

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA

FILIFE RODRIGUES NOGUEIRA CAMPOS

**DIVERSIFICAÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA BASEADA EM RECURSOS
RENOVÁVEIS: IMPACTOS SOBRE A SEGURANÇA ELÉTRICA BRASILEIRA**

SÃO MATEUS

2018

FILIPPE RODRIGUES NOGUEIRA CAMPOS

**DIVERSIFICAÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA BASEADA EM RECURSOS
RENOVÁVEIS: IMPACTOS SOBRE A SEGURANÇA ELÉTRICA BRASILEIRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia (PPGEN) da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Energia, na área de concentração em Engenharia, Tecnologia e Gestão.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Gisele de Lorena Diniz Chaves

SÃO MATEUS

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Divisão de Biblioteca Setorial do CEUNES - BC, ES, Brasil)
Bibliotecário: Filipe Briguier Pereira – CRB-6 ES-000863/O

C198d Campos, Filipe Rodrigues Nogueira, 1989-
Diversificação da matriz energética baseada em recursos renováveis : impactos sobre a segurança elétrica brasileira / Filipe Rodrigues Nogueira Campos. – 2018.
127 f. : il.

Orientador: Gisele de Lorena Diniz Chaves.
Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo.

1. Energia elétrica - Produção. 2. Energia - Fontes alternativas. I. Chaves, Gisele de Lorena Diniz. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Universitário Norte do Espírito Santo. III. Título.

CDU: 620.9

FILIPPE RODRIGUES NOGUEIRA CAMPOS

**DIVERSIFICAÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA BASEADA EM
RECURSOS RENOVÁVEIS: IMPACTOS SOBRE A SEGURANÇA
ELÉTRICA BRASILEIRA**

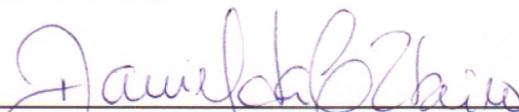
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Energia.

Aprovada em 28 de fevereiro de 2018.

COMISSÃO EXAMINADORA



**Prof.^a. Dr.^a. Gisele de Lorena Diniz
Chaves**
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientadora



Prof. Dr. Daniel da Cunha Ribeiro
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Wanderley Cardoso Celeste
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Fernando Oliveira de Araujo
Universidade Federal Fluminense

AGRADECIMENTOS

A Você, pai, ciente, paciente.

A vocês, que suportaram, apoiaram, e abdicaram.

A vocês, que participaram, conviveram e conheceram.

A você, que ensinou, corrigiu, esperou, inspirou e inspira.

A vocês, que sugeriram, contribuíram e melhoraram.

A todos, muito obrigado.

RESUMO

A segurança do suprimento de energia elétrica é um dos fatores preponderantes de análise das políticas organizacionais. Anualmente, o consumo energético mundial vem mostrando padrões de crescimento sistemático, exigindo assim uma capacidade cada vez maior de produção e distribuição de energia elétrica. O cenário brasileiro é consoante com esse crescimento, porém tende a enfrentar algumas barreiras. Baseando-se no trabalho de Aslani, Helo e Naaranoja (2014), o presente estudo objetiva realizar uma análise do impacto, no tocante à segurança e à diversidade, da implementação de políticas de incentivo à expansão da participação de fontes renováveis na matriz energética nacional. Fundamentado em um diagrama de causa e efeito, um modelo de Dinâmica de Sistemas é usado para avaliar cenários brasileiros de políticas de expansão da capacidade instalada renovável e redução do uso das termelétricas. Foram estabelecidos 32 cenários de simulação em três eixos de análise. Os cenários levam em consideração a rapidez de implementação das políticas, o alcance das metas estabelecidas e a participação das termelétricas na geração elétrica em um horizonte de dez anos, compreendidos entre 2017 e 2026. A análise mostra que a expansão das capacidades do sistema elevam a diversidade e mantêm o sistema seguro até o final da próxima década, ainda que em um patamar inferior. As termelétricas se mostram fundamentais para esse manutenção, uma vez que sua redução eleva drasticamente o risco de déficit. O modelo proposto serve de base para outros cenários relacionados às políticas de energia renovável, podendo tanto ser expandido de forma a inserir abordagens de custo e risco, quanto implementado sob outros parâmetros analíticos.

Palavras-chave: Recursos Energéticos Renováveis; Segurança Elétrica; Dinâmica de Sistemas.

ABSTRACT

The security of the electric power supply is one of the preponderant factors of analysis of the organizational policies. Every year the world energy consumption has been showing patterns of systematic growth, thus requiring an increasing capacity of production and distribution of electricity. The Brazilian scenario is consistent with this growth, but it tends to face some barriers. Based on the work of Aslani, Helo and Naaranoja (2014), the present study aims to carry out an analysis of the safety and diversity impact of the implementation of policies to encourage the expansion of the participation of renewable sources in the national energy matrix. Based on a cause and effect diagram, a Systems Dynamics model is used to evaluate Brazilian scenarios of policies to expand renewable installed capacity and reduce the use of thermoelectric plants. Thirty-two simulation scenarios were established in three axes of analysis. The scenarios take into account the speed of implementation of the policies, the achievement of the established goals and the participation of thermoelectric plants in electricity generation over a ten-year horizon, between 2017 and 2026. The analysis shows that the expansion of the system's capacities increases diversity and keep the system safe by the end of the next decade, albeit at a lower level. The thermoelectric plants are fundamental for this maintenance, since their reduction drastically increases the risk of deficit. The proposed model serves as a basis for other scenarios related to renewable energy policies, which can be either expanded to include cost and risk approaches or implemented under other analytical parameters.

Keywords: Renewable Energy Resources; Electrical Security; Systems Dynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de causa e efeito da substituição dos combustíveis fósseis por renováveis.....	33
Figura 2 - Diagrama de cauda e efeito do setor de energia.....	34
Figura 3 - Diagrama de causa e efeito para o mercado de energia.....	35
Figura 4 - Diagrama de causa e efeito do papel da energia renovável para a SSE na Finlândia.....	36
Figura 5 - Etapas da Dinâmica de Sistemas.....	39
Figura 6 - DCE entre as variáveis para a dinâmica da população.....	40
Figura 7 - Componentes utilizados no diagrama de estoque e fluxo.....	41
Figura 8 - DEF das variáveis da dinâmica da população.....	43
Figura 9 - Relação das etapas de execução da pesquisa segundo o método de DS.....	49
Figura 10 - Diagrama de causa e efeito do papel da energia renovável para a SSE no Brasil.....	55
Figura 11 - DEF do papel da energia renovável para a SSE no Brasil.....	57
Figura 12 - Cenários de simulação.....	74

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Projeção de crescimento anual da demanda elétrica brasileira - 2017 a 2026 Fonte: Adaptado de EPE (2017).....	67
Gráfico 2 - Comportamento da Segurança Elétrica entre 2017 e 2026 para diferentes time steps.....	70
Gráfico 3 - Capacidade hidrelétrica instalada entre 2006 e 2016 - Projeção, Realizado e Política.....	71
Gráfico 4 - Demanda elétrica brasileira entre 2017 e 2026.....	75
Gráfico 5 - SSE brasileiro de 2017 a 2026 (Estagnado Carbono Normal).....	76
Gráfico 6 - Diversidade da matriz elétrica brasileira de 2017 a 2026 (Estagnado Carbono Normal).....	77
Gráfico 7 - Geração Termelétrica por ano - 2017 a 2026 (Estagnado Baixo Carbono).....	78
Gráfico 8 - SSE brasileiro de 2017 a 2026 (Estagnado Baixo Carbono).....	79
Gráfico 9 - Diversidade da matriz elétrica brasileira de 2017 a 2026 (Estagnado Baixo Carbono).....	80
Gráfico 10 - Geração elétrica por ano por fonte - 2017 a 2026 - cenário Pessimista de Carbono Normal.....	81
Gráfico 11 - Diversidade da matriz elétrica brasileira de 2017 a 2026 (Pessimista Carbono Normal).....	83
Gráfico 12 - SSE brasileiro de 2017 a 2026 (Pessimista de Carbono Normal).....	83
Gráfico 13 - Diversidade da matriz elétrica brasileira de 2017 a 2026 (Pessimista Baixo Carbono).....	84
Gráfico 14 - SSE brasileiro de 2017 a 2026 (Pessimista de Baixo Carbono).....	85
Gráfico 15 - Geração elétrica por ano por fonte – 2017 a 2026 - cenário Otimista de Carbono Normal.....	86
Gráfico 16 - Diversidade da matriz elétrica brasileira de 2017 a 2026 (Otimista Carbono Normal).....	88

Gráfico 17 - SSE brasileiro de 2017 a 2026 – cenário Otimista de Carbono Normal.....	89
Gráfico 18 - Diversidade da matriz elétrica brasileira de 2017 a 2026 (Otimista Baixo Carbono).....	90
Gráfico 19 - SSE brasileiro de 2017 a 2026 - cenário Otimista de Baixo Carbono.....	91
Gráfico 20 - Geração elétrica por ano por fonte - cenário Baseado no Passado e Carbono Normal.....	92
Gráfico 21 - Diversidade da matriz elétrica brasileira de 2017 a 2026 (Baseado no Passado Carbono Normal).....	94
Gráfico 22 - SSE brasileiro de 2017 a 2026 – cenário Baseado no Passado e Carbono Normal.....	95
Gráfico 23 - Diversidade da matriz elétrica brasileira de 2017 a 2026 (Baseado no Passado Baixo Carbono).....	95
Gráfico 24 - SSE brasileiro de 2017 a 2026 - cenário Baseado no Passado Baixo Carbono.....	96
Gráfico 25 - Diversidade da matriz elétrica brasileira por cenário – 2017 a 2026 (em 100%).....	99
Gráfico 26 - SSE da matriz elétrica brasileira por cenário – 2017 a 2026 (em 100%).....	100
Gráfico 27 - Capacidade hidrelétrica instalada entre 2006 e 2016 - Projeção, Realizado e Política.....	123
Gráfico 28 - Capacidade de biomassa instalada entre 2006 e 2016 - Projeção, Realizado e Política.....	124
Gráfico 29 - Capacidade eólica instalada entre 2006 e 2016 - Projeção, Realizado e Política.....	125
Gráfico 30 - Capacidade solar instalada entre 2006 e 2016 - Projeção, Realizado e Política.....	126
Gráfico 31 - Capacidade termelétrica instalada entre 2006 e 2016 - Projeção, Realizado e Política.....	127

Gráfico 32 - Capacidade nuclear instalada entre 2006 e 2016 - Projeção, Realizado e Política.....	128
--	-----

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Capacidades instaladas e projetadas por fonte - 2016 e 2026.....	64
Tabela 2 - Capacidade Instalada Hidrelétrica (real) - 2007 a 2016.....	65
Tabela 3 - Valores de b e c para as políticas energéticas.....	66
Tabela 4 - Vida útil e depreciação por fonte.....	66
Tabela 5 - Valores de Segurança em 2017 para diferentes intervalos de tempo.....	69
Tabela 6 - Alcances por fonte (2017).....	73

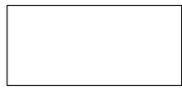
LISTA DE SÍMBOLOS

Σ

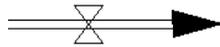
Somatório

\int

Integral simples



Estoque



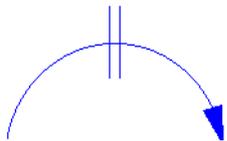
Fluxo



Variável externa às fronteiras de estudo



Relação entre variáveis (sem atraso de impacto)



Relação entre variáveis (com atraso de impacto)

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO.....	14
1.1.OBJETIVOS.....	18
1.2.ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	18
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1.PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.....	20
2.2.SEGURANÇA DO SUPRIMENTO ELÉTRICO.....	21
2.3.SEGURANÇA DO SUPRIMENTO ELÉTRICO BRASILEIRO.....	29
2.4.APOIO AO PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.....	31
3.MÉTODO DE DINÂMICA DE SISTEMAS.....	38
4.PROCEDIMENTO DE PESQUISA.....	48
4.1.ETAPA 1 – LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO E DOCUMENTAL.....	50
4.2.ETAPA 2 – CONSTRUÇÃO DO MODELO DE DS.....	50
4.3.ETAPA 3 – OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS E SIMULAÇÃO:.....	51
5.MODELAGEM.....	53
5.1.MODELO PROPOSTO.....	53
5.2.EQUACIONAMENTO DAS VARIÁVEIS DO MODELO.....	60
5.3.PARÂMETROS DO MODELO.....	64
5.4.TESTE DO MODELO.....	68
6.SIMULAÇÃO.....	72
6.1.DESCRICÃO DOS CENÁRIOS SIMULADOS.....	72
6.2.RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	75
7.CONCLUSÃO.....	101
REFERÊNCIAS.....	104
APÊNDICE A.....	116
APÊNDICE B.....	123

1. INTRODUÇÃO

Um dos principais parâmetros decisórios das políticas governamentais é a segurança do suprimento de energia, pois afeta diretamente o nível de economia, segurança e bem-estar social de um país (ASLANI et al., 2013). Por outro lado, preocupações como as crescentes exigências energéticas, as limitações dos combustíveis fósseis, as emissões de dióxido de carbono (CO₂) e conseqüentemente o aquecimento global têm levado muitos gestores políticos e governos a debaterem o papel das políticas de utilização dos recursos energéticos renováveis (RER) e diversificação das fontes de energia (ASLANI; HELO; NAARANOJA, 2014).

Uma carteira diversificada de recursos e fornecedores para a produção de eletricidade num país diminui o risco global de fornecimento de energia (MATHIESEN; LUND; KARLSSON, 2011). A diversificação nos recursos de oferta não só reduzem a vulnerabilidade de interrupções no suprimento, mas também diminui o poder dos fornecedores e os riscos de preços mais elevados no mercado (DYBVIG; ROSS, 2003; IEA, 2007a). Para ter sucesso em programas de difusão do desenvolvimento de RER, diferentes estratégias, tais como melhorias tecnológicas, economias de escala e um forte apoio político, devem contribuir tanto nos países desenvolvidos quanto nos países em desenvolvimento (LEAN; SMYTH, 2013; NAGY; KÖRMENDI, 2012).

O sistema brasileiro de fornecimento de eletricidade pode ser classificado como hidrotérmico (CHANG; OBERST; MADLENER, 2015), o que significa que a energia elétrica é produzida principalmente em grandes usinas hidrelétricas. Estes reservatórios permitem o armazenamento de energia durante a estação chuvosa, que pode então ser usada mais tarde durante a estação seca. As usinas termelétricas brasileiras servem de fonte de energia elétrica de reserva, a serem acionadas apenas em períodos excepcionalmente secos, quando a redução das chuvas ameaça realmente a segurança do abastecimento.

Em 2015, as hidrelétricas de grande porte representaram 64% da capacidade instalada (redução de 3,7% em relação ao ano anterior), mantendo ainda o setor elétrico brasileiro um dos mais ecológicos do mundo. No total, as energias

renováveis representaram 84% da capacidade instalada no Brasil em 2015 (EPE, 2016).

Devido à alta participação hidrelétrica na matriz elétrica brasileira, diversos riscos podem incidir sobre esse setor. Destaca-se o volume pluviométrico: chuvas são vulneráveis às condições climáticas e aos efeitos de fenômenos meteorológicos extremos, fazendo com que a disponibilidade de água seja uma incerteza. Apoiando esse ponto, várias secas ocorreram no Brasil na última década, impactando o fornecimento de energia elétrica (LUCENA et al., 2009; SCHAEFFER et al., 2012; JUÁREZ et al., 2014). Longos períodos de estiagem ocorreram em 2007 (a mais grave do Estado de Minas Gerais), em 2012 (a mais impactante da região nordeste nos últimos 30 anos) e em 2014, que continuou até 2015 e afetou região sudeste do Brasil. Somando-se à vulnerabilidade dos setores hidrelétricos aos eventos climáticos extremos, espera-se que sua capacidade instalada seja plenamente utilizada até 2030 (NOGUEIRA et al., 2014; PORTUGAL-PEREIRA et al., 2015).

A legislação ambiental tem restringido fortemente a construção de grandes reservatórios adicionais nas últimas duas décadas, de modo que a demanda crescente de eletricidade foi acompanhada por aumentos na capacidade instalada, mas não pela capacidade de armazenamento de energia. Isso implica que a capacidade do sistema para absorver as oscilações sazonais da energia hidrelétrica tem caído dramaticamente nos últimos anos. No Brasil, tal absorção é realizada principalmente por usinas termelétricas baseadas em fontes fósseis e com maior custo. (NOGUEIRA et al., 2014).

Por outro lado, o Brasil tem a segunda maior geração de energia elétrica baseada em biomassa do mundo (PAO; FU, 2013; WEC, 2017) e o mais competitivo programa para desenvolvimento e produção de biocombustíveis (PEREIRA et al., 2012). A geração de energia com biomassa é majoritariamente derivada de instalações combinadas de calor e energia alimentadas com bagaço de cana-de-açúcar (LUCENA, et al., 2016). Os projetos de expansão da capacidade instalada de usinas de biomassa estão previstos para 2018 (698 MW) nas regiões sudeste e nordeste do Brasil (EPE, 2014, EPE, 2015).

A geração de energia eólica é um complemento promissor à geração hidrelétrica, uma vez que o Brasil tem ventos muito fortes ao longo do ano, especialmente em épocas de baixo volume pluviométrico (PAO; FU, 2013). O potencial estimado do vento no Brasil é de cerca de 300 GW (MELO, 2013) e espera-se que a geração de energia eólica contribua para cerca de 10% para toda a geração de energia nos próximos 10 anos (JUÁREZ et al., 2014).

Já a irradiação solar média anual no Brasil varia entre 1.200 e 2.400 kWh/m²/ano, valores que são significativamente superiores à maioria dos países europeus. Para comparação, os intervalos de irradiação na Alemanha estão entre 900 e 1.250 kWh/m²/ano e entre 1.200 e 1.850 kWh/m²/ano na Espanha, sendo esses os dois países com maiores representações na geração solar em 2010 (49,7% e 11,2%, respectivamente) (EPE, 2012). Apesar disso, a energia solar ainda ocupa um percentual muito pequeno na matriz elétrica brasileira, que, em 2015, foi de 0,01% do total gerado no ano, isto é, uma geração de 59 GWh. Desse montante, 73% da geração é relativo à autoprodução, e que, em sua maior parte, não é inserida na rede de distribuição nacional (EPE, 2016).

Quanto à energia nuclear, o Brasil possui duas plantas localizadas no estado do Rio de Janeiro, com capacidade instalada de 2,0 GW. Além disso, o país possui um plano de expansão da sua capacidade termonuclear (ANEEL, 2008; CARVALHO; SAUER, 2009), cuja implementação encontra-se bastante aquém do originalmente programado. A geração proveniente dessa fonte representou, em 2016, 2,6% de toda a energia elétrica gerada no Brasil, tendo um montante de 15,051 GWh (EPE, 2017a).

Nogueira *et al.* (2014) apontam que a escolha das fontes de energia é uma questão de grande importância. Isoladamente, nenhuma fonte será suficiente para atender à crescente demanda por eletricidade no país. A energia eólica tem se tornado cada vez mais importante recentemente, mas a implantação em grande escala enfrenta desafios técnicos e operacionais (BORBA; SZKLO; SCHAEFFER, 2012). Até 2022, poucas outras opções além de combustíveis fósseis, particularmente gás natural, participam de forma significativa na matriz elétrica brasileira.

Esse desenvolvimento estrutural adverso está forçando o sistema elétrico brasileiro ao limite em relação à segurança do suprimento e, ao mesmo tempo, impõe um grande desafio para a manutenção de sua imagem voltada à sustentabilidade ambiental (CHANG; OBERST; MADLENER, 2015). O uso de fontes térmicas emissoras de CO₂, visando suprimento elétrico, está em conflito com as intenções de reduzir as emissões desse gás, expressas pelo Plano de Mudanças Climáticas do Brasil, que propõe a adoção de medidas voluntárias para mitigar as emissões de gases de efeito estufa (UNFCCC, 2011).

Neste contexto, a diversificação da matriz energética nacional deve ser buscada. Estrategicamente, e usadas em conjunto, as fontes alternativas de energia (FA), como eólica, solar, hidrelétrica de pequeno porte e biomassa, são opções valiosas para a expansão da capacidade, possibilitando o aumento da flexibilidade do sistema e melhoria da segurança do suprimento sem a necessidade de construção de novos reservatórios (CHANG; OBERST; MADLENER, 2015).

Observando as características da matriz elétrica brasileira e suas projeções, algumas questões podem ser levantadas. Tendo uma eletro geração predominantemente baseada em hidrelétricas e termelétricas, os planos de expansão de capacidade para as demais fontes são capazes de garantir bons índices de diversidade para o sistema? Os esforços voltados ao aumento da diversidade impactam positivamente na segurança elétrica? O Brasil apresenta bons índices de diversidade no setor elétrico se comparado com outros países? As metas e planos estabelecidos para o setor nos próximos anos são suficientes para garantir o suprimento elétrico brasileiro? Esta dissertação busca responder estas perguntas e, para isso, o método de dinâmica de sistemas foi escolhido.

Aslani, Helo e Naaranoja (2014) afirmam que, apesar do sucesso da dinâmica de sistemas como uma ferramenta voltada ao conhecimento detalhado e projeção dos conceitos de sistemas de energia, poucas pesquisas abordam os efeitos da RER sobre a segurança energética. Neste sentido, o objetivo desta pesquisa é cobrir uma parte desta lacuna com uma análise do impacto da diversificação de RER sobre a segurança elétrica no Brasil nos próximos anos. Desta forma, para além da contribuição com estudos para o caso brasileiro utilizando este método, espera-se

que o resultado deste trabalho oriente especialistas e políticos na tomada de decisão acerca de políticas de incentivo à RER na matriz elétrica brasileira.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral é analisar o impacto das políticas para diversificação de fontes, especialmente oriundas de recursos energéticos renováveis, na diversidade e na segurança do suprimento de energia elétrica do Brasil. Com isso, espera-se, também, cobrir uma parte da lacuna de pesquisas envolvendo o método de dinâmica dos sistemas nas investigações acerca da segurança energética.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Identificar e relacionar variáveis de impacto na geração elétrica brasileira;
- Parametrizar numericamente as variáveis de impacto com base em dados de órgãos oficiais.
- Identificar o nível de diversidade e de segurança energética atuais da oferta brasileira.
- Avaliar o comportamento de elementos da política de incentivo à inserção de novas fontes de energia no cenário nacional sobre a segurança elétrica.
- Simular cenários de inserção e participação futura de fontes renováveis de energia, apoiando-se em comportamento de políticas passadas e em possíveis alterações nas variáveis de impacto.

1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está dividido em onze capítulos. No primeiro capítulo, apresenta-se esta introdução que discorre sobre o panorama do estudo e os objetivos, geral e específicos.

No Capítulo 2 são realizadas considerações acerca da relevância do planejamento energético e sua relação com a segurança do setor elétrico para as nações. Além disso são apresentados indicadores de medida de segurança elétrica, as

características de segurança do setor elétrico brasileiro, bem como métodos de apoio ao planejamento energético, como o de Dinâmica de Sistemas, apresentado mais detalhadamente no Capítulo 3

O Capítulo 4 apresenta os procedimentos metodológicos utilizado para a realização desta pesquisa, enquanto no Capítulo 5.1 é mostrado o modelo proposto, contendo a identificação das variáveis do problema e a formulação de diagramas, de forma a representar a relação entre essas variáveis.

No Capítulo 5.2 é realizado o equacionamento matemático das variáveis do modelo. Os parâmetros dessas equações são apresentados no Capítulo 5.3, bem como a forma de obtenção dos mesmos.

O Capítulo 5.4 apresenta os testes de confiabilidade do modelo. No Capítulo 6.1 são mostrados os cenários simulados, cujos resultados são apresentados e discutidos no Capítulo 6.2.

Por fim, o Capítulo 7 apresenta a conclusão da pesquisa, com a avaliação de cumprimento dos objetivos propostos e resultados obtidos, além de recomendações para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PLANEJAMENTO ENERGÉTICO

A energia está diretamente relacionada com o desenvolvimento humano, uma vez que, como consta na Declaração Universal dos Direitos Humanos, o direito ao seu acesso é uma parte do Direito ao Desenvolvimento, uma condição prévia e um meio para alcançar o direito à vida, ao trabalho, à moradia, água, comida e inclusão digital (COSTA, 2009). Adicionalmente, Tolmasquim (2012) e Aslani, Helo e Naaranoja (2014) afirmam que, desde que estabelecida de forma segura, em condições competitivas e ambientalmente sustentáveis, a energia está associada com um dos fundamentos da sustentabilidade econômica de uma nação.

A análise do setor de energia envolve, entre outros aspectos mais técnicos, as políticas energéticas de um país, que estimulam o aumento do suprimento de energia e seu uso eficiente. O planejamento de energia precisa considerar não só a quantidade e qualidade da energia a ser distribuída para a sociedade, mas também suas áreas geográficas e sociais, de modo a garantir que o fornecimento de energia seja um serviço ao público, independentemente do regime de concessão ou autorização, conforme determinado pela Constituição Brasileira de 1988 (CHAVES; TOSTA, 2016).

Segundo Goldemberg e Moreira (2005) o governo de um país tem um papel muito importante na gestão da expansão de sistemas de energia, pois políticas energéticas bem desenvolvidas podem atrair investimentos privados. Pelo lado da oferta, o planejamento energético permite identificar as fontes de energia mais adequadas em termos tecnológicos, sociais e ambientais para atender às demandas da sociedade. Pelo lado da demanda, permite a identificação de tecnologias de uso final capazes de tornar o uso de fontes de energia mais eficiente e racional (SILVA; BERMAN, 2002).

Os papéis do planejamento energético são os de permitir a elaboração de metas realistas para as políticas energéticas do governo e monitorar o comportamento dos mercados de energia, bem como o desempenho de seus agentes (produtores, transportadores, armazenadores, distribuidores, comercializadores, governo e

órgãos reguladores). Se o comportamento dos mercados mostra que o planejamento não é realista, ele deve ser aprimorado (BAJAY, 2013). Dessa forma, o planejamento energético mostra-se uma ferramenta indispensável para auxiliar não apenas as tomadas de decisão, mas também a elaboração de políticas energéticas sustentáveis (SILVA; BERMAN, 2002).

Pearce e Webb (1987) destacam a necessidade de integração entre planejamento energético e planejamento do desenvolvimento, apontando a impossibilidade de se planejar sem uma adequada base de informações a respeito das mais diversas variáveis de um sistema energético. Da mesma forma, o próprio planejamento energético deve-se manter flexível no que se relaciona às mudanças econômicas, tecnológicas e culturais da sociedade, visando acompanhar novas tendências.

2.2. SEGURANÇA DO SUPRIMENTO ELÉTRICO

Interrupções no suprimento de energia elétrica têm atraído muita atenção nos últimos anos. Além do caso brasileiro, podem-se mencionar outras ocorrências que impulsionaram as discussões sobre a segurança do suprimento elétrico, tais como: a crise de eletricidade no estado americano da Califórnia, em 2000 e 2001; as falhas de rede em Londres, Copenhague e Itália, em 2003, que provocaram interrupções em larga escala, e; falhas no arrefecimento das centrais elétricas dos Países Baixos, em 2003, reduzindo significativamente a capacidade de produção de energia (NOOIJ; KOOPMANS; BIJVOET, 2007).

Há na literatura diversas tentativas de definição de segurança do suprimento elétrico (SSE) e de elaboração de seus indicadores (KRUYT et al., 2009; YAO; CHANG, Y., 2014). Entretanto, a definição mais citada é um fornecimento confiável e adequado de energia a preços razoáveis (CHANG; LEE, 2008; CHESTER, 2010; SOVACOO; MUKHERJEE, 2011; MÅNSSON; JOHANSSON; NILSSON, 2014; PFENNINGER; HAWKES; KEIRSTEAD, 2014; REN; SOVACOO, 2014). Alguns autores também incorporam um aspecto ambiental ao definir a SSE (PNUD, 2004; AWERBUCH, 2006; APERC, 2007; VERA; LANGLOIS, 2007; GOUVEIA *et al.*, 2014). Além desses, outros fatores foram identificados como novos desafios que devem ser incorporados como dimensões no conceito de segurança energética, tais como segurança

humana, relações internacionais e política externa, dentre outros (VON HIPPEL et al., 2009; VIVODA, 2010).

Alguns estudos apresentam abordagens amplas de avaliação da SSE. Por exemplo, Chester (2008) usa uma grade de quatro dimensões (disponibilidade, adequação de capacidade, acessibilidade e sustentabilidade) para examinar as políticas, existentes e propostas, que impulsionam a SSE da Austrália em termos das quatro dimensões. Kruyt et al. (2009) classificam as dimensões da segurança energética pela disponibilidade, adquiribilidade, acessibilidade e aceitabilidade da energia e usam-nas para analisar a SSE da Europa Ocidental nas próximas décadas. Von Hippel et al. (2009) estabelecem um quadro de seis dimensões para identificar os benefícios e custos relativos de futuros caminhos de energia direcionados pelas políticas energéticas. Outros autores, como Vera e Langlois (2007), avaliam a SSE com vistas a associá-la à sustentabilidade energética, identificando indicadores sociais, econômicos e ambientais. Mais recentemente, Yao e Chang (2014) classificaram a SSE da China segundo quatro dimensões: a disponibilidade de recursos energéticos, a aplicabilidade da tecnologia, a aceitabilidade da sociedade e a acessibilidade (financeira) dos recursos energéticos

Os conceitos de SSE descritos e as estruturas para avaliar seu nível mostram que a noção de segurança energética tornou-se multidimensional. O caminho para a multidimensionalidade, até certo ponto, exhibe a evolução histórica do conceito. Enquanto alguns trabalhos tratam de um aspecto isolado da SSE (indicadores desagregados ou simples), outros tentam agregar vários elementos relevantes em um único indicador (indicadores agregados). Essas facetas mostram que a segurança energética é uma questão complexa que necessita de uma abordagem holística, capaz de abranger toda a complexidade do conceito (SOVACOOOL; MUKHERJEE, 2011).

Tendo em vista a amplitude da SSE e sua natureza subjetiva, é importante analisar seu conceito ou fronteiras consideradas neste estudo. Dessa forma, vale destacar alguns indicadores propostos por Kruyt *et al.* (2009), apresentados de forma resumida no Quadro 1.

Quadro 1 - Indicadores de segurança do suprimento elétrico (SSE)

Tipo	Indicadores
Simples	<ul style="list-style-type: none"> - Estimativas de recursos - Taxas de reservas para produção - Preço da energia - Índices de diversidade - Dependência de importação - Estabilidade política
Agregados	<ul style="list-style-type: none"> - Indicador baseado no índice Shannon - Indicador de segurança energética da EIA

FONTE: Elaborado pelo autor

Para os indicadores simples, Kruyt *et al.* (2009) definem que a existência real ou disponibilidade de fontes de energia é crucial para a SSE e, portanto, os recursos disponíveis (restantes) podem ser usados como um indicador direto para a SSE. Infelizmente, grandes incertezas envolvem as quantidades de recursos de hidrocarbonetos e seus potenciais de extração, por exemplo.

As taxas de reserva para produção (também chamadas de Taxa R/P) são frequentemente usadas como indicadores de SSE (YAO; CHANG, 2014). Estes indicadores representam o tempo de produção considerando os mais recentes níveis de produção. Como nem as reservas nem as taxas de produção são fixas, uma combinação desses fatores também será uma quantidade dinâmica. Apesar de apresentar-se como um indicador de fácil interpretação, pode ser um pouco simplista em caso de uma rápida mudança na demanda e/ou alta incerteza nas estimativas de reservas. Caso sejam utilizados níveis projetados de produção ao invés dos reais e mais atuais (produzindo os chamados R/P Dinâmicos), o indicador torna-se menos transparente (KRUYT *et al.*, 2009).

Em um mercado funcional, o preço representa um mecanismo de equilíbrio entre demanda e oferta. Além de indicarem o montante ofertado em relação à demanda, são considerados como uma medida de impactos econômicos. O preço também reflete a escassez e, portanto, o esgotamento dos recursos energéticos, mostrando-se um importante indicador de SSE. Servindo de base para operações energéticas globais, o preço do petróleo é visto como um indicador crucial para SSE (LE COQ; PALTSEVA, 2009; LÖSCHEL; MOSLENER; RÜBBELKE, 2010; AXON; DARTON; WINZER, 2013).

