transporte e indústria. O terceiro, o módulo de Transformação, é ramificado em transmissão e distribuição, onde são computadas as perdas de eletricidade nessa etapa do suprimento; geração de eletricidade; refinarias de

petróleo, carvoarias, coquearias, destilarias, produção de biodiesel e produção de biogás. O último, o módulo de Recursos, dispõe sobre os tipos de energia primária e secundária envolvidas em todo o sistema.

O ano de 2010 foi selecionado como o ano base dos cenários, primeiramente pela disponibilidade de dados, principalmente no que tange aos dados demográficos, já que o último censo, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas – IBGE, foi realizado no referido ano. A escolha também se deu em consonância com o ano base escolhido pelo Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações – MCTIC para elaboração dos cenários que subsidiaram a NDC do Brasil.

### 3.1.2.1 Premissas Gerais

As Premissas Gerais servem para embasar todos os cenários modelados no LEAP e compreenderam 8 parâmetros básicos que são: população; crescimento da população; Produto Interno Bruto – PIB estadual; crescimento PIB; renda per capita; valor adicionado agropecuário; valor adicionado serviços; valor adicionado indústria. Os dados populacionais foram retirados do último censo e das projeções do IBGE. Já as premissas econômicas para o ano base 2010 foram coletadas nas publicações da Fundação João Pinheiro – FJP. A Tabela 4 traz todos os valores adotados para cada parâmetro em cada cenário.

Os dados macroeconômicos foram assumidos como sendo os mesmos utilizados pelo MCTIC para projeções dos cenários do Brasil. O MCTIC elaborou entre o período 2014 a 2016 três cenários econômicos chamados de Fipe I, Fipe II, e Fipe III que buscaram refletir as condições presentes da conjuntura da economia brasileira e mundial, tanto no curto prazo, quanto no longo (MCTIC, 2017). Dada a consistência dos cenários e que, historicamente, as taxas de crescimento do PIB estadual flutuam com proximidade ao do PIB nacional, nessa presente pesquisa é assumido que o crescimento do PIB para o estado de Minas Gerais acompanhará o PIB Nacional. Dessa forma, assim como nos cenários nacionais, será adotado o cenário macroeconômico mais recente, Fipe III, elaborado em 2016, para formulação do cenário REF de Minas Gerais. Os cenários ETM e ETA herdaram os dados demográficos e econômicos do cenário de REF.

Tabela 4: Premissas Gerais - LEAP – caso de Minas Gerais

Premissas Gerais	Cenários REF – ETM - ETA		
	2010	2030	2050
<b>População (milhões)</b>	20	22,2	22,05
<b>Crescimento pop. (%)</b>	-	0,29	-0,29
<b>PIB (Bilhões R\$)</b>	351,4	439,6	613,3
<b>Crescimento PIB (%)</b>	-	2,2	1,6
<b>Renda Per capita (mil R\$)</b>	17,6	19,5	26,3
<b>Tx crescimento VA -Agropecuário</b>	-	1,7	1,6
<b>Tx crescimento VA - Serviços</b>	-	1,7	1,2
<b>Tx crescimento VA - Industria</b>	-	2,5	2,0

Fonte: IBGE, 2019; FJP,2014; MCTIC,2017

### 3.1.2.2 Premissas Demanda

Como o objetivo do presente trabalho é atuar na diversificação da matriz energética de Minas Gerais, a modelagem da demanda foi feita com base no consumo de energéticos. Dessa forma, a análise foi direcionada para os setores que compõem o módulo e os energéticos por esses consumidos; não foi realizada, portanto, uma análise de sub-setores e de tecnologias de uso final de energia.

Os dados para modelar os setores da demanda foram obtidos por meio do Balanço Energético de Minas Gerais para o ano base 2010 (CEMIG, 2018) e foram estruturados de acordo com o Quadro 1.

Quadro 1: Estrutura da demanda

<b>Setor</b>	<b>Tipo de energético</b>	<b>Parâmetros de atividades</b>
Residencial	lenha, eletricidade, GLP, resíduos agrícolas e biomassa.	eficiência da conversão, consumo setorial, participação (%) do consumo total, e consumo per capita (tep/pessoa).
Comercial/Público	gás natural, eletricidade, GLP, outros e óleo combustível.	consumo total, participação (%) do consumo total, e intensidade energética (tep/real).
Agropecuário	lenha, biomassa, óleo diesel, eletricidade, GLP.	consumo total, participação (%) do consumo total, e intensidade energética (tep/real).
Indústria	lenha, biomassa, óleo diesel, eletricidade, GLP, gás natural, bagaço de cana-de-açúcar, carvão mineral e outros.	consumo total, participação (%) do consumo total, e intensidade energética (tep/real).
Transportes	são óleo diesel, eletricidade, gás natural, gasolina, etanol, biodiesel e querosene.	consumo total, participação (%) do consumo total, e intensidade energética (tep/real).

Fonte: Adaptado de BEEMG, 2011.

No Quadro 1 são ilustrados os níveis de hierarquia do módulo da demanda. A intensidade energética é calculada como uma média entre o consumo final de energia pelo nível de atividade de cada setor. No setor residencial o nível de atividade é medido pela população, e nos demais setores é mensurado pelo PIB estadual e valor adicionado. Tanto a intensidade energética, quanto o tipo de energético são necessários para estimar as necessidades energéticas de cada setor. Fatores de emissão de diferentes poluentes no módulo *Database Ambiental e Tecnológica* (TED) do LEAP são usados para especificar as emissões associadas para uma tecnologia ou combustível específico. Os fatores de emissão foram baseados nos valores recomendados pelo IPCC (SEI, 2011).

### 3.1.2.3 Premissas Transformação

O setor de transformação do LEAP é baseado em módulos para desenhar a oferta de energia e setores de conversão. Cada módulo contém um ou mais processos, que representam

tecnologias de transformações, que produzem um ou mais energético. A estrutura de um sistema de transformação no LEAP é ilustrada na Figura 9.

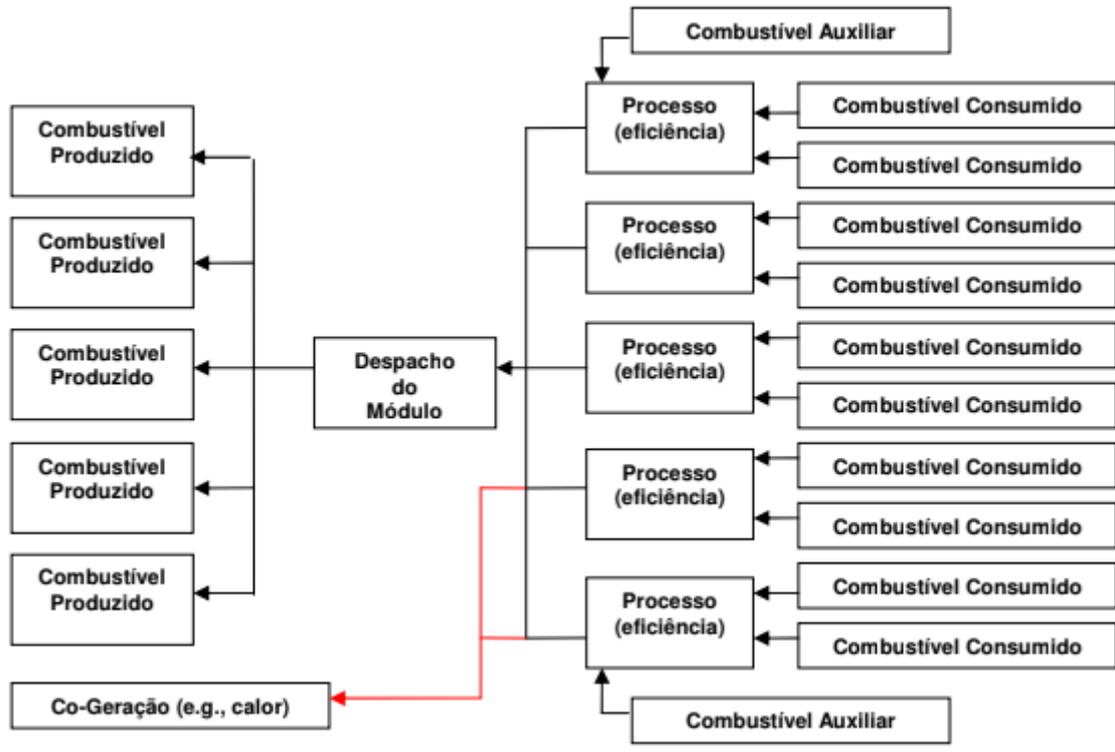


Figura 9: Estrutura de um sistema de transformação no LEAP  
Fonte: SEI, 2012

O sistema de transformação de Minas Gerais foi dividido em 8 módulos que são: Transmissão e Distribuição; Geração de Eletricidade; Refinarias de Petróleo; Coquearias; Carvoarias; Destilarias; Usinas de Biodiesel; Usinas de Bioquerosene. O módulo mais complexo é o módulo de geração de eletricidade, que inclui 10 diferentes tipos de processos de geração, que são: Hidrelétricas, Térmicas Convencional (gás natural, lenha, óleo combustível, carvão mineral, bagaço de cana, biogás, e outras fontes primárias.), Térmica Ciclo Combinado à Gás Natural, Usina Fotovoltaica, Usina Eólica.

O módulo de transmissão e distribuição é descrito apenas pelas perdas de eletricidade no processo, em que foi considerado uma perda de 17%, baseada no Sistema Interligado Nacional – SIN, conforme o PDE 2021.

O módulo de geração de eletricidade é alimentado pelos dados descritos na Tabela 5.

Os tipos de tecnologia de geração foram selecionados com base nas tecnologias existentes no sistema elétrico de Minas Gerais e no potencial de energia renovável (solar, eólica e biomassa) e eficiência energética.

Para a modelagem do sistema de geração de eletricidade também é necessário definir uma margem de reserva em relação a demanda, que nesse trabalho foi adotada como 30%<sup>5</sup>. Essa margem foi escolhida uma vez que o sistema elétrico de Minas Gerais possui uma grande participação de energias renováveis, principalmente hídrica que possui disponibilidade dependente de períodos húmido e seco, e biomassa que possui o período de entressafra, que pode acarretar na diminuição da disponibilidade da matéria-prima. Portanto, foi escolhida uma margem conservadora para garantir a segurança do sistema.

Foi definida uma curva de carga para o ano, que tem por objetivo modelar a distribuição percentual da demanda ao longo de um ano, 8760 horas, identificando a ocorrência de picos no sistema. Uma vez que não foram encontrados dados tempestivos para modelar a curva, foram utilizados os dados de default do LEAP.

---

<sup>5</sup> Margem adotada para diminuir o risco de déficit de energia.

Tabela 5: Dados técnicos para o módulo geração de eletricidade do modelo LEAP para Minas Gerais

<b>Tipo de tecnologia</b>	<b>Regra de despacho</b>	<b>Eficiência (%)</b>	<b>Capacidade Instalada (MW)</b>	<b>Produção (mil tep)</b>	<b>Fator de Disponibilidade (%)</b>	<b>Vida útil</b>	<b>Custo de Capital (US\$/KW)</b>	<b>Custo Fixo (US\$/KW)</b>	<b>Capacidade de Crédito*</b>
<b>Hidrelétrica</b>	Base	95	12500	5025	95	60	1750	35	100
<b>PCH e CGH</b>	Base	95	519	350	95	60	2000	45	100
<b>Térmica – Gás natural</b>	Pico	35	334	108	85	30	900	36	100
<b>UTE – Lenha</b>	Pico	25	200	7,25	85	25	3000	100	100
<b>UTE – Bagaço de Cana</b>	Pico	25	874	200	66 <sup>6</sup>	25	3000	100	100
<b>UTE Óleo</b>	Pico	25	131	1,5	85	25	1400	25	100
<b>Combustível</b>									
<b>UTE – Outras fontes primárias</b>	Pico	25	260	56	85	25	1400	25	100
<b>UTE Biogás</b>	Pico	25	-	-	85	25	3000	100	100
<b>UTE Carvão Mineral</b>	Pico	46	-	-	85	40	2200	88	100
<b>Novas UTE - Gás Natural</b>	Base	35	-	-	85	30	900	36	100
<b>UTE Ciclo Combinado – Gás Natural</b>	Base	65	-	-	85	30	1100	44	100
<b>Fotovoltaico</b>	Base	15	-	-	42 <sup>7</sup>	25	2500	30	30
<b>Eólica</b>	Base	95	-	-	35 <sup>8</sup>	30	1620	36	30

\*A capacidade de crédito é utilizada para calcular a margem reserva do sistema, fontes intermitentes não são firmes o suficiente, portanto, possuem baixa capacidade de crédito (SEI,2018).

Fonte: Adaptado de: CEMIG, 2018; ANEEL, 2019; IEA ETSAP, 2010a; IEA ETSAP, 2010b; IEA ETSAP, 2010c; IEA ETSAP, 2010d; IEA ETSAP, 2010e; IEA ETSAP, 2013; MOURA, 2017.

<sup>6</sup> - A disponibilidade 66% é devido ao período de entressafra da cana-de-açúcar.

<sup>7</sup> - Foi considerado um período de disponibilidade máxima de sol de 10 horas por dia.

<sup>8</sup> - Por ser uma fonte intermitente, a média de disponibilidade da eólica é 35% (SEI, 2012).

Para os outros módulos de transformação, os dados inseridos são conforme mostrados na Tabela 6. Por se tratar de fonte renovável de energia, os módulos carvoarias, destilaria, produção de biodiesel e biogás, foram modelados para suprirem a demanda do sistema por esses energéticos. Desse modo tudo é produzido de acordo com a demanda. Esses módulos permanecem constantes em todos os cenários.

Tabela 6: Dados para outros módulos de transformação

<b>Módulo</b>	<b>Combustível de entrada</b>	<b>Eficiência (%)</b>	<b>Capacidade Instalada</b>	<b>Máxima Disponibilidade</b>
<b>Refinária de Petróleo</b>	Petróleo	94,2	55*	100
<b>Coqueria</b>	Carvão Metalúrgico	97	2641**	100
<b>Carvoarias</b>	Lenha	49,8	-	-
<b>Destilaria</b>	Cana-de-açúcar	44,1	-	-
<b>Produção de Biodiesel</b>	Biomassa	96	-	-
<b>Produção de Biogás</b>	Biomassa	80	-	-

\*10<sup>6</sup>(barris por dia)

\*\*Mil tep

Fonte: Adaptado de: CEMIG, 2018; IEA ETSAP, 2013a; IEA ETSAP, 2013b; IEA ETSAP, 2013c; IEA ETSAP, 2013d.

#### 3.1.2.4 Premissas dos Recursos

O módulo de recursos do LEAP é gerado automaticamente com base nas necessidades energéticas descritas no módulo da demanda, e os combustíveis de entrada e saída do módulo de transformação. Esse módulo é dividido em recursos de energia primária – ou seja energéticos não-processados, como por exemplo o sol, vento, água, etc. – e energia secundária – como eletricidade, gasolina, biodiesel – utilizados na matriz de energia de Minas Gerais.

Os parâmetros avaliados são reservas para combustíveis fósseis, e produção anual para energias renováveis. Os preços para os combustíveis de origem fóssil para o ano base, 2010, são descritos na Tabela 7. Enquanto os recursos renováveis são considerados ilimitados e gratuitos.

Tabela 7: Preço nominal dos recursos energéticos de origem fóssil

<b>Energia Primária</b>	<b>Preço (U\$\$)</b>
<b>Carvão Betuminoso</b>	107/tonelada métrica
<b>Petróleo</b>	90/barril
<b>Gás Natural</b>	4,24/milhões de BTU
<b>Energia Secundária</b>	<b>Preço (U\$\$)</b>
<b>GLP</b>	10,75/milhões de BTU
<b>Coque Metalúrgico</b>	107/tonelada métrica
<b>Diesel</b>	2,5/galão
<b>Gasolina</b>	2,4/galão
<b>Querosene</b>	2,24/galão
<b>Óleo Combustível</b>	2,24/galão
<b>Coque de petróleo</b>	100/tonelada métrica

Fonte: INDEX MUNDI, 2019

### 3.1.2.5 Premissas adotadas nos cenários REF, ETM e ETA

O horizonte das projeções engloba o período de 2011 a 2050, tendo como base o ano de 2010, e foram desenvolvidos 3 cenários que buscam estimar a demanda energética e a composição da matriz de energia do estado, sendo um cenário de referência – REF - e dois cenários que visam a promoção de uma economia de baixo carbono – ETM e ETA.

O cenário REF considera as metas constantes nas políticas governamentais existentes, e os planos de expansão setoriais, que acarretam no aumento da demanda energética. Para esse cenário foram adicionados os empreendimentos de geração de eletricidade construídos até 2019, bem como foi prevista a inserção dos empreendimentos em construção e empreendimentos com construção não iniciada (ANEEL, 2019). Os módulos de carvoarias, destilaria e biodiesel, possuem produção prevista para acompanhar a demanda.

Em relação às perdas do módulo de transmissão, para o cenário REF é considerado um aumento de 17% para 19,5% no ano de 2019, e uma queda para 18,5% em 2027, conforme previsto no PDE 2027. Para os cenários alternativos ETM e ETA foi considerado que programas de redução de perdas foram implementados, com o objetivo de conseguirem ganhos de eficiência energética da ordem de 10% até 2030, conforme NDC, e de 15% até 2050, mantendo a ambição da NDC para o período. Os valores são com base no cenário REF.

Para os cenários alternativos, dado que o objetivo dessa pesquisa é avaliar ações que visem proporcionar segurança energética ao Estado de Minas Gerais, bem como para o Brasil, e ao mesmo tempo atuar no combate às mudanças climáticas, foi considerada uma expansão do sistema energético apenas por meio das fontes de energias renováveis com potenciais relevantes no contexto estadual. Por considerar que a fonte hidráulica já é suficientemente desenvolvida no território, e que a NDC propõe metas ambiciosas para diversificação da matriz energética por meio de renováveis além da hídrica, esse recurso foi contemplado apenas por meio de PCH's.

A escolha dos recursos renováveis foi feita com base na revisão bibliográfica apresentada na presente dissertação, no que tange aos potenciais das fontes solar e eólica, bem como da biomassa. A coleta de informações foi feita por meio de publicações da CEMIG, quais sejam Atlas Solarimétrico de Minas Gerais – Volume II; Energia Eólica – Minas Gerais, e Potencial de Energia da Biomassa em Minas Gerais. Também foram analisadas as informações disponíveis nas publicações da Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais – FEAM, sendo essas Potencial de Energias Renováveis – Volume I e Potencial de Energias Renováveis – Volume II.

Com base nesses dados foram definidas quais fontes de energia renováveis irão compor a diversificação da matriz energética com vistas à promoção de uma transição energética no estado. Foram escolhidas as que possuem maior potencial energético e maior viabilidade econômica no horizonte de tempo 2030-2050, sendo elas térmicas a biomassa, fotovoltaico, PCH e eólica.

Para o cenário ETM, como a matriz elétrica de Minas Gerais faz parte SIN, foram consideradas as previsões de expansão do sistema energético do PDE 2027 (MME/EPE, 2018), e as metas previstas para NDC do Brasil (BRASIL,2015) aplicadas para o contexto de Minas Gerais, no que tange a expansão das fontes de energia renovável e ganhos de eficiência energética no setor elétrico. Também foi considerada uma penetração moderada de veículos elétricos no setor de transporte, e um incremento na participação de biocombustíveis. O ETA foi considerado um cenário mais ambicioso com o objetivo de dobrar a capacidade instalada das térmicas a biogás e das usinas fotovoltaicas, bem como inserir a geração eólica no sistema, ainda que o potencial eólico do Nordeste e do Sudeste não tenha sido completamente explorado. Para o setor de transporte é prevista uma substancial inserção de veículos elétricos, bem como uma expansão de biocombustíveis e veículos híbridos.