A diversidade de fontes de energia é outro importante indicador de segurança por parte da oferta (JANSEN; ARKEL; BOOTS, 2004; AXON; DARTON; WINZER, 2013) e a diversidade entre os fornecedores um indicador de segurança do mercado (IEA, 2007b). Uma medida quantitativa genérica para diversidade pode, portanto, servir como um indicador de SSE. Stirling (1999) argumenta que um índice de diversidade deve considerar três elementos-chave: variedade (o número de categorias), o saldo (a amplitude entre categorias) e a disparidade (o grau em que as categorias são diferentes entre si). No entanto, a viabilidade de utilização desse índice é comprometida, dada a dificuldade em definir a disparidade. Assim, na ausência de uma medida apropriada de disparidade, os índices que medem apenas dois dos três elementos-chave da diversidade são formalmente chamados de índices de “conceito duplo”.

Jansen, Arkel e Boots (2004) apontam os dois principais índices utilizados para medir a diversidade. O primeiro é o índice Shannon, também chamado de índice Shannon-Wiener (Equação 1).

$$H = - \sum_i p_i \cdot \ln(p_i) \quad (1)$$

Com p_i representando a quota de mercado do fornecedor i . Quanto maior o valor de H , mais diversificado é o sistema (conceito duplo). Este índice aumenta uniformemente com a crescente variedade e equilíbrio. Em seguida, existe o índice Herfindhal-Hirschman (HHI) (Equação 2).

$$D = \sum_i p_i^2 \quad (2)$$

Com p_i novamente representando a quota de mercado do fornecedor i , em valores percentuais. Quanto menor o valor de D , mais diversificado é o sistema.

Vários estudos aplicaram o índice de Shannon ou uma variação do mesmo para avaliar a diversidade de combustível (LÖSCHEL; MOSLENER; RÜBBELKE, 2010; CHUANG; MA, 2013; PFENNINGER; HAWKES; KEIRSTEAD, 2014; RANJAN;

HUGHES, 2014). Já o HHI é quase exclusivamente utilizado para se calcular a concentração da oferta (essencialmente a falta de diversidade nos fornecedores) (CHUANG; MA, 2013; GOUVEIA *et al.*, 2014; REN; SOVACOOOL, 2014). Esses índices podem, também, servir de base para a criação de outros indicadores agregados, como será descrito posteriormente.

Outro indicador simples apresentado por Kruyt *et al.* (2009) é o de dependência de importação, estando entre os indicadores mais utilizados para a SSE. Um exemplo desse indicador é a importação de petróleo, muitas vezes expressa em relação ao seu consumo (LÖSCHEL; MOSLENER; RÜBBELKE, 2010; PFENNINGER; HAWKES; KEIRSTEAD, 2014; REN; SOVACOOOL, 2014). Para fins de SSE, torna-se mais prático examinar as importações líquidas. No caso de um país ou região que atua como centro de transporte, ou simplesmente no contexto de *commodities* livremente negociadas, a subtração da energia exportada fornece uma visão mais realista das dependências reais.

Existem outros indicadores de dependência de importação mais refinados. Além das ações de importação, o APERC aplica uma medida combinada de diversidade e dependência de importação (APERC, 2007). Para este fim, o índice de Shannon é adaptado para medir a dependência de uma economia ponderada com sua diversidade de combustível, como mostrado na Equação 3:

$$NEID = \frac{\sum_{(i)} m_i \cdot p_i \cdot \ln(p_i)}{\sum_{(i)} p_i \cdot \ln(p_i)} \quad (3)$$

Com m_i significando a participação percentual nas importações líquidas de energia i , e p_i sua participação percentual no total de suprimento de energia primária (*Total Primary Energy Supply* - TPES). Aqui, um valor mais elevado implica uma menor SSE. Com uma especificação do papel de uma das fontes no *mix* de energia, este indicador representa de forma mais refinada e útil, a dependência de importação, como a taxa de importação simples. Em nível global, pode-se também considerar o comércio internacional de portadores de energia como um indicador de dependência

(mútua). O comércio de energia (total ou fonte específica) em termos absolutos pode ser considerado um indicador, mas também a participação da demanda global que é negociada internacionalmente (KRUYT *et al.*, 2009).

A estabilidade política dos países também é importante para a segurança do abastecimento energético, uma vez que os governos controlam tanto o real abastecimento energético, quanto as condições em que outras partes o desenvolvem. Alguns estudos objetivaram quantificar tal elemento qualitativo (estabilidade política) para uso como medida de SSE. A Agência Internacional de Energia (IEA) utiliza a classificação de risco político do Guia Internacional de Risco País (ICRG) (IEA, 2007a). Jansen, Arkel e Boots (2004) baseiam a sua medida de estabilidade sociopolítica a longo prazo no índice de desenvolvimento humano (IDH) do Plano das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) e o utilizam na criação de um indicador agregado.

O cerne deste indicador agregado é o índice Shannon, apresentado anteriormente. Em seu estudo, Jansen, Arkel e Boots (2004) aplicam um índice Shannon combinado, de forma a captar tanto a diversidade de combustível, quanto a diversidade nos fornecedores ligadas à participação das importações de vários combustíveis. Adicionalmente, atribui-se a esses fornecedores um fator de estabilidade política, com base em uma modificação do IDH do PNUD. Assim, mais peso é dado aos fornecedores classificados estatisticamente como estáveis. Além desse índice, o esgotamento de recursos é levado em consideração por meio da inclusão de um índice de depreciação, considerando as regiões fornecedora e compradora (JANSEN; ARKEL; BOOTS, 2004).

Embora esse índice agregado capture vários aspectos da SSE, o equilíbrio entre diferentes elementos (diversidade de fontes, dependência de importações, estabilidade política e depreciação) não possui uma base fundamental e, como tal, permanece arbitrário (IEA, 2007a).

A IEA (2007) apresenta um indicador que trata dos riscos de preços decorrentes da concentração da oferta. A avaliação dessa concentração é feita por meio de um Índice Herfindhal-Hirschman (Equação 2). Também está incluída uma medida de estabilidade política, dando maior peso aos países politicamente instáveis. A medida

de concentração da oferta para cada fonte supridora é ponderada de acordo com a participação dessa fonte no fornecimento de energia primária, para avaliar a vulnerabilidade de um país a esses riscos de concentração. A medida resultante da concentração da oferta está representada na Equação 4.

$$ESI_{price} = \sum_f \left[\left(\sum_{(i)} r_i \cdot S_{if}^2 \right) \cdot \frac{C_f}{TPES} \right] \quad (4)$$

Com S_{if} sendo a participação do fornecedor i no mercado f , e r_i sendo a classificação de risco político do país i . A razão entre C_f e $TPES$ representa a quota de combustível f no fornecimento total de energia primária.

Aqui também, o equilíbrio entre os parâmetros para a concentração da oferta e a estabilidade política é arbitrário. Em um nível mais conceitual, classificar a concentração da oferta como o único indicador de SSE decorre de uma perspectiva de total confiança no funcionamento dos mercados de energia. A dinâmica de outros aspectos da SSE, como o esgotamento, é ignorada (KRUYT *et al.*, 2009).

De outro modo, Galarraga, González-Eguino e Markandya (2011) demonstram um conjunto de indicadores voltados à avaliação da SSE do ponto de vista da diversidade de fornecimento de energia (*Diversity of Energy Supply* - DES). Tais indicadores baseiam-se, majoritariamente, na Teoria da Carteira, em finanças (ASLANI; ANTILA; WONG, 2012). Seu cálculo é demonstrado na Equação 5.

$$DES = - \left(\frac{\sum_{i=1}^N a_i \cdot \ln(a_i)}{\ln(N)} \right) \quad (5)$$

Nessa equação, a_i é a parcela de cada fonte primária de energia no fornecimento total de energia. N é o número de fontes. Geralmente, maior pontuação de DES para um país significa alta SSE e baixo risco. De acordo com esta teoria, o risco global de fornecimento de energia é menor se houver um portfólio diversificado de fornecedores (DYBVIIG; ROSS, 2003). A diversificação em fontes de suprimentos

pode reduzir a vulnerabilidade das interrupções do fornecimento de uma determinada fonte. Além disso, a diversificação diminui o poder de mercado de qualquer fornecedor e os riscos de preços mais elevados (RANJAN; HUGHES, 2014).

No que se refere à aplicação de políticas e seus efeitos, tal equacionamento pode ser representado por uma curva sigmoidal (em formato de S), largamente utilizada em análises de aprendizagem em estudos de gestão (DARBY, 2006; KEMP; VOLPI, 2008; WAND; LEUTHOLD, 2011). Darby (2006) utiliza essa ferramenta para elaborar um estudo de aprendizado sobre consumo energético diário pelo lado da demanda. Kemp e Volpi (2008) utilizam a ferramenta da curva em S para apresentar um estudo a respeito da difusão de tecnologias limpas, inserindo a influência das políticas nesse contexto. Já Wand e Leuthold (2011) examinam os efeitos potenciais da política de tarifas de incentivo para pequenos sistemas fotovoltaicos solares na Alemanha. Como apresentado por Georgiadis e Vlachos (2004), a curva pode ser equacionada por uma função de tangente hiperbólica, como representado na Equação 6:

$$f(x) = a \cdot \tanh(b \cdot x + c) + d \quad (6)$$

Por fim, vale destacar o trabalho de Aslani, Antila e Wong (2012), no qual implementam dois dos indicadores apresentados acima, um simples e um agregado (NEID e DES, respectivamente) para os países nórdicos (Finlândia, Suécia, Noruega, Dinamarca e Islândia). O estudo desta região em termos de políticas de diversificação e promoção de RER se mostra interessante devido às características regionais. Por exemplo, a Finlândia e a Suécia ocupam papel de destaque global no uso da bioenergia. A Noruega também, mas no que toca o desenvolvimento da energia hidrelétrica, enquanto a Dinamarca foca na utilização de energia eólica, e a Islândia na energia geotérmica. Todos esses são exemplos bem-sucedidos da utilização dos RER (ASLANI; ANTILA; WONG, 2012).

Em outro trabalho, Aslani; Helo; Naaranoja (2014) aplicam os mesmos indicadores especificamente para o caso da Finlândia, objetivando discutir o papel da diversificação na dependência e segurança do aprovisionamento de energia do país.

O estudo desenvolve uma análise com foco especial no papel dos RER por meio de fatores qualitativos e quantitativos.

2.3. SEGURANÇA DO SUPRIMENTO ELÉTRICO BRASILEIRO

O Brasil abriga uma das matrizes energéticas mais renováveis do mundo, com 41,5% de energia proveniente desse tipo de fonte (EPE, 2017). Em 2016, a geração de energia elétrica no país foi predominantemente composta por fontes de energia renovável distribuídas em 64% de hidrelétricas, 8% de biomassa e 3,5% de energia eólica e 0,01% solar. O gás natural e os produtos petrolíferos representam uma quota de 9,1% e 2,4%, respectivamente, enquanto os produtos do carvão representam 4,2% e nuclear 2,6%. Esses percentuais fizeram com que o Brasil ocupasse, ainda em 2016, o terceiro lugar mundial em capacidade instalada baseada em energia renovável, atrás apenas da China e dos Estados Unidos. (PAO; FU, 2013; EPE, 2016).

Entretanto, o setor elétrico brasileiro enfrenta uma mudança de paradigma que levanta preocupações adicionais sobre a segurança do suprimento para os tomadores de decisão (SANTOS et al., 2015). O setor possui uma forte dependência de usinas hidrelétricas (cerca de 80% da energia elétrica provém da hidrelétrica nos últimos dez anos) (EPE, 2013), cuja expansão de capacidade instalada enfrenta sérios desafios ambientais locais. Além disso, sendo altamente dependente da pluviosidade, as mudanças nas condições climáticas podem pôr em causa a grande contribuição da energia hidrelétrica para a produção de energia no país no futuro (LUCENA et al., 2009; PAO; FU, 2013).

No ano de 2001, um sério racionamento de energia elétrica ocorreu no Brasil. Bajay (2006) aponta que, além do longo período de estiagem apresentado no ano, os principais motivos dessa ocorrência foram gerenciais e políticos, como atrasos na implantação de novas instalações, baixo nível de investimento proveniente do setor privado e falhas no planejamento conjunto dos principais órgãos nacionais responsáveis pelo setor: o Ministério de Minas e Energia (MME) e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Desta forma, fica claro que a SSE é, também,

decorrente de estratégias definidas no seu planejamento ou, até, por falta de um planejamento adequado.

No lado da demanda, as projeções para o consumo futuro de energia elétrica revelam um aumento anual médio esperado entre 3,7% e 4,2% (EPE, 2017b; NOGUEIRA et al., 2014), o que exige uma rápida expansão da capacidade de geração de energia. Nesse contexto, as tecnologias de energia renovável, como energia eólica, solar e de biomassa, podem complementar as unidades hidrelétricas.

No entanto, em um cenário de referência, estudos mostram uma maior penetração de usinas de energia baseadas em combustíveis fósseis no futuro (NOGUEIRA et al., 2014; LIMA et al., 2015; PORTUGAL-PEREIRA et al., 2015; LUCENA. et al., 2016). Estes cenários mostram que o carvão e o gás natural desempenhariam um papel cada vez mais importante na geração de energia, alterando o papel atual do gás natural como geração sobressalente na carga máxima ou quando as condições hidrológicas são ruins. Uma maior penetração dessas fontes de energia primária, no entanto, significará que as importações de combustíveis fósseis podem levar o Brasil a uma posição de maior dependência externa no futuro.

Algumas tecnologias de energias renováveis são normalmente referidas como não competitivas quando comparadas com alternativas convencionais de combustíveis fósseis. Contudo, se a competitividade inclui não apenas aspectos econômicos, mas também externalidades sociais e ambientais, o planejamento da expansão da geração de energia pode tomar outras direções. Eventualmente, a integração de fontes de energia renováveis no sistema pode até ser melhorada (LINS et al., 2012)

A complexidade do setor elétrico, cujos investimentos precisam ser planejados a médio e longo prazo, requer um sistema de planejamento, programação, operação e regulação (CHAVES; TOSTA, 2016). Entretanto, o caso brasileiro não reflete tais aspectos. Bajay (2013) aponta um alto nível de discordância entre diversos dos agentes do setor elétrico brasileiro no que toca a planejamento, simulação, operacionalização e operação de longo prazo. Chipp (2009) afirma que não há, entre os agentes de operação e expansão do sistema nacional, a necessária coordenação de planejamento.

Adicionalmente, Pedrosa (2009) aponta a necessidade de revisão dos padrões de segurança do suprimento atualmente adotados, principalmente sob a égide do custo-benefício, pois o modelo atual vem frequentemente requerendo longas operações de elevado custo operacional. No mesmo sentido, Bajay (2013) afirma que, mesmo a montante do processo de planejamento, há uma carência de políticas energéticas claras e com uma perspectiva de longo prazo, o que pode levar a planejamentos e operações fortemente embasados em hipóteses, o que reduz a credibilidade dos resultados.

Chaves e Tosta (2016) enfatizam a importância do suporte consistente de informações confiáveis que subsidiam técnicas e metodologias de planejamento, alegando que o planejamento energético deve ser capaz de acompanhar os aspectos políticos, econômicos, tecnológicos e culturais da sociedade, a fim de garantir a flexibilidade necessária para ajustar e reorientar essas mudanças. Isso reforça a importância de escolher um bom método de planejamento ou técnica que, agregado à análise de cenários, permita a antecipação ou simulação desses efeitos.

2.4. APOIO AO PLANEJAMENTO ENERGÉTICO

Vários métodos de modelagem são aplicados aos mercados de eletricidade. Ventosa *et al.* (2005) identificam três categorias principais de modelagem: modelos de otimização, modelos de equilíbrio e modelos de simulação. Os modelos de otimização e simulação fazem parte de uma abordagem ascendente (*Bottom-Up*) e os modelos de equilíbrio fazem parte das abordagens de cima para baixo (*Top-down*). Modelos *top-down* têm uma perspectiva mais macroeconômica. Normalmente, essa perspectiva tem um nível mais amplo de agregação em vez de modelar opções de tecnologia ou fontes de energia explícitas, como a energia solar, isoladamente. Métodos importantes associados aos modelos *top-down* são os modelos Insumo/Produto (ZHANG *et al.*, 2015) e Modelo de Equilíbrio Geral Computável (FUJIMORI; MASUI; MATSUOKA, 2014). Modelos *bottom-up* também são chamados de modelos parciais, pois tendem a se concentrar em setores (por exemplo, eletricidade, eólico) e não cobrem interações com toda a economia (TEUFEL *et al.*, 2013)

A análise de decisão multicritério (*Multicriteria Decision Analysis - MCDA*) é uma técnica eficiente para abordar problemas de tomada de decisão sob diferentes e conflitantes critérios (LINARES, 2002; MARTIN, 2015). A maior parte do trabalho desenvolvido para o setor de energia usando MCDA se baseia na comparação de diferentes tecnologias de geração de energia.

No entanto, Olsina (2005) aponta que modelos de otimização ou modelos econométricos, geralmente utilizados para fins de planejamento, são falhos em captar a dinâmica desses sistemas complexos e sugere um modelo de simulação baseado em Dinâmica de Sistemas (DS). Essa abordagem, ao contrário dos modelos clássicos de mercado, consegue replicar a estrutura do sistema de mercados de energia e da lógica das relações entre os componentes do sistema, a fim de obter sua resposta dinâmica (OLSINA; GARCÉS; HAUBRICH, 2006).

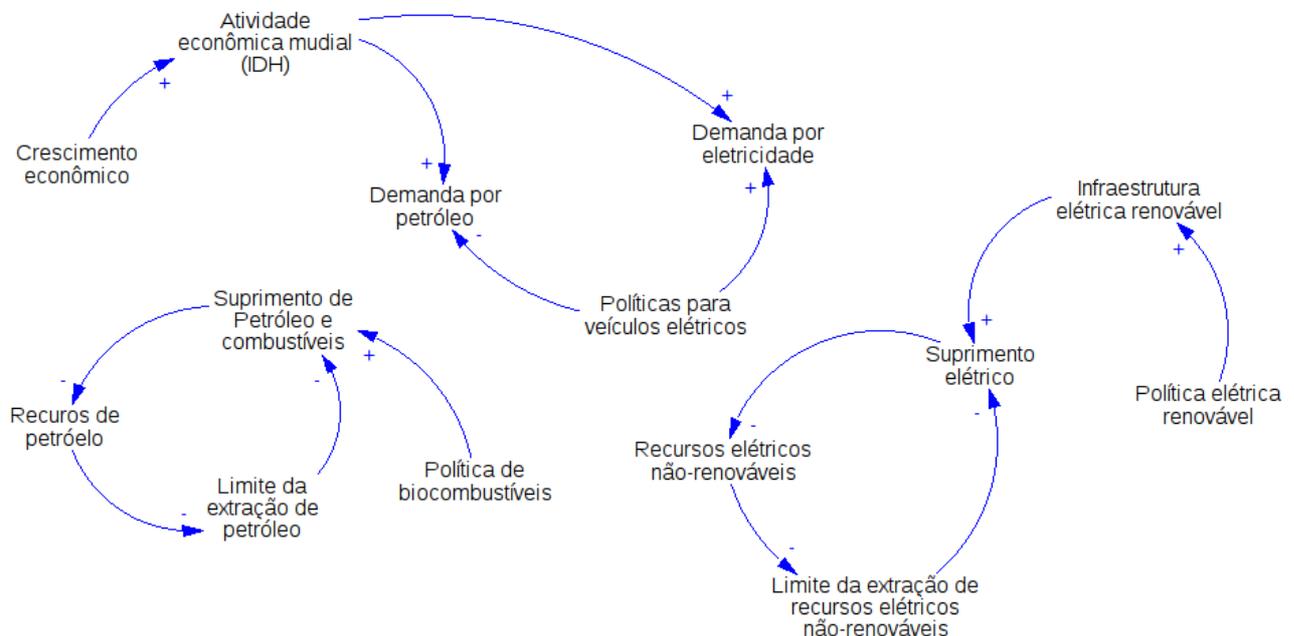
Ford (1997) já apontava 33 trabalhos com a aplicação da Dinâmica de Sistemas e da Indústria de Energia Elétrica. Por mais de 30 anos, a DS desempenhou um papel notável no desenvolvimento da política energética para muitos estados, empresas e países (ASLANI; HELO; NAARANOJA, 2014). Naill (1992) descreve o modelo de política energética norte-americano chamado FOSSIL2/IDEAS como um dos principais casos de sucesso para a modelagem de sistemas dinâmicos. Entre 1978 e 1995, FOSSIL2/IDEAS ainda era o modelo da Política Nacional de Energia para a maioria dos analistas de energia dos EUA e internacionais. Depois de quase 20 anos, este modelo foi substituído por outro detalhado modelo com o mesmo método, o Sistema de Modelagem de Energia Nacional (*National Energy Modeling System – NEMS*) (BACKUS; AMLIN, 2009).

Alguns pesquisadores utilizaram a DS para avaliar a estrutura física dos sistemas de energia e criar diferentes cenários (NAILL, 1972; CHI; NUTTALL; REINER, 2009; CONNOLLY et al., 2010). Um segundo grupo de pesquisadores implementou modelos de DS para avaliar fatores ambientais e os efeitos das emissões de CO₂ nos sistemas de energia (ANAND; VRAT; DAHIYA, 2006; HAN; HAYASHI, 2008; JIN; XU; YANG, 2009; TRAPPEY et al., 2012; FENG; CHEN; ZHANG, 2013). Esses autores desenvolveram diferentes modelos para apoiar políticas relacionadas a temas como a melhoria da sustentabilidade urbana e a análise de custos das emissões de CO₂.

Um terceiro e ainda restrito grupo de pesquisa de DS e abordagem de pensamento sistêmico foca-se na política energética em termos de segurança do abastecimento de energia (CHI; NUTTALL; REINER, 2009; HUANG; LIU, 2011; SHIN; SHIN; LEE, 2013; WU; ASLANI; HELO; NAARANOJA, 2014). Esses modelos ajudam os especialistas a avaliar e implementar quadros de indicadores ou políticas em um determinado país, identificando os principais componentes voltados à segurança de sistemas de energia.

Alguns trabalhos também se concentram na modelagem dinâmica de políticas de RER (KRUTILLA; REUVENY, 2006; ASLANI; ANTILA; WONG, 2012; BENNETT, 2012; HSU, 2012; MEDIAVILLA *et al.*, 2013). Essas pesquisas analisam a substituição dos combustíveis fósseis e fontes não renováveis por RERs. A Figura 1 mostra um exemplo de diagrama de causa e efeito usado para mostrar os padrões de exaustão mundial de combustíveis fósseis e sua possível substituição por RERs.

Figura 1 - Diagrama de causa e efeito da substituição dos combustíveis fósseis por renováveis



Fonte: Adaptado de Mediavilla *et al.* (2013, p. 298).

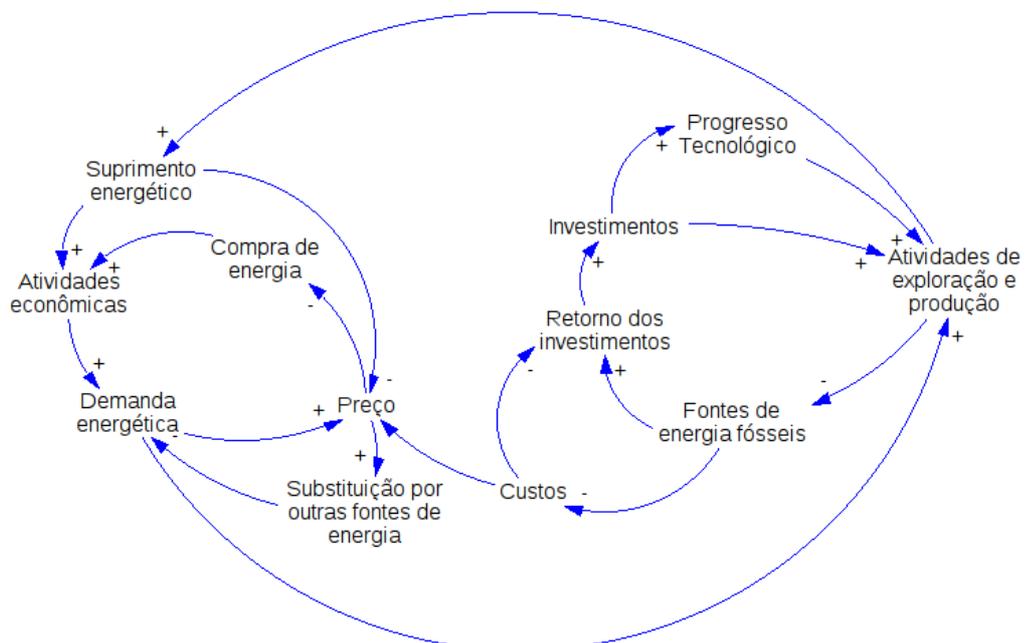
Esse modelo mostra que o crescimento econômico dos países faz aumentar a atividade econômica mundial, o que impacta em aumento na demanda energética, como o petróleo ou a própria eletricidade. As políticas de incentivo ao uso de

veículos elétricos fazem aumentar a demanda por eletricidade, na medida que impactam negativamente na demanda por derivados petróleo. Da mesma forma, os recursos de petróleo são limitados, de forma que, quanto maior a demanda e consequente extração desse bem, menor a quantidade disponível. O mesmo acontece com os recursos não-renováveis voltados à produção elétrica. Dessa forma, as políticas de incentivo à produção de biocombustíveis e produção elétrica a partir de recursos renováveis são reforçadas.

Kiani, Mirzamohammadi e; Hosseini (2010) destacam a aplicação de DS à análise de sistemas energéticos que utilizam combustíveis fósseis (Figura 2). Segundo esses autores, a demanda energética impulsiona as atividades de exploração e produção de energia, a fim de acelerar o suprimento energético. Esse abastecimento fomenta a atividade econômica, gerando uma crescente demanda por energia e, conseqüentemente, uma elevação nos preços. Esse aumento influi na busca de fontes substitutas, voltados à redução ou manutenção dos preços.

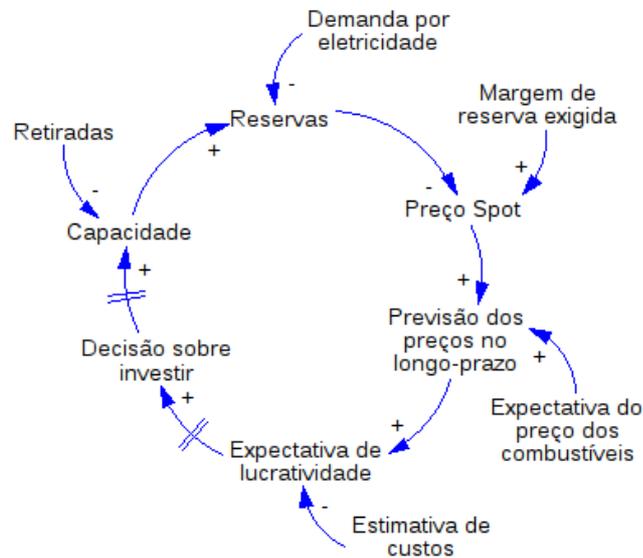
Outro fator de influência sobre os preços são os próprios custos da atividade de exploração e produção. Quanto mais escassos se tornam os insumos, maiores os custos de exploração e, conseqüentemente, maiores os preços. Entretanto, investimentos voltados aos avanços tecnológicos na produção de energia a partir de outras fontes podem equilibrar esse cenário.

Figura 2 - Diagrama de cauda e efeito do setor de energia



Para obter uma visão significativa do comportamento a longo prazo dos mercados de energia liberalizados, Olsina (2005) propõe um modelo que envolve uma análise de seu comportamento a longo prazo, onde os preços e a confiabilidade da oferta a longo prazo são o centro de interesse, de acordo com a Figura 3.

Figura 3 - Diagrama de causa e efeito para o mercado de energia



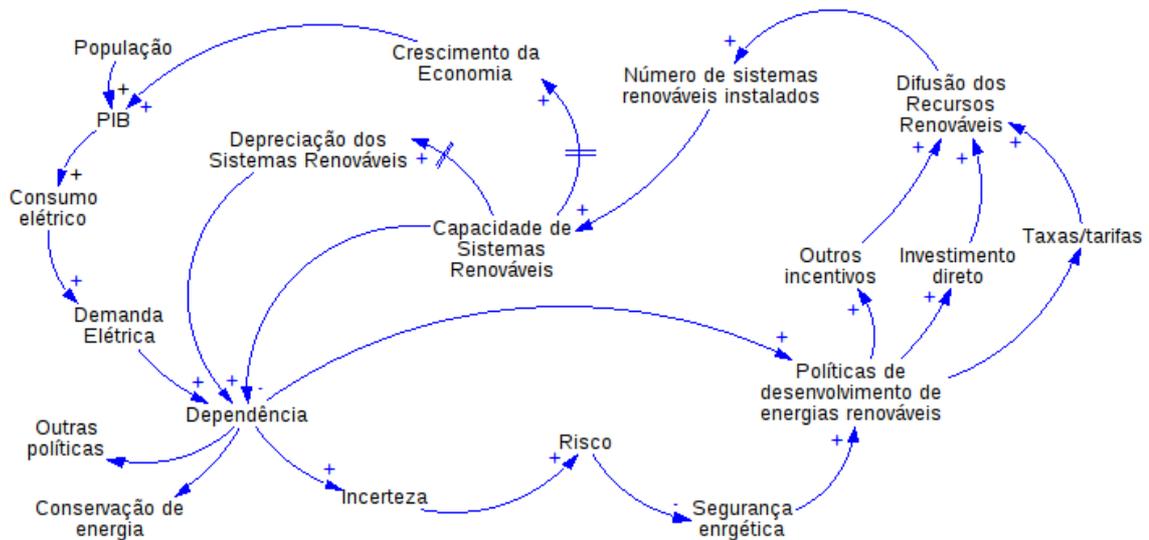
Fonte: Adaptado de Olsina (2005, p. 42).

Esse modelo mostra que, quanto maior a capacidade de produção, maior o montante de reserva de energia elétrica de determinada localidade, subtraída quando da demanda por essa eletricidade. Maiores valores de reserva impactam em menores preços, que podem ser elevados em caso de aumento das margens de lucro dos componentes da rede. A previsão de longo prazo desses preços influenciam diretamente a expectativa de lucratividade, podendo ser impactada tanto pela estimativa de preço dos combustíveis, quanto pela expectativa dos custos. Após determinado período, a expectativa de lucratividade impacta sobre a decisão investimentos futuros, influenciando no aumento da capacidade de produção no médio ou longo prazo.

Aslani, Helo e Naaranoja (2014) propõem um modelo de DS para avaliar a segurança e a dependência externa do setor energético na Finlândia com foco especial no papel das fontes renováveis (Figura 4), que é avaliado por meio de três cenários para as políticas de energias renováveis até 2020. De acordo com esse modelo, a dependência é influenciada pela capacidade de produção dos sistemas renováveis, pela depreciação desses sistemas (que ocorre após um tempo) e pela própria demanda por eletricidade. Quanto maior a dependência externa desse sistema, maiores as incertezas e riscos, diminuindo a segurança do mesmo. As políticas de incentivo à produção a partir de recursos renováveis auxiliam na difusão desses recursos, aumentando o número de instalações produtivas a partir de RER.

Novas instalações impactam no aumento da capacidade dos sistemas renováveis, o que influencia, após determinado período, tanto no crescimento econômico do país, quanto no nível de depreciação desses sistemas. O crescimento econômico impacta positivamente no PIB, acarretando um maior consumo elétrico, em consequência, uma elevação na dependência do sistema.

Figura 4 - Diagrama de causa e efeito do papel da energia renovável para a SSE na Finlândia



Fonte: Adaptado de Aslani, Helo e Naaranoja (2014, p. 762).

De modo geral, os modelos baseados em DS buscam evidenciar como este método pode ser utilizado com diversas abordagens para o planejamento do setor elétrico.