As principais premissas adotadas na construção dos cenários apresentados neste trabalho estão sintetizadas no Quadro 2, conforme explicadas neste presente item.

### 3.1.2.6 Premissas de Análise de Custo-benefício

O LEAP realiza uma análise de custo-benefício baseada nos custos inseridos na modelagem; nesse trabalho em específico, isso é baseado no custo de geração de eletricidade e importação de recursos energéticos, bem como na mitigação de gases de efeito estufa. A análise resulta, além das emissões evitadas, no Valor Presente Líquido – VPL, que é um indicador econômico utilizado para avaliar a viabilidade econômica de um determinado projeto. Para realizar esse cálculo é necessário a definição de uma taxa de desconto (juros). Para essa modelagem foi adotada uma taxa de 8%, que é a mesma utilizada pela EPE para realizar as projeções do PDE 2027.

Quadro 2: Principais Premissas dos cenários REF, ETM e ETA

<b>Principais Premissas</b>		
<b>REF</b>	<b>ETM</b>	<b>ETA</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Expansão a mínimo custo, com a inserção de hidrelétricas e combustíveis de origem fóssil.</li> <li>• Desconsideração de políticas adicionais de mitigação e adaptação às mudanças climáticas.</li> <li>• Manutenção da margem de reserva por meio UTE a carvão mineral, gás natural e óleo combustível (Capacidade instalada 300 MW, 500 MW, 500 MW, respectivamente);</li> <li>• Premissas de expansão da capacidade previstas no PNE e no BIG ANEEL.</li> <li>• Redução do custo de capital da tecnologia eólica de 30%, em 2030, e 40%, 2050, comparada ao ano base (IRENA, 2018c)</li> <li>• Redução do custo de capital da tecnologia fotovoltaica de 50%, em 2030, e 60%, 2050, comparado ao ano base (IRENA, 2018c).</li> <li>• Para demais tecnologias é esperada uma redução de 10% do custo de capital no horizonte 2030-2050, uma vez que são consideradas tecnologias maturadas.</li> <li>• É esperado que no período analisado os combustíveis de origem fóssil dobrem em seu valor, devida a limitação dos recursos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metas da NDC do Brasil, recortadas para Minas Gerais;</li> <li>• 27% a 33% de fontes renováveis na matriz elétrica, excetuando a fonte hídrica até 2030, e 40 a 42% até 2050.</li> <li>• Capacidade instalada fotovoltaica de 5 GW e 13 GW até 2030 e 2050, respectivamente.</li> <li>• Capacidade instalada de UTE a biogás de 7 GW e 15 GW até 2030 e 2050, respectivamente.</li> <li>• Obter ganhos de eficiência energética no setor elétrico de 10% até 2030 e 15% até 2050.</li> <li>• Participação de 7% de veículos elétricos e 24% de biocombustíveis no setor de transporte até 2030.</li> <li>• Manutenção da margem de reserva por meio de UTE a biogás, PCH, e UTE de ciclo combinado a gás natural (Tamanho médio 500 MW, 15 MW, 1000 MW, respectivamente);</li> <li>• Assume-se que os custos são os mesmos do cenário REF.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Liberdade de seleção da evolução do perfil tecnológico e da otimização da matriz energética;</li> <li>• Substituição de veículos movidos a diesel e gasolina por veículos elétricos, movidos a biocombustíveis ou híbridos.</li> <li>• Mínimo de 50% de fontes renováveis na matriz elétrica, excetuando a fonte hídrica até 2030 e 60% até 2050.</li> <li>• Capacidade instalada fotovoltaica de 10 GW e 26 GW até 2030 e 2050, respectivamente.</li> <li>• Capacidade instalada de UTE a biogás de 9 GW e 26 GW até 2030 e 2050, respectivamente.</li> <li>• Capacidade instalada de eólica de 5 GW e 10 GW até 2030 e 2050, respectivamente.</li> <li>• Participação de 20% de veículos elétricos e 27% de biocombustíveis no setor de transporte até 2030.</li> <li>• Participação de 50% de veículos elétricos e 29% de biocombustíveis no setor de transporte até 2050.</li> <li>• Assume-se que os custos são os mesmos do cenário REF.</li> </ul>

### 3.2 Elaboração da Política Estadual de Transição Energética - PETE

Uma vez obtidos os cenários, esses subsidiarão a elaboração da Política Estadual de Transição Energética – PETE.

A modelagem de sistemas energéticos permite uma avaliação integrada que considere segurança de suprimento, acesso ao sistema a preço justo, dimensionamento dos impactos ambientais e estratégias de financiamento (IRENA, 2017b). Dessa forma a política Estadual de Transição Energética – PETE, é baseada na modelagem de cenários de médio e longo prazo desenvolvidos para o sistema energético do estado, utilizando a ferramenta LEAP.

A PETE também é fundamentada nas medidas sugeridas por ESTIF, 2007, em que é sugerido que estratégias efetivas devem se basear em metas ambiciosas, apoiadas em mecanismo de pesquisa e desenvolvimento, financiamento, treinamento, exemplaridade de projetos, sensibilização e regulação, conforme ilustrado na Figura 10.

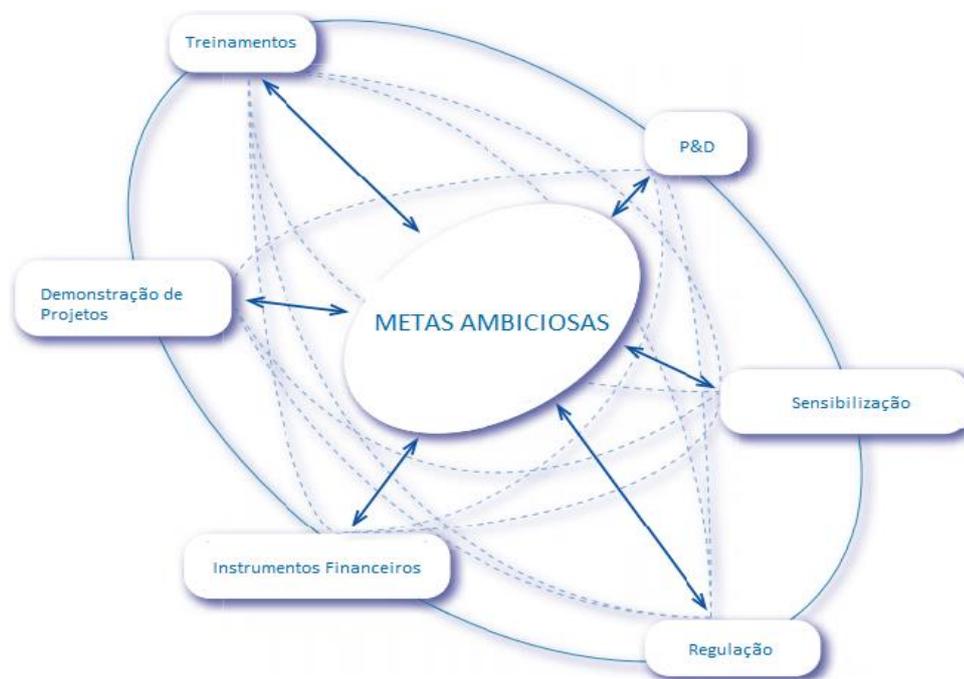


Figura 10: Estratégia para promoção da transição energética.  
Fonte: Adaptada: ESTIF, 2007

Também foi feita uma avaliação do Programa Mineiro de Energias Renováveis, que é atual política vigente para promoção das fontes de energia renovável do estado. A metodologia de avaliação é apresentada a seguir.

Adicionalmente, foram escolhidos os energéticos de origem renovável para ser o principal alvo de promoção dentro do estado, a política foi formulada com base nos erros e acertos do PMER, levando em consideração, principalmente, os critérios de inovação elencados pela IRENA. Já os cenários serviram para subsidiar as metas para promoção das energias renováveis com vistas a promoção da transição energética, utilizando como base os cenários que apresentaram o melhor custo benefício. Dessa forma, as tecnologias que apresentaram o melhor efeito para mitigação dos gases de efeito estufa do setor, melhor desempenho energético e a melhor viabilidade financeira foram os principais componentes da PETE.

### **3.2.1 Avaliação do Programa Mineiro de Energias Renováveis**

Atualmente, o Programa Mineiro de Energias Renováveis é a principal política pública do estado para promoção de fontes de energia renovável para geração de energia elétrica e produção de biogás<sup>9</sup>. Para verificar a sua efetividade em promover a transição energética no estado, foi feita uma análise dos instrumentos que compõe o Programa correlacionando-os aos seguintes indicadores:

1. Número de projetos implementados pelo PMER;
2. Inovação;
3. Criação de Empregos; e
4. Mitigação de gases de efeito estufa.

#### **3.2.1.1 Número de projetos implementados pelo PMER**

Para avaliar os resultados do PMER quanto ao número de projetos implementados é necessário mensurar o alcance do objetivo do programa por meio da avaliação, no âmbito estadual, da geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis. Nesse sentido, foram elencados possíveis indicadores para a análise; no entanto, esses estão sujeitos à crítica sobre sua capacidade de captar a efetividade do programa, suas falhas de mensuração, bem como possibilidades de obtenção de dados tempestivamente. No Quadro 3 são descritos os indicadores elencados com suas vantagens e desvantagens.

---

<sup>9</sup> “Decreto Estadual nº 46.296 de 14 de agosto de 2013”, <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=257589>.

Quadro 3: Indicadores e suas vantagens e desvantagens

<b>Indicador</b>	<b>1. Empreendimentos de geração de energia renovável em operação em Minas Gerais</b>	<b>2. Empreendimentos de geração de energia renovável com regime especial na Secretaria de Estado de Fazenda de Minas Gerais – SEF/MG</b>	<b>3. Empreendimentos de geração de energia renovável com licença ambiental</b>	<b>4. Micro e mini geração distribuída instalada.</b>
<b>Unidade</b>	MW ou percentual (MW energia renovável/MW energia total).	Número de empreendimentos (possibilidade de MW, de acordo com informações detidas pela SEF/MG)	Número de empreendimentos (possibilidade de usar MW)	Pode ser em MW, em número de projetos, em percentual de participação de MG.
<b>Fonte</b>	ANELL, 2019	SEF/MG	SEMAD	ANEEL, 2019
<b>Vantagens</b>	Mensura a expansão da geração de energia a partir de fontes renováveis. A informação é atualizada pela ANEEL com periodicidade maior que anual. Quando calculado em termos de MW ou em termos percentuais permite mensurar o ritmo da implantação de potência de energia renovável em dado período em relação a outros períodos.	Identifica exatamente a quantidade de empreendimentos que se beneficiaram do regime tributário especial concedido a geração de energia renovável. Se a SEF possuir informação quanto a potência dos empreendimentos, permite avaliar ainda a potência instalada de empreendimentos com regime especial contemplado no PMER.	Identifica exatamente a quantidade de empreendimentos que obtiveram licença ambiental, em qualquer uma de suas etapas, junto ao estado. Permite identificar empreendimentos que foram planejados antes e depois do PMER, o que pode denotar a influência do Programa.	Mensura a expansão da geração distribuída no Estado, em termos de projeto, capacidade instalada e posição quanto a outras unidades federativas. Permite cortes por fonte de energia renovável. É atualizado em periodicidade maior que anual.
<b>Desvantagens</b>	O indicador soma a potência de todos os empreendimentos de geração de energia renovável sem discriminar aqueles que de fato se beneficiaram de alguma ação do PMER. Não mostra qual a eletricidade de fato gerada por fontes renováveis, apenas o potencial de geração instalado.	Receber o regime especial não significa que o empreendimento está em operação. O indicador não permite saber se o empreendimento foi contemplado com outro benefício advindo do PMER. Dificuldade de obtenção de dados junto a SEF.	Os empreendimentos licenciados podem não ser instalados. Não permite saber se foi contemplado com outro benefício do PMER. Dificuldade de obtenção de dados junto a SEMAD. Só apresenta informação de potência instalada, não permitindo definir a quantidade de energia renovável de fato produzida.	Não mensura a energia realmente gerada, de forma que não permite saber se a capacidade instalada é eficiente ou se está funcionando.

Fonte: Elaboração própria

### 3.2.1.2 Inovação

As políticas governamentais para criar mercados de energia renovável devem possuir mecanismos para facilitar o desenvolvimento de tecnologias renováveis e promover a redução de custos por meio de economias em escala e ganhos tecnológicos. No intuito de direcionar a seleção apropriada dos mecanismos necessários para se desenvolver uma política voltada para a expansão de energias renováveis, a Agência Internacional de Energias Renováveis – IRENA estabeleceu os principais instrumentos que devem ser contemplados na construção de uma política eficaz, considerando o contexto inserido. A EETN procurou atender todos os requisitos apontados pela agência. O Quadro 4 sintetiza esses mecanismos.

Quadro 4: Visão geral dos principais tipos de instrumentos e medidas adotados em políticas de energia renováveis.

<b>Política Nacional</b>	<b>Instrumentos de Regulação</b>	<b>Incentivos Fiscais</b>	<b>Acesso à Rede</b>	<b>Acesso à linhas de financiamento</b>	<b>Benefícios socioeconômicos</b>
- Metas de Energias Renováveis	- Tarifa feed-in	- Imposto de combustível, Isenção IR	- Desconto /isenção transmissão	- Título de moeda	-Energia renovável em área rural
- Lei/Estratégia de Energias Renováveis	- Premium feed-in	- Benefício fiscal importação/exportação	- Prioridade transmissão	- Fundo dedicado	- Políticas de Comida e água
- Programa de Tecnologias de baixo carbono	- Leilão	- Isenção Nacional de Impostos Locais	- Acesso à rede	- Fundo elegível	- Requerimentos de conteúdo local
	- Quota	- Imposto de Carbono	- Despacho preferencial	- Garantias	- Regulações ambientais
	- Sistema de Certificado	- Acelerar depreciação	- Outros benefícios de grid	- Suporte de pré-investimento	- Requerimentos sociais
	- Net metering	- Outros Benefícios Fiscais		- Financiamento direto	
	- Mandato				
	- Registro				

Fonte: Adaptado IRENA, 2017c

### 3.2.1.3 Criação de Empregos

IRENA divulga anualmente o número de pessoas trabalhando em todo mundo no mercado de energias renováveis (fases de instalação, operação e manutenção), esses relatórios, associados aos dados de expansão das fontes renováveis no mundo, permitem criar uma taxa média de número de empregos por MW instalado.

Na Tabela 8 estão sintetizados os dados agregados, levando em consideração os três primeiros anos do programa, para o número de empregos e capacidade instalada no mundo das fontes contempladas no programa.

O resultado será um dado aproximado, já que o fator selecionado não é individual para cada fonte.

Tabela 8: Número médio de empregos gerados por MW/ano no Brasil.

Ano	Empregos Gerados (10 <sup>3</sup> )	Capacidade Instalada (MW)	Número médio de empregos MW/ano
2014	894	106.44	8.40
2015	934	112.62	8.29
2016	918	121.32	7.57
2017	876	128.29	6.83

**Número médio de empregos por MW: 7.77**

Fonte: Elaboração própria com base em MORAES, 2010; IRENA, 2018b; IRENA, 2018d; UN, 2011.

### 3.2.1.4 Mitigação de gases de efeito estufa

Para mensurar os resultados do Programa quanto a efetividade na mitigação de GEE, serão utilizados os Fatores de Emissões de Gases de Efeito Estufa para o setor de energia, fornecidos, em uma base anual, pelo - Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações – MCTIC em 2017.

Dado que o programa entrou em vigor em 2013, a análise será feita para os primeiros 4 anos completos de existência do PMER, ou seja, para o período de 2013 à 2017, conforme os fatores médios anuais da Tabela 9.

Tabela 9: Fator de emissão do sistema elétrico do Brasil

Ano	Fator de emissão médio anual (tCO <sub>2</sub> /MWh)
2014	0.1355
2015	0.1244
2016	0.0817
2017	0.0927

Fonte: MCTIC, 2018.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos por meio da modelagem realizada no LEAP, bem como a análise de efetividade do PMER. Por meio da interpretação desses dados, no final do capítulo, é proposta uma estratégia de transição energética para o estado de Minas Gerais. É importante frisar que os cenários obtidos nessa pesquisa mostram tendências e alternativas no médio e longo prazo, baseadas em uma coletânea de dados históricos e estatísticos, que visam nortear a tomada de decisão no que tange o planejamento de sistemas energéticos.

### **4.1 Modelagem do Sistema Energético de Minas Gerais no horizonte 2030-2050**

Nesse item são apresentados os resultados obtidos da modelagem realizada no LEAP para o período 2030-2050.

#### **4.1.1 Demanda de Energia**

Baseado nas premissas gerais, que envolvem praticamente critérios econômicos e demográficos, a evolução do consumo final de energia, no horizonte 2030-2050, por setores econômicos é mostrado no Gráfico 1. Os valores refletem como o consumo irá evoluir no cenário REF. Uma vez que o objetivo dessa pesquisa é prover alternativas e diversidade de suprimento energético, os cenários ETM e ETA possuem o mesmo consumo final de energia em termos de tep.

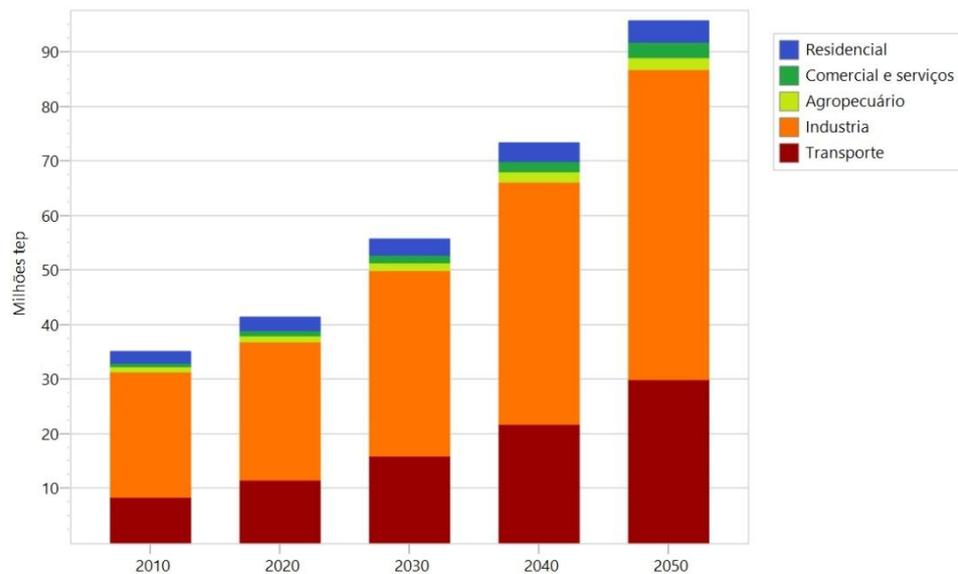


Gráfico 1: Consumo final de energia por setores – REF, ETM e ETA  
Fonte: Elaboração própria

Em geral, o consumo final de energia aumenta consideravelmente em um período de 40 anos, saindo de 35 milhões de tep em 2010 para 95,7 milhões de tep em 2050, quase triplicando em seu valor base. Os setores da indústria (65,4%) e o de transporte (24%) juntos somaram mais de 89% do total da energia consumida em 2010. Em 2030 e 2050, é esperado, com o aumento populacional e uma perspectiva de crescimento econômico mais conservadora, que o setor de transporte passe ter uma maior participação, 28,5% e 31,3%, respectivamente. Dessa forma, a indústria passaria a representar, 61,2%, em 2030, e 59,4% em 2050. A elevada participação desses dois setores se dá principalmente por desempenhar atividades de alta energointensidade.

#### 4.1.1.2 Uso final de energia por combustíveis

A estrutura do uso final de energia no cenário REF é mostrada na Gráfico 2; como pode ser observado, os combustíveis de origem fóssil (derivados de petróleo, carvão mineral - combustíveis sólidos - e gás natural) representam mais de 50% da demanda final de energia no ano de 2010. Essa participação tende a aumentar para 54% em 2030, e 55% em 2050.

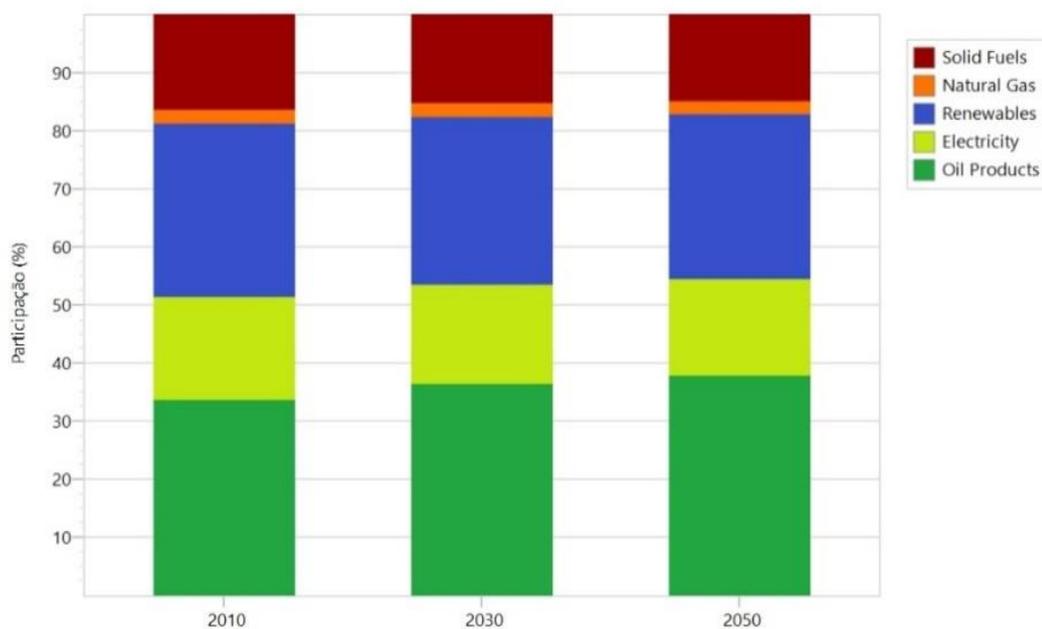


Gráfico 2: Uso final de energia por combustíveis – REF.  
Fonte: Elaboração própria

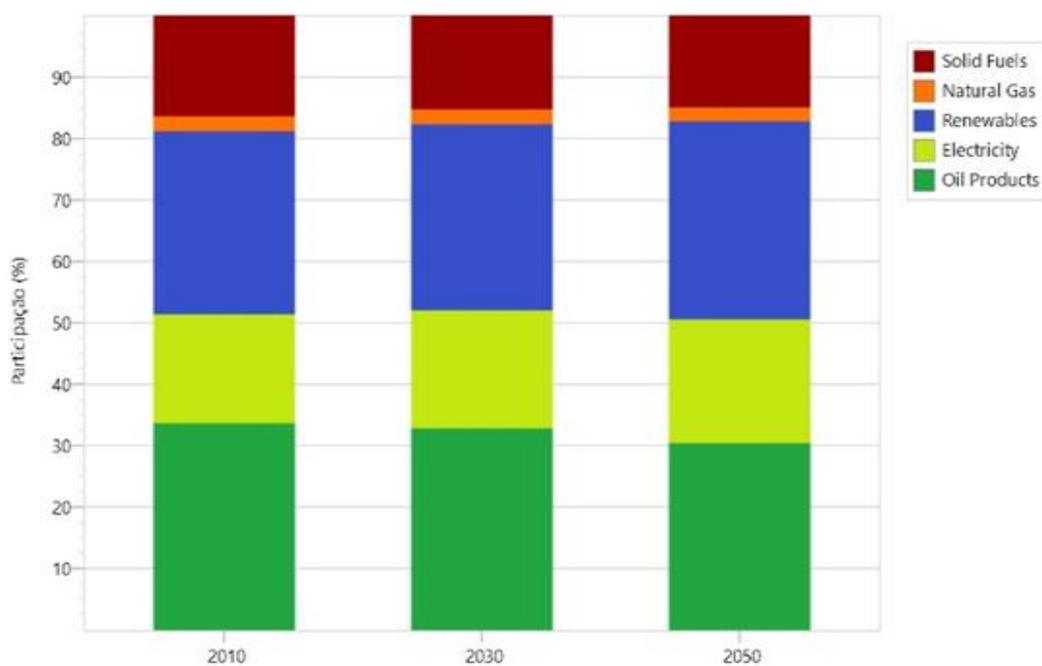


Gráfico 3: Uso final de energia por combustíveis – ETM.  
Fonte: Elaboração própria

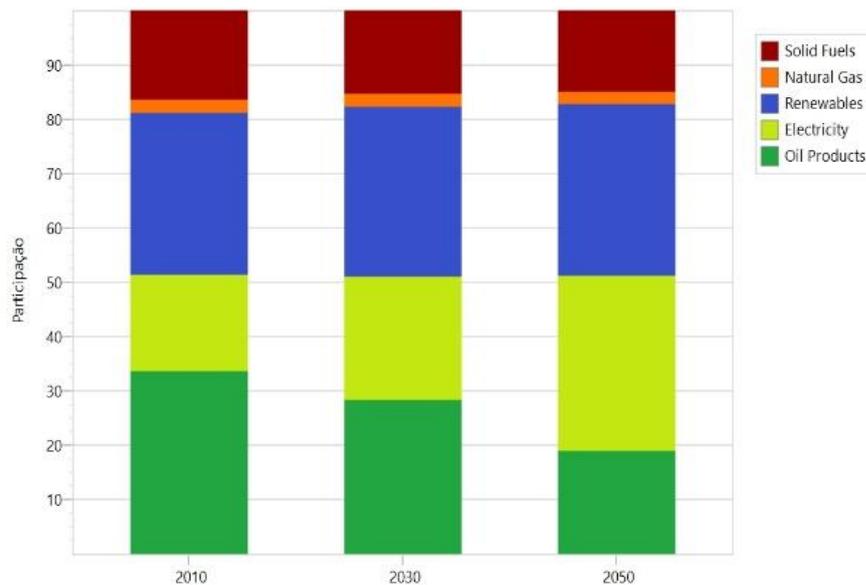


Gráfico 4: Uso final de energia por combustíveis – ETA.  
Fonte: Elaboração própria

Nos cenários alternativos, são propostas políticas que visem uma transição gradual dos derivados de petróleo no setor de transportes para veículos elétricos e biocombustíveis. Sendo assim o cenário ETM (Gráfico 3), possui uma leve diminuição da participação de fósseis passando para 50% em 2030, e 47% em 2050. Já o cenário ETA (Gráfico 4), prevê uma política mais audaciosa, com uma grande penetração de veículos elétricos na matriz, diminuindo a demanda de combustíveis de origem fóssil para 43% em 2030, e para 36% em 2050. Nesse cenário, em 2050, a eletricidade passa a representar 32% da demanda final de energia, um aumento de 100% quando comparado ao mesmo período do cenário REF.

A demanda de eletricidade para todos os cenários é mostrada no Gráfico 5. Como era de se esperar, o cenário ETA é o que mais demanda por esse energético, com uma necessidade 148 mil GWh em 2030, e mais que dobrando em 2050, com 359 mil GWh. Essa diferença elevada é devida principalmente a transição de combustíveis fósseis para eletricidade no setor de transporte, denotando, portanto, que uma penetração intensiva de veículos elétricos irá impactar consideravelmente a demanda por eletricidade.

Em relação aos cenários ETM e REF, quando comparado um ao outro, não possui uma diferença tão significativa quanto o ETA, já que o ETM possui um aumento em torno de 20% da participação da eletricidade em sua demanda final de energia em relação ao REF.

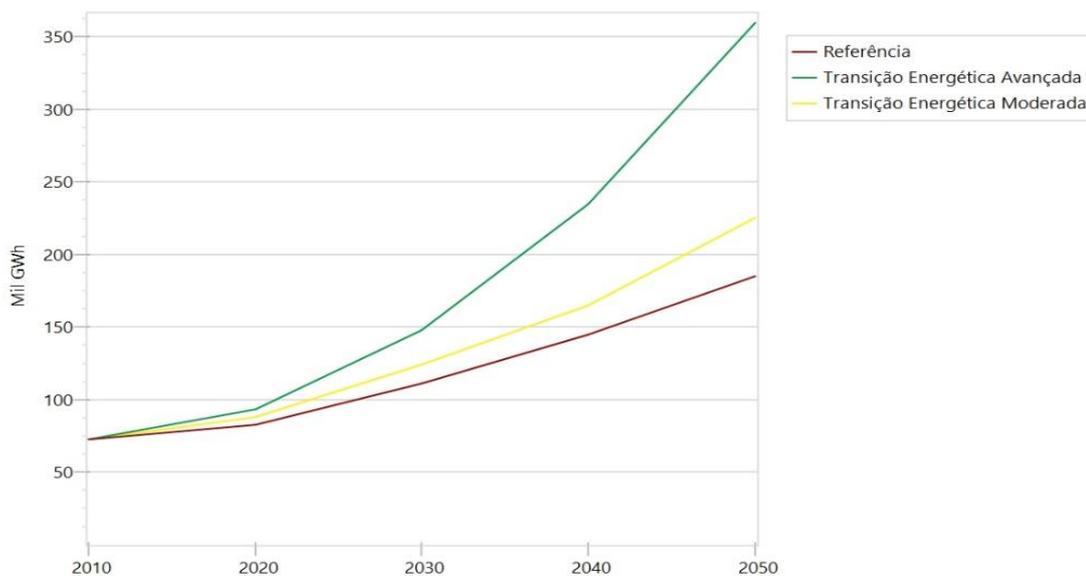


Gráfico 5: Demanda por eletricidade  
Fonte: Elaboração própria

#### 4.1.2 Transformação

Os módulos de transformação estão programados para produzir eletricidade e recursos de origem renovável conforme a demanda por esses. No entanto, quando se trata de recursos de origem fóssil, o sistema é completamente limitado às capacidades já existentes no ano base, e permanece assim no período projetado, uma vez que não há planos de expansão de refinarias de petróleo e nem de coquearias no planejamento do governo, e não é um objetivo desse estudo a promoção desses energéticos. O Gráfico 6 mostra que no cenário REF os módulos com maior capacidade de produção são os de geração de eletricidade e as carvoarias, com 23 e 12 milhões de tep, respectivamente, até 2050. Nesses cenários, as perdas de transmissão e distribuição aumentam de 17% para 18,5% até 2030, conforme dados do PDE 2027.

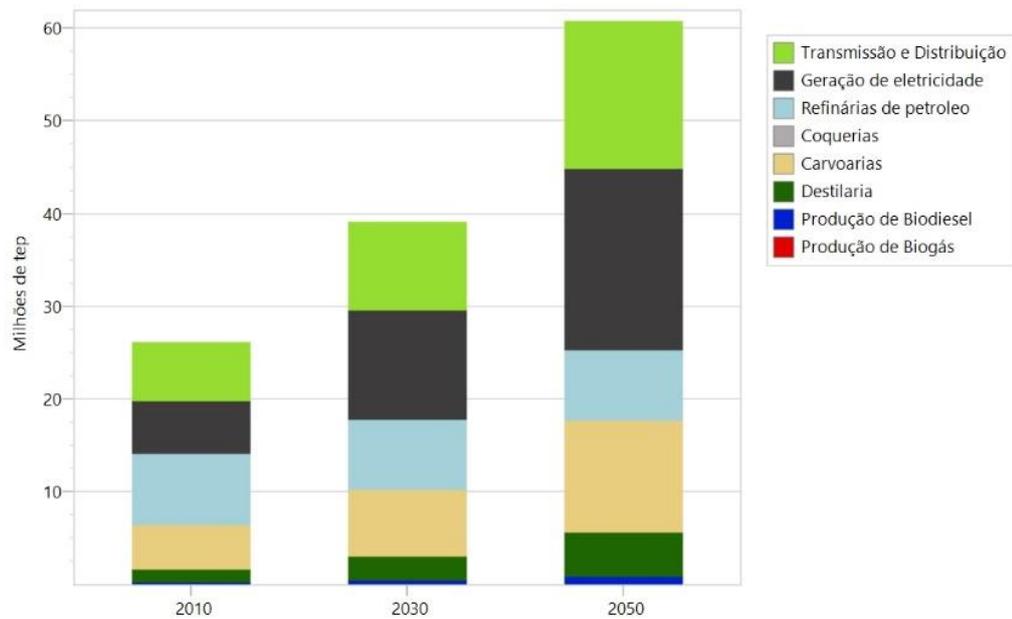


Gráfico 6: Produção de energéticos – REF  
 Fonte: Elaboração própria

Os cenários alternativos ETM e ETA além de permanecerem com uma produção significativa de eletricidade e carvão vegetal, também começam a produzir biocombustíveis (biogás, biodiesel e etanol) de forma considerável, de modo a fornecer matéria-prima para produção de eletricidade e atender a demanda do setor de transportes. Nesse sentido, será necessário que em 2050 sejam produzidos 12,9 milhões de tep de biocombustíveis líquidos para atender à demanda do sistema energético do cenário ETM, e 14,1 milhões de tep do cenário ETA, como mostrado nos Gráficos 7 e 8, respectivamente.

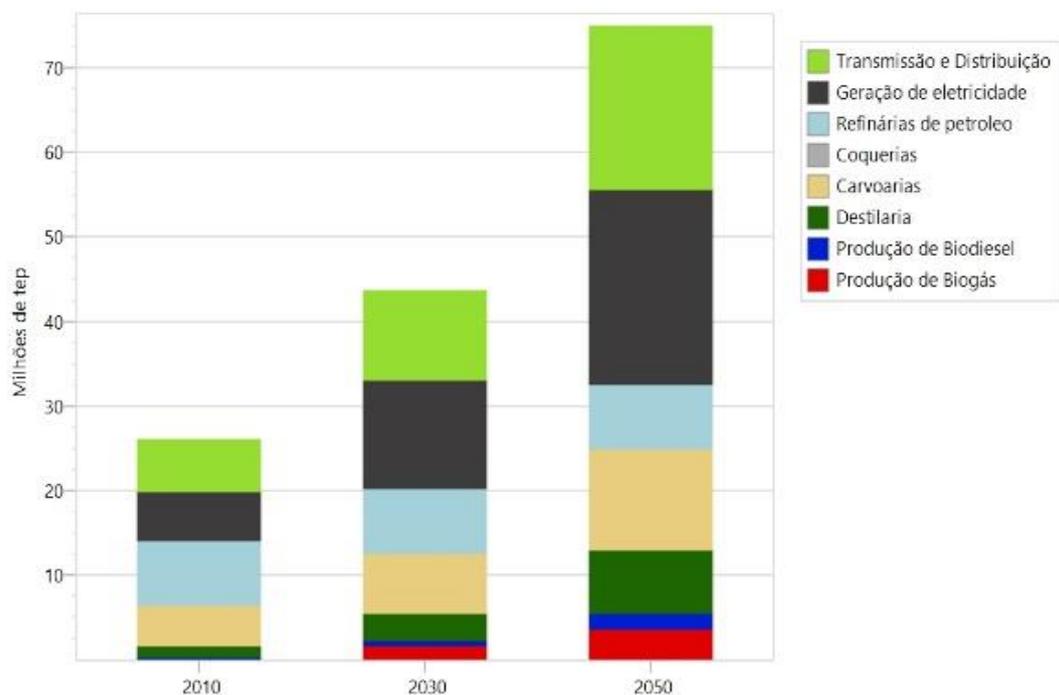


Gráfico 7: Produção de energéticos – ETM  
Fonte: Elaboração própria

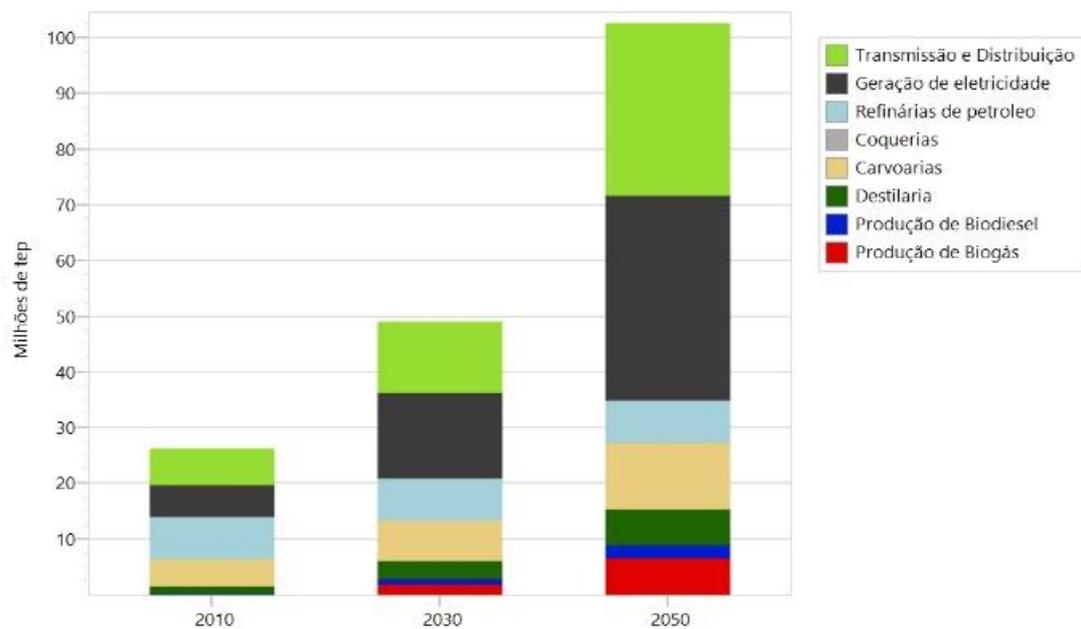


Gráfico 8: Produção de energéticos – ETA  
Fonte: Elaboração própria

#### 4.1.2.1 Geração de Eletricidade

Para atender à crescente demanda por eletricidade, o cenário REF prevê uma expansão na capacidade geração elétrica que permitirá gerar o montante de 136 TWh até 2030, e 227 TWh até 2050, como mostrado no Gráfico 9. Os cenários alternativos ETM e ETA possuem uma capacidade maior de geração de eletricidade, podendo gerar até 149 TWh e 177,5 TWh até 2030, e 267 TWh e 426 TWh até 2050, respectivamente. Esse montante elevado é devido à penetração de veículos elétricos e das tecnologias de geração de fontes intermitentes (solar e eólica), principalmente no cenário ETM que possui uma inserção mais agressiva dessas tecnologias.