Por meio da análise de cenários, esta técnica permite avaliar o efeito da variação de diversos fatores que influenciam o setor energético em longo prazo, fornecendo subsídios para o planejamento estratégico (CHAVES; TOSTA, 2016).

Neste sentido, uma análise sistemática para levantamento das principais e mais atuais publicações relacionadas aos objetivos desta pesquisa foi realizada por meio da plataforma Scopus. Foram pesquisados artigos e artigos de revisão publicados entre os anos de 2007 e 2017, e que contivessem no título, resumo ou nas palavras-chave do trabalho termos que se relacionassem com energias renováveis, Dinâmica de Sistemas e segurança energética.

Utilizando a plataforma Scopus e estabelecendo os referidos parâmetros, buscou-se, a princípio, trabalhos relacionados a energias renováveis (“renewable energy”), obtendo-se 40.077 publicações compreendidas no período de análise. Desses trabalhos, 723 também estavam relacionados à Dinâmica de Sistemas (“System Dynamics”), refletindo 1,8% do total analisado. Quando aplicado o filtro de inclusão do termo “energy security”, o percentual cai para 0,18% (72 trabalhos).

Observou-se que, dentre os trabalhos selecionados, apenas a pesquisa de Xavier et al. (2013) possui relação com o Brasil, apresentado a aplicação de um modelo de DS para o estado de Minas Gerais, simulando possíveis trajetórias de demanda e oferta de energia. Entretanto, a pesquisa, além de aplicada de maneira regional, não apresenta a análise de diversidade e segurança da energia elétrica, essenciais à compreensão do modelo proposto.

Dessa forma, o trabalho de Aslani, Helo e Naaranoja (2014) pode ser destacado, pois, além de propor um modelo de DS para avaliação da segurança setor energético de um país, apresenta um foco especial no papel das fontes renováveis, o que contribui para os objetivos desta dissertação.

Evidencia-se, portanto, o baixo volume de trabalhos científicos publicados que envolvam o uso desse método voltado à análise de políticas energéticas e segurança de suprimento no longo prazo, sobretudo no cenário brasileiro. Dessa forma, cabe uma melhor descrição do método de Dinâmica de Sistemas (DS), que será apresentada no capítulo a seguir, pois foi o método utilizado neste trabalho.

3. MÉTODO DE DINÂMICA DE SISTEMAS

A Dinâmica de Sistemas foi desenvolvida pelo engenheiro Jay Wrigh Forrester no Massachusetts Institute of Technology (MIT) na década de 1950 (TANG; VIJAY, 2001). A DS estuda a mudança no comportamento do sistema ao longo do tempo, com base em conceitos fundamentais como sistema, dinâmica, estruturas e comportamento, de forma a permitir a avaliação das consequências das decisões tomadas. Um sistema é um conjunto de elementos que interagem continuamente ao longo do tempo. O termo dinâmica refere-se a sistemas cujas variáveis estão em constante mudança. As relações e conexões entre os componentes são chamadas de estruturas do sistema e as formas com que estes componentes variam indicam o comportamento do sistema. Por definição, a estrutura de um sistema determina seu comportamento (RICHARDSON, 2009; CHOOPOJCHAROEN; MAGZARI, 2012),

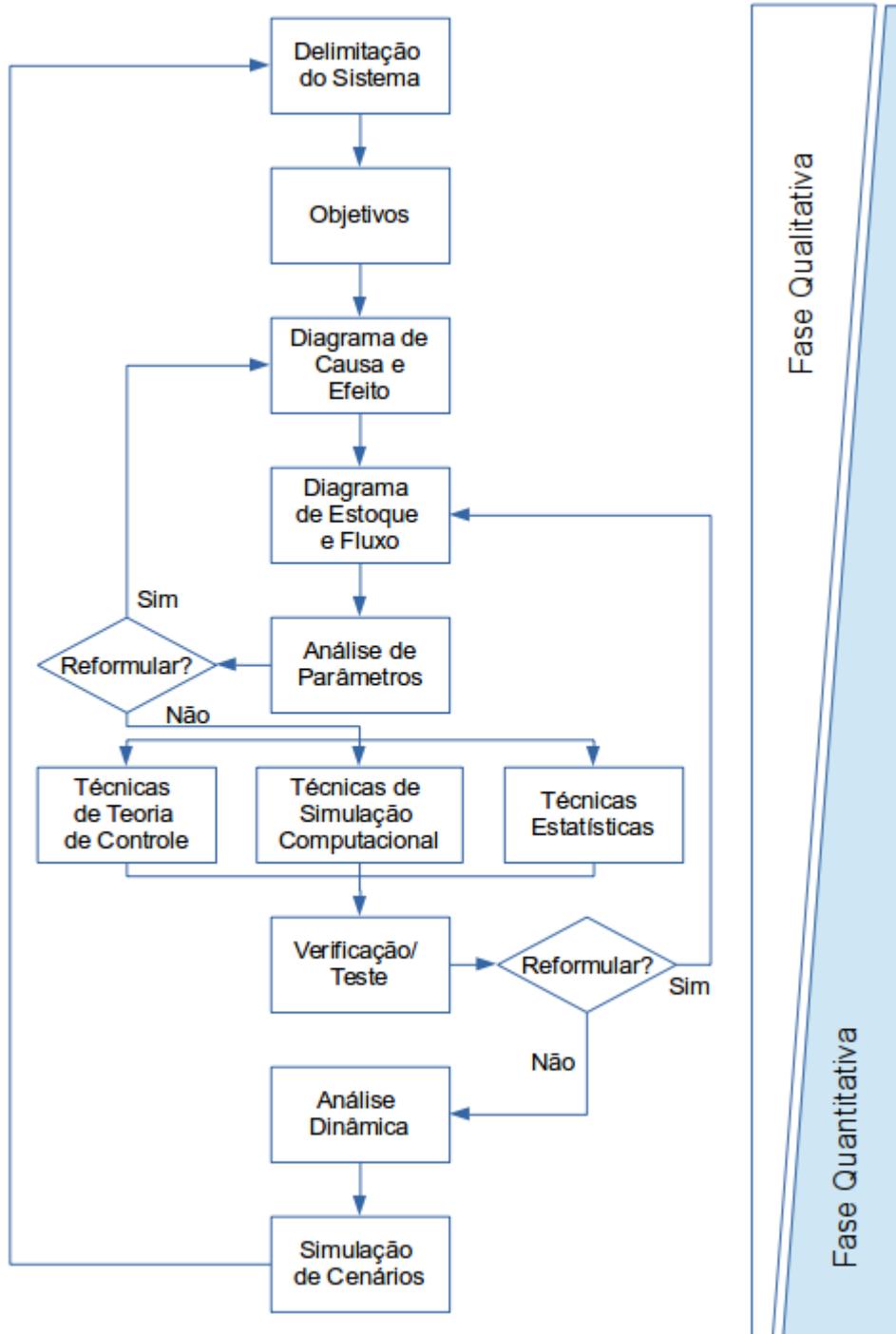
Segundo Fernandes (2003), em DS é possível representar um sistema por meio de duas abordagens: a qualitativa e a quantitativa. A modelagem qualitativa permite um maior entendimento a respeito das inter-relações do sistema, enquanto a quantitativa se presta a análises numéricas. As duas abordagens são realizadas em conjunto para a representação de um modelo que seja próximo à realidade da dinâmica do sistema (NAIM; TOWILL, 1994). A Figura 5 mostra o procedimento metodológico composto pela análise qualitativa e a análise quantitativa, descritas em seguida.

A fase qualitativa inicia-se pela identificação do sistema, suas fronteiras e interfaces, ou seja, limita-se o sistema e o objetivo do estudo, bem como as variáveis de entrada e saída do modelo. A partir de então, o modelo conceitual é construído por meio do Diagrama de Causa e Efeito (DCE), que representa a relação causal entre as variáveis identificadas, auxiliando como rascunho preliminar de hipóteses causais e simplificando a representação do modelo (NAIM; TOWILL, 1994; GEORGIADIS; VLACHOS, 2004).

Os elementos básicos de um DCE são variáveis relacionadas por meio de setas de sinal negativo ou positivo, representando uma relação de causa e efeito. Uma relação positiva significa que, se a causa aumentar, o efeito aumenta, ou, se a causa diminuir, o efeito diminui (relação diretamente proporcional). Analogamente, uma

relação negativa significa que, se a causa aumentar, o efeito diminui; se a causa diminuir, o efeito aumenta (relação inversamente proporcional) (STERMAN, 2000).

Figura 5 - Etapas da Dinâmica de Sistemas

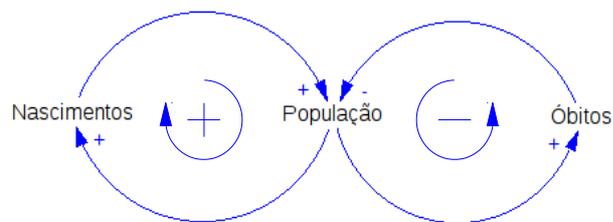


Fonte: Adaptado de Naim e Towill (1994).

Além das variáveis relacionadas por meio de setas, esses diagramas são caracterizados por laços de realimentação de polaridade positiva ou negativa, representados por ciclos no sentido horário ou anti-horário com sinais (+) ou (-) (FORRESTER, 1993). Um laço de realimentação é uma sucessão de causas e efeitos tais que, uma mudança em uma dada variável repercute através do laço e torna a afetar a mesma variável (MORECROFT, 2015). Segundo Georgiadis e Vlachos (2004), se um aumento na variável inicial provoca, através do laço, um aumento final na mesma variável, então o laço de realimentação é considerado positivo. Ao contrário, se um aumento em uma dada variável inicial afeta o laço de modo a diminuir o valor dessa mesma variável, então o laço de realimentação é identificado como negativo.

De acordo com Sterman (2000), esse método de determinação da polaridade do laço funciona independentemente do número de variáveis existentes no laço e de qual seja a variável inicial do efeito, levando ao mesmo resultado. Para exemplificar, consideram-se as variáveis: nascimento; população; e óbitos, demonstradas na Figura 6 e explicados em seguida.

Figura 6 - DCE entre as variáveis para a dinâmica da população.



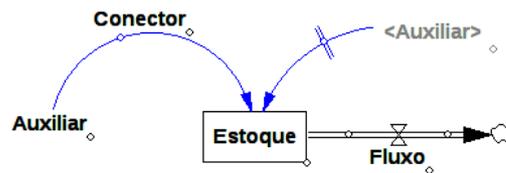
Fonte: Adaptado de Sterman (2000).

A relação causal entre nascimentos e população é positiva (diretamente proporcional), ou seja, quanto maior o número de nascimentos, maior será a população que, por sua vez, aumenta o número de nascimentos. Essa relação é representada por um laço de realimentação positivo. Por outro lado, quanto maior a população, maior será o número de óbitos que, por sua vez, diminui a população, sendo esta, uma relação negativa (inversamente proporcional) entre as variáveis, representada por um laço de realimentação negativo (STERMAN, 2000).

Laços positivos tendem a provocar um crescimento exponencial instável e a um colapso no comportamento do sistema, enquanto laços negativos tendem a estabilizar o comportamento do sistema, mantendo-o em equilíbrio (GEORGIADIS; VLACHOS, 2004).

No entanto, como destaca Sterman (2000), os DCE não distinguem estoques e fluxos, ou seja, as acumulações dos recursos e as taxas de mudança dos recursos em um sistema. Por isso, utiliza-se uma forma mais completa de representação dos sistemas, os Diagramas de Estoque e Fluxo (DEF), construídos com basicamente quatro componentes: estoques, fluxos, auxiliares e conectores, representados na Figura 7.

Figura 7 - Componentes utilizados no diagrama de estoque e fluxo.



Fonte: Elaborada pelo autor, a partir do software Vensim.

Estoques representam acumulações dentro do sistema e podem sofrer alterações devido à ação dos fluxos. São representados por retângulos e seu valor inicial acumula o fluxo que entra e subtrai o fluxo que sai (RICHARDSON, 2009). Matematicamente, os estoques podem ser representados pela Equação 7a, onde *Entrada(s)* representa o valor do fluxo de entrada em qualquer momento *s* entre o tempo inicial e o tempo atual *t*, enquanto *Saída(s)* representa o valor do fluxo de saída nesse mesmo intervalo de tempo (STERMAN, 2000).

$$Estoque(t) = \int_{t_0}^t [Entrada(s) - Saída(s)] ds + Estoque_{t_0} \quad (7a)$$

Equivalentemente, a taxa líquida de variação de um estoque, sua derivada, é a entrada menos a saída, definindo uma equação diferencial (Equação 7b).

$$\frac{d\text{Estoque}}{dt} = \text{Entrada}(t) - \text{Saída}(t) \quad (7b)$$

Os fluxos são variáveis de ação que alteram os estoques, aumentando ou diminuindo seus volumes. São representados por setas com válvulas, que controlam as taxas de entrada e saída dos estoques. As nuvens, que podem aparecer no início ou final de cada fluxo, representam a fonte ou destino final e não são considerados por estarem fora do sistema delimitado de estudo (STERMAN, 2000).

As variáveis auxiliares têm a função de formular os dados e definir as equações dos fluxos, combinando, por meio de operações algébricas, os fluxos, estoques e outros auxiliares. Podem aparecer, de forma repetida, entre os símbolos “<” e “>”, para evitar o cruzamento excessivo de setas (MORECROFT, 2015).

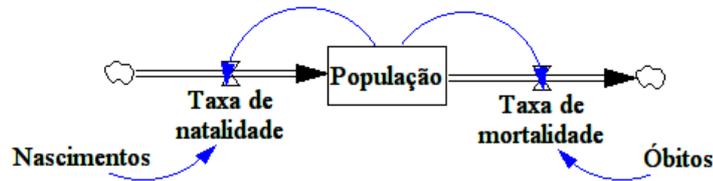
Por fim, os conectores (setas) representam as inter-relações entre todos os componentes do sistema. São essas inter-relações que ligam os componentes que formarão uma expressão matemática (RICHARDSON, 1986).

Além das variáveis representadas, consideram-se também os atrasos, representados simbolicamente por dois traços paralelos (||) interceptando uma determinada seta. Tais componentes são importantes, pois quando uma ação é tomada, seu efeito pode não ser imediato, ocorrendo um atraso em sua percepção. A duração média dos atrasos depende do problema abordado e deve ser investigada por coleta de dados (STERMAN, 2000). Por exemplo, quando determinado produto é consumido pela demanda, há um tempo de utilização do mesmo, antes que se torne resíduo, mas esse tempo de uso varia conforme o produto e, por isso, deve ser analisado caso a caso.

Ressalta-se que, para cada variável “estoque” existe um atraso associado. No entanto, em um modelo de simulação consideram-se apenas as variáveis de maior relevância para o objetivo do estudo (GEORGIADIS; VLACHOS 2004).

Dessa forma, os DEF representam as relações entre os estoques e os fluxos dentro do sistema em estudo. O DEF para o exemplo de nascimentos, população e óbitos, é representado na Figura 8.

Figura 8 - DEF das variáveis da dinâmica da população.



Fonte: Adaptado de Martin (1997).

Segundo Georgiadis e Vlachos (2004), o DEF é uma representação gráfica da formulação matemática do modelo. Sua construção permite a revisão e possível reformulação do modelo conceitual, representado pelo DCE, auxiliando a compreensão das inter-relações do sistema na fase qualitativa de formulação do modelo.

Para a fase quantitativa, Naim e Towill (1994) afirmam que existem três possíveis técnicas para a solução do modelo: a teoria de controle, a simulação computacional e a análise estatística. A escolha dentre as técnicas depende do grau de complexidade do modelo matemático e da disponibilidade de dados e objetivos da análise proposta.

A técnica da teoria de controle envolve o desenvolvimento de um modelo matemático de função de Transformada de Laplace. Essa técnica é aplicada, geralmente, quando as relações lineares, invariantes no tempo, são evidentes ou podem ser assumidas. A Transformada de Laplace é então usada para determinar o desempenho do objeto de estudo e pode ser representada no domínio do tempo ou domínio de frequência (NAIM; TOWILL, 1994).

A análise estatística geralmente é possível apenas se dados relevantes e suficientes estão disponíveis. Técnicas como tendências, suavização, análise de alcance, autocorrelação e correlação cruzada podem ser aplicadas. Estes métodos permitem a identificação de características subjacentes nos dados, tais como grau de dispersão, tendências a curto ou longo prazos, variação cíclica e eventos significativos e exógenos (NAIM; TOWILL, 1994).

Modelos de simulação computacional são desenvolvidos diretamente do DEF, configurando equações diferenciais que representam as relações causais. O conjunto de equações é resolvido através de técnicas numéricas de integração em software especializados, como o Powersim, Vensim, Stella, i-think e outros. Esta técnica é particularmente útil quando a análise matemática é proibitiva, por exemplo, devido à complexidade ou não-linearidades (NAIM; TOWILL, 1994; MORECROFT, 2015).

A simulação traz alguns benefícios, como: redução do tempo para verificação de resultados; custo-benefício comparado a outros tipos de modelagem; possibilidade de experimentação; visualização simplificada e prática, dentre outros (REIBSTEIN; CHUSSIL, 1999). Um dos métodos computacionais mais rápidos e simples é o método de Euler. No entanto, quando aplicado a sistemas mais complexos e/ou envolvendo maiores passos de tempo, esse método tende a apresentar menor precisão (CHOOPOJCHAROEN; MAGZARI, 2012).

Para sistemas de ordem superior ou que exijam maiores passos de tempo, são amplamente utilizados os métodos Runge-Kutta de segunda, terceira e quarta ordens (NOURGALIEV; DINH; YOUNGBLOOD, 2010; CHOOPOJCHAROEN; MAGZARI, 2012). Por serem mais precisos, os métodos Runge-Kutta demandam mais tempo de computação, tornando essencial o entendimento desses *trade-offs* para a melhor escolha entre os métodos (HONEYCUTT, 1992; NOURGALIEV; DINH; YOUNGBLOOD, 2010).

O teste do modelo na DS consiste em duas etapas sequenciais críticas: teste da estrutura e teste do comportamento. Segundo Saysel e Hekimoğlu (2013), o teste da estrutura analisa a consistência interna e a suficiência dos elementos formais do modelo para análise de um conjunto de problemas dinâmicos selecionados. O teste do comportamento busca a combinação de padrões entre dados históricos e os resultados da simulação do modelo (BARLAS, 1996; QUDRAT-ULLAH; SEONG, 2010). A questão-chave no teste é verificar dois aspectos: primeiro, se o modelo é aceitável para o uso pretendido, ou seja, o modelo imita o mundo real suficientemente bem para o propósito declarado (SENGE; FORRESTER, 1980; FORRESTER, 1985); e segundo, quanta confiança colocar em inferências baseadas em modelos sobre o sistema real (BARLAS, 1996; MORECROFT, 2015).

De acordo com Naim e Towill (1994), na fase de verificação do modelo, antes de cada rodada de simulação, determina-se o comportamento esperado nas condições estabelecidas. Se o resultado for diferente, há erro na tradução do sistema para a linguagem computacional, ou mesmo nas premissas do próprio modelo. Dessa forma, a representação por meio do DEF exige precisão nas relações entre as variáveis dos sistemas, provocando uma evolução do entendimento do sistema e possíveis alterações no diagrama de causa e efeito.

Senge e Forrester (1980) apresentaram cinco testes para verificação estrutural de um modelo de simulação de DS: adequação de limites, verificação de estrutura, consistência dimensional, verificação de parâmetros e condição extrema. Além desses, Sterman (2000) descreve outros dez testes: erro de integração, reprodução comportamental, anomalia de comportamento, membro da família, comportamento surpresa, análise de sensibilidade, melhoria do sistema.

Dentre esses, os testes mais utilizados são os de consistência dimensional, condição extrema testes de erro de integração e reprodução comportamental (GEORGIADIS; VLACHOS, 2004; QUDRAT-ULLAH; SEONG, 2010; MORECROFT, 2015) conforme descrito no Quadro 2.

Testes de consistência dimensional são realizados por meio da inspeção direta de todas as equações do modelo, possivelmente resultando em correções da formulação inicial. Esse tipo de teste fornece a validade estrutural do modelo (MORECROFT, 2015).

Os testes de condição extrema são realizados para verificar se os modelos se comportam realisticamente em políticas extremas. Por exemplo, os inventários nunca podem possuir valores negativos, não importa quão grande seja uma demanda. Ou a demanda por produtos deve zerar quando um preço subir alto o suficiente. A produção não pode ocorrer sem materiais, mão de obra, equipamentos e outros recursos. Testes de condição extrema perguntam se os modelos se comportam adequadamente quando as entradas assumem valores extremos, como zero ou infinito (STERMAN, 2000).

Quadro 2: Testes de modelos de DS

Teste	Questões-chave	Procedimentos
Consistência dimensional	Cada equação no modelo corresponde dimensionalmente ao sistema real?	<ul style="list-style-type: none"> - Usar software de análise dimensional. - Inspeccionar as equações do modelo para os parâmetros suspeitos.
Condições extremas	Cada equação faz sentido mesmo quando suas entradas assumem valores extremos? O modelo responde plausivelmente quando submetido a políticas extremas, choques e parâmetros?	<ul style="list-style-type: none"> - Inspeccionar cada equação. - Testar a resposta a valores extremos de cada entrada, de forma isolada ou combinada. - Sujeitar o modelo a grandes choques e condições extremas.
Erro de integração	Os resultados são sensíveis à escolha do tempo ou do método de integração numérica?	<ul style="list-style-type: none"> - Cortar o intervalo de tempo ao meio e testar as mudanças de comportamento. - Usar métodos de integração diferentes e testar as mudanças no comportamento.
Reprodução Comportamental	O modelo reproduz o comportamento de interesse no sistema (qualitativa e quantitativamente)? O modelo gera os vários modos de comportamento observados no sistema real?	<ul style="list-style-type: none"> - Calcular medidas estatísticas de correspondência entre modelo e dados - Comparar a saída do modelo e os dados de forma qualitativa, incluindo modos de comportamento, forma de variáveis, assimetrias, amplitudes relativas e fase, eventos incomuns. - Examinar a resposta do modelo para testar entradas, choques e ruído.

Fonte: Adaptado de Sterman (2000).

Os modelos de dinâmica de sistemas são baseados em equações diferenciais ordinárias não-lineares, geralmente formulados em tempo contínuo. Frequentemente, soluções analíticas não podem ser encontradas e o comportamento dos modelos deve ser computado numericamente, um processo conhecido como integração numérica (STERMAN, 2000). Um teste de erro de integração pode ser conduzido cortando-se o passo de tempo da simulação pela metade, até que os resultados obtidos entre os testes não sejam mais sensíveis a essa alteração considerando a precisão desejada (GHISOLFI *et al.*, 2017; MORECROFT, 2015; STERMAN, 2000).

Os testes de reprodução comportamental visam verificar o grau de semelhança do comportamento do modelo com situações passadas, quando colocado em situações semelhantes. Experiências mostram que os resultados numéricos dependem da natureza do sistema e do tipo de padrão envolvido. Espera-se que modelos mais estáveis apresentem uma reprodução de comportamento mais precisas (BARLAS, 1996). Os testes de reprodução comportamental não podem comprovar que um

modelo é correto ou confiável. O uso adequado do teste de reprodução do comportamento é descobrir falhas na estrutura ou parâmetros do modelo e avaliar se eles são importantes em relação ao objetivo (STERMAN, 2000).

Estruturado o sistema no simulador, o tomador de decisão possui um modelo que gera diferentes cenários futuros do sistema analisado (SENGE, 2006). Executando-se diversas simulações com diferentes valores de variáveis, pode-se verificar quais delas são as mais relevantes para a otimização do sistema e identificar os pontos de alavancagem (RICHARDSON, 2009).

4. PROCEDIMENTO DE PESQUISA

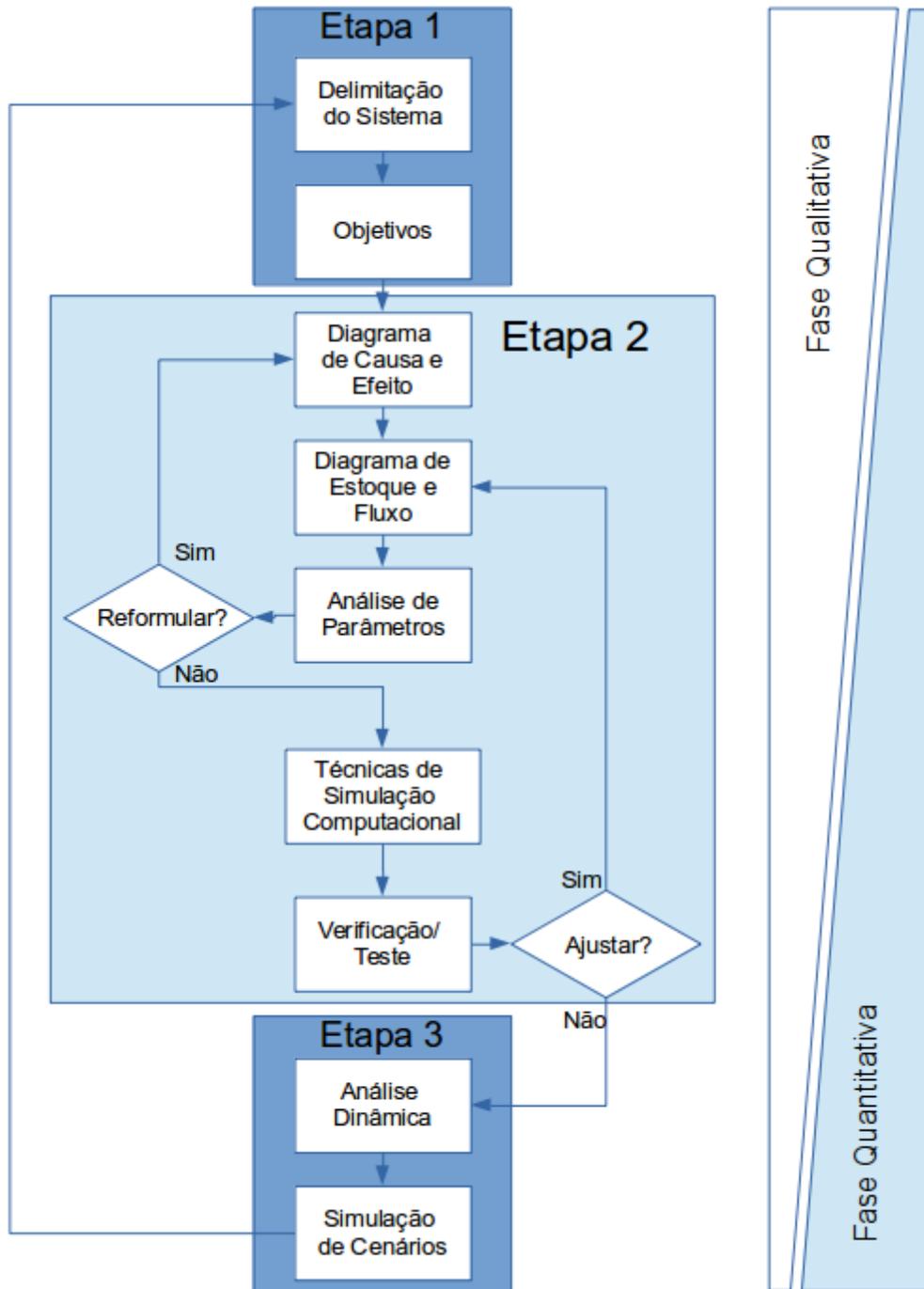
Muitos autores apresentam parâmetros para categorização de pesquisa científica. Silva e Menezes (2005), Moresi (2003), Lacerda *et al.* (2007) e Gil (2002) mostram que um trabalho pode ser classificado segundo sua natureza, abordagem, seu objetivo, o método científico empregado e o procedimento técnico empregado.

Este trabalho possui natureza aplicada e abordagem quantitativa. Pesquisas com natureza aplicada envolvem verdades e interesses locais, objetivando desenvolver conhecimentos voltados à aplicação prática e à solução de problemas específicos (SILVA; MENEZES, 2005). Estudos com abordagem quantitativa traduzem dados e informações em números, visando classificá-los e analisá-los metodicamente, necessitando do uso de recursos e de técnicas, principalmente, estatísticas (MORESI, 2003).

O objetivo deste estudo classifica-se como explicativo e exploratório, pois, além de identificar os fatores que causam um determinado fenômeno, visa proporcionar maior conhecimento acerca do tema (LACERDA *et al.*, 2007). O procedimento técnico utilizado nesta pesquisa é o de estudo de caso, pois este tipo de procedimento consiste em uma análise aprofundada sobre um ou poucos objetos, permitindo um amplo conhecimento sobre os mesmos. Desta forma, pode-se identificar e relacionar as variáveis que compõem o modelo, além de se definir as formas de controle e de observação dos efeitos (LACERDA *et al.*, 2007).

As etapas desta pesquisa seguem o exposto na Figura 5, e podem ser esquematizadas conforme exposto na Figura 9.

Figura 9 - Relação das etapas de execução da pesquisa segundo o método de DS



Fonte: Elaborado pelo autor baseado em Naim e Towill (1994).

4.1. ETAPA 1 – LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO E DOCUMENTAL

O objetivo desta etapa foi realizar de uma revisão bibliográfica em conteúdos especializados voltada à identificação e contextualização do problema. Da mesma forma, pretendeu-se delimitar o foco do estudo e elencar os objetivos analíticos.

De modo não exaustivo, pôde-se constatar que as investigações acerca da segurança energética necessitam de abordagens abrangentes, que traduzam toda a complexidade inerente ao conceito. Dessa forma, o método de DS mostrou-se promissor para tal análise.

Finda a etapa 1, constataram-se várias aplicações desse método voltadas ao segmento de energia, mesmo que focadas em aspectos específicos, como custo-benefício ou fatores ambientais, conforme descrito na Seção 2.4. Tais aplicações serviram de base estrutural para este estudo.

Pode-se destacar também uma grande consonância relacionada aos objetivos deste trabalho com as técnicas apresentadas por Aslani, Antila e Wong (2012) e Aslani; Helo; Naaranoja (2014), posto que tais trabalhos demonstram aplicação de DS voltada à segurança e dependência energética em determinados países. Dessa forma, foi utilizado um dos indicadores de SSE apresentados pelos autores (DES), entretanto focando-se no cenário brasileiro.

Adicionalmente, a revisão bibliográfica permitiu a definição de SSE utilizada neste trabalho como, dentre outros fatores, a redução do risco de falhas na oferta de energia elétrica, levando-se em consideração que a diversificação das fontes de energia podem levar a uma redução desse fator. Há aqui um foco especial na inserção e/ou promoção dos RER. O resultado desta etapa permitiu a elaboração dos Capítulos 2 e 3 deste trabalho.

4.2. ETAPA 2 – CONSTRUÇÃO DO MODELO DE DS

O objetivo desta etapa foi o de levantamento dos fatores que influenciam o sistema, delimitado na etapa anterior, e de identificação da relação de causa e efeito entre essas variáveis no decurso do tempo, inserida nas fronteiras do sistema.

A Etapa 1 permitiu verificar que o trabalho de Aslani, Helo e Naaranoja (2014) (Figura 4) aborda a questão da diversificação energética com foco na dependência que a Finlândia tem para suprir sua necessidade. Apesar de o foco ser diferente, este trabalho serviu de base para a reflexão do caso brasileiro. O DCE envolveu os principais elementos da diversificação de fontes que interferem na segurança energética considerando a realidade brasileira, apontando os agentes pertencentes ao cenário elétrico nacional e que impactam na SSE.

A relação entre estes elementos serviu de base para a construção do DEF e seu consequente equacionamento, desta forma, tanto o DCE quanto o DEF são baseados em Aslani, Helo e Naaranoja (2014), adaptado ao cenário do Brasil. O resultado destes passos será apresentado no Capítulo 5 deste trabalho.