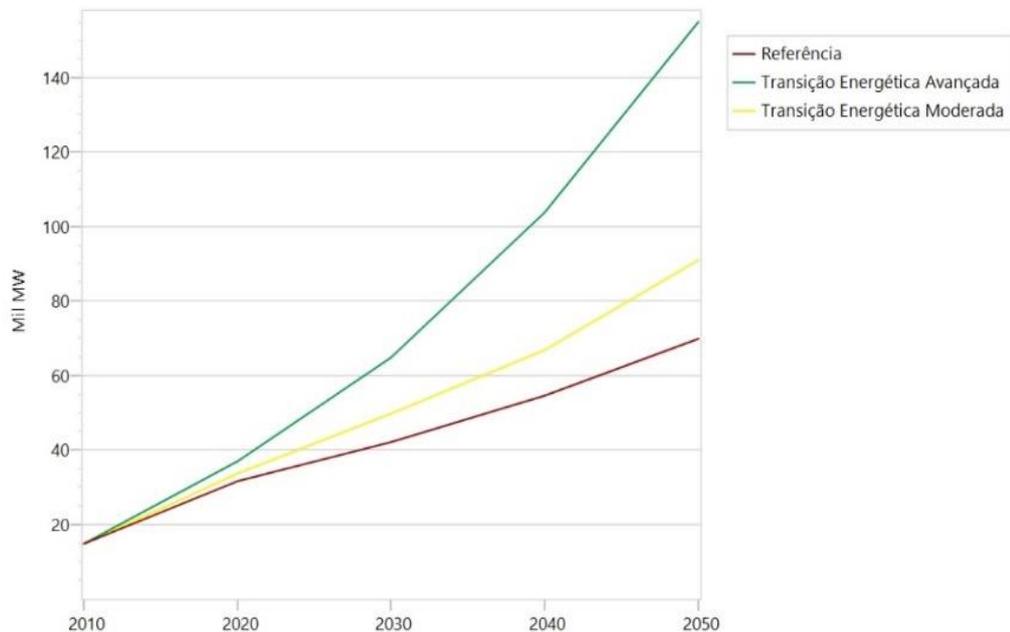


Gráfico 9: Projeção de geração de eletricidade por cenários  
Fonte: Elaboração própria

Os resultados da modelagem do sistema de geração de eletricidade podem ser vistos na Tabela 10, bem como no Gráfico 10, Gráfico 11 e Gráfico 12. No ano base 2010, mais de 80% da matriz elétrica do estado de Minas Gerais era composta por hidrelétricas. Nas projeções desenhadas para o período 2030, o cenário REF possui capacidade instalada de 42,2 GW, sendo composto majoritariamente por Hidrelétricas e PCH's (32,3%), seguidos das térmicas a gás natural (24,5%), óleo combustível (22,8%) e carvão mineral (13,5%). Já o cenário ETM possui uma maior capacidade instalada (49,6 GW), e sua composição difere de forma significativa do

cenário REF, sendo composto majoritariamente de fontes de energias renováveis. Nesse cenário, as UTE de ciclo combinado movidas a gás natural são a principal base da matriz, com 34,4%, seguidas pelas hídricas, com 27,9%, e pelas térmicas movidas a biomassa, que somam o montante de 24,6%. Nesse cenário a tecnologia fotovoltaica possui uma participação mais expressiva, respondendo por 10,1% da composição da matriz. O cenário ETM possui a maior capacidade instalada quando comparado aos demais, com 64,8 GW, em que as térmicas de ciclo combinado respondem por 27,8%, e a térmicas a biomassa possuem um papel mais expressivo do que as hídricas, com 24,3% e 21,5%, respectivamente. A participação fotovoltaica também cresce chegando a 15,4% e, nesse cenário, são inseridas as usinas eólicas que representam 7,7% da matriz.

Tabela 10: Capacidade Instalada (GW) por cenários

Cenários	2030	2050
<b>Referência</b>	42,2	69,8
<b>Transição Energética Moderada</b>	49,6	90,9
<b>Transição Energética Avançada</b>	64,8	155,0

Fonte: Elaboração própria

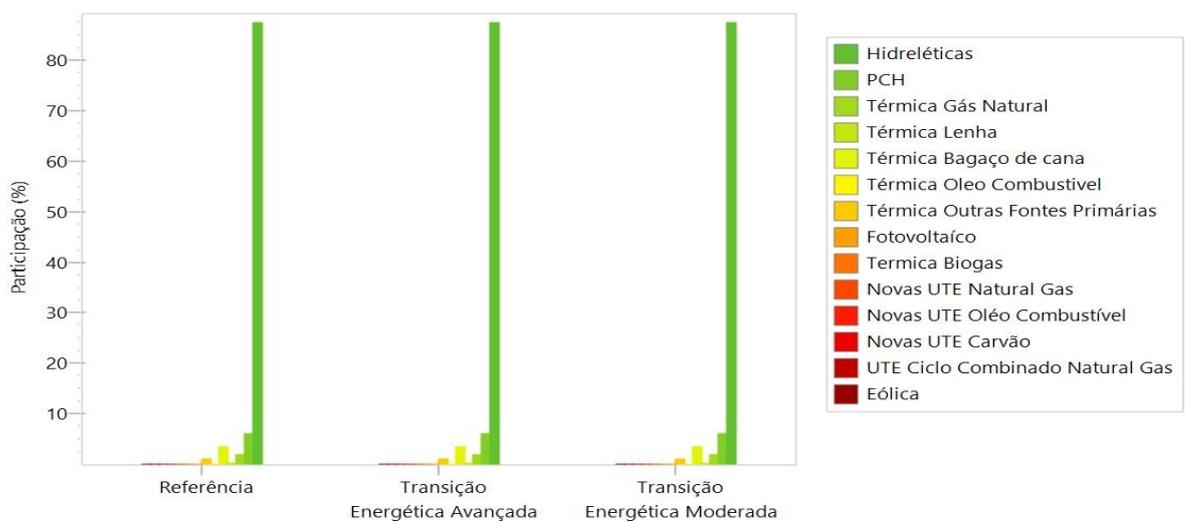


Gráfico 10: Matriz elétrica em 2010 por cenários

Fonte: Elaboração própria

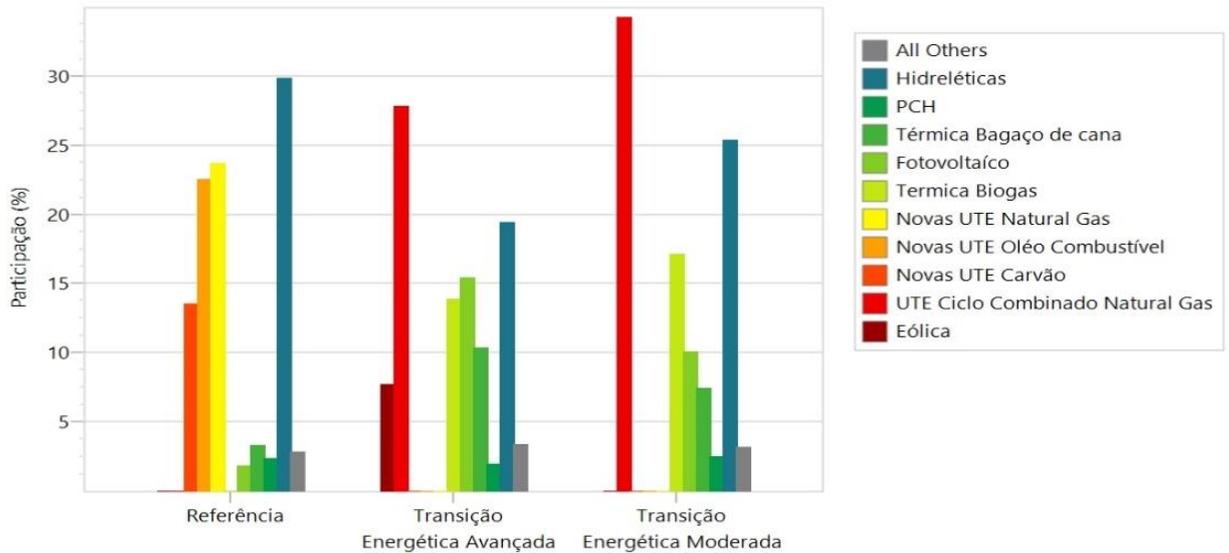


Gráfico 11: Matriz elétrica em 2030 por cenários  
 Fonte: Elaboração própria

A matriz elétrica do cenário REF em 2050 possui um aumento significativo da participação de tecnologias movidas por meio de combustíveis de origem fóssil (75,7%), tornando-se a principal base do sistema. Os cenários ETM e ETA conseguem se manter por meio de uma geração majoritária de fontes renováveis de energia, porém observa-se uma redução expressiva da fonte hídrica, 15,8 % e 9,4%, respectivamente. Nesses cenários, as térmicas a biomassa e as usinas fotovoltaicas passam a corresponder por uma grande parte do sistema, sendo no cenário ETM, 25,8% e 14,3%, e no cenário ETA, 26,4% e 16,8%, respectivamente.

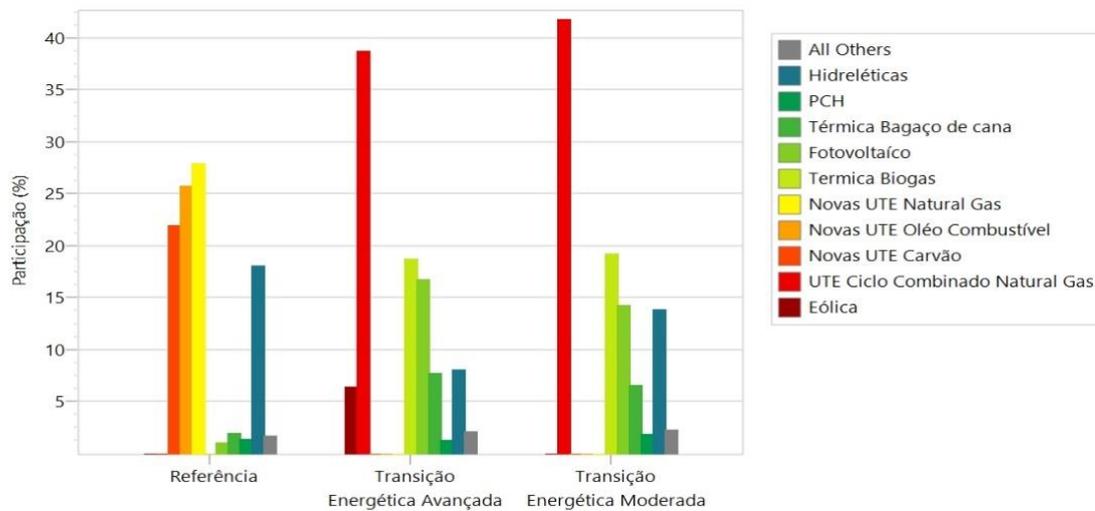


Gráfico 12: Matriz elétrica em 2050 por cenários  
Fonte: Elaboração própria

#### 4.1.3 Recursos

Como era de se esperar, no horizonte 2050, o cenário ETA é o que mais necessita de recursos energéticos para suprir o seu sistema energético, com uma demanda da ordem de 160 milhões de tep. No entanto, até 2030 ambos cenários REF e ETM possuíam suas respectivas demandas por recursos praticamente iguais, com uma ordem de 85 milhões de tep. O cenário que apresenta menor intensidade de recursos em todo o período projetado, é o cenário ETM, com 79 milhões de tep em 2030, e 141 tep em 2050. Isso representa uma diferença de aproximadamente 20 milhões de tep entre os cenários ETM e ETA, como pode ser observado no Gráfico 13.

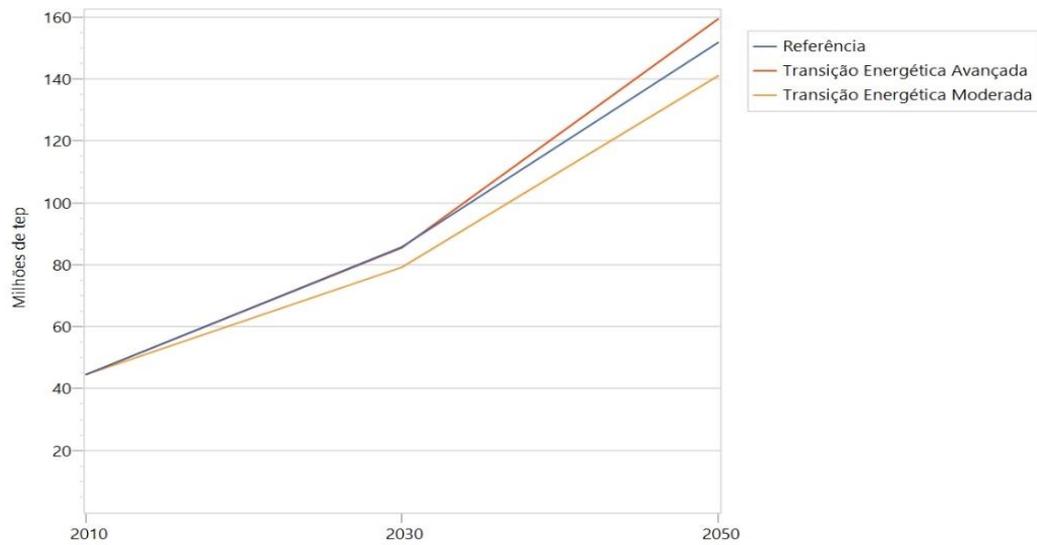


Gráfico 13: Demanda de recursos energéticos por cenários

Fonte: Elaboração própria

Embora o cenário ETA seja o mais intensivo em recursos energéticos, ele é o que menos depende da importação de recursos, uma vez que seu sistema é predominantemente dependente de recursos renováveis, que são produzidos no âmbito do território mineiro. Em contrapartida, o cenário REF, que é intensivo em energéticos não renováveis, possui larga dependência da importação desses, uma vez que Minas Gerais não possui expressivas reservas de petróleo, carvão mineral ou gás natural. Como mostra o Gráfico 14 os cenários ETM e ETA possuem necessidades de importações similares ao longo do período analisado. No entanto, o cenário REF possui uma diferença da ordem de quase 40 milhões de tep, no ano 2050, quando comparado aos outros dois cenários.

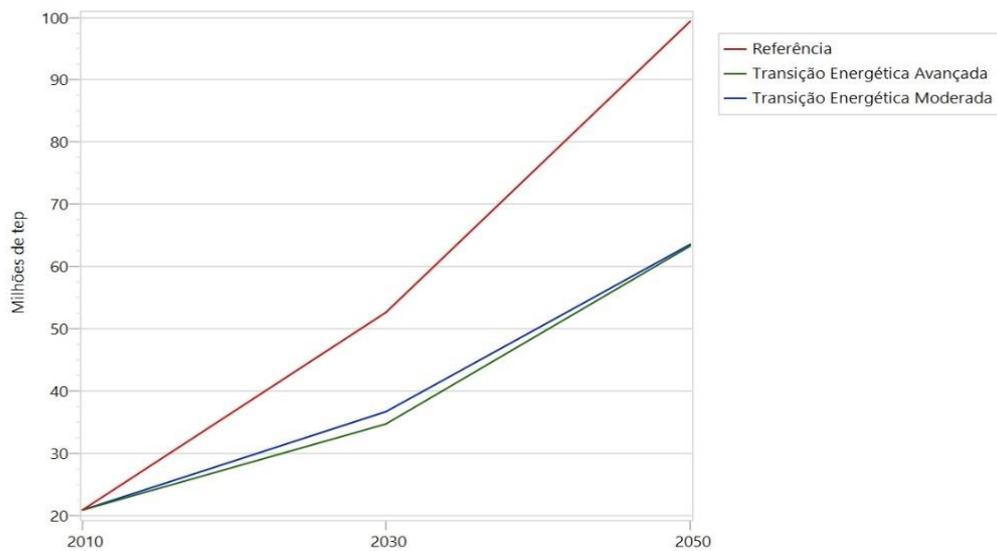


Gráfico 14: Importação de recursos energéticos por cenários  
Fonte: Elaboração própria

#### 4.1.4 Emissões de Gases de Efeito Estufa

A evolução das emissões de GEE, no período 2030-2050, referente ao setor de energia no âmbito do estado de Minas Gerais, para os três cenários modelados nesse estudo, são mostradas no Gráfico 15. No cenário REF é previsto que as emissões irão aumentar em torno de 36 milhões de tCO<sub>2e</sub> até 2030, quando comparadas ao ano base, e em 2050 esse número mais que triplica, chegando ao montante de 109 milhões de tCO<sub>2e</sub>. Nos cenários alternativos as emissões são inferiores quando comparadas ao cenário REF, sendo o cenário ETA o menos intensivo em carbono, com um aumento de 23 tCO<sub>2e</sub> em 2030, e 54 tCO<sub>2e</sub> em 2050, esse último, uma redução de aproximadamente 50% quando comparada ao cenário REF. Já o ETM possui previsão de um aumento de 31 milhões de tCO<sub>2e</sub> até 2030, e 87 milhões de tCO<sub>2e</sub>, em 2050, uma redução em torno de 30% comparado ao cenário REF.

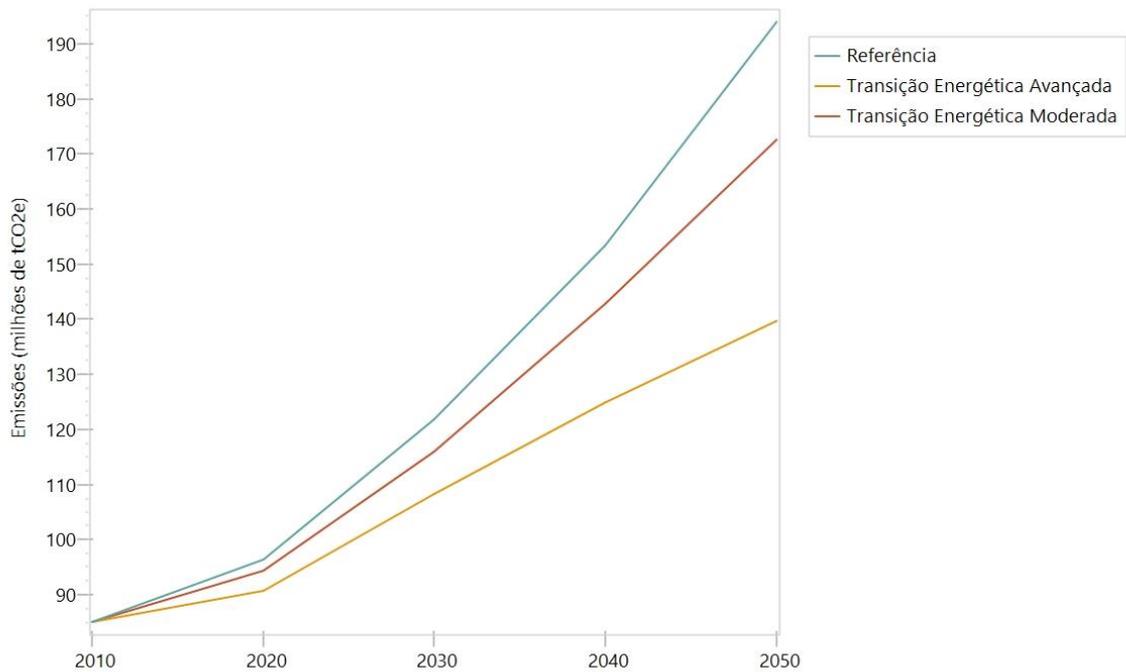


Gráfico 15: Evolução das Emissões de GEE no horizonte 2030-2050 por cenários.  
Fonte: Elaboração própria

#### 4.1.5 Análise de Custo-benefício

Uma análise de custo-benefício dos cenários projetados foi realizada, e os resultados são apresentados na Tabela 11. Os resultados são baseados nos custos de produção de eletricidade e nos custos de importação de recursos energéticos, bem como no Valor Presente Líquido - VPL dos cenários alternativos em comparação com o cenário de referência. O VPL representa todos os custos descontados, a uma taxa de 8% no ano 2010 e benefícios acumulados em um cenário menos o outro. Sendo assim podemos observar que no período de 2010 a 2050 o cenário ETM custará em torno de 18,1 bilhões de dólares a mais que o cenário REF no que tange aos custos de geração de eletricidade, enquanto esse valor para o cenário ETA será em torno de 34,8 bilhões. Essa diferença era esperada uma vez que os cenários alternativos além de possuírem uma capacidade instalada maior, também possuem tecnologias de geração com custos associados mais elevados quando comparado ao cenário REF.

No entanto, quando a análise é feita para os recursos energéticos, o cenário REF, como é mais dependente de importação, é mais caro quando comparado aos cenários alternativos, sendo o cenário ETM 159,2 bilhões de dólares mais barato, e o cenário ETA 182 bilhões de dólares. Uma vez que o custo de importação de recursos energéticos ultrapassa os custos de produção de energia elétrica, temos que o VPL para os cenários ETM e ETA é negativo, isso

quer dizer que o cenário REF é mais caro que os cenários alternativos, em outras palavras, o sinal negativo denota o quão mais barato esses são em relação ao cenário REF. Para esse estudo, o cenário ETM é 141,1 bilhões mais barato que o REF, já para cenário ETA esse montante equivale a 147,2 bilhões. O cenário ETA, além de apresentar o melhor custo-benefício, também é o menos emissor, evitando a emissão de 746 milhões de tCO<sub>2</sub>e em relação ao cenário REF.

Tabela 11: Análise de Custo-benefício dos cenários alternativos em comparação com o cenário REF

Custos e benefícios cumulativos: 2010-2050. Relativos ao Cenário: Referência. Taxa de desconto 8% para o ano 2010. Unidade: Bilhões U.S. Dolar		
	<b>Transição Energética Moderada</b>	<b>Transição Energética Avançada</b>
Transformação	18,1	34,8
Geração de eletricidade	18,1	34,8
Recursos	-159,2	-182,0
Produção	-	-
Importação	-159,2	-182,0
Exportação	-	-
<b>Valor Presente Líquido - VPL</b>	<b>-141,1</b>	<b>-147,2</b>
<b>Emissões evitadas (Milhões de tCO<sub>2</sub>e)</b>	<b>286,6</b>	<b>746,2</b>

Fonte: Elaboração própria

#### 4.1.6 Sistemas de Energia no Futuro

Como demonstrado no cenário REF, é esperado que com o crescimento populacional e o desenvolvimento econômico, ainda que tímido, o consumo de energia aumente de forma significativa no horizonte 2030-2050. Isso deverá afetar diretamente a forma como que consumimos e ofertamos energia no futuro, desse modo, o Anexo I fornece previsões de como o sistema energético do estado de Minas Gerais deverá se desenhar de acordo com as premissas traçadas nos três cenários projetados nesse estudo.

Os resultados demonstram que o cenário ETA é o mais promissor em termos de atendimento a crescente demanda de energia, com a menor dependência de importação de recursos energéticos no horizonte estudado, e que ainda é o mais efetivo em termos de diminuição das emissões de GEE do setor energético. O cenário ETA também é mais barato comparado ao cenário REF, de acordo com o quesito geração de eletricidade associada a importação de recursos energéticos. Dessa forma, o cenário ETA, foi escolhido como base para subsidiar o processo de tomada de decisão relativa à construção das diretrizes da política de transição energética para o estado de Minas Gerais.

A Figura 11 e a Figura 12 ilustram a matriz energética do estado de Minas Gerais, sob o cenário ETA, para os anos de 2030 e 2050, respectivamente. No primeiro período, percebe-se que as fontes renováveis, além da hídrica, representam a principal base do sistema, e que os combustíveis de origem fóssil, ainda que possuam uma participação expressiva, são utilizados basicamente para atender o setor de transportes e a indústria. Em 2050, é esperado que as fontes renováveis se expandam ainda mais, principalmente na geração de eletricidade para atender a demanda expressiva do setor de transporte, que terá sofrido uma expressiva transição para biocombustíveis e veículos elétricos. Para assegurar a confiabilidade do sistema elétrico, o gás natural assume como o principal combustível de origem fóssil utilizado no sistema, uma vez que as térmicas de ciclo combinado são mais eficientes, e o gás natural mais sustentável do ponto de vista ambiental, quando comparado aos demais.

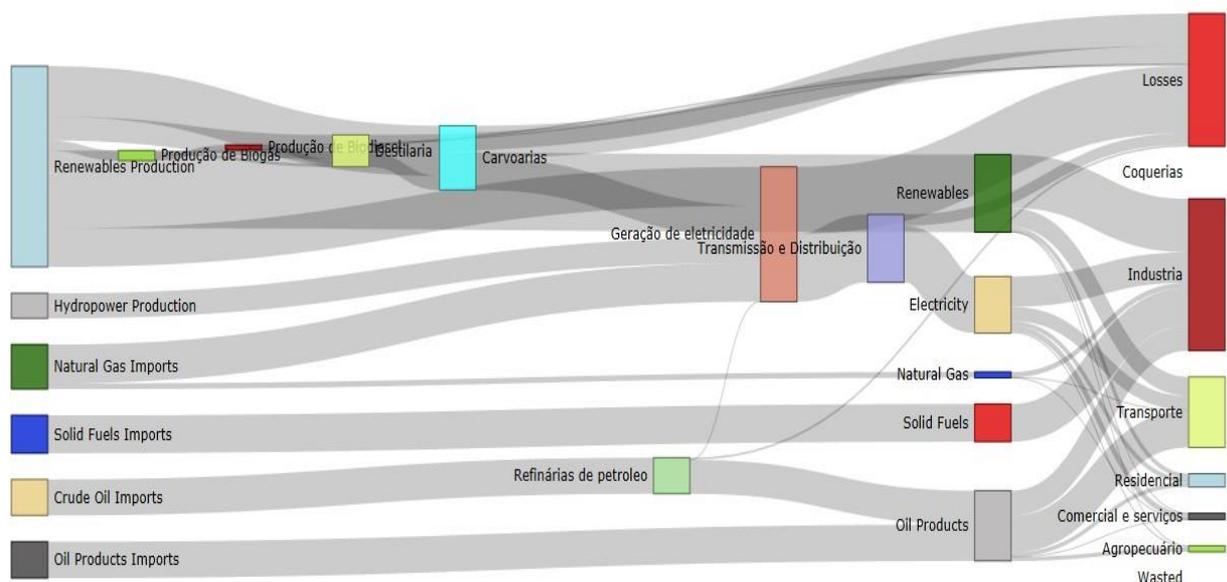


Figura 11: Matriz energética em 2030 - Cenário ETA  
Fonte: Elaboração própria

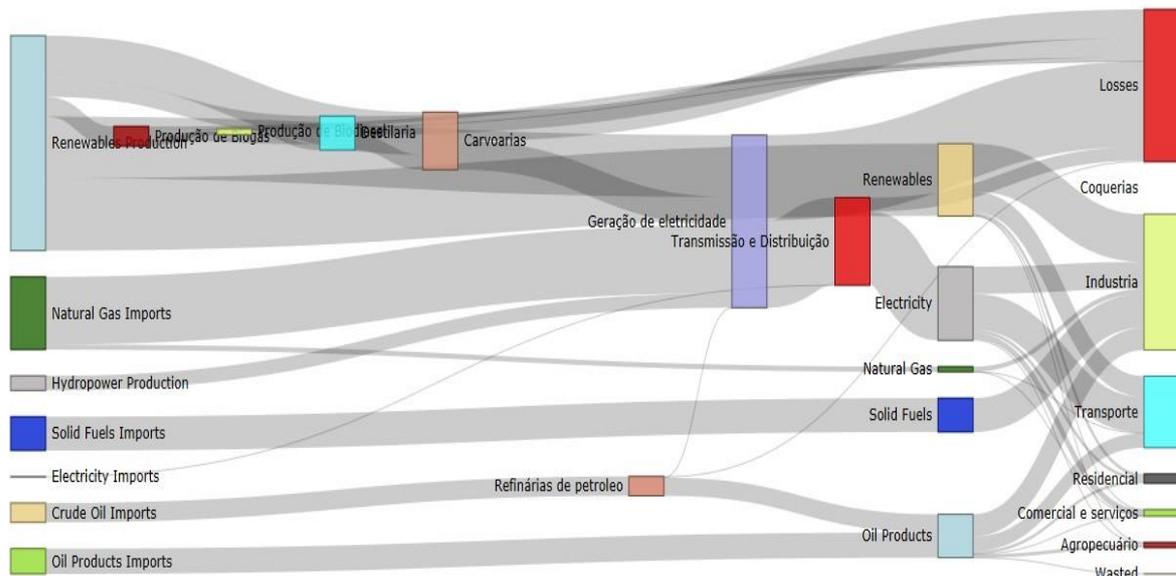


Figura 12: Matriz energética em 2050 - Cenário ETA  
 Fonte: Elaboração própria

## 4.2 Avaliação do PMRE no processo de expansão de energias renováveis no estado de Minas Gerais

### 4.2.1 Número de projetos implementados pelo PMER

Como mostrado no Quadro 3, foram selecionados 5 indicadores para realizar a análise do impacto do PMER sobre a expansão do número de projetos de energias renováveis no estado de Minas Gerais. Entretanto, embora os indicadores demonstrem eficiência na mensuração dos resultados do PMER, os indicadores 2 e 3 não possuem dados suficientes disponíveis para realização da análise.

Dessa forma, serão apresentados os resultados dos indicadores para os quais foi possível obter dados tempestivos (1 e 4). Também será feita uma análise mais aprofundada dos números encontrados nas bases de dados do BIG ANEEL.

A Tabela 12 apresenta a capacidade total de geração instalada por fonte, em Minas Gerais, de 2010 a 2016. Os empreendimentos analisados foram Usina Hidrelétrica – UHE, Pequenas Centrais Elétricas – PCH, Central Geradora Hidrelétrica - CGH, Central Geradora Eólica – EOL, Central Geradora Solar Fotovoltaica – UFV, Geração Distribuída – GD, e Usina Termelétrica - UTE. Os dados permitem verificar a expansão da capacidade de cada fonte renovável incentivada antes e a partir do PMER, pois abrange três anos antes e três após a implementação do Programa e discrimina entre as fontes renováveis, inclusive as grandes e

pequenas hidrelétricas. No caso das térmicas renováveis, a maioria (cerca de 80%) corresponde a geração por bagaço de cana-de-açúcar, mas há também presença de usinas que utilizam biogás de resíduos urbanos e resíduos agrícolas, licor negro, carvão vegetal, gás de alto forno resultante do uso de biomassa e resíduos de madeira.

Tabela 12: Capacidade total de geração instalada em Minas Gerais por fonte em MW, 2010-2016

Ano	Capacidade Instalada (MW)								
	Source								
	UHE	PCH	CGH	EOL	UFV	UTE Renovável	UTE Gás	UTE Outras	Total
2017	12,578	710	156	0.2	323	1,594	381	556	16,301
2016	12,568	689	125	0.2	2.1	1,518	381	512	15,815
2015	12,568	665	122	0.2	1.4	1,496	381	510	15,748
2014	12,568	665	100	0.2	1.4	1,452	381	498	15,668
2013	12,516	637	93	0.2	0	1,401	379	476	15,504
2012	12,210	614	79	0.2	0	1,346	374	453	15,078
2011	12,210	580	72	0.2	0	1,273	374	434	14,944
2010	12,210	521	68	0.2	0	1,159	374	416	14,750

Fonte: Elaboração própria adaptado de ANEEL, 2019.

Verifica-se um aumento contínuo da capacidade de geração total instalada de 2010 a 2017, num total de 1.551 MW a mais no final do período em relação a 2010. Desse montante, 56,6%, se refere ao aumento da potência instalada de geração por fontes renováveis contempladas no PMER (exclui UHE). No entanto, entre 2013 e 2016, ou seja, a partir do lançamento do PMER, a entrada de nova potência instalada de fontes de energia renovável apresentou queda no seu ritmo, conforme se verifica no Gráfico 16. Em 2017, o setor volta a recuperar com uma grande inserção de energia fotovoltaica.

Considerando as diferentes fontes de geração renovável, observa-se a redução de nova capacidade instalada anualmente de fonte térmica renovável e pequenas hídricas. No caso das pequenas hídricas, porém, houve um pequeno aumento entre 2015 e 2017. Destaca-se positivamente o aumento representativo do ritmo da entrada de nova capacidade instalada de

usinas fotovoltaicas no período. Antes de 2013 não havia qualquer usina instalada, enquanto que em 2016 a entrada de capacidade de geração elétrica fotovoltaica foi significativa em relação às demais fontes.

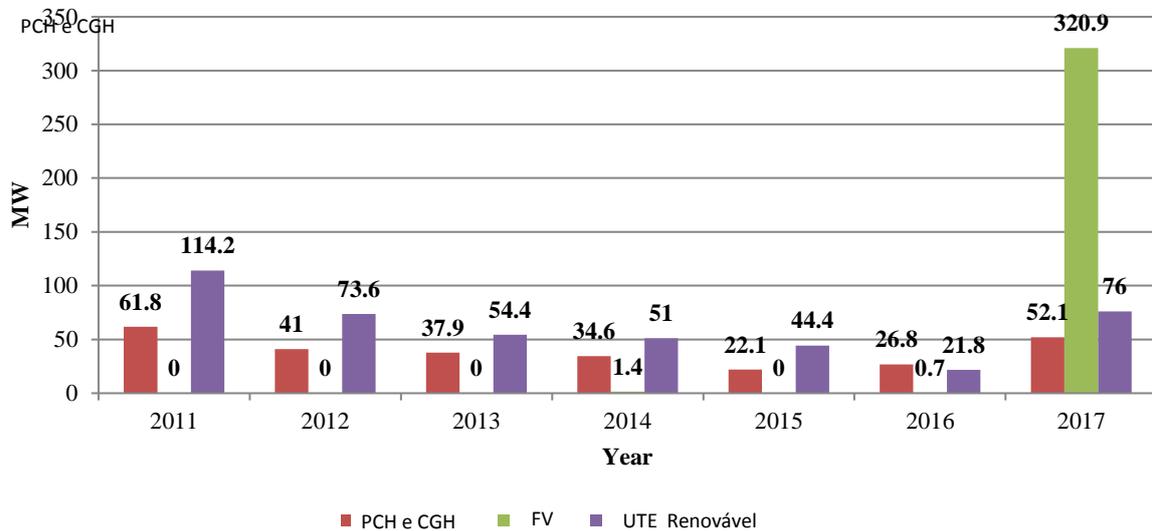


Gráfico 16: Entrada Anual de Energia Renovável, exceto UHE, na Matriz Elétrica de MG, por fonte, 2011 a 2017 (MW).

Fonte: Elaboração própria

Conforme se observa no Gráfico 17, a participação de energia renovável na matriz elétrica de Minas Gerais, excluindo-se as UHE, cresceu em todos os anos analisados. No entanto, o ritmo de aumento da proporção dessas fontes diminuiu a partir de 2013 até 2016, e só voltou a crescer significativamente em 2017, 4 anos depois da implementação do Programa. Esse resultado reflete parcialmente o que figura no Gráfico 16. A participação da energia renovável continuou aumentando de 2013 a 2017, porque a entrada de capacidade instalada por fonte não renovável diminuiu.

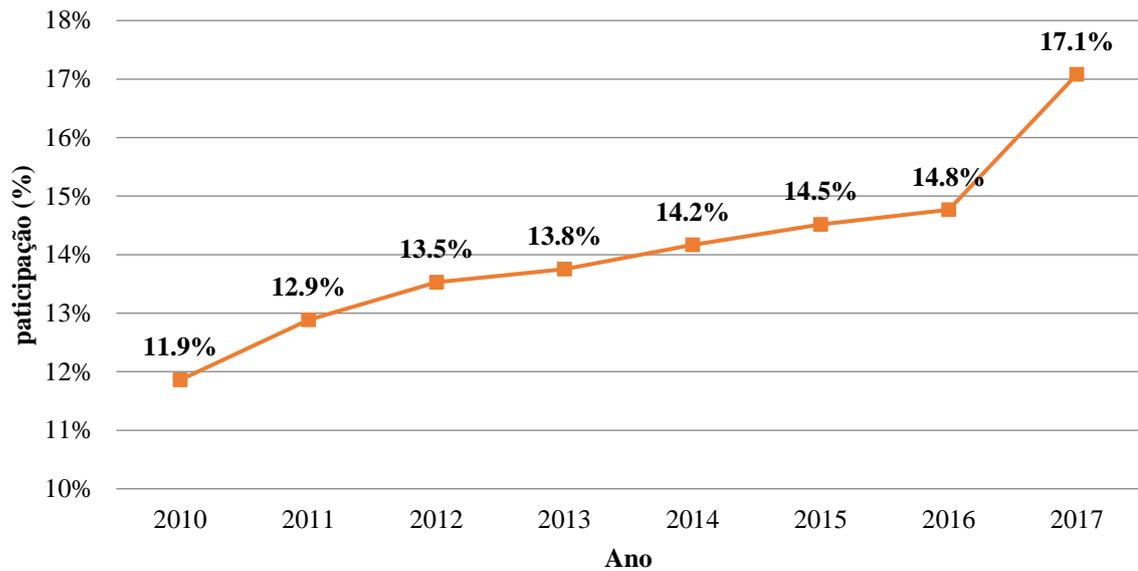


Gráfico 17: Participação de Energia Renovável, exceto UHE, na matriz elétrica de Minas Gerais, 2010 a 2016 (%)

Fonte: Elaboração própria

O Gráfico 18 apresenta a potência instalada total de micro e mini geração em Minas Gerais de 2013 a 2017. No ano de 2016 houve um aumento da potência de micro e mini geração instalada no estado de mais de 11 vezes. Do total de 19,4 MW instalados até fevereiro de 2017, 12,3 MW correspondiam a geração fotovoltaica. O restante era composto por geradores a partir de biogás de resíduos urbanos, animais ou agroindustriais, ou hídrica, ou ainda gás de alto forno oriundo de biomassa.

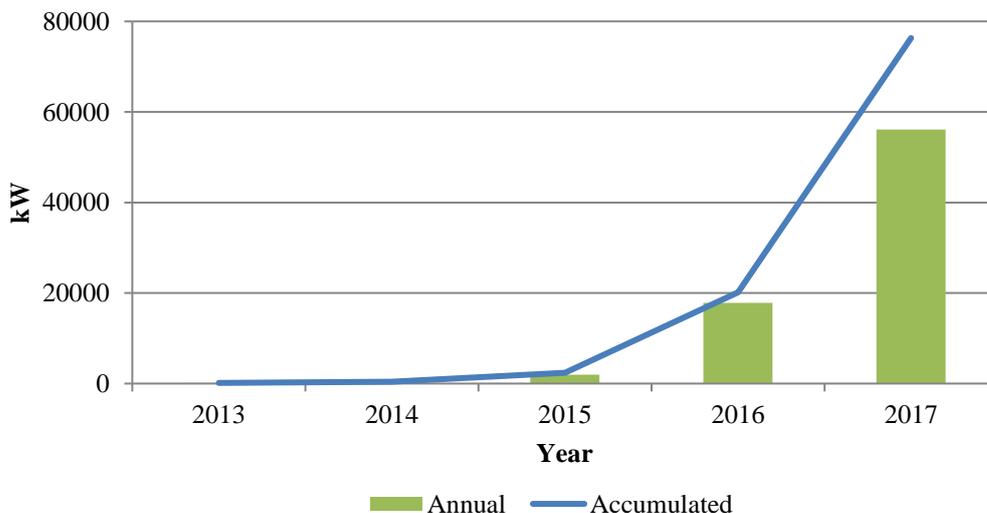


Gráfico 18: Potência instalada de micro e mini geração em Minas Gerais, 2013 a 2017 (kW)

Fonte: Elaboração própria

Ressalta-se que Minas Gerais é o estado do Brasil com maior número de unidades de geração distribuída, bem como maior capacidade de geração instalada desse tipo, como observado no Gráfico 19. Isso se deve às condições propícias do estado como o alto valor da tarifa de eletricidade e a incidência solar. Também não se pode desconsiderar o efeito positivo produzido a partir da regulamentação do ICMS para a geração distribuída, desonerando a energia produzida por essas unidades, não só porque melhorou o retorno financeiro dos investimentos, como também porque demonstrou o comprometimento do estado com o desenvolvimento dessa tecnologia, haja vista que Minas Gerais foi o primeiro a regulamentar essa questão tributária.