A etapa de equacionamento consistiu na tradução das variáveis relacionadas pelo DEF em variáveis que acumulem mudanças efetuadas no decurso temporal (estoques) e variáveis que influenciam essas mudanças (fluxos e variáveis auxiliares). O desafio dessa etapa foi o da obtenção de equações algébricas que emulem, o mais próximo possível da realidade, o comportamento das variáveis a cada passo de tempo (STERMAN, 2000). Entretanto, antes de partir para a simulação, deve-se garantir o teste do modelo, utilizando os quatro métodos descritos na Seção 3: consistência dimensional, condições extremas, erro de integração e reprodução comportamental.. O objetivo desses testes é o de garantir que os dados obtidos a partir da simulação computacional do modelo sejam válidos e próximos o suficiente da realidade. Os três primeiros testes utilizados garantem a consistência interna do modelo, enquanto o teste de reprodução comportamental garante uma consistência externa do modelo ou uma adequação a comportamentos reais. O resultado dos testes está descrito no Capítulo 5.4 deste trabalho.

4.3. ETAPA 3 – OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS E SIMULAÇÃO:

Almejou-se nesta etapa o cumprimento de dois objetivos principais: a coleta de dados históricos de operação, resultados de políticas implementadas e relação de

políticas em fase de implementação (i), e; a simulação e análise dos diferentes cenários propostos (ii).

Os dados necessários ao cumprimento dessa etapa foram levantados a partir de publicações oficiais, tais como relatórios dos mais diversos órgãos componentes do setor elétrico brasileiro e artigos relacionados à avaliação de políticas energéticas implementadas no Brasil nos últimos 10 anos. Este período de tempo foi designado, pois, os principais trabalhos que dão base a esta pesquisa foram publicados a partir de 2007 e representam as características apresentadas pelo setor na última década. As informações necessárias para o cumprimento dessa etapa bem como os tratamentos realizados sobre os mesmos estão expostos no Capítulo 7 deste estudo.

O levantamento das características históricas de geração e consumo elétrico no Brasil, bem como as projeções governamentais para o setor permitiram a simulação do modelo, levando-se em consideração as políticas atuais de aumento de capacidade de produção do setor e as previsões de demanda. A partir desse levantamento foi possível estabelecer-se os cenários de simulação, descritos no Capítulo 9, cujos resultados são descritos e discutidos no Capítulo 10 deste trabalho.

A confecção do modelo, bem como os testes e a simulação, foram realizadas com o uso do *software* Vensim[®] PLE (*Personal Learning Edition*), uma versão gratuita da empresa Ventana Systems, destinado para uso pessoal e educacional. Esse *software* disponibiliza dois tipos de métodos para integração numérica: o de Euler e o de Runge-Kutta de quarta ordem (RK4). Como alertado no Capítulo 3 deste trabalho, há um *trade-off* entre esses métodos: o primeiro se mostra mais simples e mais rápido, enquanto o segundo é mais preciso, exigindo um tempo computacional maior. Vale ressaltar que, como as equações contidas no modelo proposto (Capítulo 5.1) foram, em sua totalidade, de primeira ordem, optou-se pelo método de integração de Euler. Além disso, possíveis erros de precisão ocasionados por esse método de integração podem ser minimizados por meio de testes de erro de integração (STERMAN, 2000).

Os resultados obtidos com as simulações servem de base para uma discussão mais aprofundada, abordada no Capítulo 10 desta pesquisa.

5. MODELAGEM

5.1. MODELO PROPOSTO

5.1.1. Diagrama de Causa e Efeito

O estudo de Aslani, Helo e Naaranoja (2014) fornece um método de avaliação da efetividade das políticas de RER para geração de eletricidade e calor sobre a dependência de importações para o suprimento de energia no cenário da Finlândia.

Diferentemente do trabalho de Aslani, Helo e Naaranoja (2014), este trabalho objetiva avaliar a efetividade das políticas de RER para a geração de eletricidade sobre a segurança de suprimento elétrico brasileiro. Para isso, deve-se levar em consideração que a população e o crescimento econômico afetam positivamente o PIB de um país (LEE; CHANG, 2007). Vale ressaltar que outros fatores afetam o crescimento econômico de um país, além da capacidade de geração de energia, principalmente, as renováveis. No entanto, estes fatores extrapolam a fronteira estabelecida para a análise deste sistema. Quando o PIB é aumentado, o consumo de eletricidade também é elevado. Por consequência, a demanda de energia aumentará (NARAYAN; PRASAD, 2008; WOLDE-RUFAEL, 2014). O crescimento da demanda de eletricidade aumenta o risco de falta de suprimento, reduzindo a segurança do sistema. Com a redução de segurança no suprimento, o governo é pressionado no sentido da ampliação da capacidade de suprimento por meio do uso de fontes não-renováveis de energia, importação direta e/ou o uso de fontes renováveis.

Nesse sentido podem-se destacar políticas de conservação de energia, de desenvolvimento da utilização de RER na geração elétrica e outras frentes de ação. Somente serão consideradas nas fronteiras desta pesquisa as relações das políticas de desenvolvimento de RER.

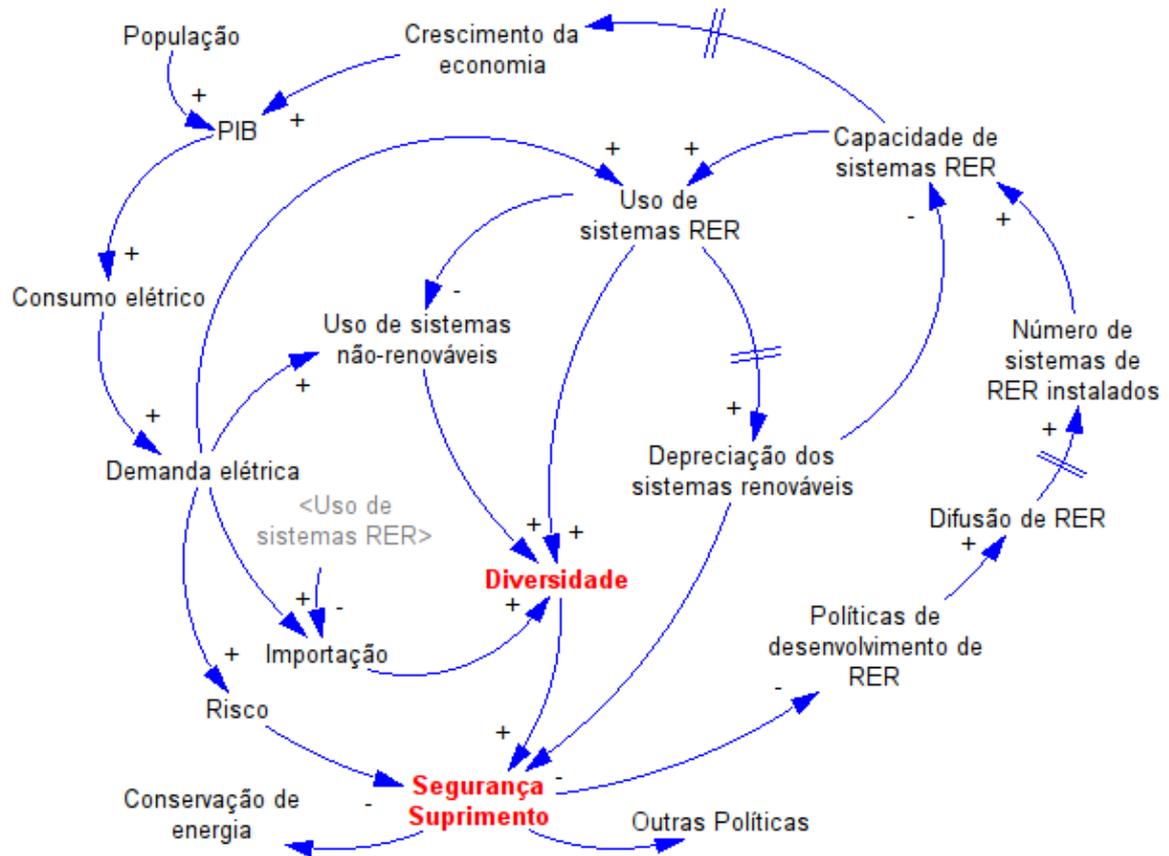
Essas políticas consistem em diferentes pacotes, incluindo investimentos diretos, auxílios fiscais e outras políticas de incentivo. Ressalta-se que investimentos governamentais ou subsídios ao setor privado para participar de programas de desenvolvimento de RER ajudam a acelerar os programas de difusão de RER (ASLANI, 2014; ASLANI; NAARANOJA; ZAKERI, 2012; KIANI; MIRZAMOHAMMADI;

HOSSEINI, 2010; MEDIAVILLA *et al.*, 2013). Portanto, os programas de difusão influenciam positivamente, de forma diferida, o número de sistemas renováveis instalados e a capacidade dos sistemas renováveis. Isso permite um maior uso dos sistemas baseados em RER para suprimento elétrico, não só aumentando a diversidade e, conseqüentemente, a segurança energética no curto prazo, como proporcionando, a longo prazo, oportunidades para criação de empresas e empregos que promovem crescimento econômico e bem-estar social. Adicionalmente, um maior uso desses sistemas reduz tanto a necessidade de suprimento proveniente de sistemas baseados em fontes não renováveis – como termelétricas (gás natural) e nucleares – quanto da importação.

Por outro lado, o próprio uso dos sistemas baseados em RER passam a causar, após determinado tempo, um efeito negativo, tanto na segurança elétrica quanto na capacidade produtiva desses sistemas. Entretanto, alguns anos são necessários para que os efeitos causados pela depreciação sejam notáveis. (KELLOGG *et al.*, 1998; ZHAO *et al.*, 2015).

As relações acima descritas podem ser visualizadas na Figura 10, que representa o diagrama de causa e efeito do papel da energia renovável para a SSE no Brasil.

Figura 10 - Diagrama de causa e efeito do papel da energia renovável para a SSE no Brasil



Fonte: Elaborado pelo autor.

O diagrama de causa e efeito permite uma melhor visualização e compreensão da situação a ser estudada (STERMAN, 2000; MORECROFT, 2015). Por meio dessas relações, é possível determinar quais variáveis serão inseridas no modelo a ser simulado, de modo a se estabelecer as fronteiras do sistema estudado.

Este trabalho não considera em detalhes as relações de influência entre as variáveis de aspecto econômico (crescimento da economia, PIB e população) com o consumo elétrico e a capacidade dos sistemas de RER. Dessa forma, o modelo proposto faz uma simplificação dessas relações, destacando como tópico para futuras pesquisas um maior detalhamento dos impactos econômicos sobre a segurança de suprimento elétrico brasileiro e vice-versa. A simplificação realizada para essas relações será descrita na próxima subseção.

5.1.2. Diagrama de Estoque e Fluxo

A partir das relações descritas anteriormente, foi possível criar um DEF, que serviu de base para o equacionamento das variáveis e inserção dos parâmetros do sistema, conforme será descrito nos capítulos 6 e 7, respectivamente.

Este trabalho não engloba as relações de custos, de forma que nenhuma variável inserida nas fronteiras estudadas leva em consideração seu impacto financeiro. Outrossim, não se considera nesta pesquisa aspectos relativos à gestão de demanda, e os impactos que a expansão (ou retração) das capacidades produtivas ocasionam na demanda por eletricidade. Dessa forma, todo o panorama de variação de demanda é baseado em dados de projeções publicados por meio de mecanismos oficiais de órgãos do setor elétrico brasileiro.

Sendo assim, com base em Aslani, Helo e Naaranoja (2014) pode-se elaborar o DEF do papel da energia renovável para a SSE no Brasil, como pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 - DEF do papel da energia renovável para a SSE no Brasil.

(continua)

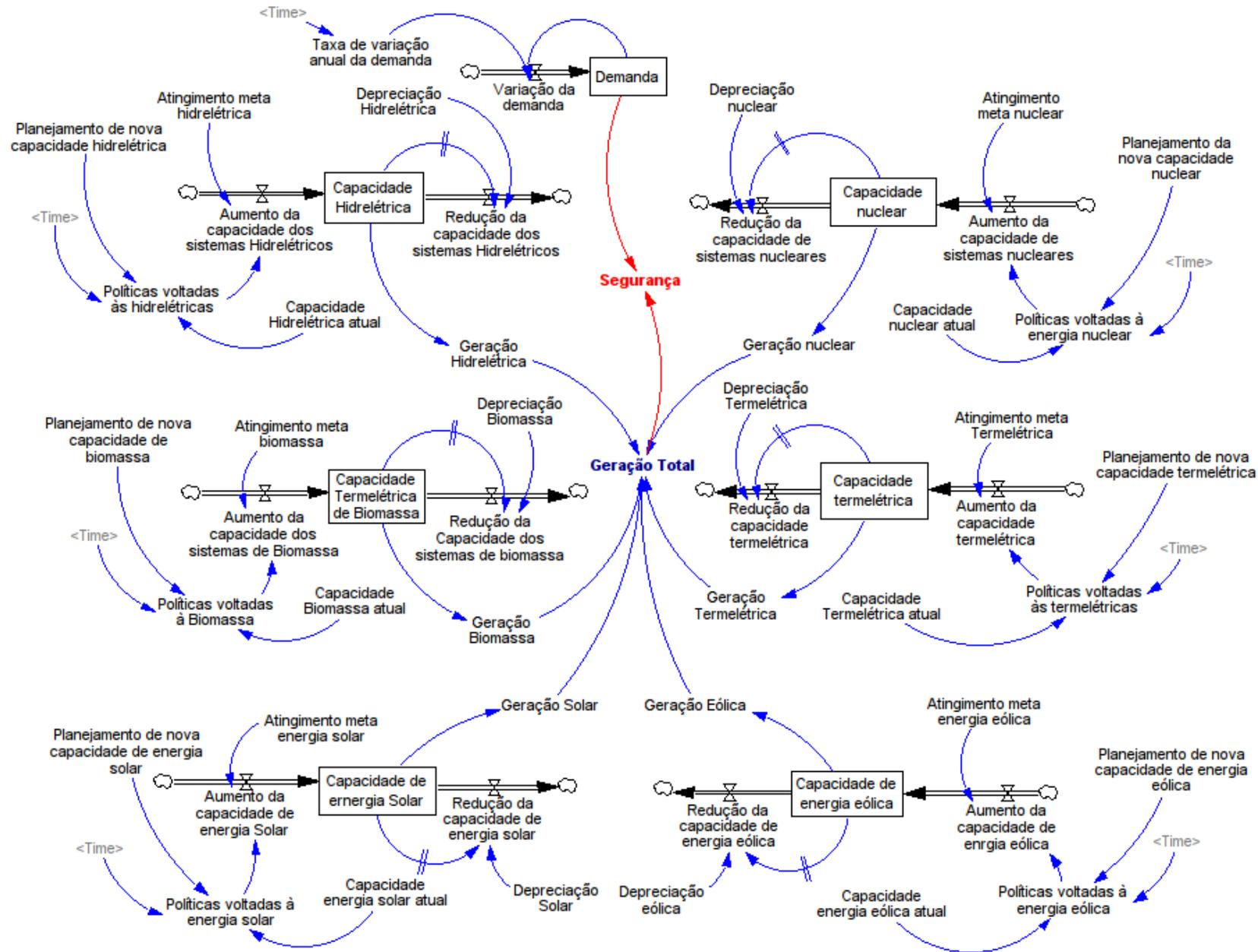
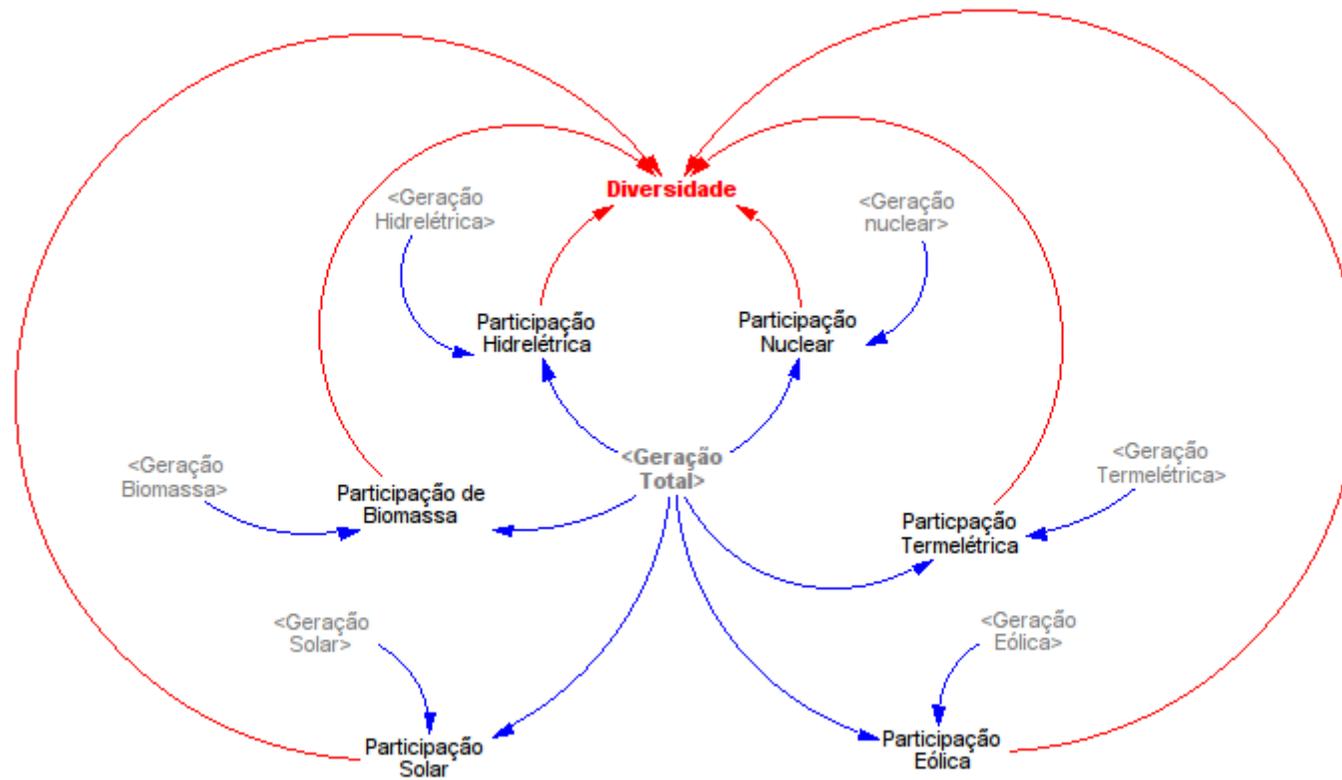


Figura 11 - DEF do papel da energia renovável para a SSE no Brasil

(conclusão).



Fonte: Elaborado pelo autor.

O estoque de Capacidade Hidrelétrica acumula a diferença entre os fluxos de entrada (Aumento de Capacidade dos sistemas Hidrelétricos) e saída (Redução de Capacidade dos sistemas Hidrelétricos), ao longo do tempo. O Aumento de Capacidade é influenciado pelas políticas voltadas à expansão da capacidade hidrelétrica e pelo próprio grau de alcance das metas estabelecidas para o período. As políticas são baseadas nessas metas (Planejamento de Nova Capacidade Hidrelétrica) e na capacidade atual. Já a redução de capacidade está relacionada ao grau de depreciação dos sistemas ao longo do tempo.

As relações para as outras fontes seguem o mesmo raciocínio. Entretanto, ressalta-se que as metas, a depreciação anual, bem como as políticas são aquelas referentes a cada fonte energética.

Pelo lado da demanda, pode-se verificar o acúmulo do consumo no decurso do tempo, que pode ser alterado por taxas de variação, positivas ou negativas, sobre a demanda anual por eletricidade. Esse estoque é uma simplificação do modelo, em que não se leva em consideração os impactos diretos causados nas capacidades instaladas de cada uma das fontes de suprimento. As referidas taxas de variação de demanda encontram-se disponíveis em relatórios oficiais publicados por órgãos do setor, como o Plano Decenal de Expansão de Energia (EPE, 2017b).

A segurança energética é mensurada por meio de uma avaliação de aspectos internos ao sistema, relacionados à sua capacidade, bem como de aspectos externos que influenciam a demanda por eletricidade. Logo, este indicador é influenciado tanto pela demanda anual por eletricidade, quanto pela geração total. Já a diversidade é influenciada pelo grau de participação de cada fonte na matriz de fornecimento nacional. O equacionamento dessas relações será descrito na seção a seguir.

Por meio do DEF, podem-se inserir as equações para identificação do comportamento das variáveis no decurso temporal

5.2. EQUACIONAMENTO DAS VARIÁVEIS DO MODELO

Os estoques integram seus fluxos de entrada e saída ao longo do tempo. O estoque de *Demanda* acumula essa variação no decurso do tempo, somado à demanda atual (*Demanda₀*), como mostrado na Equação 8.

$$Demanda = \int_{t_0}^t (VDem) dt + Demanda_0 \quad (8)$$

A variação dessa demanda pode ser calculado pelo produto de uma taxa anual de variação (TV_{Dem}) pela variação líquida da demanda em cada passo de tempo. A variação líquida pode ser obtida por meio da diferença entre o acumulado da demanda até o ano corrente e o resultado acumulado até o ano anterior. Por meio de uma função de atraso de primeira ordem (*Delay1*), pode-se obter dados passados de determinada variável. Dessa forma, é possível equacionar a variável de variação de demanda (*Vdem*) conforme descrito pela Equação 9.

$$VDem = TV_{dem} * (Demanda - DELAY 1(Demanda, 1)) \quad (9)$$

O estoque de Capacidade Hidrelétrica (*CapH*) pode ser representado, pela Equação 10, onde *CapH* integra a diferença entre os fluxos de entrada e saída, ou seja, o aumento anual da capacidade dos sistemas hidrelétricos (AC_H) e a redução anual dessa mesma capacidade (RC_H), causada principalmente pela depreciação. A essa diferença, soma-se a capacidade hidrelétrica atual (*CapH₀*).

$$CapH = \int_{t_0}^t (AC_H - RC_H) dt + CapH_0 \quad (10)$$

O AC_H é baseado nas políticas voltadas à energia hidrelétrica (PV_H) e no percentual estimado de alcance das metas (AM_H) estabelecidas para essas políticas. Tanto a PV_H quanto o AM_H são variáveis auxiliares, podendo ser calculadas ou estimadas.

O valor de AC_H é calculado pela multiplicação do AM_H pela variação líquida acarretada pela PV_H . Semelhantemente ao caso da demanda, a variação líquida

pode ser obtida pela diferença entre o resultado acumulado da política até o ano corrente e o resultado acumulado até o ano anterior. Utiliza-se, portanto, a função de *Delay1* para a realização desse cálculo, conforme mostrado na Equação 11.

$$AC_H = AM_H (PV_H - DELAY1(PV_H, 1)) \quad (11)$$

Para AM_H atribuem-se valores entre 0 e 1, sendo que tais extremos significam os percentuais estimados de alcance da meta estabelecida para o aumento da capacidade hidrelétrica no período estudado. Quando se atribui zero, significa uma estagnação do aumento de capacidade, ou seja, no período de simulação não há mudança na capacidade instalada e a meta não é atingida. Quando atribui-se 1 significa que a meta é totalmente atingida no período de simulação.

As PV_H podem ser representadas por uma curva sigmoidal (Equação 6), equacionada por uma função de tangente hiperbólica, como representado Equação 12.

$$PV_H = a_H * \tanh(b_H * (ano - 2017) + c_H) + d_H \quad (12)$$

Em que os itens a_H e d_H são determinados a partir da $CapH_0$ e do PNC_H , como demonstrado a seguir:

$$d_H = \frac{(PNC_H + CapH_0)}{2} \quad \text{e} \quad a_H = PNC_H - d_H$$

Já os itens b_H e c_H podem ser calculados de maneira iterativa, de modo que, estimando-se um valor para b_H , pode-se calcular c_H . Os mecanismos para estimação e obtenção desses valores serão melhores explicitados na próxima seção. O item *ano* é representado pela variável “<time>” no modelo, e remete ao ano, a partir do atual (2017), para o qual se pretende simular o modelo.

Dessa forma, podem-se substituir os itens a_H e d_H , gerando a equação completa das PV_H , como pode ser visto na Equação 13.

$$PV_H = \frac{((PNC_H - CapH_0) * \tanh(b_H * (ano - 2017) + c_H) + (PNC_H + CapH_0))}{2} \quad (13)$$

A redução da capacidade dos sistemas hidrelétricos (RC_H) depende diretamente do AC_H , pois reflete a depreciação do montante adicionado no ano anterior. Dessa forma há um atraso a ser considerado no equacionamento desse fluxo, que deve ser multiplicado pela taxa de depreciação anual de cada tipo de instalação, como representado na Equação 14.

$$RC_H = DELAY1(AC_H, 1) * Dep_H \quad (14)$$

A RC_H é calculada pela multiplicação do percentual de depreciação anual da capacidade instalada hidrelétrica (Dep_H) pelo aumento de capacidade realizado no ano anterior ($DELAY1(AC_H, 1)$).

A geração hidrelétrica anual (G_H) é calculada pela multiplicação da capacidade instalada pelo tempo médio anual de operação (\bar{t}_H), como pode ser visto na Equação 15.

$$G_H = CapH * \bar{t}_H \quad (15)$$

O equacionamento para as demais fontes é feito de forma análoga e pode ser observado no Apêndice A. A geração total (G_{tot}) é calculada pelo somatório da geração de todas as fontes (Equação 16). Por meio da G_{tot} é possível calcular, tanto a *Segurança* quanto a *Diversidade* (DES), sendo essas as duas variáveis de interesse do modelo proposto.

$$G_{tot} = G_H + G_B + G_S + G_E + G_T + G_N \quad (16)$$

A diversidade é calculada com base na Equação 5 (Seção 2.2). As participações de cada fonte são calculadas pela razão entre a geração anual de cada uma e a

geração total. A Equação 17, demonstra o cálculo da participação hidrelétrica na geração total anual.

$$P_H = \frac{G_H}{G_{tot}} \quad (17)$$

De modo análogo, pode-se calcular as participações de cada uma das outras fontes e, com isso, calcular-se a diversidade da matriz, como mostrado na Equação 18.

$$DES = \frac{[(P_H * \ln(P_H)) + (P_B * \ln(P_B)) + \dots + (P_N * \ln(P_N))]}{[\ln(6)]} \quad (18)$$

A *Segurança* é calculada pela razão entre G_{tot} e *Demanda* (Equação 19). Valores superiores a 1 remetem a superávit de oferta em relação à demanda, logo maior segurança. Resultados inferiores a 1 indicam déficit de oferta, o que caracteriza uma insegurança elétrica.

$$Segurança = \frac{G_{tot}}{Demanda} \quad (19)$$

As variáveis de interesse do modelo, *DES* e *Segurança*, são impactadas, direta ou indiretamente, pelo comportamento da implementação das políticas voltadas à expansão da capacidade de cada uma das fontes da matriz elétrica. Por sua vez, a implementação dessas políticas é influenciada pelo decurso temporal, sendo o tempo (*ano*) a única variável independente presente no modelo proposto.

Como o comportamento da implementação das políticas é matematicamente conhecido (curva sigmoideal) e pretende-se avaliar tais implementações de maneira desagregada, sem mensurar o impacto entre essas variáveis, pode-se concluir que o modelo pode ser, também, resolvido algebricamente.

5.3. PARÂMETROS DO MODELO

Desde 2007, a EPE publica anualmente o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) visando orientar as ações e decisões do setor, baseando-se em projeções de crescimento econômico do país e seus reflexos nos requisitos de energia e da necessária expansão da oferta (EPE, 2007) A publicação do primeiro PDE se deu no mesmo período de publicação da Matriz Energética Nacional 2030 e o Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030), no âmbito do Novo Modelo Institucional do Setor Elétrico (EPE, 2007).

Este trabalho utilizou dos dados constantes nos PDE's publicados de 2007 a 2017, acumulando uma década de estudos e projeções oficiais. Isso possibilitou observar as projeções de longo prazo, realizadas em 2007, e o que foi efetivamente implementado durante esse período. A comparação desses dados permitiu a verificação do percentual de alcance sobre o planejado originalmente, o que forneceu uma base para projeções mais assertivas, com cenários mais realistas.

A partir do último PDE publicado (EPE, 2017b) foi possível obter, tanto as capacidades instaladas atuais ($CapH_0$, $CapB_0$ etc.), quanto a projeção de novas capacidades instaladas (PNC_H , PNC_B etc.) para o próximo decênio, como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Capacidades instaladas e projetadas por fonte - 2016 e 2026

Fonte	Cap. Instalada 2016 (MW)	Cap. Instalada Projetada 2026 (MW)
Hidráulica	96.698	110.466
Biomassa	12.881	16.936
Solar	21	9.660
Eólica	10.025	28.470
Termelétrica	20.957	23.239
Nuclear	1.990	3.395

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de EPE (2017).

A partir dos PDE's publicados de 2007 a 2017, foi possível obter os dados de capacidades instaladas ao final do ano de 2006 (ou início do ano de 2007) e o que

estaria planejado para o final de 2015 (ou início de 2016). Esses dados foram utilizados para equacionamento das curvas sigmoidais relativas às políticas voltadas a cada tipo de fonte energética. Dessa forma, por meio dos registros de expansão de capacidade realizada no período entre 2006 e 2015, foi possível estabelecer uma equação para cada fonte, baseando-se na Equação 13, e que se aproximasse o máximo possível da realidade.

Os valores de b e c puderam ser calculados por meio de programação não-linear. As expressões de modelagem, na forma padrão, para obtenção desses valores, para o caso da energia hidrelétrica, podem ser descritas conforme a Equação 20.

(20)

$$\text{Min } Z_H = \sum_{i=0}^n \left\{ \left| \frac{[(CapH_N - CapH_0) * \tanh(b_H * (ano_i - 2006) + c_H) + (CapH_N + CapH_0)]}{2} \right| - CapH_i \right\}$$

Onde ano_i varia de 2006 a 2015, $CapH_0$ e $CapH_N$ remetem, respectivamente, às capacidades instaladas nos anos de 2006 (76.869 MW) e 2016 (91.650 MW). O item $CapH_i$ representa as capacidades instaladas em cada um dos anos compreendidos na análise (2006 a 2016), e estão exposto na Tabela 2. Já b_H e c_H são variáveis de decisão. Essa expressão minimiza a diferença existente entre os valores reais e uma projeção de uma política (Equação 13).

Tabela 2 - Capacidade Instalada Hidrelétrica (real) - 2007 a 2016

Ano	Cap. Instalada (MW)
2007	76.869
2008	77.545
2009	78.610
2010	80.703
2011	82.459
2012	84.293
2013	86.018
2014	89.193
2015	91.650
2016	96.924

Fonte: Elaborado pelo autor com base em EPE (2016)

A resolução dessa expressão pôde ser realizada por meio da ferramenta *Solver*, do software LibreOffice Calc, resultando nos seguintes valores para b_H e c_H :

$$b_H = 0,268487 \quad \text{e} \quad c_H = -1,901107$$

As expressões de modelagem, na forma padrão, para obtenção dos valores de b e c , para os casos de energia de biomassa, solar, eólica, termelétrica e nuclear, seguem a mesma lógica. Desta forma, a resolução das mesmas resultaram nos valores para b e c expostos na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores de b e c para as políticas energéticas

Fonte	b	c
Biomassa	0,333786	-1,796445
Solar	0,926252	-6,951869
Eólica	0,614498	-4,966753
Termelétrica	0,368237	-1,944986
Nuclear	1,394270	-9,062870

Fonte: Elaborado pelo autor.

Às variáveis de depreciação anual para cada fonte (Dep_H , Dep_B , etc.) podem ser atribuídos, segundo a ANEEL (1999, 2002, 2008), Carvalho (2008), e Aslani, Helo e Naaranoja (2014), os seguintes valores (Tabela 4):

Tabela 4 - Vida útil e depreciação por fonte.