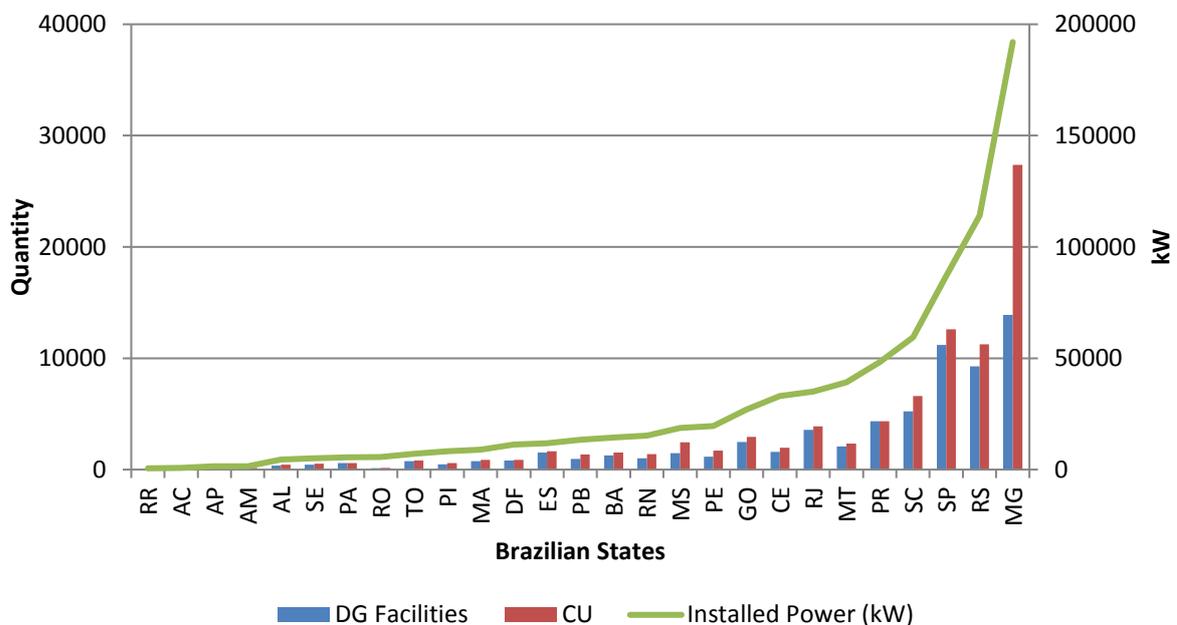


Gráfico 19: Quantidade de instalações de geração distribuída, Unidades Consumidoras atendidas e Potência Instalada por estado, 2017 (KW, nº).  
Fonte: Elaboração própria

Os aperfeiçoamentos na legislação ambiental advindos do PMER também favoreceram a ampliação da energia fotovoltaica no estado, uma vez que beneficiaram, especialmente, a instalação de projetos de autoconsumo remoto.

Até o início de 2017 já havia geração distribuída instalada em 256 municípios de Minas Gerais. Os municípios com maior potência instalada até esse período eram Sete Lagoas, com mais de 5 MW (em função de uma unidade de geração térmica a biomassa de 5 MW), Uberlândia, com mais de 1 MW e Belo Horizonte com quase 1 MW. Em número de unidades

consumidoras de energia oriunda de geração distribuída, Uberlândia estava em primeiro lugar com 236 unidades, seguida por Belo Horizonte, com 170, e Montes Claros, com 93 (ANEEL, 2019). Verifica-se por esses números que o uso da tecnologia de geração tende a ser maior em municípios com maior renda, mas que ainda assim há grande distribuição da instalação desses projetos por todo o estado.

#### 4.2.2 Inovação

São apresentados no Quadro 5 os resultados quanto ao atendimento dos requisitos proposto pela IRENA para se configurar uma política inovadora de incentivo as fontes de energia renovável:

Quadro 5: Classificação dos Instrumentos Abordados pelo PMER

<b>Política Nacional</b>	<b>Instrumentos Regulatórios</b>	<b>Incentivos Fiscais</b>	<b>Acesso à Rede</b>	<b>Financiamento</b>	<b>Conhecimento e recursos humanos</b>
Decreto N 9073 de 5 de junho de 2017 Plano Decenal de Energia	Prioridade nos processos de regularização ambiental Prioridade na celebração de contratos de compra de energia	Iseção de ICMS	Prioridade na solicitação e acesso ao sistema	Contratos de parceria para linhas de transmissão Linha de financiamento específica	Cooperação técnico-científica Formação e capacitação de recursos humanos

Fonte: Elaboração própria

O Decreto 9.073 de 5 de junho de 2017 (PLANALTO, 2017), atende em parte os requisitos do critério do primeiro item, Política Nacional, uma vez que possui metas específicas para expansão de Energias Renováveis. Entretanto, o PMER, embora possua objetivos em comum, não possui uma meta quantitativa definida para aumentar o número de projetos. Já os sobre os requisitos relativos à Lei Específica ou Estratégia para energia renovável, percebe-se que não existe nenhuma ação nesse sentido tanto a nível nacional quanto estadual, ficando a cargo dos Planos Decenais de Energia (PDE's) estabelecer as diretrizes para expansão do setor energético nacional. Destaca-se que a maioria dos investimentos previstos no PDE são para a indústria de Petróleo.

No que tange aos instrumentos regulatórios, o programa também deixa a desejar, uma vez que conta com apenas duas ações voltadas a dar celeridade nos processos de regularização ambiental e contratos de compra de energia (DN 217<sup>10</sup>). Instrumentos

<sup>10</sup> - Deliberação Normativa Copam nº 217, de 06 de dezembro de 2017

importantes, como tarifas especiais e certificados de energia renováveis, não são contemplados.

Em termos de incentivos fiscais, novamente, o PMER possui apenas a isenção de ICMS como chamariz de investimentos no setor. Em relação ao item acesso à rede, o PMER utiliza do mesmo artifício do item de instrumentos regulatórios, que é celeridade aos pedidos de acesso à rede. Não são previstos incentivos a novas linhas de transmissão e nem outros tipos de benefícios.

No item de financiamentos o PMER conta com uma linha específica de financiamento e contratos de parcerias público privada para construção de linhas de transmissão. Entretanto, a criação de um fundo específico seria um diferencial substancial para implementação do programa.

Em termos de benefícios socioeconômicos o PMER prevê cooperações tecnocientíficas para desenvolvimento das tecnologias renováveis em território mineiro, bem como a capacitação de recursos humanos na temática. Entretanto, nota-se a ausência de ações específicas para atender às necessidades da população rural e programas de âmbitos locais.

#### **4.2.3 Criação de Empregos**

A Tabela 13 demonstra um crescimento nos últimos três do número de pessoas empregadas no setor de energia renovável em decorrência da expansão de novos empreendimentos em Minas Gerais. Percebe-se que de 2013 para 2017 foram criados aproximadamente 5.657 postos de trabalhos. Nesse período, o número de empregos mais que triplicou em relação ao período anterior, isso se deve em grande parte ao aumento da capacidade instalada de empreendimento de GD e UFV, que foram os que mais se desenvolveram no estado no período de vigência do PMER.

Tabela 13: Total de Pessoas Que trabalhou no Setor de Energia Renováveis

Ano	Número Médio de Empregos Gerados por MW	Nova Capacidade Instalada por fontes incentivadas (inclui geração centralizada e GD)	Número de pessoas empregadas no setor
2013	7,77	92,40	717,95
2014	7,77	87,28	678,14
2015	7,77	68,46	531,96
2016	7,77	67,09	521,32
2017	7,77	505,14	3.924,94
<b>Total</b>		820,38	6.374,32

Fonte: Elaboração própria

#### 4.2.4 Mitigação de gases de efeito estufa

Conforme FEAM, 2016, em 2014 foram emitidas em torno de 124 milhões de toneladas CO<sub>2</sub> equivalente – MtCO<sub>2</sub>e, no estado de Minas Gerais, sendo que o setor de energia foi responsável por cerca de 37% dessas emissões, ou seja, 45,8 MtCO<sub>2</sub>e.

A Tabela 14 traz o total de emissões evitadas no período de vigência do PMER em relação à expansão dos empreendimentos contemplados nesse. Percebe-se que quando comparado ao número de emissões do setor, o total de emissões evitada representa em torno do 0,365% no ano de 2014. Para os outros anos, não é possível realizar a análise uma vez que não se dispõe dos dados de emissões para os anos de 2015 e 2016.

Tabela 14: Emissões Evitadas do Setor Elétrico em Minas Gerais

Year	Fator Médio Anual (tCO <sub>2</sub> /MWh)	Total (MWh/year)	Total de Emissões Evitadas (tCO <sub>2</sub> e)
2016	0.0817	2,050,795.0	167,549.95
2015	0.1244	2,002,287.0	249,084.50
2014	0.1355	1,943,482.0	263,341.81

Fonte: Elaboração própria

#### 4.2.5 Análise da Efetividade do PMER

O Programa Mineiro de Energia Renovável é o principal esforço do governo de Minas Gerais para o fomento da geração de energia elétrica por fontes renováveis. O programa é limitado em seu escopo e não atende ao setor de energia renovável como um todo, uma vez que não contempla todos os biocombustíveis e a geração de energia térmica. Sua maior

contribuição ocorreu no eixo dos incentivos fiscais com a consolidação das isenções fiscais para a geração de eletricidade por fontes renováveis, exceto grandes hidrelétricas.

Os resultados analisados demonstram que a geração de energia elétrica por fonte renovável tem crescido em Minas Gerais, no entanto, não é possível fazer uma associação dessa trajetória com o PMER. Os dados mostram que houve diminuição da entrada de pequenas usinas hidrelétricas e térmicas a biomassa nos últimos anos, parcialmente compensada pela instalação de empreendimentos solares. A inversão da trajetória de diminuição da entrada de operação de pequenas hidrelétricas, porém, pode ser um efeito positivo do programa.

Os resultados que mais claramente indicam efeitos positivos do programa são os referentes à energia fotovoltaica. Há uma evidente expansão da capacidade instalada de geração de energia fotovoltaica desde 2013, quando o PMER foi estabelecido. A micro e a minigeração distribuídas especificamente mostraram crescimento expressivo, apesar de que, em termos de capacidade instalada, ainda representa montante pouco significativo. No entanto, não é possível definir qual o grau de importância do programa para a efetivação desses empreendimentos, tendo em vista que a energia fotovoltaica teve outros incentivos fundamentais para seu desenvolvimento, originários tanto do governo federal como das condições de mercado e de fatores naturais.

Em termos de inovação política, os instrumentos abordados pelo PMER não são suficientes para reconhecer o programa como uma política robusta, eficiente e inovadora para promoção das fontes renováveis em Minas Gerais. Embora atenda alguns requisitos dos parâmetros propostos pela IRENA, fatores como lei e estratégia específicas de energias renováveis estão ausentes no estado. Este trabalho contribui para acabar com a inexistência de metas e diretrizes para curto, médio e longo prazo, aumentando, portanto, a ambição do Governo quanto a temática. Ademais, o PMER não adentra especificamente no contexto local e na promoção da geração distribuída, tendo os seus instrumentos uma abordagem mais genérica.

Assim como houve uma expansão da capacidade instalada de fontes de energias renováveis no estado, também houve um aumento na criação de novos postos de trabalhos advindos desses empreendimentos. Destaca-se o ano de 2016, onde foram criados mais de 21 mil empregos, presume-se, devido à expansão de empreendimentos fotovoltaicos, que possui uma alta taxa de empregabilidade. No entanto, esse aumento não pode ser atribuído com certeza ao PMER.

No que tange a mitigação de Gases de Efeito Estufa, o período em que se foi analisado não apresentou grandes reduções das emissões do setor, uma vez que pegando como

ano base 2014, a mitigação dos gases foi inferior a 0,5% do valor emitido no ano. Os cenários traçados nesse estudo, mostram um crescimento constante da demanda de energia elétrica, consequentemente as emissões também serão crescentes, principalmente no cenário REF, caso as fontes de energias renováveis não assumam um papel mais importante.

### **4.3 Discussão - Proposta Política Estadual de Transição Energética de Minas Gerais – PETE**

Nesse item é discutida uma proposta de Política Estadual de Transição Energética de Minas Gerais – PETE, que tem por objetivo promover a adoção integrada e aprimorada da modelagem de cenários energéticos no médio e longo prazo, para desenvolver e acelerar a transição energética no estado de Minas Gerais. Nesse sentido, cenário ETA, que demonstra maior viabilidade diante os parâmetros avaliados nessa pesquisa, deverá ser integrado ao processo de tomada de decisão, de modo a fornecer as metas e diretrizes do planejamento do sistema energético do estado de Minas Gerais no horizonte 2030-2050.

#### **4.3.1 Metas de Transição Energética para o Horizonte 2030-2050**

As metas que nortearão a PETE correspondem à composição do cenário ETA, e são listadas na Tabela 15.

Tabela 15: Metas de Transição Energética para o horizonte 2030-2050

	<b>2030</b>			<b>2050</b>		
<b>Energias Renováveis</b>	50%	excluindo	largas	60%	excluindo	largas
	hidrelétricas.			hidrelétricas.		
<b>Eficiência Energética no setor elétrico</b>	10%	de ganhos	no setor	15%	de ganhos	no setor
	elétrico			elétrico		
<b>Redução de Emissões de GEE</b>	12%	comparado	ao cenário	28%	comparado	ao cenário
	REF.			REF.		

Fonte: Elaboração própria

#### **4.3.2 Diretrizes da PETE**

A PETE estabelece as seguintes diretrizes:

- Identificar e solucionar desafios que dificultem o cumprimento das metas de energia renovável e eficiência energética;

- Reduzir a dependência de combustíveis fósseis como fonte de energia primária para atendimento as demandas energéticas do estado;
- Promover amplamente o cumprimento das metas de energia renovável e eficiência energética;
- Prover instrumentos tributários, financeiros e creditícios que aumente a viabilidade econômica de empreendimentos de energia renovável e ações de eficiência energética no estado;
- Investir em pesquisa e desenvolvimento em energia renovável e eficiência energética para contribuir com o desenvolvimento socioeconômico do estado.

### **4.3.3 Eixos da PETE**

A PETE visa efficientizar e diversificar a matriz energética de Minas Gerais por meio, principalmente, dos seguintes eixos de eficiência e energia renovável:

- Eficiência energética no setor elétrico;
- Eficiência energética no consumo final de energia;
- Tecnologias de baixo carbono;
- Energia Solar, principalmente as tecnologias:
  - Fotovoltaico;
  - Usinas de concentração solar;
  - Aquecedores solar;
  - Sistemas de condicionamento de ar solar.
- Energia Eólica
- Biomassa
  - Biogás, e
  - Biocombustíveis

### **4.3.4 Linhas de Ação Política Estadual de Transição Energética de Minas Gerais – PETE**

As linhas de ação da PETE partem dos exemplos de transições energéticas já iniciadas, bem como das melhores práticas internacionais para promoção de sistemas energéticos mais sustentáveis. Dessa forma, a estratégia de transição energética de Minas Gerais é desenhada de modo a implementar políticas públicas que garantam os marcos propícios para

que as ações do governo e do setor privado, que visam o cumprimento das metas aqui propostas, estejam apoiadas por uma base de regulamentação e mecanismos de desenvolvimento sustentável. Nessa perspectiva, a política de transição energética é dividida em seis categorias:

- Regulação;
- Sensibilização;
- Pesquisa & Desenvolvimento & Inovação;
- Demonstração de Projetos;
- Capacitação de Recursos Humanos;
- Mercados e financiamento;
- Cooperação Internacional.

#### 4.3.4.1 Regulação

Fornecerá o arcabouço legal que tem por objetivo prover as regras que normatizam as atividades econômicas e sociais envolvidas no processo de transição energética. Inicialmente, sugere-se que o quadro de regulamentação seja composto por pelos menos três instrumentos legais, quais sejam:

- Lei que estabeleça a Política Estadual de Transição Energética de Minas Gerais – PETE, regulamentada por dois decretos:
  - Programa Estadual de Expansão de Energias Renováveis;
  - Programa Estadual de Tecnologias de baixo carbono e Eficiência Energética;

#### 4.3.4.2 Sensibilização

Sensibilizar todos os atores envolvidos por meio de campanhas que demonstrem de forma clara os objetivos e importância da transição energética, bem como a necessidade de comprometimento de toda a sociedade com esse processo.

Também é necessário o envolvimento das instituições, governamentais e não governamentais, de modo a coordenar o desenho, implantação, operação, e avaliação das políticas, programas e projetos da transição energética estadual.

#### 4.3.4.3 Pesquisa e Desenvolvimento e Inovação (P&D&I)

Visa aumentar e difundir o conhecimento sobre transições energéticas, bem como promover a inovação ao fornecer incentivos diretos para projetos específicos, e dessa forma propiciar tanto o aprimoramento técnico e econômico das tecnologias já existentes, quanto a criação de novas tecnologias.

#### 4.3.4.4 Demonstração de Projetos

O estado deverá se valer do princípio da exemplaridade, e promover projetos de energias renováveis e eficiência energética no âmbito de sua competência, de modo a demonstrar tecnologias sustentáveis, bem como seus impactos sociais, ambientais e econômicos.

#### 4.3.4.5 Capacitação de Recursos Humanos

O processo de transição energética consiste em uma adoção maciça de tecnologia e melhores práticas que evoluem e modificam constantemente de modo a gerar novas oportunidades e necessidades. Dessa forma, é fundamental contar com recursos humanos suficientes e capacitados para garantir a implementação da transição energética não somente em termos tecnológicos, mas também em termos de coordenação da política, programas e projetos associados a essa.

#### 4.3.4.6 Mercados e financiamento

Promover mecanismos de financiamento, bem como incentivos tributários, para estabelecimento do mercado de energias renováveis e de eficiência energética no estado de Minas Gerais. Esse deverá ter condições de fluir atrelado aos menores custos de transação e de acordo com as oportunidades que o câmbio regulatório e tecnológico permita.

#### 4.3.4.7 Cooperação

A cooperação é um importante instrumento de desenvolvimento para o estado e que permite transferir recursos, conhecimentos, experiências de sucesso e tecnologias, colaborando de forma efetiva com a capacitação de recursos humanos e fortalecimento das instituições do estado receptor.