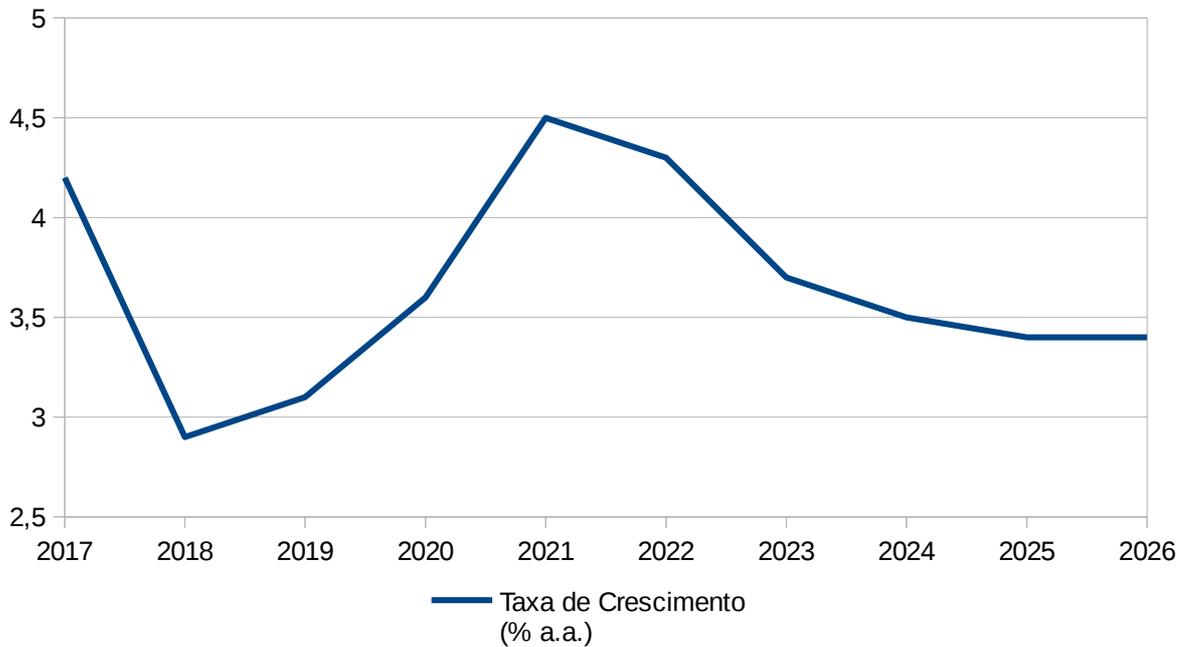
Suprimento	Vida útil (anos)	Depreciação anual (%)	Fonte
Hidrelétrica	30	3,3	Carvalho (2008), ANEEL (1999, 2002)
Biomassa	30	3,3	
Solar	20	5,0	Aslani, Helo e Naaranoja (2014)
Eólica	25	4,0	
Termelétrica	30	3,3	ANEEL (2002)
Nuclear	30	3,3	ANEEL (2008)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação à demanda, segundo a EPE (2016, 2017), o Brasil apresentou, em 2016, uma demanda elétrica total no valor de 412 TWh. Para o próximo decênio, segundo

um cenário de referência, a demanda possui uma perspectiva de crescimento anual de 3,4%. O Gráfico 1 apresenta os dados de projeção de crescimento ano a ano, de acordo com a EPE (2017), para um cenário de referência.

Gráfico 1 - Projeção de crescimento anual da demanda elétrica brasileira - 2017 a 2026



Ano	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Taxa de Crescimento (% a.a.)	4,2	2,9	3,1	3,6	4,5	4,3	3,7	3,5	3,4	3,4

Fonte: Adaptado de EPE (2017).

Dessa forma, todas as variáveis podem ser calculadas para o modelo. Entretanto, há ainda a necessidade do teste do mesmo, descrita na próxima seção.

5.4. TESTE DO MODELO

Como descrito no item 4.2 deste trabalho, o modelo deve ser submetido a, pelo menos, quatro testes: Consistência Dimensional, Condições Extremas Erro de Integração e Reprodução Comportamental.

O primeiro dos testes consiste na verificação direta e sistemática de todas as equações e variáveis, no intuito de checar as unidades utilizadas e a paridade das relações entre as variáveis. Vale ressaltar que o modelo não apresentaria qualquer resultado caso as relações e suas unidades estivessem inadequadas. Esse teste pôde ser realizado por meio da ferramenta de checagem de unidades (*units check*) e checagem do modelo (*check model*), oferecidas pelo próprio software *Vensim PLE*.

O segundo teste busca levar o modelo a algumas condições extremas, como a total falta ou excesso de determinada variável. Para tanto foram escolhidas as seguintes variáveis como chave para esse teste: demanda, todas as capacidades instaladas atuais e os planejamentos de novas capacidades. O objetivo foi testar o comportamento do modelo para valores nulos ou extremamente altos.

Em primeira instância foi atribuído à variável Dem_0 o valor de zero. Observou-se um erro no cálculo da *Segurança*, uma vez que *Demanda* é o denominador da fração da qual resulta seu cálculo. Dessa forma, o modelo foi condicionado à seguinte lógica:

- a) Se o valor de *Demanda* for nulo e houver geração elétrica, o cálculo de *Segurança* deve resultar em um valor suficientemente alto, de modo a refletir um alto superávit de oferta.
- b) Se o valor de *Demanda* for nulo e também não houver geração elétrica, o cálculo de *Segurança* deve resultar em um valor igual a 1, de modo a refletir equivalência entre oferta e demanda.
- c) Em todos os outros casos, o resultado do cálculo permanece inalterado, pois reflete, por si só, a relação entre oferta e demanda.

Quando atribuídos valores nulos às variáveis de capacidades instaladas atuais, erros foram reportados em relação às variáveis de participação (P_H , P_B , etc.), pois

essas apresentam um denominador comum: a G_{tot} . Novamente, o modelo foi condicionado à lógica de:

- a) Caso G_{tot} seja nulo, os resultados das participações devem reportar um valor igual a 1. Isso significaria dizer que cada uma das participações representam 100% da matriz elétrica. Apesar de contraditório, a escolha desse resultado é explicada pelo cálculo de *Diversidade*, em que são utilizados os logaritmos naturais dos valores de participação. Dessa forma, ao atribuírem-se valores unitários ao resultado das participações de cada fonte, têm-se logaritmos naturais nulos, logo uma *Diversidade* nula.
- b) Em todos os outros casos, o cálculo permanece inalterado.

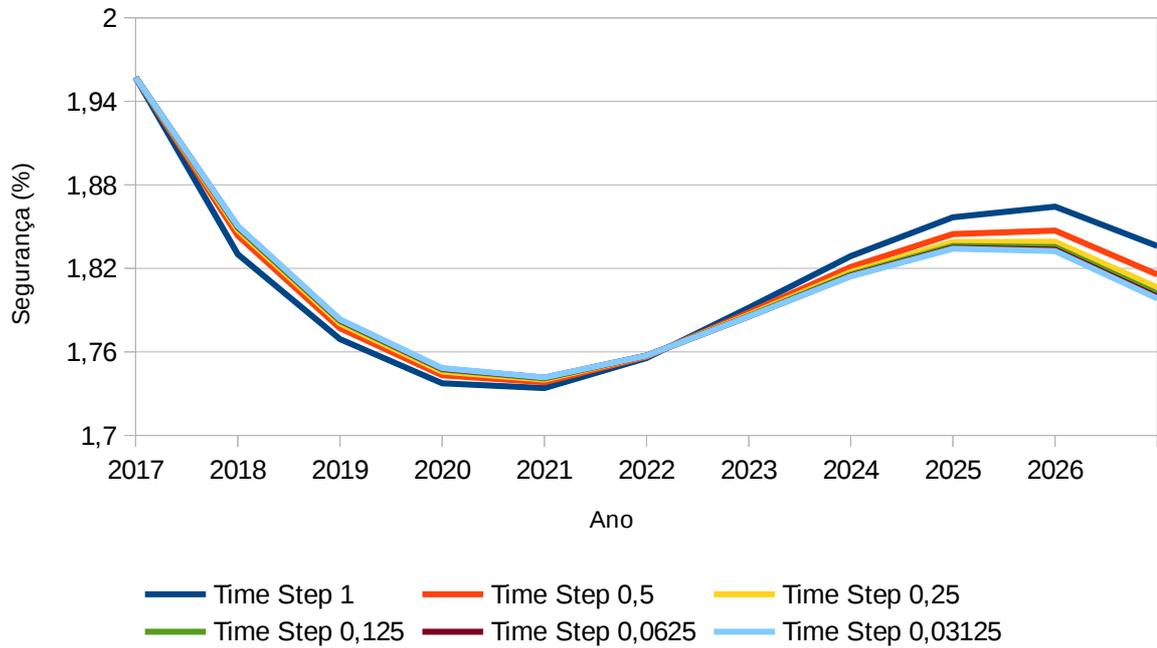
O terceiro teste consiste em verificar a sensibilidade dos resultados quando da variação dos intervalos de tempo de simulação (*time step*). Essa variação pode ser feita ao dividir sistematicamente o *time step* por dois. A Tabela 5 apresenta, como ilustração, os valores de saída da variável *Segurança* para o ano de 2027.

Tabela 5 - Valores de Segurança em 2017 para diferentes intervalos de tempo

Ano	Time Step (anos)	Segurança (%)
2027	1	1,79842
	0,5	1,79953
	0,25	1,80177
	0,125	1,80632
	0,0625	1,8157
	0,03125	1,83603

Fonte: Elaborado pelo autor

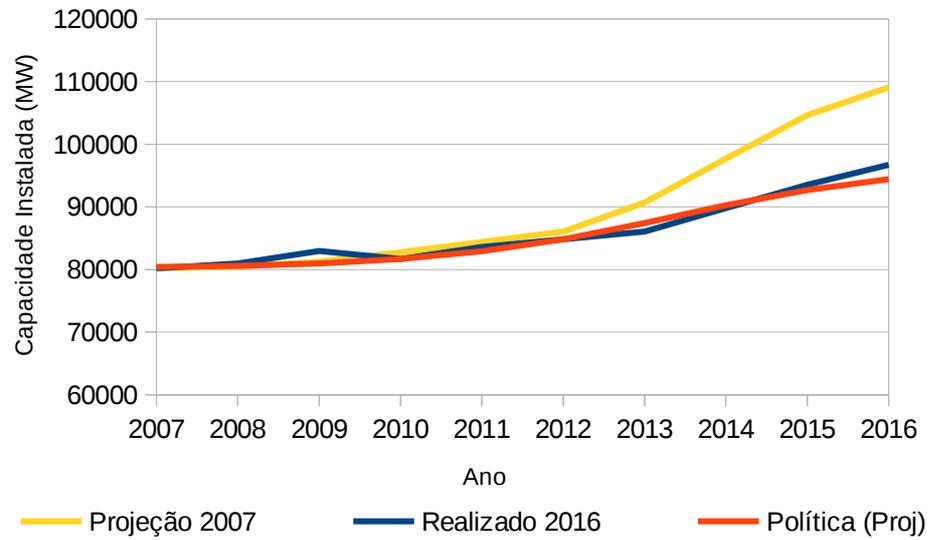
Apesar de apresentarem resultados distintos, o comportamento da variável se altera pouco, independentemente do intervalo de tempo, como pode ser visto no Gráfico 2. Dessa forma, segundo Stermán (2000), quando não há divergências significativas para distintos passos de tempo, sugere-se a simulação sob um *time step* de 0,25, sendo esse a utilizada neste trabalho.

Gráfico 2 - Comportamento da Segurança Elétrica entre 2017 e 2026 para diferentes *time steps*

Fonte: Elaborado pelo autor

O quarto teste consiste em verificar a aderência de comportamento do modelo quando inseridos dados do passado. Como as equações de políticas (PV_H , PV_B etc.) foram baseadas em dados de capacidade instalada entre os anos de 2007 e 2016, pôde-se realizar o teste de reprodução comportamental. O Gráfico 3 mostra a similaridade entre os dados de capacidades instaladas realizadas no decênio em questão e a curva sigmoidal projetada para reprodução desse comportamento.

Gráfico 3 - Capacidade hidrelétrica instalada entre 2006 e 2016 - Projeção, Realizado e Política



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se também visualizar, por meio do mesmo gráfico, a diferença entre o projetado pela EPE, em 2007, para a mesma década e o realmente implementado. Essa diferença servirá de base para a confecção dos cenários trabalhados na próxima seção. Os resultados dos testes relativos a todas as outras fontes podem ser vistos no Apêndice B.

6. SIMULAÇÃO

6.1. DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS SIMULADOS

A partir do modelo testado, devidamente parametrizado e com apoio de dados passados, podem-se estabelecer cenários analíticos para a segurança e a diversidade da matriz elétrica nacional. Escolheram-se três horizontes de análise: segundo o alcance das metas; segundo o uso das termelétricas para geração de energia elétrica, e; segundo o grau de implementação das políticas.

Quanto ao alcance das metas, foram propostos quatro cenários, conforme descrito:

- i. Estagnado: atribui-se aos alcances das metas de todas as fontes (AM_H , AM_B etc.) o valor nulo (0%), indicando que nenhuma meta proposta foi iniciada, ou seja, um cenário em que nenhum investimento é realizado e a capacidade de cada fonte de suprimento é alterada apenas pela depreciação.
- ii. Pessimista: atribui-se aos alcances das metas de todas as fontes um valor igual a 0,3 (30%), indicando, dentro do prazo de simulação, uma implementação parcial de todas as políticas estabelecidas.
- iii. Otimista: atribui-se aos alcances das metas de todas as fontes um valor igual a 1 (100%), indicando a implementação integral de todas as políticas estabelecidas dentro do prazo de simulação.
- iv. Baseado no passado: atribuem-se aos alcances das metas um valor baseado no cumprimento das projeções da década passada (Apêndice B), conforme percentuais apresentados na Tabela 6. Vale ressaltar que, para a energia solar, não há valor de alcance, já que não há dados de projeções e metas estabelecidos em 2007 para efeito comparativo. Dessa forma, considerando o nível de alcance apresentado por outras fontes renováveis, tais como a eólica e a de biomassa, em que há uma extrapolação da meta, atribui-se o valor de 100% para o alcance da meta para a fonte solar, de modo a se considerar uma total implementação do montante estabelecido para essa fonte.

Tabela 6 - Alcances por fonte (2017)

Fonte	Atingimento
Hidrelétrica	88,87%
Biomassa	358,70%
Solar*	---
Eólica	3163,75%
Termelétrica	122,20%
Nuclear	59,28%

*Atribuído valor de 100%, com base em outras fontes renováveis.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de EPE (2007, 2017b)

Quanto ao uso de termelétricas, foram estabelecidos dois outros cenários:

- i. Carbono Normal: Sem alteração da meta proposta pelo governo para o uso de termelétricas para a próxima década.
- ii. Baixo Carbono: Nesse cenário atribui-se um valor nulo ao PNC_T , refletindo uma meta de eliminação do uso das termelétricas na próxima década. Para isso, considera-se um total cumprimento dessa meta ($AM_T = 1$) e desconsidera-se os efeitos da depreciação, pois esses já estariam inclusos na meta de redução de uso das termelétricas.

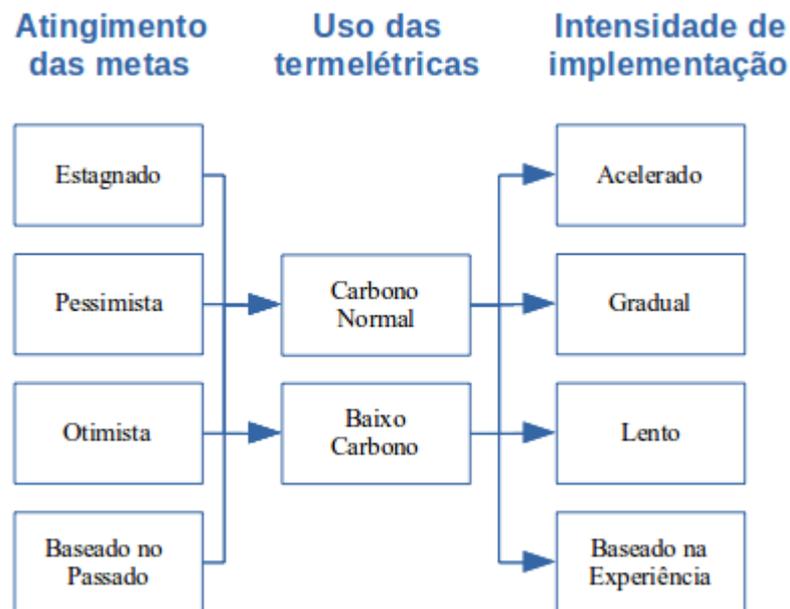
Por último, tem-se o grau de implementação das políticas. Neste horizonte apresentam-se mais quatro cenários:

- i. Acelerado: atribuem-se aos valores de b e c das equações de políticas de cada fonte (PV_H , PV_B , etc.) valores de forma que o grau de implementação das políticas predomine na primeira metade da década. Esses valores podem ser obtidos do mesmo modo pelo qual foram obtidos os anteriores (Tabela 3), por meio da ferramenta *Solver*, do LibreOffice Calc. Independentemente da fonte de suprimento, os valores de b e c encontrados, são, respectivamente, 1 e -3.
- ii. Gradual: A implementação das políticas inicia-se lenta, intensifica-se na metade da década e volta a se estabilizar no fim. Os valores de b e c para as equações de Política (Equação 13) para este cenário são, respectivamente, 1 e -5,5, independentemente da fonte.

- iii. Lento: semelhante ao cenário Acelerado, entretanto a implementação predomina na segunda metade da década. Para este cenário atribui-se 1 para b e -8 para c , em cada uma das fontes.
- iv. Baseado na experiência: a implementação das políticas repete o comportamento da década passada. Para isso, utiliza-se neste cenário os dados apresentados na Tabela 3.

Cada um dos quatro cenários de alcance das metas são categorizados segundo o horizonte de uso das termelétricas, resultando em oito cenários. Esses, por sua vez, são novamente categorizados segundo o horizonte de intensidade de implementação das políticas, resultando em 32 cenários a serem simulados, conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Cenários de simulação



Fonte: Elaborado pelo autor.

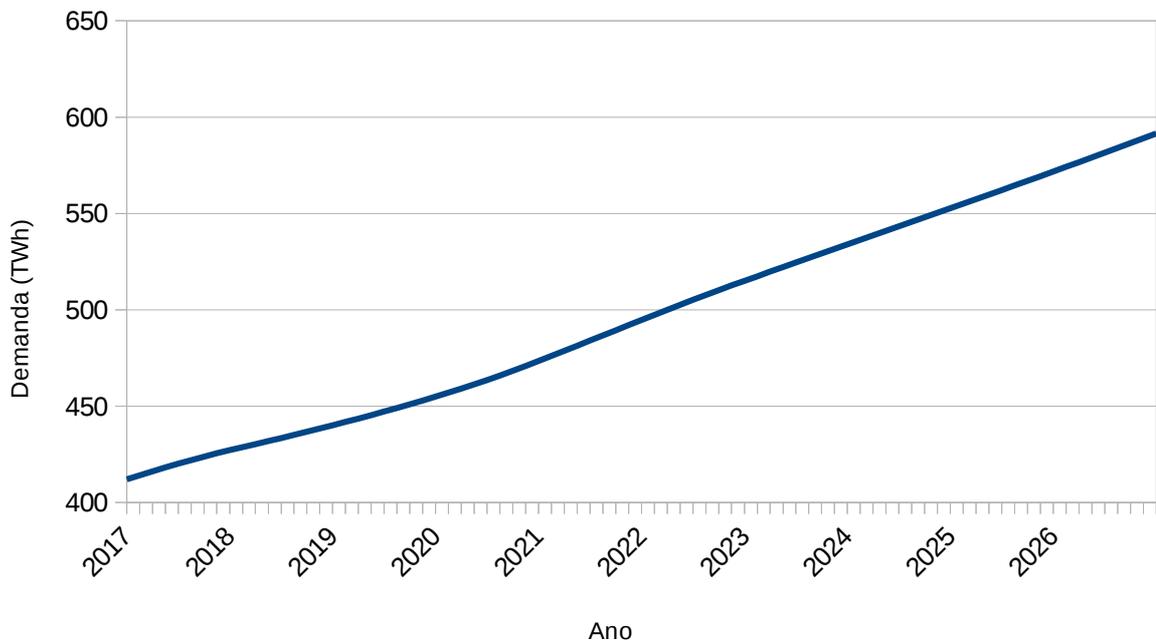
O resultado da simulação desses cenários será apresentado e discutido a seguir.

6.2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para uma melhor compreensão dos resultados das simulações, esta seção está dividida em três subseções, baseadas no horizonte analítico de alcance das metas de implementação das políticas. Os outros horizontes são apresentados e discutidos nessas subseções.

Vale ressaltar que, para todos os cenários, o comportamento da demanda se apresenta quase linearmente crescente, conforme exposto no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Demanda elétrica brasileira entre 2017 e 2026



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2.1. Cenário Estagnado

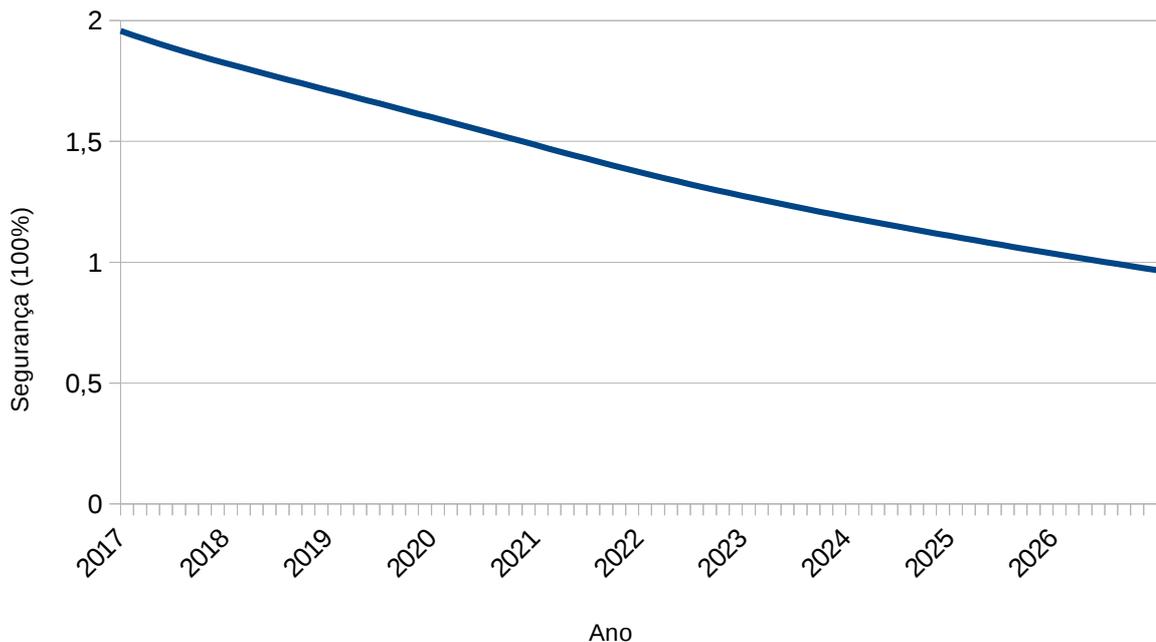
Ao se atribuir zero a todos os alcances de meta, significa dizer que não haverá nenhuma expansão da matriz elétrica nacional na próxima década, quaisquer que sejam as fontes de abastecimento. Em outras palavras, as capacidades instaladas somente se depreciariam, de forma que esses estoques somente se reduziram no decorrer dos anos.

Conforme ilustrado pela Figura 12, os cenários podem ser divididos em dois grupos. O primeiro considera um uso normal das termelétricas, admitindo as metas governamentais para tal (Carbono Normal). O segundo considera uma meta de extinção do uso das termelétricas para a próxima década (Baixo Carbono).

6.2.1.1. Carbono Normal

Todos os cenários de estagnação com uso normal das termelétricas mostram-se idênticos, posto que nesses cenários não há alteração positiva nas capacidades instaladas de nenhuma das fontes, restando apenas as alterações negativas. Os perfis de segurança e diversidade para esse cenário são mostrados no Gráfico 5 e no Gráfico 6, respectivamente.

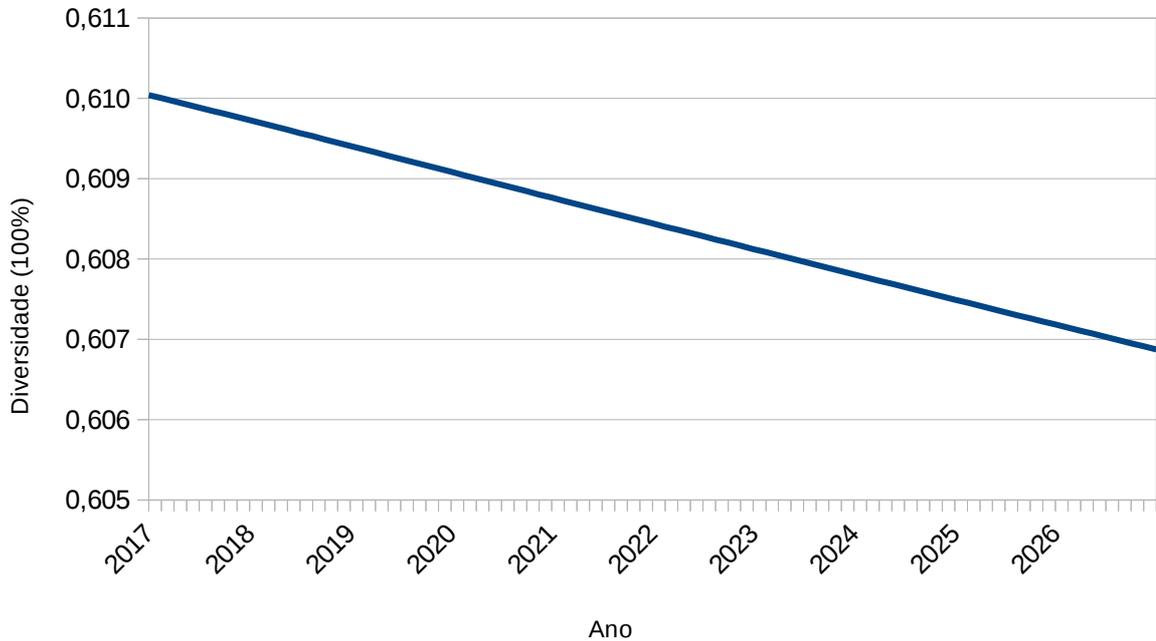
Gráfico 5 - SSE brasileiro de 2017 a 2026 (Estagnado Carbono Normal)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se verificar neste cenário que, tanto para a segurança quanto para a diversidade, há uma queda acentuada em seus níveis para a próxima década. Essa queda é motivada tanto pela crescente demanda por eletricidade (Gráfico 4), quanto pela depreciação das centrais geradoras e sua conseqüente redução das capacidades instaladas.

Gráfico 6 - Diversidade da matriz elétrica brasileira de 2017 a 2026 (Estagnado Carbono Normal)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a diversidade pode-se constatar uma queda de 0,47% (de 61,0% para 60,7% de diversidade). A segurança acompanha essa queda, apresentando, em 2026, um valor aproximado de 47% do montante relativo a 2017. Ainda assim, constata-se que, caso nenhuma iniciativa de ampliação seja tomada, o sistema deixa de se apresentar como seguro no final da década simulada, pois o índice dessa variável cruza abaixo da faixa dos 100% na segunda metade do ano de 2026.

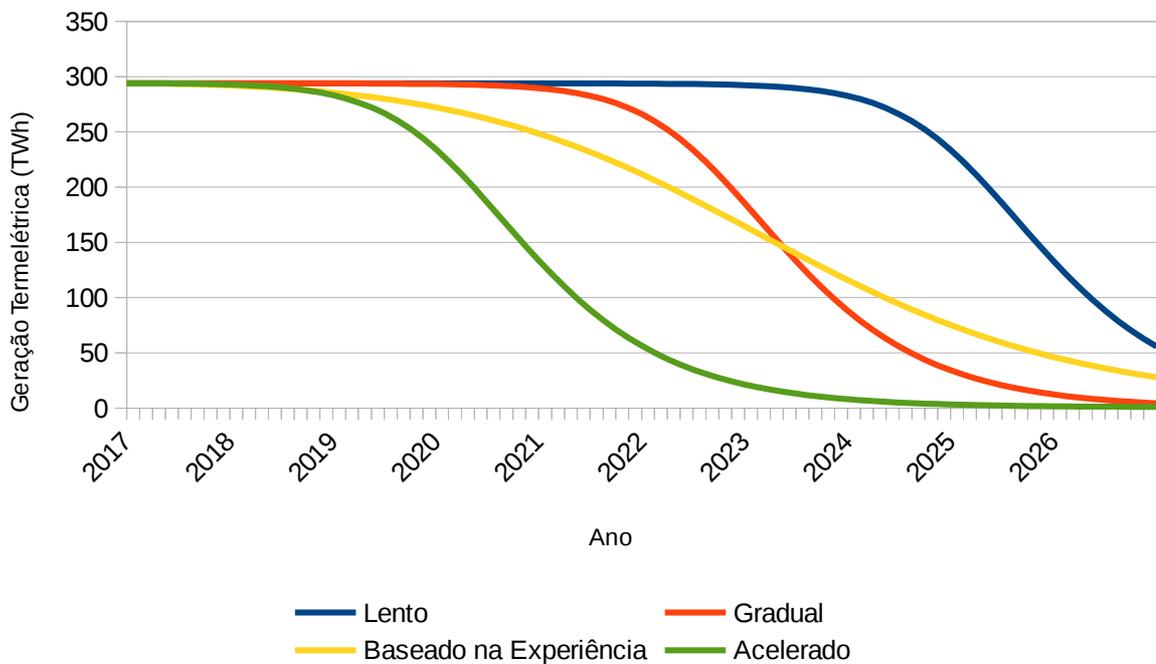
6.2.1.2. Baixo Carbono

Quando considerada uma iniciativa de redução do uso das termelétricas somada às reduções de capacidade causadas pela depreciação, podem-se apresentar quatro microcenários analíticos, relacionados à intensidade do cumprimento dessa meta de redução. Dessa forma, para todas as outras fontes, ainda considera-se uma estagnação. Excepcionalmente para as termelétricas, é considerado um cenário não somente de estagnação, mas de retração, objetivando a extinção dessa forma de produção de energia elétrica no final da década simulada.

Os quatro microcenários analíticos distinguem-se pela velocidade de implementação da meta de extinção das termelétricas: acelerado, gradual, lento e baseado na

experiência passada. Cada uma dessas intensidades influenciam, de maneira distinta, o comportamento da geração termelétrica nos anos analisados, como pode ser observado no Gráfico 7. Nota-se que, para os cenários acelerado, gradual e lento, os perfis das curvas são semelhantes, apenas deslocados no eixo das abcissas para implementações ocorridas no início, meio o fim da década, respectivamente. O perfil baseado na experiência é pautado no comportamento de implementação de políticas voltadas à geração termelétrica na década passada. Esse último cenário apresenta um comportamento semelhante ao de implementação gradual.

Gráfico 7 - Geração Termelétrica por ano - 2017 a 2026 (Estagnado Baixo Carbono)

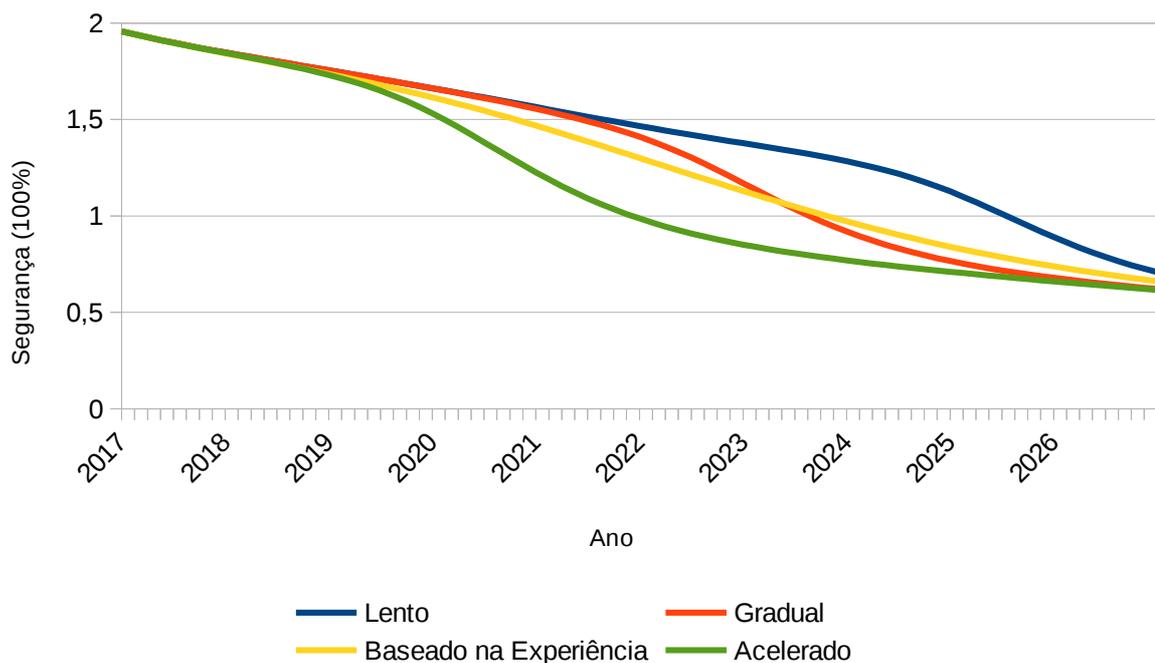


Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se perceber que, para o cenário de implementação acelerado, a maior parte da redução é realizada nos cinco primeiros anos, enquanto no cenário mais lento, tal redução ocorre a partir do sétimo ano. O cenário de implementação gradual mostra uma implementação mais densa compreendida entre o quinto e o sétimo anos, ao passo que a implementação baseada na experiência apresenta um perfil ainda mais suave, com implementação próxima a uma taxa constante durante toda o período.

Esses diferentes comportamentos influenciam, de maneira distinta, o perfil da SSE, como pode ser visualizado no Gráfico 8. Para o cenário mais acelerado, o índice de SSE se apresenta pela primeira vez abaixo da faixa dos 100% no início do ano de 2022, quase quatro anos de antecipação ao cenário mais lento (fim de 2025). Para os cenários de implementação gradual e baseada na experiência, o indicador cruza o limiar de segurança ao final do ano de 2023. Quando comparado este grupo de cenários ao anterior (Estagnado de Carbono Normal) percebe-se o grande impacto causado pela redução da geração por parte das termelétricas. Todos esses cenários apresentam deficit de geração dentro do prazo simulado, indicando a grande necessidade do uso das termelétricas para manutenção da segurança do sistema elétrico brasileiro.

Gráfico 8 - SSE brasileiro de 2017 a 2026 (Estagnado Baixo Carbono)

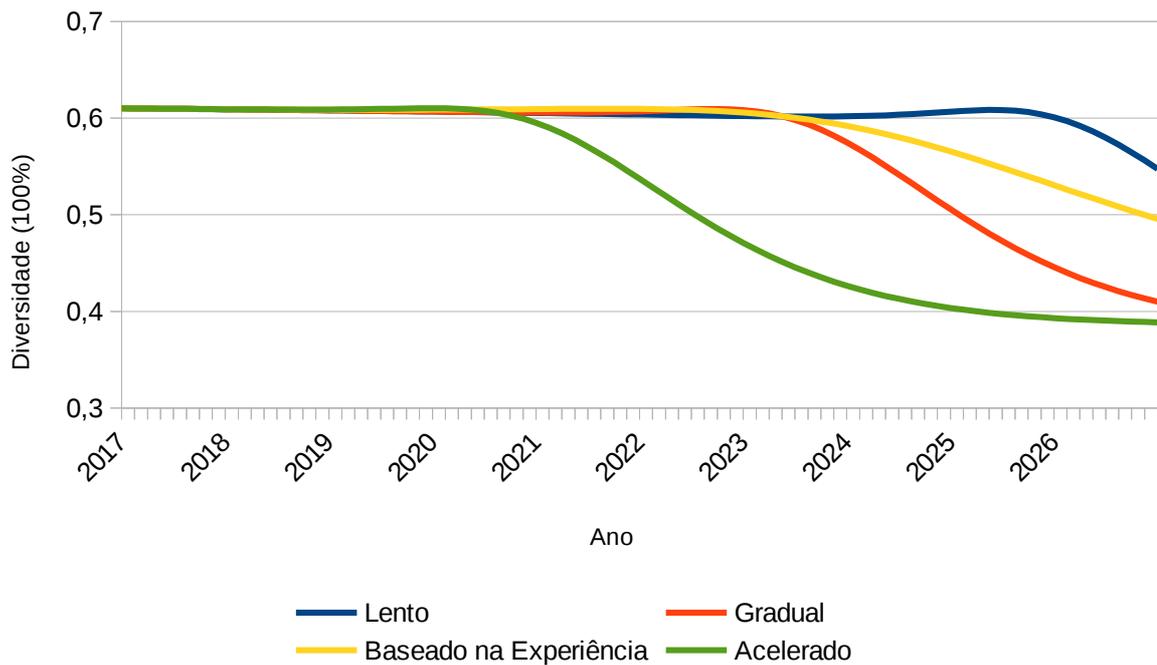


Fonte: Elaborado pelo autor.

A queda nos índices de segurança é acompanhada por uma redução da diversidade da matriz (Gráfico 9), o que eleva o risco no fornecimento elétrico no país. Nota-se que o padrão da redução da diversidade está diretamente ligado à intensidade de implementação das metas de diminuição da geração termelétrica, ou seja, quanto mais rápido se reduz o uso de termelétricas, mais rápida é a queda na diversidade do sistema. Isso se explica pelo fato das termelétricas ocuparem o segundo lugar em importância de geração elétrica, atrás apenas das centrais hidrelétricas. A

redução da participação das termelétricas na matriz implica elevação da participação hidrelétrica. Esse aumento indica que o sistema passa a depender ainda mais da geração hidráulica, ou seja, se torna menos diversificado e, por consequência, menos seguro.

Gráfico 9 - Diversidade da matriz elétrica brasileira de 2017 a 2026 (Estagnado Baixo Carbono)



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2.2. Cenário Pessimista

Para este cenário, atribui-se aos alcances das metas o valor de 30%, remetendo a uma implementação parcial da expansão planejada para a década. Os estoques, portanto, passam a integrar tanto a depreciação causada no decorrer dos anos (como no caso estagnado), quanto às contratações de novas energias devidas à implementação das políticas de cada área.

Como no caso estagnado, este cenário pode ser dividido em dois grupos. O primeiro considera um uso normal das termelétricas, admitindo as metas governamentais para tal (Carbono Normal). O segundo considera uma meta de extinção do uso das termelétricas para a próxima década (Baixo Carbono).

6.2.2.1. Carbono Normal

Neste cenário, podem ser percebidas quedas significativas nas gerações hidrelétrica (26%), termelétrica (26%) e de biomassa (21%), ocasionada pela forte depreciação dessas centrais, não totalmente suprida pelo baixo volume de expansão inicial do setor neste cenário. De maneira menos expressiva, há uma queda na geração nuclear (12%), ao passo que as centrais de geração eólicas apresentam leve crescimento (11%). O crescimento mais significativo é representado pela geração solar, partindo da faixa de 31,6 GWh de geração anual para uma escala de 3479 GWh por ano. Os perfis de geração elétrica anual por fonte podem ser vistos no Gráfico 10.

O comportamento dos cenários para a geração hidrelétrica não se distinguem de forma relevante, apresentando perfis comportamentais muito semelhantes. O mesmo se pode constatar no que tange à geração termelétrica. Para as gerações solar e eólica pode-se perceber que o perfil de implementação baseado na experiência passada se aproxima do comportamento de implementação lenta, enquanto para a geração por biomassa esse cenário se apresenta muito próximo ao comportamento da implementação gradual. Para as centrais nucleares, o cenário de experiência passada mostra-se como um cenário intermediário, entre uma implementação gradual e lenta.

Gráfico 10 - Geração elétrica por ano por fonte - 2017 a 2026 - cenário Pessimista de Carbono Normal

(Continua)

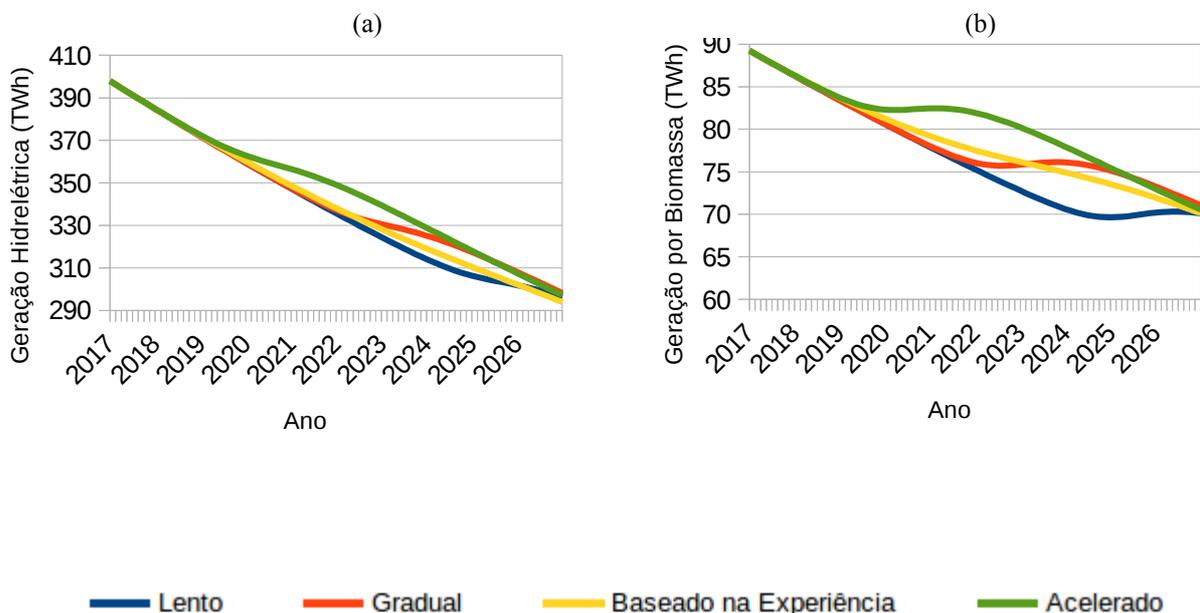
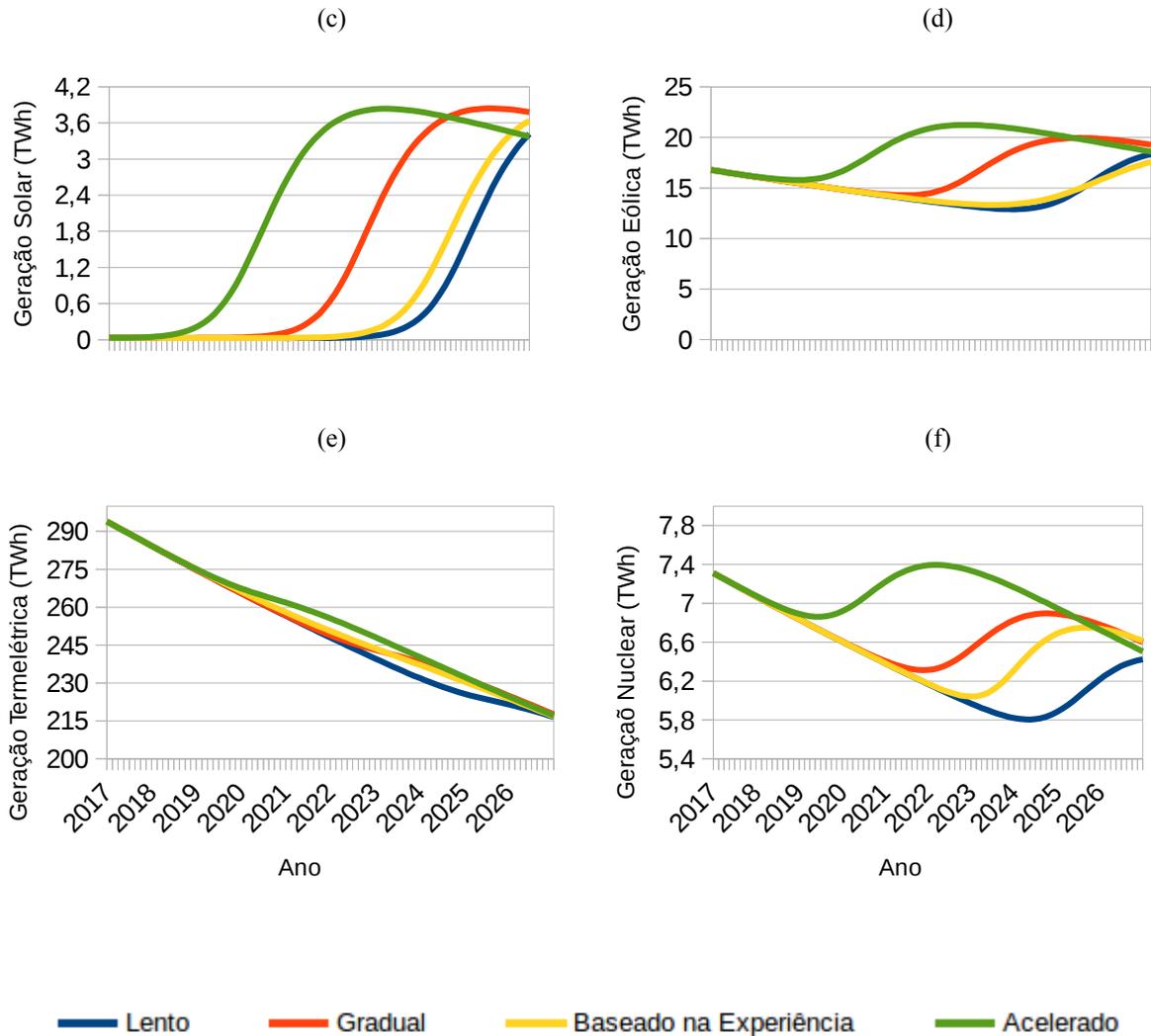


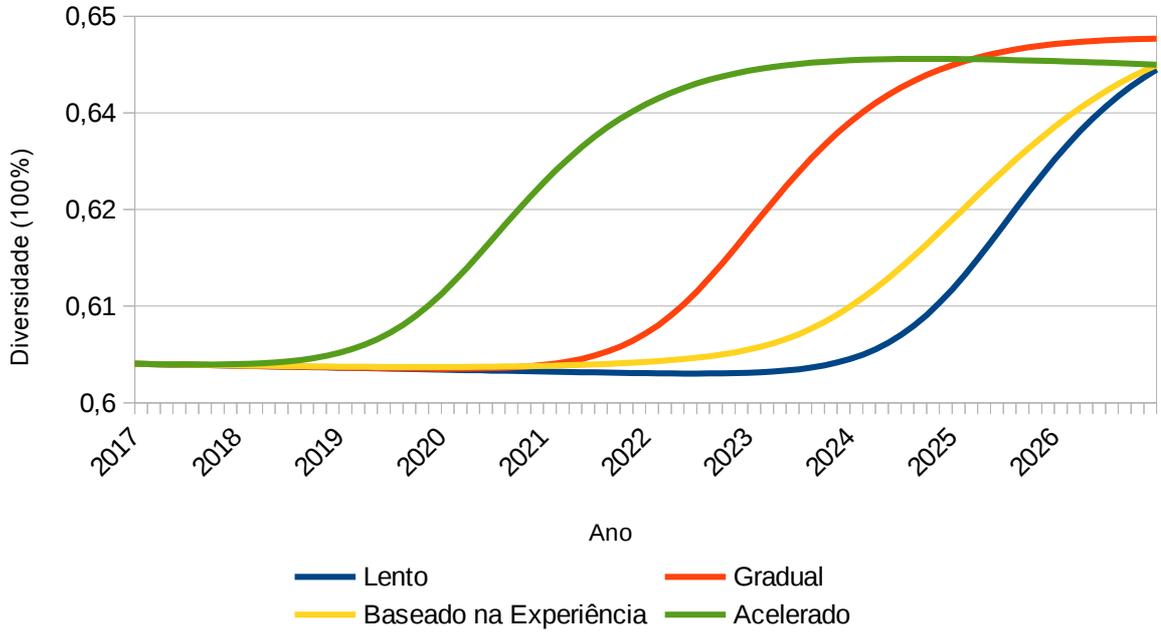
Gráfico 10 - Geração elétrica por ano por fonte - 2017 a 2026 - cenário Pessimista de Carbono Normal
(Conclusão)



Fonte: Elaborado pelo autor.

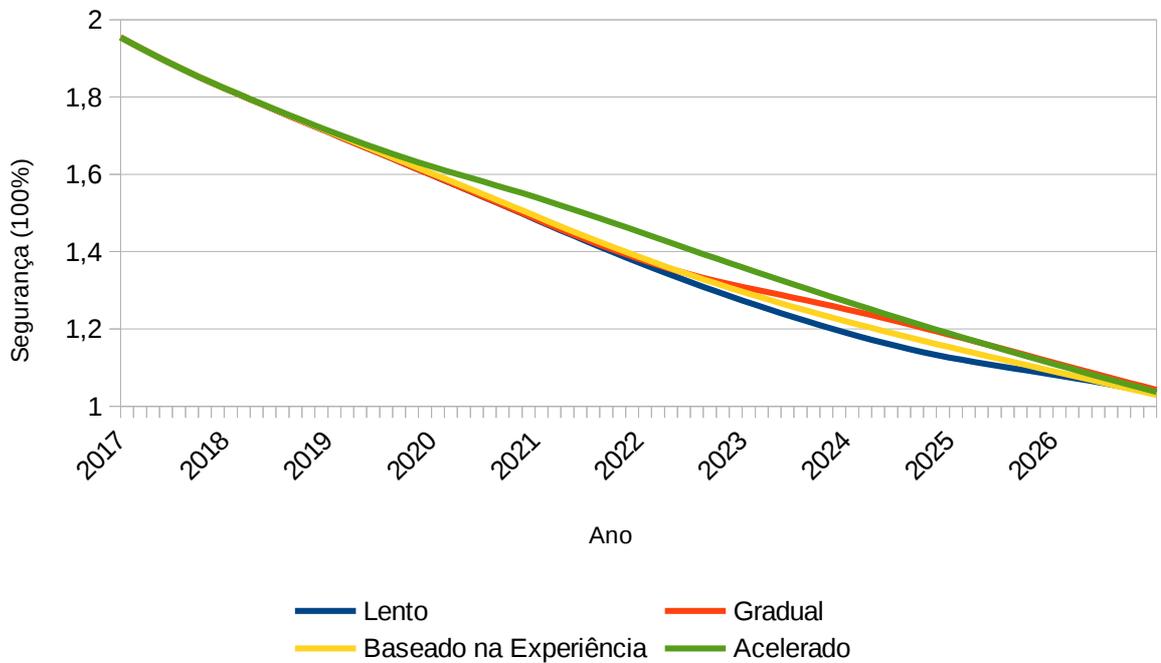
O crescimento apresentado pelas centrais eólicas e solares, aliado à queda das gerações hidráulica e térmica, apesar de provocarem elevação de 6,0% nos índices de diversidade (Gráfico 11), não se mostram suficientes para suprir as quedas apresentadas pelas outras fontes, de forma que os índices de segurança apresentam-se em perfis de retração (Gráfico 12).

Gráfico 11 - Diversidade da matriz elétrica brasileira de 2017 a 2026 (Pessimista Carbono Normal)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 12 - SSE brasileiro de 2017 a 2026 (Pessimista de Carbono Normal)



Fonte: Elaborado pelo autor.

A despeito das reduções apresentadas pelo indicador de SSE (cerca de 47%), o sistema apresenta valores excluídos à faixa de risco, demonstrando que, caso as

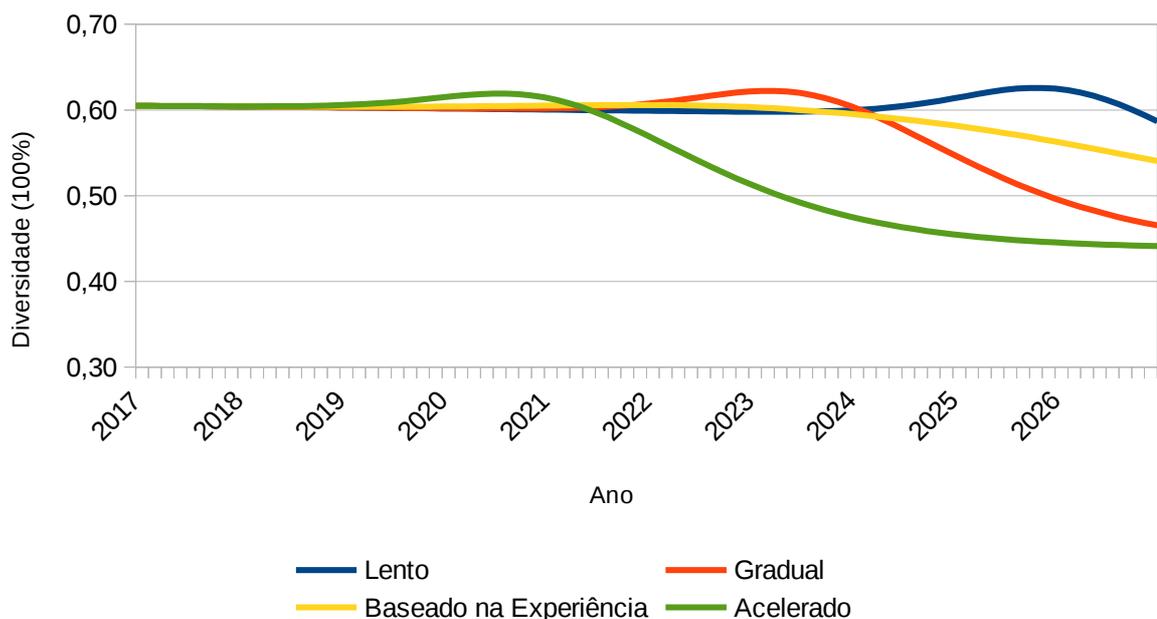
medidas de expansão sejam parcialmente cumpridas, o sistema se mostra capaz de manter superávit de oferta até o final da próxima década, mas com perspectivas de deficit para o início do ano seguinte.

6.2.2.2. Baixo Carbono

Os mesmos quatro microcenários podem ser apresentados para este grupo, entretanto sob a égide da implementação da meta de extinção do uso das termelétricas, atribuindo-se, portanto, um valor nulo ao PNC_T . Dessa forma, os perfis de geração termelétrica para a próxima década são os mesmos apresentados no Gráfico 7 enquanto os perfis de geração para todas as outras fontes são os mesmos apresentados no Gráfico 10.

Novamente, a meta de eliminação da geração termelétrica afeta drasticamente a SSE brasileira, tendo, para todos os microcenários, queda significativa em seus índices. Essa involução é acompanhada por uma redução da diversidade da matriz (Gráfico 13), Mais uma vez, é possível notar a forte e diretamente proporcional relação entre a diversidade e a intensidade de implementação das metas de diminuição da geração termelétrica, tendo, para implementações mais aceleradas, quedas mais rápidas nos índices de diversidade do sistema.

Gráfico 13 - Diversidade da matriz elétrica brasileira de 2017 a 2026 (Pessimista Baixo Carbono)

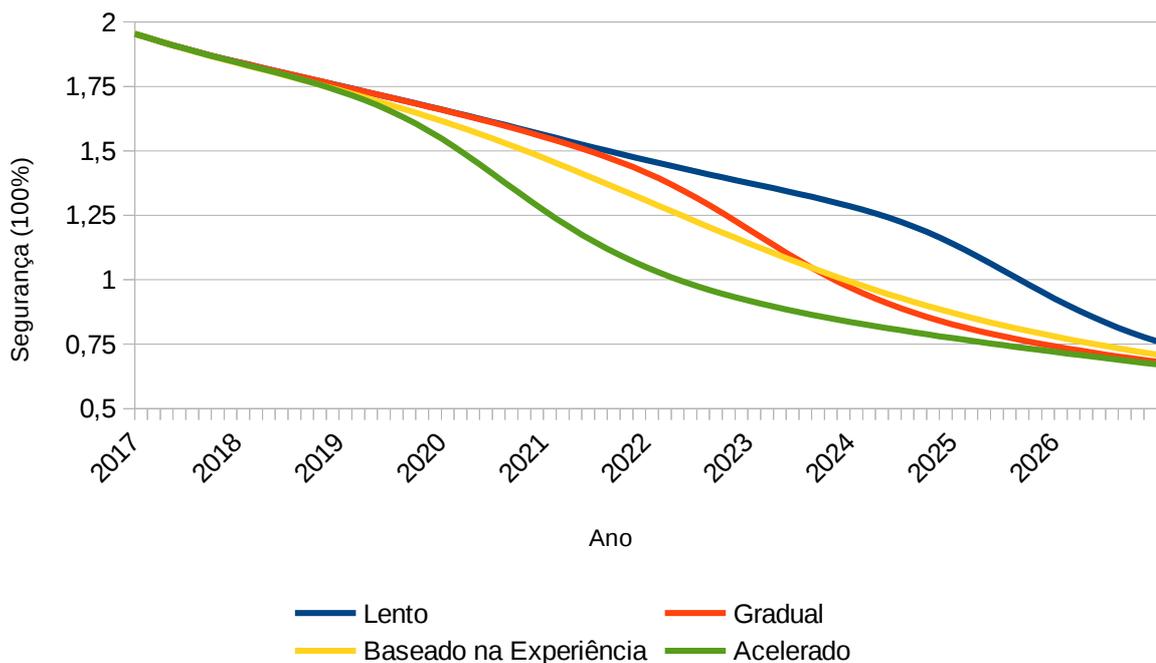


Fonte: Elaborado pelo autor.

Novamente, as reduções de SSE são reflexo do crescimento da demanda, da queda da geração (principalmente hidrelétrica, que é a principal fonte geradora no país) e das baixas contratações iniciais para expansão do sistema, que não acompanham a depreciação das centrais geradoras. Sem o apoio da geração termelétrica, as outras fontes não se mostram capazes de sustentar os padrões iniciais de SSE, o que reflete nos perfis de declínio, apresentados no Gráfico 14. Tal comportamento também é percebido nos perfis de diversidade, em que os cenários apresentam, inicialmente, taxas de crescimento, seguidas de drásticas quedas. Novamente, esse comportamento é explicado pela elevação da participação hidrelétrica na matriz, causada pela redução da participação termelétrica.

De maneira muito semelhante aos cenários de estagnação da expansão setorial de baixo carbono (Gráfico 8), este cenário apresenta rápidas quedas dos níveis de segurança à zona de risco do sistema. Entre os anos de 2022 e 2026, todos os cenários apresentam queda de SSE à faixa de risco. Apesar da implementação mais lenta para políticas de redução do uso das termelétricas sustentarem, por mais tempo, maiores índices de segurança nesse período, tal medida não é suficiente para manter o sistema em um patamar seguro até o fim da década simulada.

Gráfico 14 - SSE brasileiro de 2017 a 2026 (Pessimista de Baixo Carbono)



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2.3. Cenário Otimista

Ao atribuir-se o valor 1 a todos os alcances de meta, significa dizer que haverá integralmente a expansão planejada para a matriz elétrica nacional na próxima década, quaisquer que sejam as fontes de abastecimento. Como no grupo pessimista de cenários, os estoques integram a depreciação e as contratações de novas energias.

Como nos outros casos, divide-se este cenário em dois grupos, relacionados ao uso das termelétricas: carbono normal e baixo carbono; que serão subdivididos em mais quatro microcenários cada um, relacionados às intensidades de implementação das políticas (acelerado, gradual, lento e baseado na experiência).

6.2.3.1. Carbono normal

Quando observado o perfil de implementação baseado na experiência passada, destaca-se, por parte das gerações por biomassa (Gráfico 15b) e termelétrica (Gráfico 15e), grande semelhança com a implementação gradual. Para as gerações solar (Gráfico 15c) e eólica (Gráfico 15d), essa curva se aproxima mais da chamada implementação lenta. Já para a hidrelétrica e nuclear, a experiência passada se aproxima de um perfil intermediário, entre a implementação gradual e a lenta.