### 4.3.5 Principais Produtos Esperados

Essa estratégia deverá servir para subsidiar a criação dos seguintes instrumentos:

- Lei que institui a Política Estadual de Transição Energética de Minas Gerais – PETE;
- Decreto que regulamenta o Programa Estadual de Expansão de Energias Renováveis;
- Decreto que regulamenta o Programa Estadual de Tecnologias de Baixo Carbono e Eficiência Energética;
- Estratégia de Coordenação da Transição Energética, eixos:
  - Sensibilização
  - Capacitação de Recursos Humanos
  - P&D&I
  - Atores envolvidos
- Estratégia de financiamento da PETE

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Estado da Arte mostrou que a transição para sistemas energéticos mais sustentáveis já foi iniciada em várias partes do mundo, e que as ações vão desde o âmbito de acordo internacionais, como o Acordo de Paris, até os níveis nacional, subnacional e local. Nesse contexto, a transição estadual, por meio de um desenvolvimento de baixo carbono, dependerá amplamente das políticas energéticas iniciadas e implementadas no futuro.

Nessa dissertação, foi desenvolvido um modelo para o sistema energético de Minas Gerais, que considerou vários fatores capazes de influenciar as políticas energéticas no horizonte de 2030-2050. Os três cenários desenvolvidos (REF, ETM e ETA) trazem perspectivas futuras sobre o que poderá acontecer se nenhuma política adicional for implementada (cenário REF), e se forem adotadas políticas e estratégias visando um caminho de baixo carbono no futuro projetado (cenários ETM e ETA).

No cenário REF é esperado que a demanda de energia aumente 55% em 2030, e que esse montante quase triplique em 2050. Atrelado a isso, os combustíveis fósseis devem representar em média 55% do uso final de energia até 2050. Já a matriz elétrica será composta majoritariamente por combustíveis fósseis, 75%, até o fim do período analisado. O cenário REF é também altamente dependente de importação de recursos energéticos, uma vez que não temos reservas significativas de combustíveis fósseis. Dada a sua composição energética, as emissões de GEE nesse cenário crescem consideravelmente, aumentando mais que o dobro em relação ao ano base. O cenário REF, embora tenha um custo de capital menor comparado aos demais, devido a sua elevada dependência externa, o custo de importação, no médio-longo prazo faz com que esse cenário seja mais caro. Nesse sentido, o cenário de REF não só torna o estado mais suscetível aos efeitos das mudanças climáticas, uma vez que aumenta consideravelmente as emissões de GEE, como também o torna menos seguro do ponto de vista energético, já que eleva o custo de produção e, conseqüentemente, de fornecimento dos insumos energéticos.

Os cenários ETM e ETA se mostraram opções viáveis em termos de mudar as perspectivas futuras, intensivas em carbono e com custos elevados, por meio da implantação de políticas de médio e longo prazo visando sistemas energéticos mais sustentáveis. O cenário ETM, mostrou-se capaz de cumprir com os acordos firmados no âmbito do acordo de Paris, no que tange ao estado de Minas Gerais, ou seja, uma vez que atinge entre 28% e 33% de energias renováveis na matriz energética, excluindo as largas hídricas, e aumenta a eficiência do setor elétrico em 10%, até 2030, de forma mais viável economicamente do que o cenário REF. Em termos de mitigação de GEE, o cenário ETM apresenta uma redução média de 30%, comparada

ao cenário REF. Já o cenário ETA, foi o que apresentou melhor custo-benefício, uma vez que consegue aumentar a participação de energias renováveis, excluindo as largas hídricas, em 50% até 2030 e 60% até 2050, reduzindo em torno de 50% as emissões de GEE comparadas ao cenário REF, sem aumento expressivo dos custos comparado ao ETM e mais barato, no médio longo prazo, comparado ao REF. O cenário ETA também considera a possível transição para veículos elétricos no setor de transporte, que irá aumentar significativamente a necessidade de eletricidade, sem poluir a matriz elétrica por meio do aumento da inserção de fontes de origem fóssil. Além disso o cenário ETA, possui uma capacidade instalada 62% maior que o cenário ETM, 2,6 vezes maior que o cenário REF. Nesse sentido, o cenário ETA é o mais efetivo em termos de desenvolvimento de baixo carbono, aumento da segurança energética e combate às mudanças climáticas.

Em termos de mitigação de GEE, os resultados demonstram que o setor de transformação é um importante aliado na busca da redução das emissões, porém os setores de transportes e indústria, são tão importantes quanto, já que juntos representam mais de 50% das emissões alocadas na demanda de energia. Embora o cenário ETM já proponha uma transição no setor de transportes, os resultados também evidenciaram que é necessário realizar estudos para propor uma transição com os mesmos fins para o setor da indústria.

Sobre a análise de efetividade do PMER, os resultados revelaram que o aumento da geração e consumo de energia renovável tendo em vistas o combate às mudanças climáticas e o desenvolvimento sustentável depende fortemente de políticas públicas que melhorem o mercado e incentivem os investimentos do setor. Para que se acelere o desenvolvimento das fontes renováveis no estado é importante que as ações previstas pelo PMER sejam fortalecidas e retomadas. Ações complementares também são necessárias no sentido de melhor definir os objetivos do programa, incluir outras fontes renováveis não contempladas e prever novos instrumentos de fomento. Assim, julga-se necessária a reformulação do PMER para que esse possa assumir o papel de fortalecer as ações do Governo estadual para promoção da energia renovável e a descentralização das metas para cumprimento do Acordo de Paris, firmado em âmbito federal.

A análise de custo-benefício realizada nesse estudo ratificou o que a Alemanha já havia constatado: que no médio-longo prazo o investimento em empreendimentos de energia renováveis é inferior aos empreendimentos energéticos de origem fóssil. Esse resultado consiste um fator-chave para instruir o processo de tomada de decisão no que tange tanto à formulação de políticas públicas, quanto o convencimento dos investidores do setor energético.

A proposta da PETE incorporou todos os resultados do cenário ETA, bem como as melhores práticas internacionais para promoção da transição energética visando o nível subnacional e local. Podemos considerar que a PETE possui metas e objetivos ambiciosos, como foi demonstrado nesse estudo, a ambição é um dos fatores-chave para criar uma política de transição energética que vise difundir sistemas de energias sustentáveis. Dessa forma, instituir uma política estadual de transição energética é necessário para atuar efetivamente contra as políticas governamentais de curto prazo. Nesse sentido, a PETE é uma oportunidade para a consolidação de uma política de estado, garantindo assim o princípio da continuidade, e ao mesmo tempo tendo a garantia de um ambiente saudável com acesso à energia segura e confiável para todos.

### **5.1 Sugestão para trabalhos futuros**

- Modelagem do consumo final de energia da demanda, focado principalmente no setor da indústria;
- Avaliar a inserção no modelo de outras tecnologias de fontes renováveis;
- Realizar uma matriz de resultados por regiões e municípios do estado de Minas Gerais;
- Extrapolar a metodologia desenvolvida nesse trabalho para outros estados, regiões e municípios.

## 6 REFERÊNCIAS

ABELSON, H. **Energy Independence**. 1973. Disponível em: <https://science-sciencemag-org.ez27.periodicos.capes.gov.br/content/sci/182/4114/779.full.pdf> . Acesso em 18 de abril 2018.

ABRAHAM, S.; MILLS, M.P. **Sovereign Energy Independence - Properly Understood and Effectively Achieved in the 21st Century**. 2013. Disponível em: [https://www.tech-pundit.com/wp-content/uploads/2013/07/GeorgetownJournal\\_2013\\_Abraham\\_Mills.pdf?5bc6cb](https://www.tech-pundit.com/wp-content/uploads/2013/07/GeorgetownJournal_2013_Abraham_Mills.pdf?5bc6cb). Acesso em 18 de abril 2018.

AGORA, Agora Energiewende. **Understanding the Energiewende**. 2015. Disponível em: [https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2015/Understanding\\_the\\_EW/Agora\\_Understanding\\_the\\_Energiewende.pdf](https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2015/Understanding_the_EW/Agora_Understanding_the_Energiewende.pdf). Acesso em 18 de abril 2017.

ALMG – Assembleia Legislativa de Minas Gerais – **Decreto Estadual nº 46.296 de 14 de Agosto de 2013** – Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=257589>. Acesso em 29 de novembro de 2017.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica – **Programa de Incentivo às Fontes Alternativas** – Brasília, 2015a. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/proinfra>. Acesso em 29 de novembro de 2017.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica – **Regulação do Setor Elétrico** – Brasília, 2015b. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/mercado-de-eletricidade>. Acesso em 29 de novembro de 2017.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica – **Sala de Imprensa** – Brasília, 2018. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset\\_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/leilao-de-geracao-n-03-2018-tem-desagio-de-46-89-e-contrata-168-twh/656877?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Fsala-de-imprensa-exibicao%3Fp\\_p\\_id%3D101\\_INSTANCE\\_XGPXSqdMFHrE%26p\\_p\\_lifecycle%3D0%26p\\_p\\_state%3Dnormal%26p\\_p\\_mode%3Dview%26p\\_p\\_col\\_id%3Dcolumn-2%26p\\_p\\_col\\_count%3D3](http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/leilao-de-geracao-n-03-2018-tem-desagio-de-46-89-e-contrata-168-twh/656877?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Fsala-de-imprensa-exibicao%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_XGPXSqdMFHrE%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-2%26p_p_col_count%3D3). Acesso em 18 de janeiro 2019.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica – **Banco de Informações de Geração – BIG**. Brasília, 2019. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em 29 de novembro de 2018.

BICALHO, R.; QUEIROZ, R. **Segurança Energética e Mudança Climática: Estruturando o Debate Energético**. Centro de Excelência em Economia da Energia: Rio de Janeiro, 2012.

BMW, Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. **The Energy Transition**. 2015. Disponível em: <http://www.bmwi.de/EN/Topics/Energy/energy-transition.html>. Acesso em 15 de fevereiro de 2018.

BMWI, Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. **The Federal Government's Energy Concept of 2010 and the Transformation of the Energy System of 2011**. 2011 Disponível em: <https://cleanenergyaction.files.wordpress.com/2012/10/german-federal-governments-energy-concept1.pdf>. Acesso em 15 de fevereiro de 2018.

BRASIL. **Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada Para Consecução do Objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. 2015. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80108/BRASIL%20iNDC%20portugues%20FINAL.pdf> Acesso em 15 de fevereiro de 2019.

BRÜGGEMEIER, R. F. Sol, água, vento: **O Desenvolvimento da Transição Energética na Alemanha**. 2017. Disponível em: <https://library.fes.de/pdf-files/bueros/brasilien/12076-20151203.pdf>. Acesso em 18 de janeiro 2018.

CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais. **32º Balanço Energético do Estado de Minas Gerais - BEEMG 2017: Ano Base 2016**. Companhia Energética de Minas Gerais. Belo Horizonte: Cemig, 2018.

CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais. **Atlas de Biomassa de Minas Gerais**. Companhia Energética de Minas Gerais. Belo Horizonte: Cemig, 2017.

CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais. **Atlas Eólico de Minas Gerais**. Companhia Energética de Minas Gerais. Belo Horizonte: Cemig, 2010.

CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais. **Atlas Solarimétrico de Minas Gerais - Volume II**. Companhia Energética de Minas Gerais. Belo Horizonte: Cemig, 2016.

CHVANOVA, E. **System Integration of Renewable Energies, Grid Development & Flexibilization**. 2019. Disponível em: <https://www.german-energy-solutions.de/GES/Redaktion/EN/Publications/Presentations/190528-erfolg-ir-suedkorea-02.pdf?blob=publicationFile&v=2>. Acesso em 20 de junho 2019.

EMODI, N. V.; EMODI, C. C.; MURTHYC, G. P.; EMODI, A. S. A. **Energy Policy for Low Carbon Development in Nigeria: A Leap Model Application**. 2017. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68 (2017) 247-261.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Balanço Energético Nacional 2018: Ano Base 2017**. 2018. Disponível em: [http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018\\_Int.pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018_Int.pdf). Acesso em 18 de abril 2018.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Plano Nacional de Energia 2030**. 2007. Disponível em: <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-165/topico-173/PNE%202030%20-%20An%C3%A1lise%20Retrospectiva.pdf>. Acesso em 18 de abril 2019.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Plano Nacional de Energia 2050**. 2014. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>. Acesso em 18 de abril 2019.

ESTIF, European Solar Thermal Industry Federation. **Solar Thermal Action Plan for Europe Heating & Cooling from the Sun.** 2007. Disponível em: [http://www.estif.org/fileadmin/estif/content/policies/STAP/Solar\\_Thermal\\_Action\\_Plan\\_2007\\_A4.pdf](http://www.estif.org/fileadmin/estif/content/policies/STAP/Solar_Thermal_Action_Plan_2007_A4.pdf). Acesso em 18 de abril 2019.

ETP, Energy Transition Platform. **Briefing: Energy and Climate Policy in North Rhine-Westphalia** – North Rhine-Westphalia, 2016a. Disponível em: [https://www.theclimategroup.org/sites/default/files/etp\\_partnerprofile\\_california.pdf](https://www.theclimategroup.org/sites/default/files/etp_partnerprofile_california.pdf). Acesso em 15 de novembro de 2017.

ETP, Energy Transition Platform. **Partner Region Profile – California** – Califórnia, 2016c. Disponível em: [https://www.theclimategroup.org/sites/default/files/etp\\_partnerprofile\\_california.pdf](https://www.theclimategroup.org/sites/default/files/etp_partnerprofile_california.pdf). Acesso em 15 de novembro de 2017.

ETP, Energy Transition Platform. **Partner Region Profile – Hauts-de-France** – Hauts-de-France, 2016b. Disponível em: [https://www.theclimategroup.org/sites/default/files/etp\\_partnerprofile\\_california.pdf](https://www.theclimategroup.org/sites/default/files/etp_partnerprofile_california.pdf). Acesso em 15 de novembro de 2017.

FCCC, Framework Convention on Climate Change. **Conference of the Parties - Adoption of the Paris Agreement.** 2015. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>. Acesso em 18 de abril 2018.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas. **Plano de Energia e Mudanças Climáticas de Minas Gerais: Resumo Executivo** / Fundação Estadual do Meio Ambiente; com apoio de Agência Francesa do Meio Ambiente e da Gestão de Energia, Conselho Regional de Nord Pas-de-Calais. Belo Horizonte, 2015.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais. **Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Estado de Minas Gerais Período de Referência: 2005-2014. 2016.** Disponível em: [http://pemc.meioambiente.mg.gov.br/images/Estimativas\\_GEE\\_2005\\_2014\\_MG\\_FEAM\\_v02-1.pdf](http://pemc.meioambiente.mg.gov.br/images/Estimativas_GEE_2005_2014_MG_FEAM_v02-1.pdf) Acesso em 29 de novembro de 2017.

FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Potencial de Energias Renováveis.** Fundação Estadual do Meio Ambiente; com apoio de Agência Francesa do Meio Ambiente e da Gestão de Energia, Conselho Regional de Nord Pas-de-Calais. - Belo Horizonte: FEAM, 2014a. 75 p. il.

FEAM, Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Plano de Energia e Mudanças Climáticas de Minas Gerais: Setor Energia** / Fundação Estadual do Meio Ambiente; com apoio de Agência Francesa do Meio Ambiente e da Gestão de Energia, Conselho Regional de Nord Pas-de-Calais. Belo Horizonte: FEAM, 2014.

FJP, Fundação João Pinheiro. **Produto Interno Bruto (PIB) de Minas Gerais: Relatório Anual | 2010-2013.** 2014. Disponível em: <http://fjp.mg.gov.br/index.php/docman/cei/informativos-cei-eventuais/590-monitor-fjp-relatorio-anual-do-pibmg-2010-2013-Atualizacao-dez-20152/file>. Acesso em 25 de janeiro 2019.

FORTIN, M.J. **The Landscapes of Energy Transition: A Political Perspective.** 2015. Disponível em <https://online.unisc.br/seer/index.php/redes/article/view/6722/pdf>. Acesso em 18 de abril 2019.

FRANCE. **Loi du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte. 2015.** Disponível em: <https://www.gouvernement.fr/action/la-transition-energetique-pour-la-croissance-verte> Acesso em 25 de janeiro 2018.

FRANCÉS, E. G. **Market or Geopolitics the Europeanization of Eu's Energy Corridors.** International Journal of Energy Sector Management, United Kingdom, v. 5, n. 1, p. 39 – 59, 2011.

HU, G.; MAA, X.; JIA, J. **Scenarios and Policies for Sustainable Urban Energy Development Based on Leap Model – A Case Study of a Postindustrial City: Shenzhen China.** 2019. Applied Energy 238 (2019) 876–886.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas. **Projeção da População do Brasil e das Unidades da Federação.** Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>. 2019. Acesso em 25 de janeiro 2019.

IEA ETSAP, International Energy Agency – Energy Technology Systems Analysis Program. **Technology Brief Coal-Fired Power.** (2010a). Disponível em: [http://www.iea-etsap.org/Energy\\_Technologies/Energy\\_Supply.asp](http://www.iea-etsap.org/Energy_Technologies/Energy_Supply.asp) Acesso em 25 de janeiro 2018.

IEA ETSAP, International Energy Agency – Energy Technology Systems Analysis Program. **Technology Brief Gas-Fired Power.** (2010b). Disponível em: [http://www.iea-etsap.org/Energy\\_Technologies/Energy\\_Supply.asp](http://www.iea-etsap.org/Energy_Technologies/Energy_Supply.asp) Acesso em 25 de janeiro 2018.

IEA ETSAP, International Energy Agency – Energy Technology Systems Analysis Program. **TECHNOLOGY BRIEF HYDROPOWER.** (2010c). Disponível em: [http://www.iea-etsap.org/Energy\\_Technologies/Energy\\_Supply.asp](http://www.iea-etsap.org/Energy_Technologies/Energy_Supply.asp) Acesso em 25 de janeiro 2018.

IEA ETSAP, International Energy Agency – Energy Technology Systems Analysis Program. **Technology Brief Biomass for Heat and Power.** (2010d). Disponível em: [http://www.iea-etsap.org/Energy\\_Technologies/Energy\\_Supply.asp](http://www.iea-etsap.org/Energy_Technologies/Energy_Supply.asp) Acesso em 25 de janeiro 2018.

IEA ETSAP, International Energy Agency – Energy Technology Systems Analysis Program. **Technology Brief Combined Heat and Power.** (2010e). Disponível em: [http://www.iea-etsap.org/Energy\\_Technologies/Energy\\_Supply.asp](http://www.iea-etsap.org/Energy_Technologies/Energy_Supply.asp) Acesso em 25 de janeiro 2018.

IEA ETSAP, International Energy Agency – Energy Technology Systems Analysis Program. **Technology Brief Photovoltaic Solar Power.** (2013a). Disponível em: [http://www.iea-etsap.org/Energy\\_Technologies/Energy\\_Supply.asp](http://www.iea-etsap.org/Energy_Technologies/Energy_Supply.asp) Acesso em 25 de janeiro 2018.

IEA ETSAP, International Energy Agency – Energy Technology Systems Analysis Program. **Technology Brief Biogas and Bio-Syngas Production.** (2013b). Disponível em: [http://www.iea-etsap.org/Energy\\_Technologies/Energy\\_Supply.asp](http://www.iea-etsap.org/Energy_Technologies/Energy_Supply.asp) Acesso em 25 de janeiro 2018.

IEA ETSAP, International Energy Agency – Energy Technology Systems Analysis Program. **Technology Brief Production of Liquid Biofuels.** (2013c). Disponível em: [http://www.iea-etsap.org/Energy\\_Technologies/Energy\\_Supply.asp](http://www.iea-etsap.org/Energy_Technologies/Energy_Supply.asp) Acesso em 25 de janeiro 2018.

IEA ETSAP, International Energy Agency – Energy Technology Systems Analysis Program. **Technology Brief Biomass Production & Logistics**. (2013d). Disponível em: [http://www.iea-etsap.org/Energy\\_Technologies/Energy\\_Supply.asp](http://www.iea-etsap.org/Energy_Technologies/Energy_Supply.asp) Acesso em 25 de janeiro 2018.