Gráfico 15 - Geração elétrica por ano por fonte – 2017 a 2026 - cenário Otimista de Carbono Normal

(Continua)

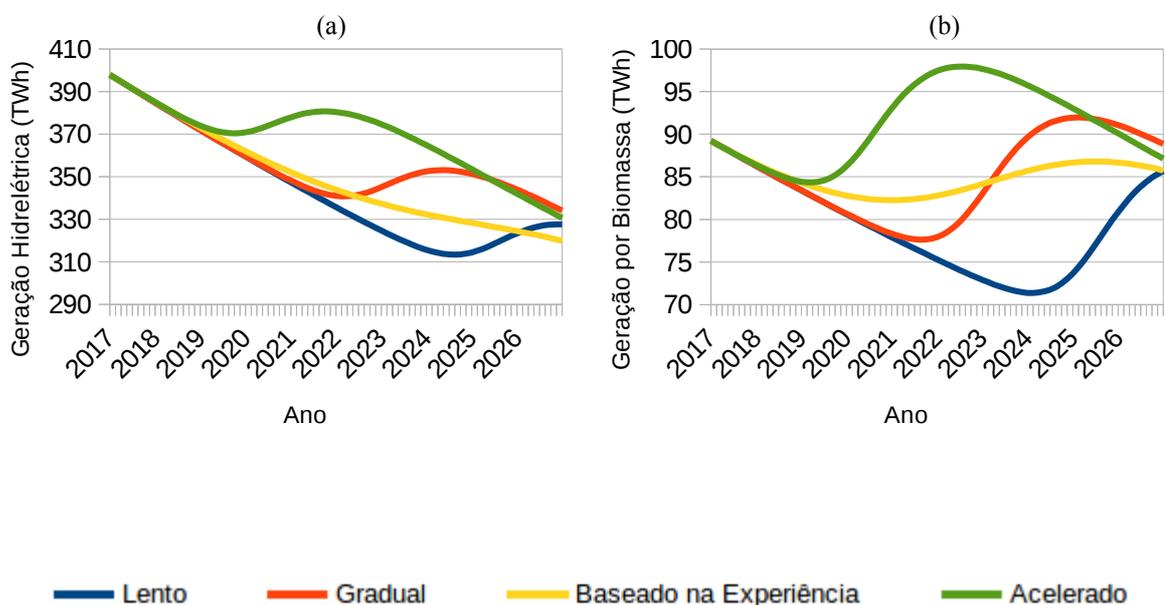
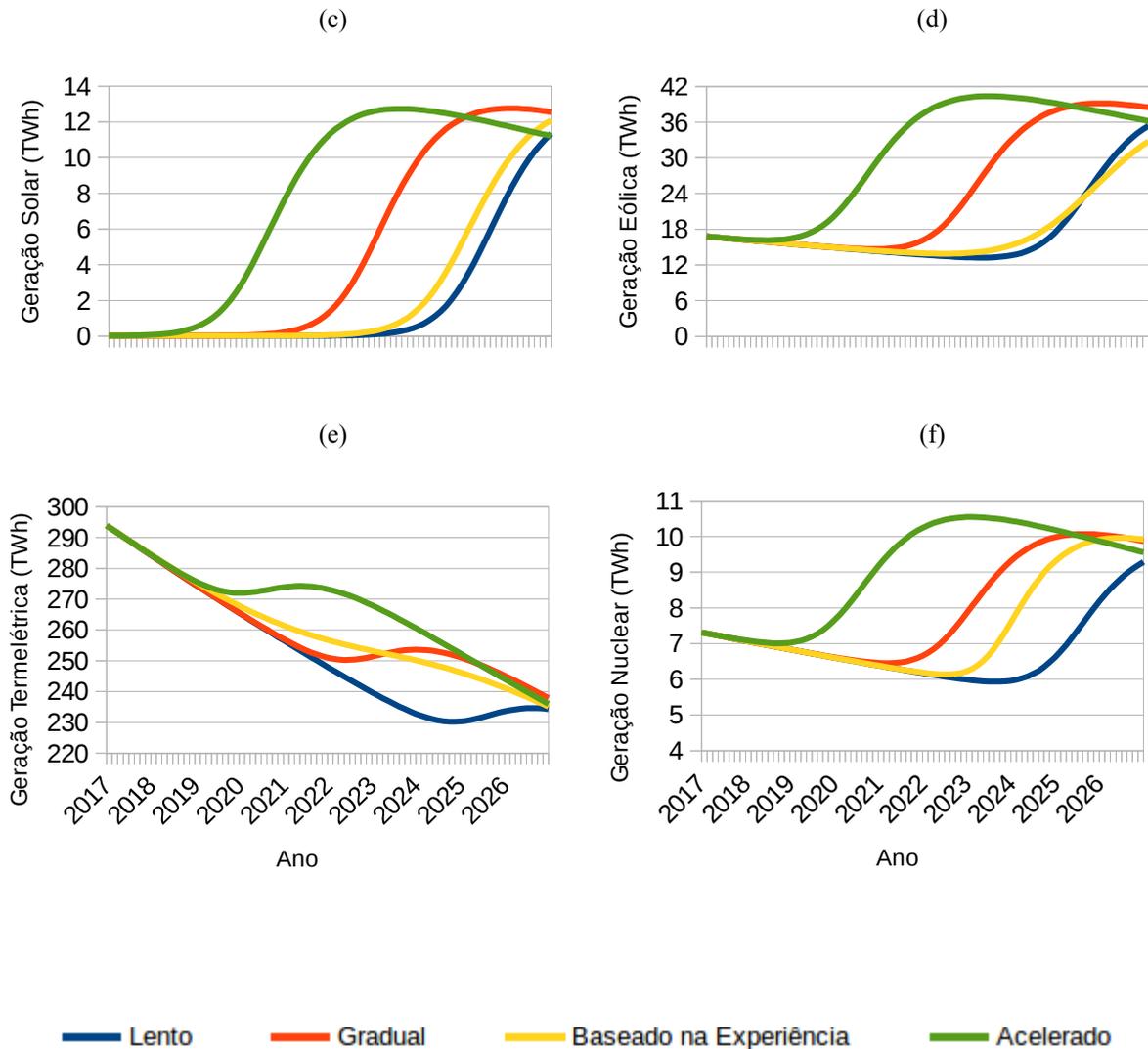


Gráfico 15 - Geração elétrica por ano por fonte – 2017 a 2026 - cenário Otimista de Carbono Normal

(Conclusão)

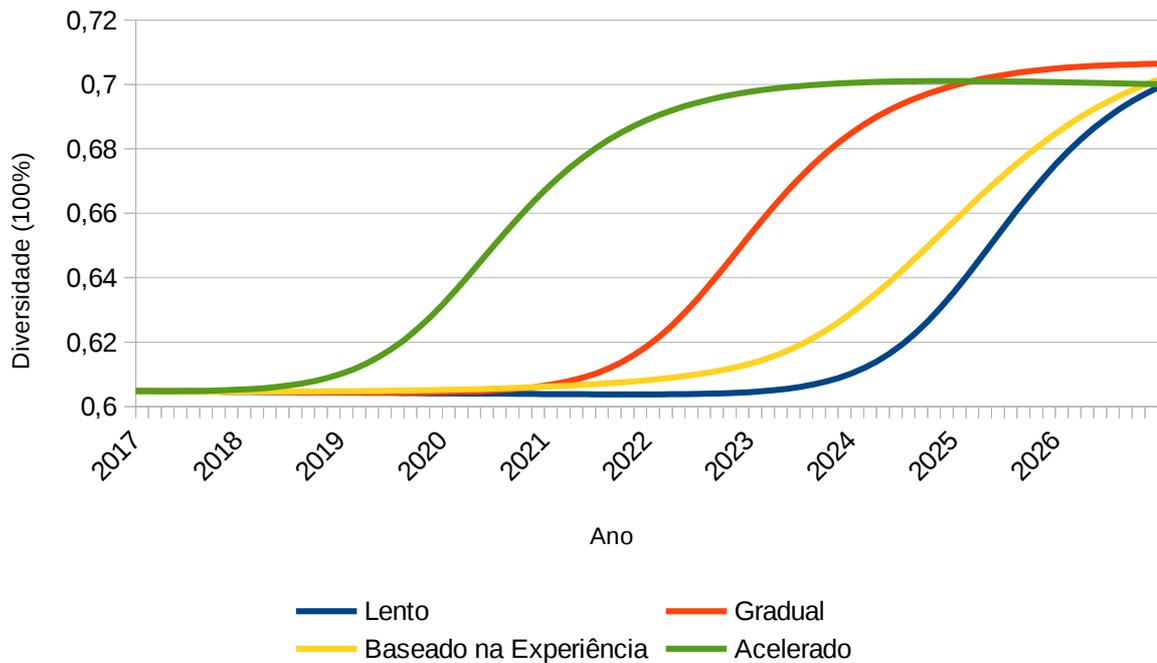


Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse mesmo comparativo pode ser realizado quanto aos índices de diversidade e segurança. Nota-se, no Gráfico 16, que, apesar de todos os cenários apresentarem níveis semelhantes de diversidade, a velocidade de alcance desse patamar está diretamente relacionada com a intensidade de implementação das políticas. Vale ressaltar que, considerando o alcance integral das metas planejadas para a próxima década, os perfis de diversidade se mostram em uma crescente de, em média, 16%,

ao final do período simulado. Isso mostra que, com a redução das gerações hidráulica e térmica, combinada às elevações das participações das modalidades de geração solar, eólica, por biomassa e nuclear, o sistema se torna mais diversificado.

Gráfico 16 - Diversidade da matriz elétrica brasileira de 2017 a 2026 (Otimista Carbono Normal)

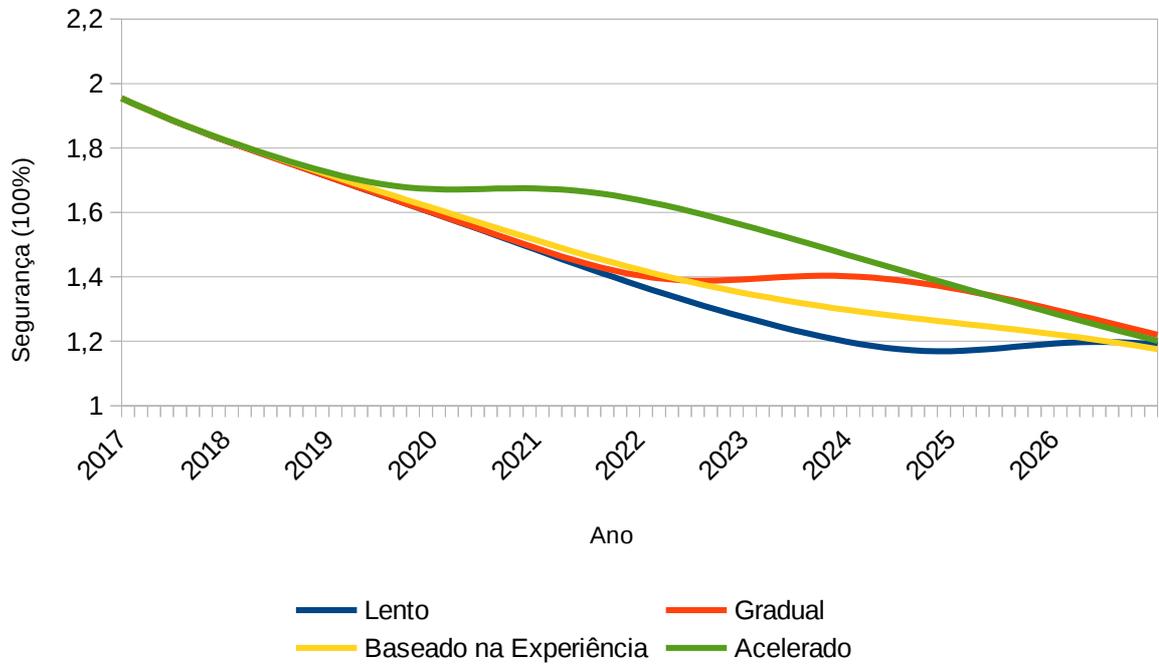


Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação aos perfis de SSE (Gráfico 17), pode-se constatar uma redução de 39% em relação aos níveis iniciais dos cenários. Apesar disso, é possível observar que uma implementação acelerada ou gradual mantêm o índice de segurança afastado do limiar, enquanto os cenários de implementação lenta e baseada na experiência passada apresentam aproximação da faixa de risco de segurança. Contudo, nenhum dos cenários considerados neste grupo apresentam deficit de oferta para o período de simulação, apontando que, mesmo havendo queda relativa quando comparado com o estado inicial, o sistema permanece seguro durante os próximos dez anos, caso as metas sejam 100% implementadas. Grande parte da queda da SSE é ocasionada por três principais motivos: i) o crescimento constante da demanda por eletricidade (Gráfico 4); ii) a queda nas capacidades instaladas das centrais hidrelétricas e termelétricas (Gráfico 15a e Gráfico 15e, respectivamente),

que representam as principais fontes de geração no país, e; o alto grau de depreciação perante os baixos níveis iniciais de expansão do setor.

Gráfico 17 - SSE brasileiro de 2017 a 2026 – cenário Otimista de Carbono Normal



Fonte: Elaborado pelo autor.

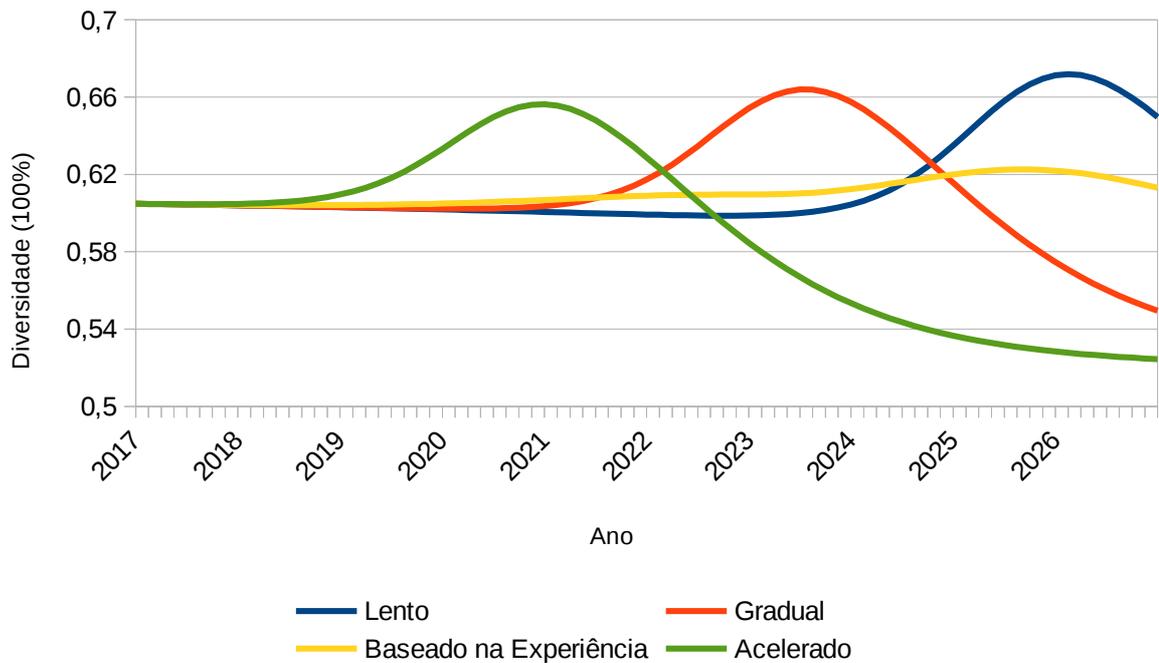
6.2.3.2. Baixo Carbono

Novamente os quatro microcenários podem ser apresentados, porém sob a nuance da implementação da meta de extinção do uso das termelétricas. Os perfis de geração para cada fonte são os mesmos apresentados no Gráfico 15, exceto aquele relacionado à geração termelétrica, sendo os mesmos apresentados no Gráfico 7.

Destacam-se, neste grupo de cenários, quedas, tanto na geração termelétrica quanto na hidrelétrica. A contraponto, as demais fontes supridoras apresentam perfis de crescimento (solar, eólica e nuclear) ou manutenção (biomassa). Esses comportamentos acarretam uma elevação nas taxas de diversidade da matriz, uma vez que reduz a concentração nas duas principais fontes de suprimento (hidro e termoelétricas), na medida em que a participação das outras fontes é aumentada. Entretanto, a redução da participação termelétrica se mostra mais intensa que a da hidrelétrica, de modo a implicar um novo aumento da participação relativa dessa modalidade de geração na matriz elétrica nacional. Somado a isso, a taxa de

crescimento das demais fontes não são capazes de suprir as reduções apresentadas pelas termelétricas, de modo que as taxas de diversidade voltam a cair após certo período, como pode ser verificado no Gráfico 18.

Gráfico 18 - Diversidade da matriz elétrica brasileira de 2017 a 2026 (Otimista Baixo Carbono)



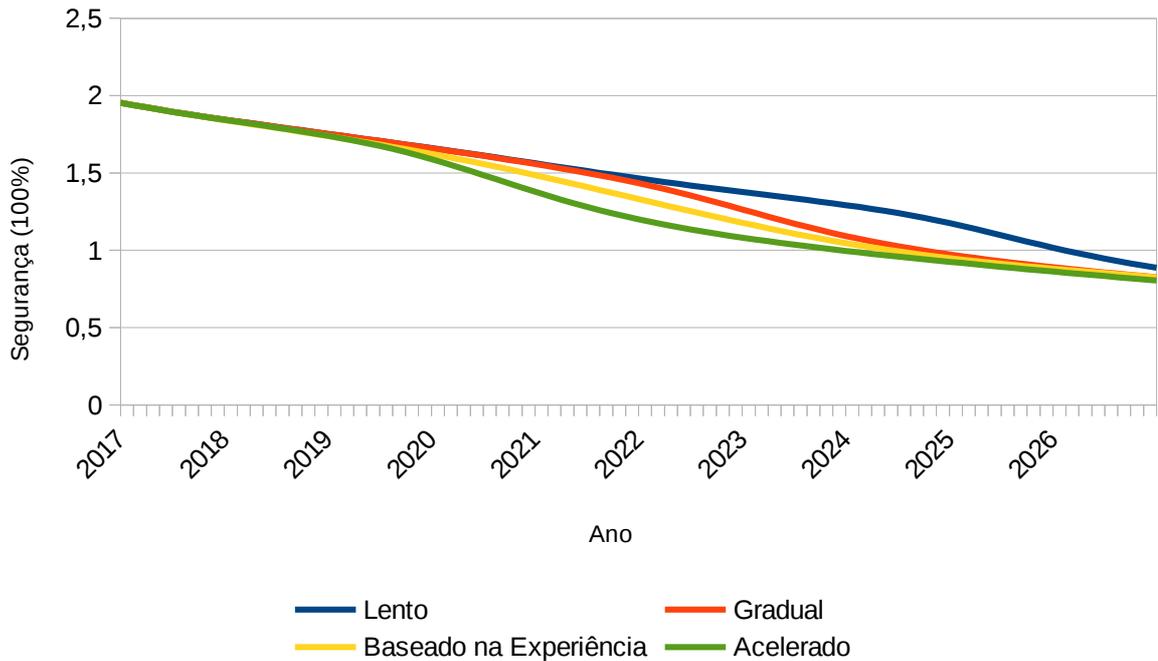
Fonte: Elaborado pelo autor.

Novamente, pode-se perceber que, para cenários mais acelerados, a diversidade tem um comportamento mais intenso, apresentando, antecipadamente aos demais cenários, tanto a elevação de suas taxas, quando a referida e consecutiva queda. Ainda assim, os cenários de implementação lenta e baseada no passado apresentam leve elevação dos valores finais se comparados aos valores iniciais.

A meta de eliminação da geração por parte das termelétricas afeta drasticamente a SSE brasileira, como pode ser visto no Gráfico 19. Todos os microcenários apresentam queda significativa na SSE, na escala de 58% de redução. Novamente, as quedas iniciais na segurança são reflexo do crescimento da demanda, da queda das gerações hidro e termoeletrica e das baixas contratações iniciais para expansão do sistema, que não acompanham a depreciação das fontes supridoras. No período compreendido entre os anos de 2024 e 2026, todos os cenários apresentam queda à zona de risco de oferta, tendo o cenário mais lento como o que apresenta um maior

grau de sustentação dos níveis de SSE fora dessa zona. Sem o apoio da geração termelétrica, as outras fontes não se mostram capazes de manterem o sistema em padrões seguros até o final de 2026, mesmo que a redução do seu uso seja implementada de forma mais lenta.

Gráfico 19 - SSE brasileiro de 2017 a 2026 - cenário Otimista de Baixo Carbono



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2.4. Cenário Baseado no Passado

Para este cenário, serão utilizadas as mesmas taxas de cumprimento de metas apresentadas na última década, conforme Tabela 6. Isso indica que os cenários inseridos neste contexto terão o mesmo alcance apresentado por políticas passadas.

Semelhantemente aos cenários anteriores, divide-se esse cenário em dois grupos (Carbono Normal e Baixo Carbono). Em seguida, subdivide-se esses grupos em quatro microcenários cada (implementação acelerada, gradual, lenta e baseada na experiência).

6.2.4.1. Carbono Normal

Este grupo de cenários apresenta uma queda mais acentuada no que se relaciona às hidrelétricas, quando comparado ao cenário otimista (18,9% contra 17,6%, respectivamente). Para as termelétricas há uma menor redução se comparado ao cenário anterior (18,4% contra 20,3%). Podem-se destacar os comportamentos de crescimento das gerações solar, por biomassa e principalmente eólica (Gráfico 20b, Gráfico 20c, e Gráfico 20d, respectivamente).

Gráfico 20 - Geração elétrica por ano por fonte - cenário Baseado no Passado e Carbono Normal

(Continua)

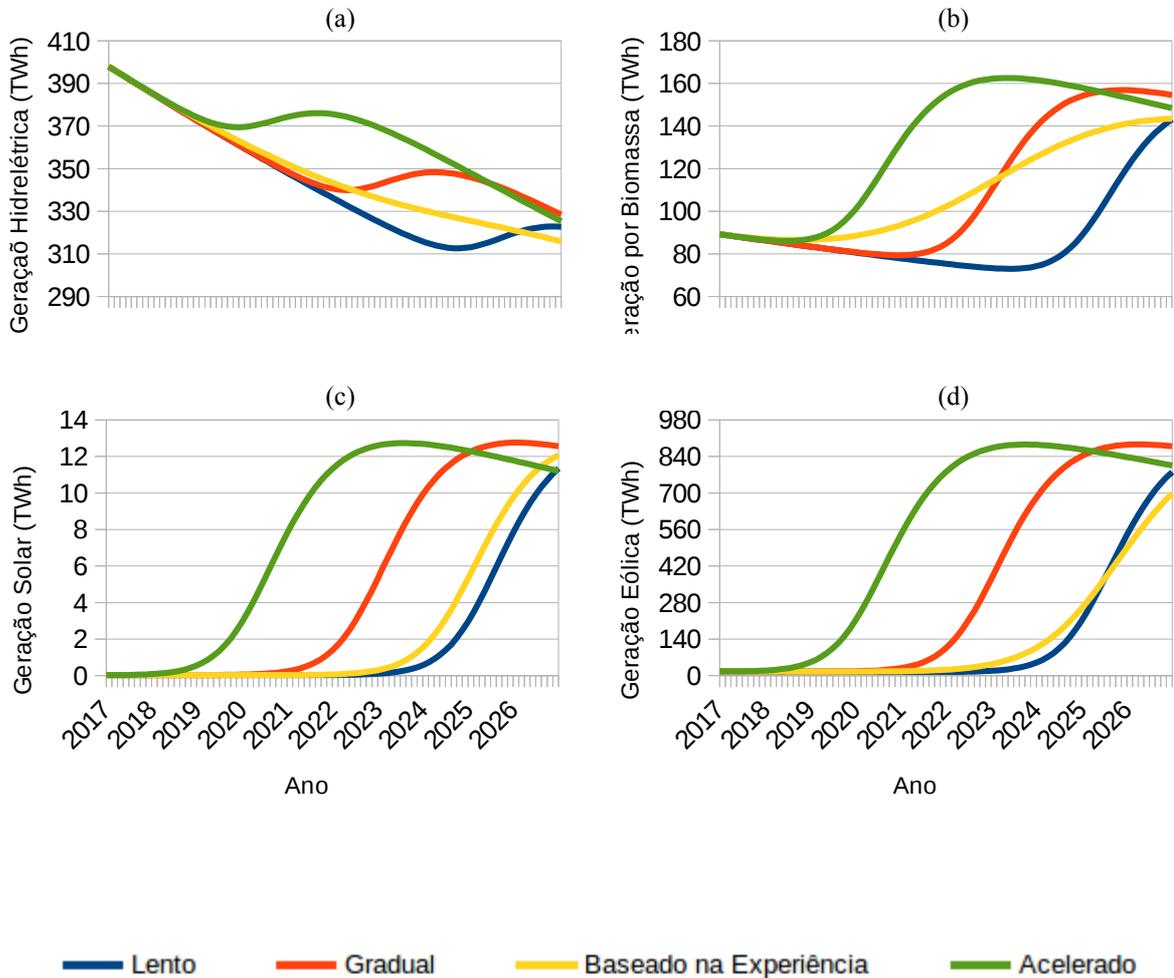
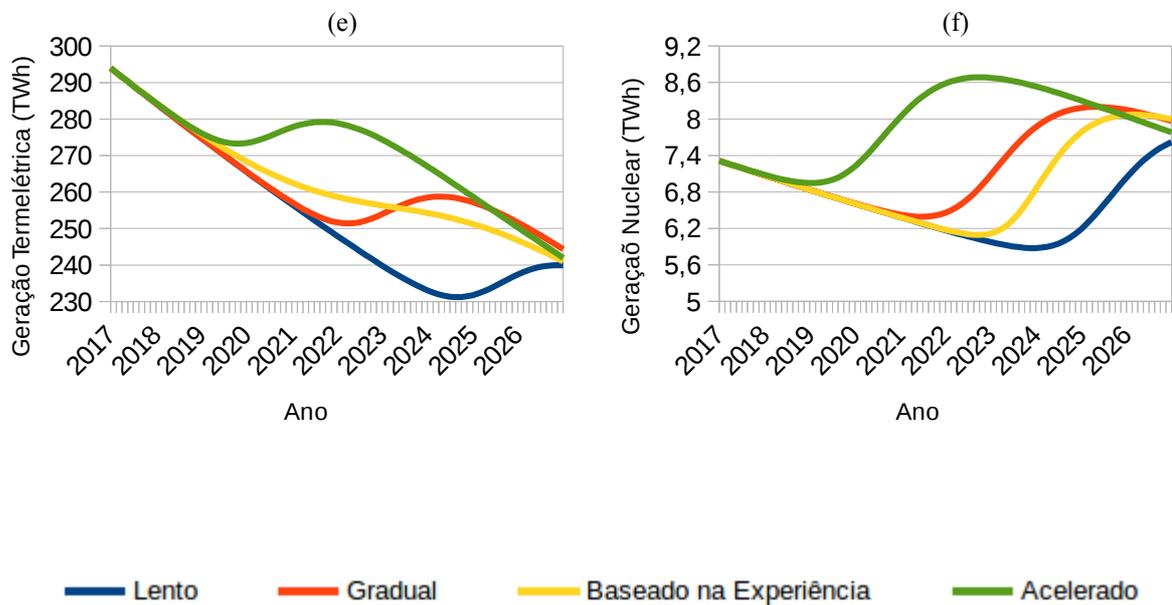


Gráfico 20 - Geração elétrica por ano por fonte - cenário Baseado no Passado e Carbono Normal

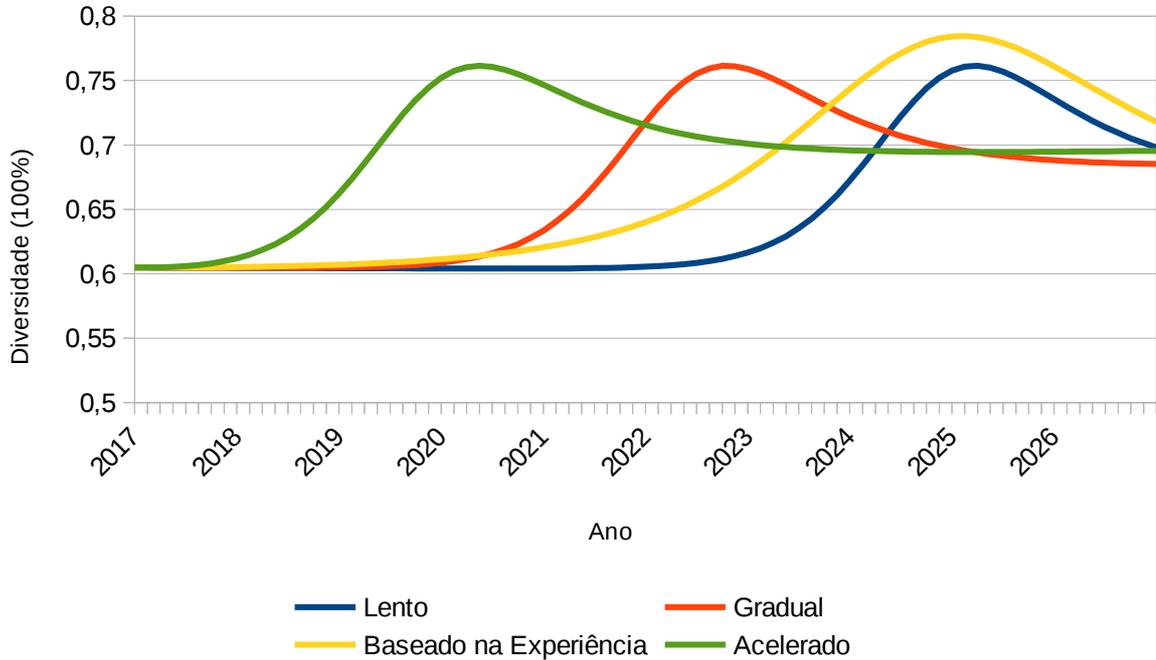
(Conclusão)



Fonte: Elaborado pelo autor.

A expansão dos sistemas de RER aliada à queda da participação das termelétricas implicam uma elevação dos níveis de diversidade do sistema, conforme mostrado no Gráfico 21. Apesar dos perfis de diversidade apresentarem queda após um pico de crescimento, os valores finais se estabilizam em um patamar superior ao do início da década. Implementações mais aceleradas diversificam o sistema mais rapidamente. Além disso, a experiência passada se apresenta próxima a um perfil de implementação mais lenta, entretanto alcançando maiores níveis, tanto no pico de diversidade (78,5% no início de 2025) quanto no final de 2026 (71,8%)

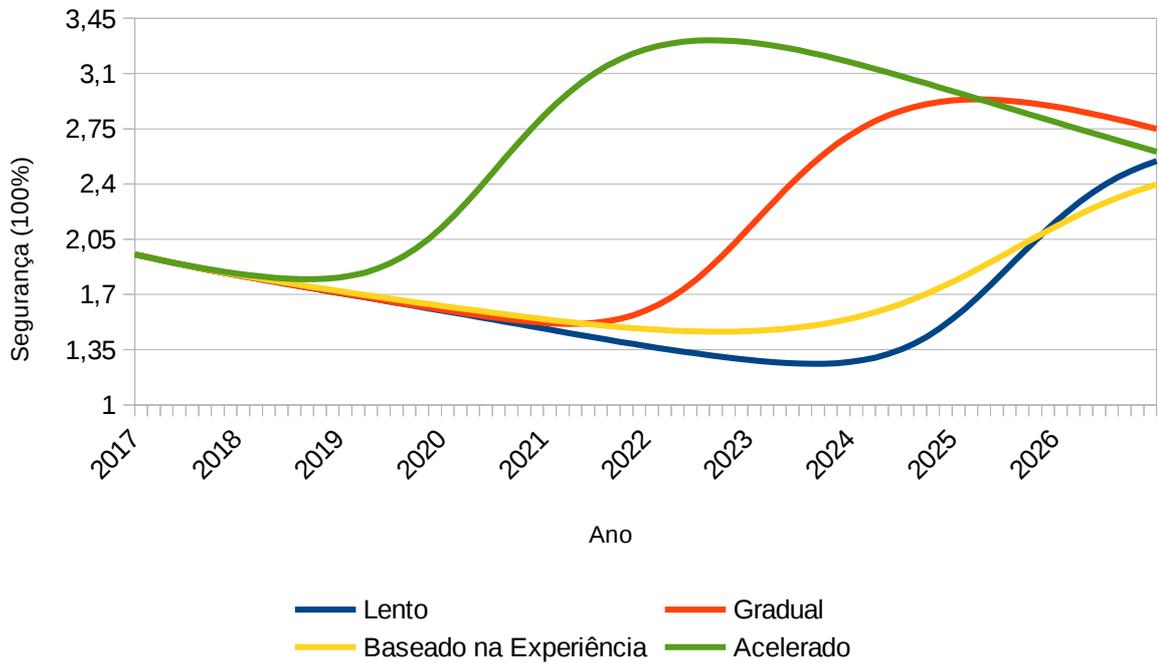
Gráfico 21 - Diversidade da matriz elétrica brasileira de 2017 a 2026 (Baseado no Passado Carbono Normal)



Fonte: Elaborado pelo autor.

No que se relaciona à segurança elétrica (Gráfico 22), pode-se verificar que, como nos cenários otimistas, implementações mais aceleradas sustentam, durante toda a década, os níveis de SSE mais distanciados da zona de deficit de oferta, enquanto as outras formas de implementação se aproximam dessa faixa, principalmente entre os anos de 2022 e 2025. Apesar disso, os sistemas se mostram, ao final da simulação, em um patamar de SSE mais elevado do que no início da década. Isso implica que, caso os padrões de alcance das políticas se repitam, independente da intensidade de implementação dessas políticas, o sistema brasileiro se mantém seguro por, pelo menos, mais dez anos. Além disso, o sistema apresentará, ao final, um padrão de segurança superior ao visto na atualidade.

Gráfico 22 - SSE brasileiro de 2017 a 2026 – cenário Baseado no Passado e Carbono Normal

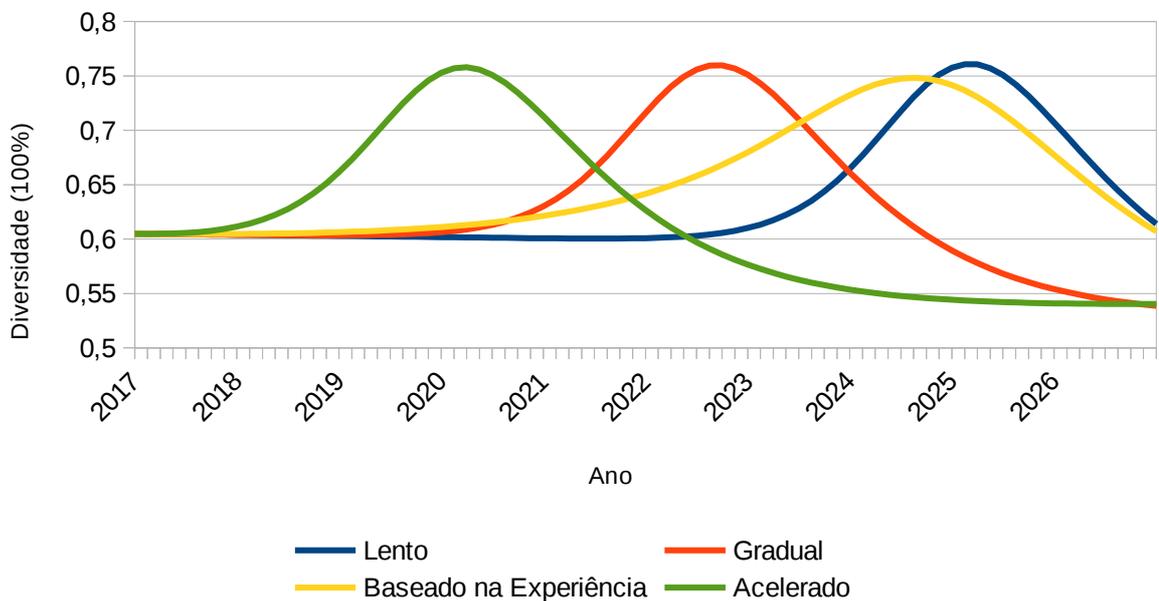


Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2.4.2. Baixo Carbono

Mais uma vez, os perfis de geração das fontes, com exceção da termelétrica, são os mesmos do grupo anterior (Gráfico 20). Comparada aos cenários anteriores, a meta de eliminação do uso das termelétricas (Gráfico 7) rebaixa os picos de diversidade de 78,5% para 76,1%, como pode ser constatado no Gráfico 23.