IEA, International Energy Agency. **Contribution of Renewables To Energy Security**. 2007. Disponível em: [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/so\\_contribution.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/so_contribution.pdf) Acesso em 25 de janeiro 2018.

IEEMA, Instituto de Energia e Meio Ambiente. **Emissões de GEE do Setor de Energia, Processos Industriais e Uso de Produtos**. Disponível em: [http://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2016/09/FINAL-16-09-23-RelatoriosSEEG-PIUP\\_.pdf](http://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2016/09/FINAL-16-09-23-RelatoriosSEEG-PIUP_.pdf). Acesso em 15 de setembro de 2017.

INDEX MUNDI. **Preço das Mercadorias**. 2019. Disponível em: <https://www.indexmundi.com/pt/pre%C3%A7os-de-mercado/>. Acesso em 25 de janeiro 2019.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **O Futuro que Queremos Economia Verde, Desenvolvimento Sustentável e Erradicação da Pobreza**. 2012. Disponível em: <http://www.inpe.br/noticias/arquivos/pdf/RIO+20-web.pdf>. Acesso em 18 de abril 2018.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2014 Synthesis Report Summary for Policymakers**. 2014. Disponível em: [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5\\_SYR\\_FINAL\\_SPM.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf). Acesso em 29 de setembro de 2017.

IRENA, International Renewable Energy Agency. **Renewable energy: A Key Climate Solution**. 2017a. Disponível em: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Nov/IRENA\\_A\\_key\\_climate\\_solution\\_2017.pdf?la=en&hash=A9561C1518629886361D12EFA11A051E004C5C98](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Nov/IRENA_A_key_climate_solution_2017.pdf?la=en&hash=A9561C1518629886361D12EFA11A051E004C5C98). Acesso em 15 de fevereiro de 2018.

IRENA, International Renewable Energy Agency. **Planning for the Renewable Future: Long-Term Modelling and Tools to Expand Variable Renewable Power in Emerging Economies**. 2017b. Disponível em: <https://www.irena.org/energytransition/Energy-Planning-Support/National-Energy-Master-Plan-Development>. Acesso em 15 de fevereiro de 2018.

IRENA, International Renewable Energy Agency, **Accelerating Off-Grid Renewable Energy: Key Findings and Recommendations from IOREC 2016**, Abu Dhabi - United Arab Emirates, 2017c.

IRENA, International Renewable Energy Agency. DASHBOARD: **Patents Evolution**. 2018a. Disponível em: <http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/?topic=1019&subTopic=1058>. Acesso em 15 de fevereiro de 2018.

IRENA, International Renewable Energy Agency. DASHBOARD: **Employment Time Series**. 2018b. Disponível em: <http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/?topic=1019&subTopic=1058>. Acesso em 15 de fevereiro de 2018.

IRENA, International Renewable Energy Agency. **Renewable Power Generation Costs in 2017**. 2018c. Disponível em:

<https://www.irena.org/publications/2018/Jan/Renewable-power-generation-costs-in-2017>.

Acesso em 15 de fevereiro de 2018.

IRENA, International Renewable Energy Agency. **Featured Dashboard – Capacity and Generation**. 2018d Disponível em:

<http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/?topic=4&subTopic=17>. Acesso em 15 de fevereiro de 2018.

JACOBI, P.R; GUERRA, A.F.S; SULAIMAN , S.N; NEPOMUCENO,T. **Mudanças Climáticas Globais: A Resposta da Educação**. 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbedu/v16n46/v16n46a08.pdf>. Acesso em 18 de abril 2018.

MCTIC, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Trajetórias de Mitigação e Instrumentos de Políticas Públicas Para Alcance das Metas Brasileiras no Acordo De Paris / Régis Rathmann [et al.] -- Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, ONU Meio Ambiente, 2017. 64 p.: il. – (Opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em setores-chave do Brasil)**

MCTIC, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Trajetórias de Mitigação e Instrumentos de Políticas Públicas Para Alcance das Metas Brasileiras no Acordo de Paris**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, ONU Meio Ambiente, 2017

MCTIC, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Cálculo dos Fatores de Emissão de Co2 pela Geração de Energia Elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil. 2018**. Disponível em: [http://www.mct.gov.br/upd\\_blob/0019/19707.pdf](http://www.mct.gov.br/upd_blob/0019/19707.pdf). Acesso em 29 de novembro de 2018

MME, Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional De Eficiência Energética: Premissas e Diretrizes Básicas – Brasília, 2011. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1432134/Plano+Nacional+Efici%C3%A2ncia+Energ%C3%A9tica+%28PDF%29/74cc9843-cda5-4427-b623-b8d094ebf863?version=1.1>**. Acesso em 29 de novembro de 2017.

MME, Ministério de Minas e Energia. **Renova Bio – Brasília, 2017. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas-natural-e-combustiveis-renovaveis/programas/renovabio/principal>**. Acesso em 29 de novembro de 2017.

MME/EPE, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2027**. 2018. Disponível em: [http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202027\\_aprovado\\_OFICIAL.pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202027_aprovado_OFICIAL.pdf). Acesso em 18 de abril 2019.

MME/EPE, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2021**. 2012. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal-de-Expansao-de-Energia-2021>. Acesso em 18 de abril 2019.

MORAES, M. V. E. **Políticas Inovadoras em Gestão no Brasil**, in III Congresso Consad de Gestão Pública, Brasília, Brazil, 2010.

MORRIS, C; PEHNT, M. **Energy Transition: The German Energiewende**. 2015. Heinrich Böll Foundation, 2015. Disponível em: <http://energytransition.de>. Acesso em: 01/12/2015.

MOURA, G. N. P. **Long-term Power Systems Integration Using Osemosys Samba - South America Model Base - and the Bargaining Power of Countries: A Cooperative Games Approach**. Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2017.

MUINZER, T; ELLIS, G. **Subnational governance for the low carbon energy transition: Mapping the UK's 'Energy Constitution'**. 2017. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/2399654416687999>. Acesso em 20 de junho 2019.

OZTURK, I. **Energy Dependency and Energy Security: The Role Of Energy Efficiency and Renewable Energy Sources**. 2013. Disponível em: <http://go-galegroup.ez27.periodicos.capes.gov.br/ps/i.do?id=GALE%7CA404753837&v=2.1&u=capes&it=r&p=AONE&sw=w>. Acesso em 25 de janeiro 2018.

PARK, NB.; YUN, SJ.; JEON, E-C. **An Analysis of Long-Term Scenarios for the Transition to Renewable Energy in the Korean Electricity Sector**. 2013. Energy Policy 52 (2013) 288–296.

PLANALTO, Presidência da República. **Decreto nº 9.073, de 5 de Junho de 2017**. Disponível em: [www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/ato2015-2018/2017/decreto/D9073.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2015-2018/2017/decreto/D9073.htm). Acesso em 29 de novembro de 2017.

RADEMAEKERS, K.; VAN NUFFEL, L.; YEARWOOD, J. **Eu Energy Independence, Security of Supply and Diversification of Sources**. 2017. Disponível em: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2017/595367/IPOL\\_STU\(2017\)59536\\_7\\_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2017/595367/IPOL_STU(2017)59536_7_EN.pdf). Acesso em 18 de abril 2018.

ROINIOTI A.; KORONEOS, C.; WANGENSTEEN, I. **Modeling the Greek Energy System: Scenarios of Clean Energy Use and Their Implications**. 2012. Energy Policy 50 (2012) 711–722.

SANCHEZ, A. **Atividades Humanas e Mudanças Climático-Ambientais: Uma Relação Inevitável**. São Paulo, 2009. Disponível em: [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/43/130/43130587.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/130/43130587.pdf). Acesso em 29 de setembro de 2017.

SEF, Secretaria de Estado de Fazenda. **Decreto Estadual nº 47.231, de 4 de Agosto de 2017** – Belo Horizonte, 2017. Disponível em: [http://www.fazenda.mg.gov.br/empresas/legislacao\\_tributaria/decretos/2017/d47231\\_2017.htm](http://www.fazenda.mg.gov.br/empresas/legislacao_tributaria/decretos/2017/d47231_2017.htm). Acesso em 29 de novembro de 2017.

SEI, Stockholm Environment Institute. **User Guide, Leap: Long Range Energy Alternative Planning System**. Stockholm Environment Institute, Boston; 2011.

SEI, Stockholm Environment Institute. **Sistema de Planejamento de Longo Prazo de Alternativas Energéticas Exercícios Utilizando LEAP**. Stockholm Environment Institute, Boston; 2012.

STATE AND REGIONS, The Climate Group / STATES & REGIONS ALLIANCE. **Declaration of the Federated States and Regional Governments on Climate Change.** Montreal, 2005. Disponível em: <https://www.theclimategroup.org/sites/default/files/archive/files/Montreal-Declaration-Signatories-as-of-Jan2010.pdf>. Acesso em 29 de setembro de 2017.

TERZIC, B. **Energy Independence and Security: A Reality Check.** 2013. Disponível em: [https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/energy-independence/Energy-Independence-and-Security\\_A-reality-check.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/energy-independence/Energy-Independence-and-Security_A-reality-check.pdf). Acesso em 18 de abril 2018.

UN, United Nations. Energy, **Strengthening Public-Private Partnerships to Accelerate Global Electricity Technology Deployment**, (2011).

WEF, World Energy Forum. **Energy Vision 2013 Energy Transitions: Past and Future.** 2013 Disponível em <https://www.weforum.org/reports/energy-vision-2013-energy-transitions-past-and-future>. Acesso em 18 de abril 2019.

YARROS, J. **Fact Sheet: What is Energy Independence? 2013.** Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/126259595/What-is-Energy-Independence>. Acesso em 18 de abril 2018.

YOPHYA, H.; JEFFREY, B.Y.; CHIEH-YUC, P. **The Long-Term Forecast of Taiwan's Energy Supply and Demand: LEAP Model Application.** 2011. Energy Policy 39 (2011) 6790–6803.

ANEXO I

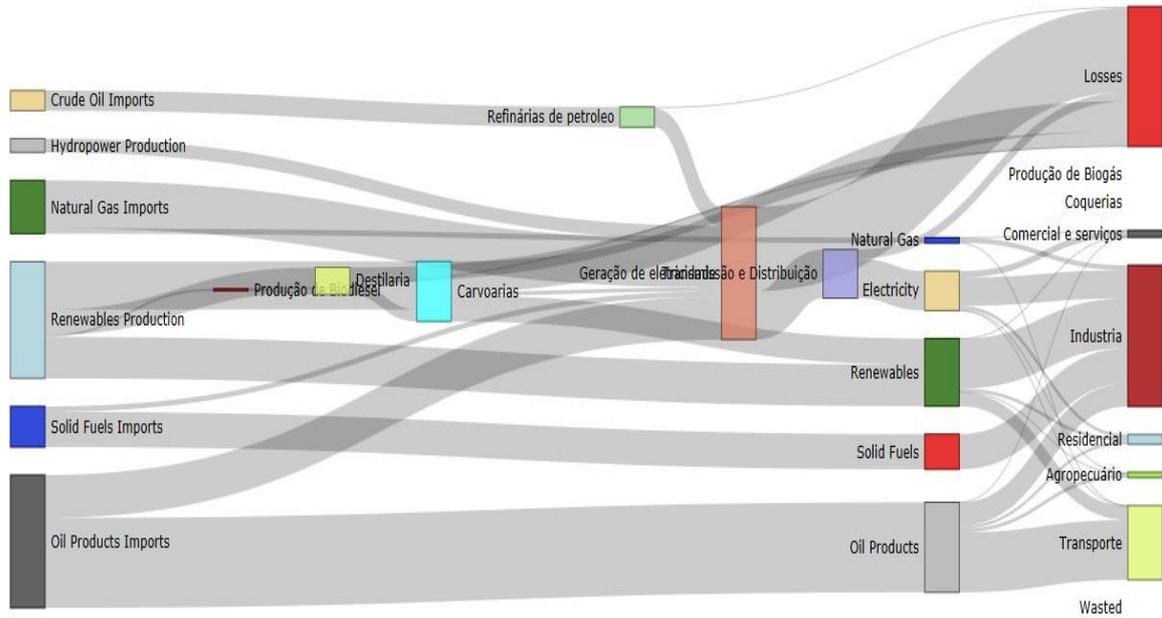


Figura 13: Matriz energética em 2030 - Cenário REF  
 Fonte: Elaboração própria

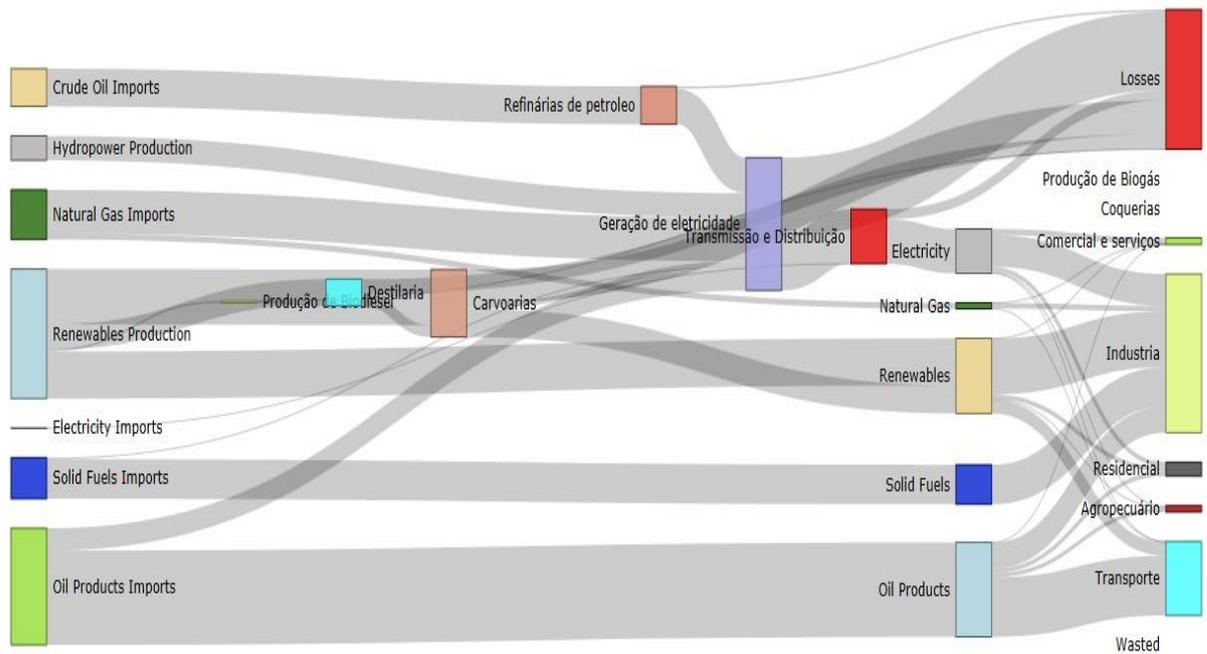


Figura 14: Matriz energética em 2050 - Cenário REF  
 Fonte: Elaboração própria

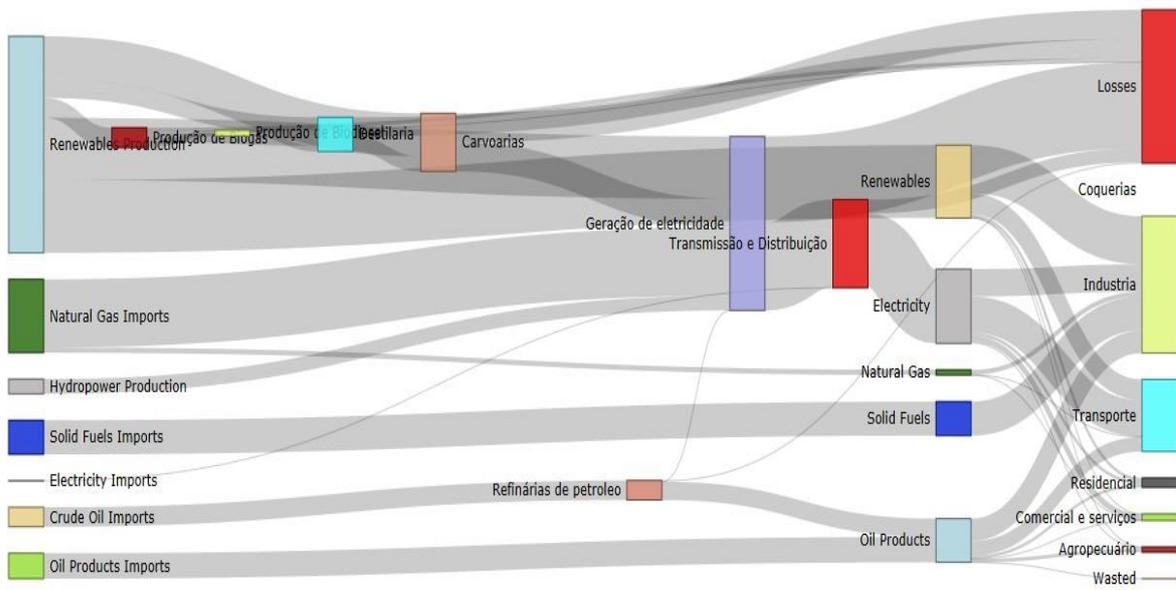


Figura 15: Matriz energética em 2030 - Cenário ETM  
 Fonte: Elaboração própria

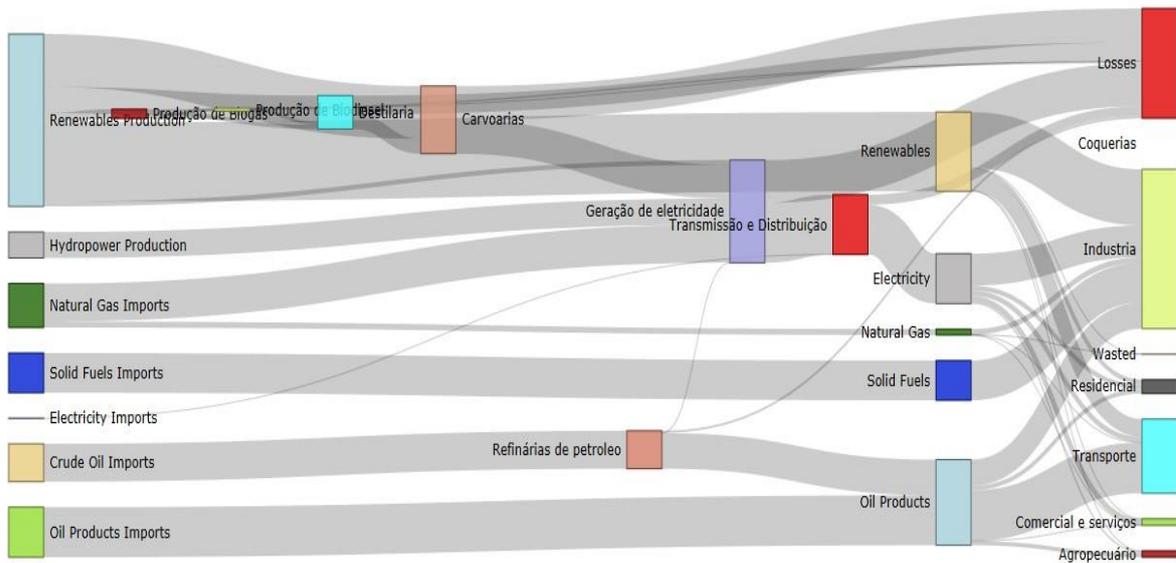


Figura 16: Matriz energética em 2050 - Cenário ETM  
 Fonte: Elaboração própria