Gráfico 23 - Diversidade da matriz elétrica brasileira de 2017 a 2026 (Baseado no Passado Baixo Carbono)

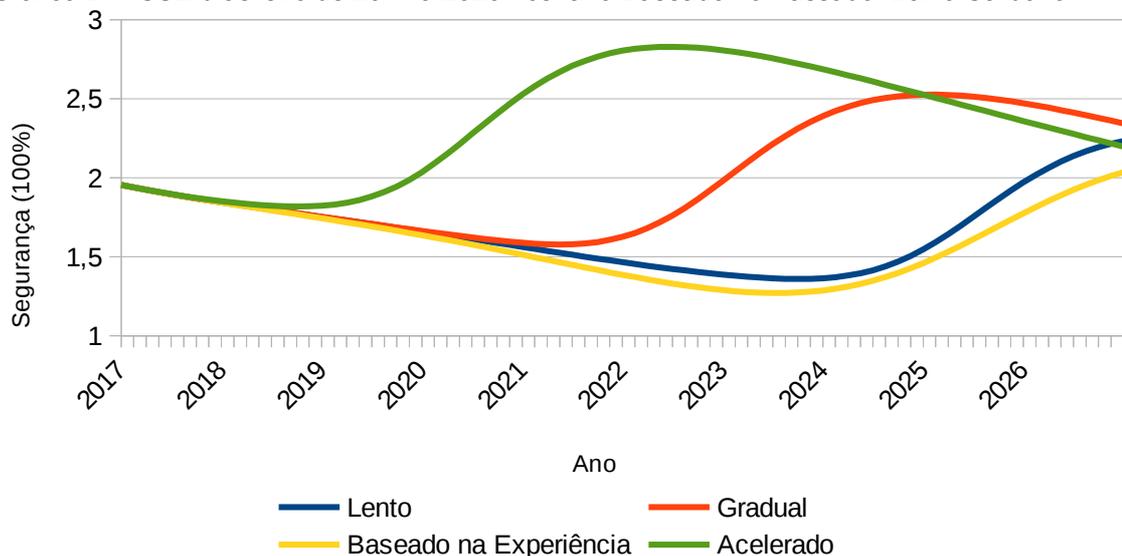


Fonte: Elaborado pelo autor.

Quando as políticas são implementadas de maneira mais acelerada ou gradual, os picos de diversidade são atingidos mais rapidamente. Entretanto, após esse ponto máximo, as taxas de diversidade tendem a cair, o que acarreta valores finais mais baixos para esses dois cenários. A contraponto, como o perfil da experiência passada se aproxima de uma implementação lenta, observa-se, para esses cenários, picos de diversidade alcançados na segunda metade da década, porém com valores finais superiores aos dos outros dois cenários. Novamente, as quedas dos índices de diversidade após um período de elevação são causadas pela rápida redução da participação termelétrica na matriz elétrica nacional, não acompanhada, nem pela taxa de crescimento das demais fontes, nem por uma redução mais significativa da geração hidrelétrica. Dessa forma, os percentuais de participação na geração elétrica total voltam a se concentrar na hidrelétrica, reduzindo a diversidade do sistema.

Para os índices de segurança (Gráfico 24), pode-se verificar um manutenção dos níveis de oferta próximos ao dobro da demanda. Entre os anos de 2020 e 2026, enquanto os cenários de implementação acelerada e gradual apresentam crescimento do índice de segurança, as implementações lenta e baseada na experiência se aproximam da zona de risco. Vale ressaltar que o ponto mais baixo desses perfis é apresentado pela curva de implementação baseada no passado, com índice de 127,11% na metade do ano de 2023. Isso demonstra uma forte relação da experiência passada com o uso das termelétricas.

Gráfico 24 - SSE brasileiro de 2017 a 2026 - cenário Baseado no Passado Baixo Carbono



Apesar de algumas curvas mostrarem aproximação com o limiar de risco, esses cenários demonstram que, caso as implementações das metas das fontes supridoras repitam o alcance da década passada, mesmo com a redução total do uso das termelétricas o sistema permanece em um patamar de segurança. Entretanto, caso esses alcances repitam o comportamento de implementação apresentado no passado, o sistema pode se mostrar em maior risco do que em caso de uma implementação mais acelerada ou gradual.

6.2.5. Comparação entre cenários

No que se relaciona ao índice de diversidade, pode-se constatar que, para os cenários de baixo carbono (Gráfico 25), há sempre um perfil de queda, quando comparados os valores finais com os iniciais. Entretanto, os cenários otimista e baseado no passado chegam a apresentar períodos de aumento dos índices de diversidade, indicando que a redução do uso das termelétricas, aliada aos perfis de redução de geração hidrelétrica, e crescimento das demais fontes, podem contribuir para um aumento da diversidade do sistema, uma vez que implicam uma transferência da concentração da participação setorial hidrelétrica para as outras centrais geradoras. Contudo, a alavancagem ocorrida por essas fontes não se mostra capaz de suprir as rápidas reduções apresentadas pelas termelétricas, ocasionando um retorno da concentração das participações na geração hidrelétrica e, com isso, novas quedas dos índices de diversidade após um período. Para o caso dos cenários baseados no passado, essas quedas também são devidas a um drástico aumento da participação eólica no setor, tornando-se a principal fonte geradora e dividindo importância com as centrais hidrelétricas.

Quanto aos cenários de carbono normal, percebe-se uma queda dos padrões de diversidade apenas para o cenário de estagnação da expansão. Os demais apresentam elevação e estabilização entre cinco e dez pontos percentuais ao término do período. O cenário baseado no passado chega a apresentar valores superiores no decorrer do período analisado, tendo involuções causadas pelo aumento significativo da participação eólica na matriz elétrica.

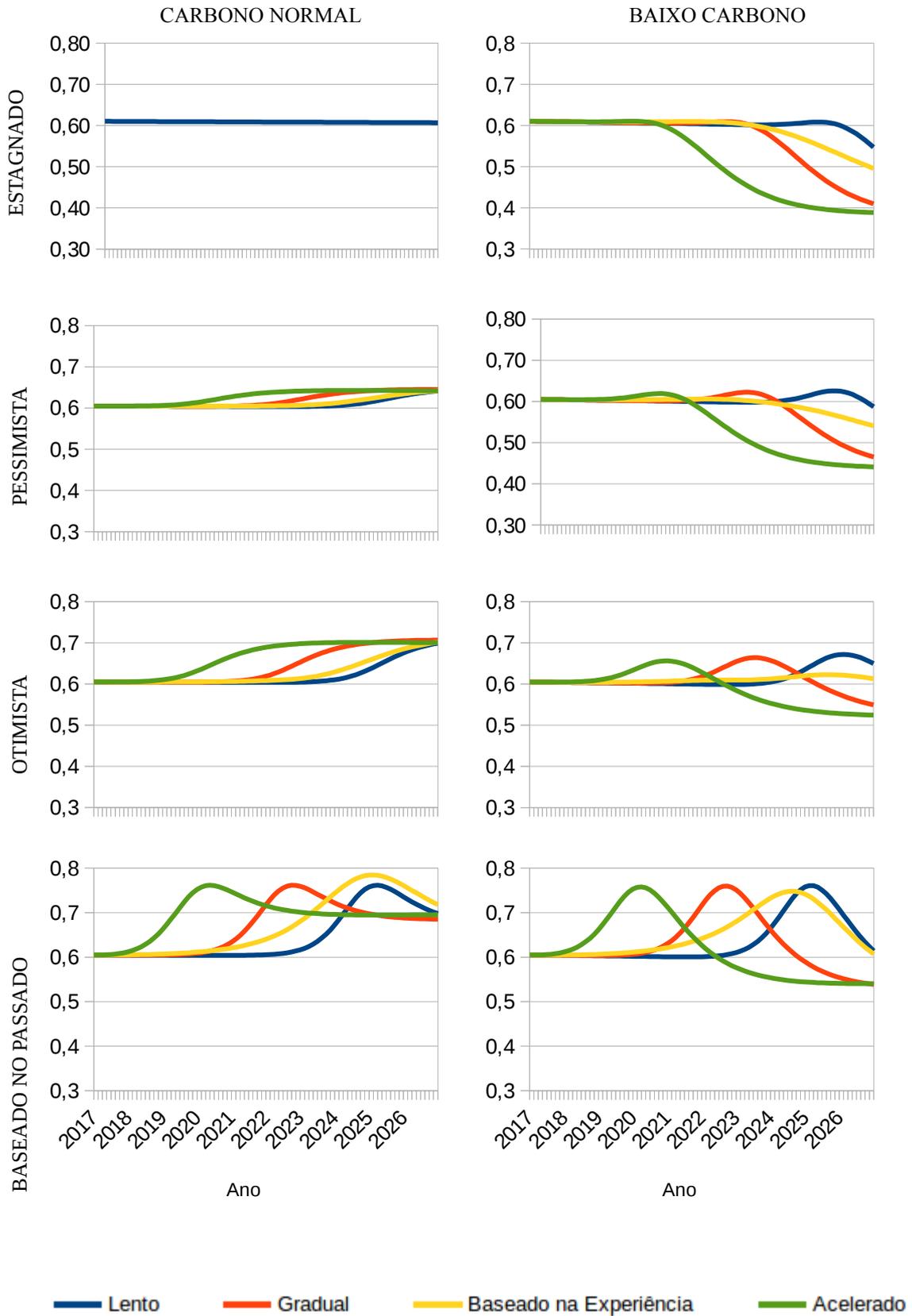
Já para os índices de segurança (Gráfico 26), todos os cenários apresentam perfil de queda, exceto aqueles baseados nos alcances da década passada, que

apresentam elevação de índices (carbono normal) ou manutenção dos padrões atuais (baixo carbono). Todos os outros cenários de baixo carbono apresentam queda à faixa de deficit de oferta, enquanto os cenários de carbono normal se mantêm acima dessa zona, mesmo que ligeiramente. Tais comportamentos indicam forte dependência da matriz elétrica nacional pela geração termelétrica. Especificamente para o cenário de carbono normal, que não considera expansão do setor, os índices de segurança se mostram na zona de risco no último ano da simulação.

Os cenários que apresentam elevação dos índices de diversidade, mesmo que de forma ligeira, possuem índices de segurança afastados da zona de risco por períodos mais prolongados. Isso reforça a assertiva de que sistemas mais diversos quanto às suas fontes, apresentam maiores níveis de segurança.

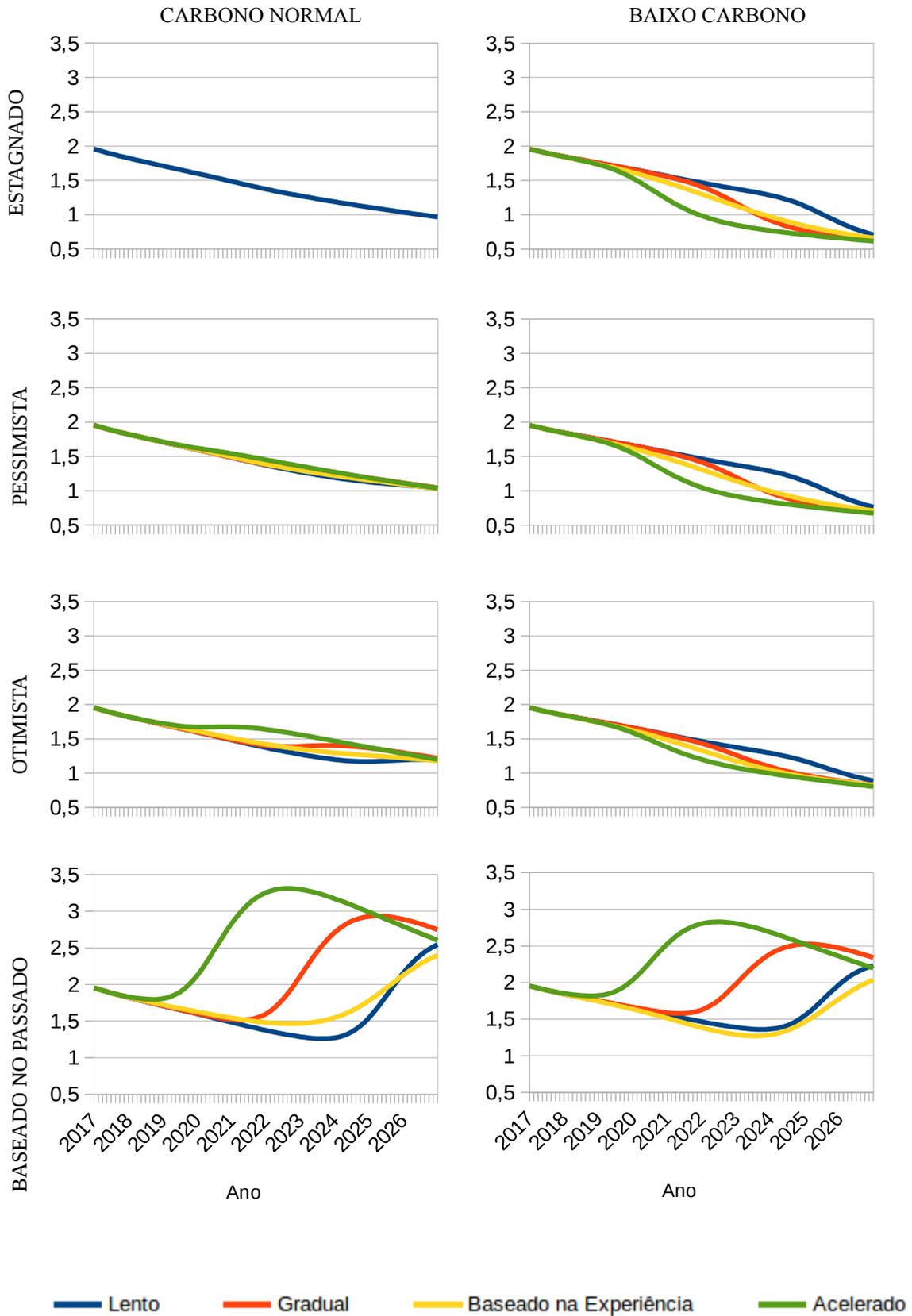
Por fim, por meio do cenário baseado no passado, pode-se perceber que as políticas de incentivo, principalmente no tangente à geração eólica, caso repitam o comportamento da última década, farão os níveis de segurança do sistema crescerem-se ou, no mínimo, manterem-se no mesmo patamar atual, podendo suprir integralmente o uso das termelétricas após algum tempo. Caso essas políticas sejam implementadas de forma acelerada ou gradual, o sistema se mantém afastado do perigo de deficit de oferta. Mas se a implementação for lenta ou seguir o mesmo padrão da última década, o risco se torna maior, sobretudo se houver a redução do uso da geração termelétrica.

Gráfico 25 - Diversidade da matriz elétrica brasileira por cenário – 2017 a 2026 (em 100%)



■ Lento
 ■ Gradual
 ■ Baseado na Experiência
 ■ Acelerado

Gráfico 26 - SSE da matriz elétrica brasileira por cenário – 2017 a 2026 (em 100%)



7. CONCLUSÃO

Muitos países se esforçam para serem eficazes na gestão do abastecimento de energia. Devido aos vários fatores efetivos, a segurança do fornecimento de energia é caracterizada como um sistema complexo. À medida que a análise estratégica e política dos problemas de energia está se tornando mais complexa e difícil de gerenciar, um método qualitativo, combinado à abordagem de modelagem de dinâmica de sistemas, oferece uma importante contribuição para futuras formulações e planejamentos voltados à política energética. Esta abordagem pode ajudar pesquisadores e formuladores de políticas a compreenderem a complexidade e a dinâmica da segurança elétrica e da diversificação das fontes de suprimento desses sistemas.

Este estudo forneceu uma pesquisa inicial, envolvendo a análise dos impactos das políticas de planejamento elétrico sob o prisma da Dinâmica de Sistemas. Contudo, a presente pesquisa limitou-se a avaliar o papel dos recursos de energia renovável para segurança e diversidade da geração de eletricidade no Brasil. Semelhantemente ao trabalho de Aslani, Helo e Naaranoja (2014), este estudo não levou em consideração processos de elaboração de políticas para a promoção de RER ou de avaliação dos custos do desenvolvimento desses recursos. Da mesma forma, não foram considerados, para as fontes de suprimento e para a demanda, os efeitos causados pela alteração de capacidade das mesmas. Ainda, o comportamento da demanda é fruto de uma simplificação do modelo, que considera apenas o último valor de consumo e a projeção de crescimento da mesma para os próximos anos.

Os resultados das simulações mostraram que a implementação de planos de ação voltados à instalação de novas capacidades no sistema de energia elétrica, principalmente no que se relaciona às fontes renováveis, impactam em modificações nos padrões de segurança e de diversidade do sistema elétrico brasileiro. Os índices de diversidade do sistema apresentam-se superiores aos da Alemanha (61% contra 58%), sendo essa a detentora de maior participação na contribuição de energia primária da União Europeia (ASLANI; ANTILA; WONG, 2012; KONSTANTINOS, 2017). Entretanto, apesar de comparável aos índices de países como Estados Unidos, Suécia, Dinamarca e Coreia do Sul, a diversidade do sistema elétrico

brasileiro apresenta-se inferior ao da Finlândia (79%), que possui uma participação de apenas 1,9% da energia primária gerada na União Europeia e possui alta dependência por importação para suprimento elétrico (ASLANI; ANTILA; WONG, 2012; ASLANI; HELO; NAARANOJA, 2014). Pode-se concluir que as metas de expansão da capacidade instalada do sistema elétrico, de forma geral, impactam na extensão da sobrevida do mesmo, uma vez que, em caso de estagnação, o sistema não se manteria seguro até 2026. Outrossim, a permanência do uso das termelétricas se mostra fundamental para a elevação dos índices de diversidade e o manutenção da segurança do sistema até o fim da próxima década, uma vez que, sem essa fonte, o risco de deficit se apresenta em mais de um cenário. Por outro lado, a expansão das fontes de RER não são capazes de manter o nível de segurança do sistema no mesmo patamar até o fim da década, apesar de mantê-lo fora da faixa de risco.

Os perfis de alcance de expansão da capacidade baseados no passado mostram-se como sendo um cenário de difícil alcance no próximo decênio, seja por barreiras político-ambientais tocantes à expansão da capacidade hidrelétrica, seja pelos baixos valores iniciais de capacidade instalada apresentados na última década pelos sistemas solar, eólico e de biomassa, se comparados aos índices do início desta década.

Para pesquisas futuras, o modelo de dinâmica de sistemas criado pode ser implementado em outros países e os resultados podem ser comparados com o trabalho atual. Além disso, os custos totais do desenvolvimento de energia renovável no Brasil não foram considerados neste trabalho. Da mesma forma, uma análise de risco, indicativa de forças e fraquezas das energias renováveis pode ser considerada, bem como a expansão (ou redução) das taxas de crescimento de demanda.

Do ponto de vista da diversificação, podem ser consideradas outras fontes de abastecimento que não os atuais (biomassa, hidrelétrica, eólica, e solar), observando-se investimentos em pesquisa e políticas sobre o desenvolvimento de novas tecnologias ou melhoramento das atuais. Finalmente, as estratégias de redução de custos por meio de questões como a combinação de mercados,

impostos e incentivos regulatórios são elementos sugeridos pelo autor que devem ser considerados para uma ampliação do modelo proposto.

Ainda assim, o presente fornece um modelo base para ampliação futura no que tange à análise do setor de energia, sobretudo incorporando indicadores de segurança e diversidade do setor elétrico. Diversas aplicações do método de Dinâmica de sistemas voltadas à análise e planejamento do setor de energia são encontradas na literatura, como o estudo de Aslani, Helo e Naaranoja (2014), entretanto poucos são os trabalhos relacionados ao caso brasileiro, sobretudo no tocante à análise da diversidade aliada à segurança dos sistemas. Dessa forma, o presente trabalho contribui por reduzir parte dessa lacuna.

REFERÊNCIAS

- AFONSO, J. R. R.; ARAÚJO, E. A.; BIASOTO JÚNIOR, G. Fiscal space and public sector investments in infrastructure: a Brazilian case-study. 2005. Disponível em: <<http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/2971>>. Acesso em: 6 jun. 2017.
- ANAND, S.; VRAT, P.; DAHIYA, R. P. Application of a system dynamics approach for assessment and mitigation of CO2 emissions from the cement industry. **Journal of Environmental Management**, jun. 2006. v. 79, n. 4, p. 383–398.
- ANEEL. **Resolução nº 44 , de 17 de março de 1999**. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/leitura_arquivo/arquivos/Tabela_Taxas_Depria_cao_RIT.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2017.
- _____. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2002.
- _____. Fontes Não Renováveis: Energia Nuclear. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2008.
- APEREC (Org.). **A quest for energy security in the 21st century: resources and constraints**. Tokyo: Inst. of Energy Economics, 2007.
- ASLANI, A. *et al.* Renewable energy supply chain in Ostrobothnia region and Vaasa city: Innovative framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, jul. 2013. v. 23, p. 405–411.
- _____. Private sector investment in renewable energy utilisation: strategic analysis of stakeholder perspectives in developing countries. **International Journal of Sustainable Energy**, 2 jan. 2014. v. 33, n. 1, p. 112–124.
- ASLANI, A.; ANTILA, E.; WONG, K.-F. V. Comparative analysis of energy security in the Nordic countries: The role of renewable energy resources in diversification. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, nov. 2012. v. 4, n. 6, p. 062701.
- ASLANI, A.; HELO, P.; NAARANOJA, M. Role of renewable energy policies in energy dependency in Finland: System dynamics approach. **Applied Energy**, jan. 2014. v. 113, p. 758–765.
- ASLANI, A.; NAARANOJA, M.; ZAKERI, B. The prime criteria for private sector participation in renewable energy investment in the Middle East (case study: Iran). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, maio. 2012. v. 16, n. 4, p. 1977–1987.
- AWERBUCH, S. Portfolio-Based Electricity Generation Planning: Policy Implications For Renewables And Energy Security. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, maio. 2006. v. 11, n. 3, p. 693–710.

AXON, C.; DARTON, R.; WINZER, C. Measuring energy security. **New Challenges in Energy Security**. [S.l.]: Springer, 2013, p. 208–237.

BACKUS, G.; AMLIN, J. A history of making energy policy. [S.l.]: [s.n.], 2009. Disponível em: <http://www.energy2020.com/images/A_History_of_Making_Energy_Policy.pdf>. Acesso em: 7 jul. 2017.

BAJAY. Integrating competition and planning: A mixed institutional model of the Brazilian electric power sector. **Energy**, maio. 2006. Electricity Market Reform and Deregulation. v. 31, n. 6–7, p. 865–876.

BAJAY, S. V. Evolução do planejamento energético no Brasil na última década e desafios pendentes. **Revista Brasileira de Energia, Itajubá**, 2013. v. 19, n. 1, p. 255–266.

BARLAS, Y. Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. **System dynamics review**, 1996. v. 12, n. 3, p. 183–210.

BENNETT, S. J. Using past transitions to inform scenarios for the future of renewable raw materials in the UK. **Energy Policy**, nov. 2012. v. 50, p. 95–108.

BORBA, B. S. M. C.; SZKLO, A.; SCHAEFFER. Plug-in hybrid electric vehicles as a way to maximize the integration of variable renewable energy in power systems: The case of wind generation in northeastern Brazil. **Energy**, jan. 2012. 7th Biennial International Workshop “Advances in Energy Studies”. v. 37, n. 1, p. 469–481.

BRASIL. Decreto nº 24.643, de 10 de Julho de 1934. Decreta o Código de Águas. . 1934.

_____. 8.031. Lei nº 8.031, de 12 de abril de 1990. Cria o Programa Nacional de Desestatização, e dá outras providências. . 1990.

_____. Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996. Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências. . 1996.

_____. Decreto nº 2.335, de 6 de outubro de 1997. Constitui a Agência Nacional de Energia Elétrica -ANEEL, autarquia sob regime especial, aprova sua Estrutura Regimental e o Quadro Demonstrativo dos Cargos em Comissão e Funções de Confiança e dá outras providências. . 1997.

CALDAS, G. P. **Concessões de serviços públicos de energia elétrica: face à Constituição Federal de 1988 eo interesse público**. Curitiba: Juruá, 2006.

CARVALHO, J. F. De. Prioridades para investimentos em usinas elétricas. **Estudos Avançados**, dez. 2008. v. 22, n. 64, p. 215–225.

CARVALHO, J. F. De; SAUER, I. L. Does Brazil need new nuclear power plants? **Energy Policy**, 1 abr. 2009. v. 37, n. 4, p. 1580–1584.

CHANG, N. C. P.; OBERST, C. A.; MADLENER, R. **Economic Policy Evaluation for the Deployment of Alternative Energy Sources in Brazil**. Rochester, NY: Social Science Research Network, 2015. Disponível em: <<https://papers.ssrn.com/abstract=2721630>>. Acesso em: 6 jul. 2017.

CHANG, Y.; LEE, J. L. Electricity market deregulation and energy security: a study of the UK and Singapore electricity markets. **International Journal of Global Energy Issues**, 2008. v. 29, n. 1–2, p. 109–132.

CHAVES, G. De L. D.; TOSTA, M. De C. R. Planejamento governamental do setor energético no Brasil. *In*: CHAVES, G. de L. D.; TOSTA, M. de C. R. (Org.). **Gestão de Sistemas de Energia**. Curitiba: Editora CRV, 2016.

CHESTER, L. The (default) strategy determining the security of Australia's energy supply. [S.l.]: Curtin University of Technology, 2008. p. 97–122. Disponível em: <<https://espace.curtin.edu.au/handle/20.500.11937/14309>>. Acesso em: 25 jul. 2017.

_____. Conceptualising energy security and making explicit its polysemic nature. **Energy Policy**, fev. 2010. v. 38, n. 2, p. 887–895.

CHI, K. C.; NUTTALL, W. J.; REINER, D. M. Dynamics of the UK natural gas industry: System dynamics modelling and long-term energy policy analysis. **Technological Forecasting and Social Change**, mar. 2009. v. 76, n. 3, p. 339–357.

CHIPP, H. Seminário 5 anos do Marco Regulatório: Realidades e Perspectivas para o Setor de Energia Elétrica: Os Desafios da Garantia de Abastecimento do Setor Elétrico. **Rio de Janeiro**, 2009.

CHOOPOJCHAROEN, T.; MAGZARI, A. **Mathematics behind System Dynamics: An Interactive Qualifying Project Report**. Massachusetts: Worcester Polytechnic Institute, 2012. Projeto de Graduação.

CHUANG, M. C.; MA, H. W. Energy security and improvements in the function of diversity indices—Taiwan energy supply structure case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, ago. 2013. v. 24, p. 9–20.

CONNOLLY, D. *et al.* A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. **Applied Energy**, abr. 2010. v. 87, n. 4, p. 1059–1082.

COSTA, M. D. **O Direito de Acesso à Energia: meio e pré-condição para o exercício do direito ao desenvolvimento e dos direitos humanos**. São Paulo: USP, 2009. Tese de Doutorado.

DYBVIK, P. H.; ROSS, S. A. Arbitrage, state prices and portfolio theory. **Handbook of the Economics of Finance**, 2003. v. 1, p. 605–637.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2016**. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2007. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PDEE/20080111_2.pdf>. Acesso em: 4 dez. 2017.

_____. **Análise da inserção da geração solar na matriz elétrica brasileira**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2012. Disponível em: <http://jornalgggn.com.br/sites/default/files/documentos/nt_energiasolar_2012.pdf>. Acesso em: 4 jul. 2017.

_____. **Balanco Energético Nacional**. Brasil: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2016. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.697.7835&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2017.

_____. **Balanco Energético Nacional**. Brasil: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2017a. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf>.

_____. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2017b. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PDE/Documents/Arquivos/PDE2026/PDE2026_versao_para_ConsultaPublica.pdf>. Acesso em: 4 dez. 2017.

FENG, Y. Y.; CHEN, S. Q.; ZHANG, L. X. System dynamics modeling for urban energy consumption and CO2 emissions: A case study of Beijing, China. **Ecological Modelling**, mar. 2013. v. 252, p. 44–52.

FERNANDES, A. Da C. **Scorecard Dinâmico - Em Direção à Integração da Dinâmica de Sistemas com o Balanced Scorecard**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2003. Tese de Doutorado. Disponível em: <http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/33531763/Fernandes_-_Scorecard_Dinamico_-_Dinamica_de_Sistemas_e_BSC_-_DSc_COPPE-UFRJ_-_2003.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1500325299&Signature=CwGEsrRWlpc1Ypxv7Dbld8y%2BBIY%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DScorecard_Dinamico_-_Em_Direcao_a_Integr.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2017.

FORD, A. System dynamics and the electric power industry. **System Dynamics Review**, 1997. v. 13, n. 1, p. 57–85.

FORRESTER, J. W. “The” model versus a modeling “process” - Forrester. **System Dynamics Review**, 1985. v. 1, p. 133–134.

_____. System dynamics as an organizing framework for pre-college education. **System Dynamics Review**, 1993. v. 9, n. 2, p. 183–194.

FUJIMORI, S; MASUI, T; MATSUOKA, Y. Development of a global computable general equilibrium model coupled with detailed energy end-use technology. **Applied Energy**, v. 128, p. 296-306, 2014.

GALARRAGA, I.; GONZÁLEZ-EGUINO, M.; MARKANDYA, A. (Org.). **Handbook of sustainable energy**. Cheltenham: Edward Elgar, 2011.

GEORGIADIS, P.; VLACHOS, D. The effect of environmental parameters on product recovery. **European Journal of Operational Research**, set. 2004. v. 157, n. 2, p. 449–464.

GHISOLFI, V. *et al.* System dynamics applied to closed loop supply chains of desktops and laptops in Brazil: A perspective for social inclusion of waste pickers. **Waste Management**, fev. 2017. v. 60, p. 14–31.

GOLDEMBERG, J.; MOREIRA, J. R. Política energética no Brasil. **Estudos avançados**, 2005. v. 19, n. 55, p. 215–228.

GOLDENBERG, J.; PRADO, L. T. S. Reforma e crise do setor elétrico no período FHC. **Tempo social**, 2003. v. 15, n. 2, p. 219–235.

GOMES, J. Paulo Pombeiro; VIEIRA, M. M. F. O campo da energia elétrica no Brasil de 1880 a 2002. **Revista da Administração Pública - RAP**, 2009. v. 43, n. 2, p. 295–321.

GOUVEIA, J. P. *et al.* Effects of renewables penetration on the security of Portuguese electricity supply. **Applied Energy**, jun. 2014. v. 123, p. 438–447.

HAN, J.; HAYASHI, Y. A system dynamics model of CO2 mitigation in China's inter-city passenger transport. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, jul. 2008. v. 13, n. 5, p. 298–305.

HIPPEL, D. VON *et al.* Energy security and sustainability in Northeast Asia. **Energy Policy**, 2009. v. 39, n. 11, p. 6719–6730.

HONEYCUTT, R. L. Stochastic runge-kutta algorithms. i. white noise. **Physical Review A**, 1992. v. 45, n. 2, p. 600.

HSU, C.-W. Using a system dynamics model to assess the effects of capital subsidies and feed-in tariffs on solar PV installations. **Applied Energy**, dez. 2012. *Clean Energy for Future Generations*. v. 100, p. 205–217.

IEA. **Energy Security & Climate Policy**. [S.I.]: International Energy Agency (IEA), 2007a. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/energy_security_climate_policy.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2017.

_____. **Contribution of renewables to energy security**. [S.I.]: International Energy Agency (IEA), 2007b. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/so_contribution.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2017.

JANNUZZI, G. D. M. Power sector reforms in Brazil and its impacts on energy efficiency and research and development activities. **Energy Policy**, set. 2005. v. 33, n. 13, p. 1753–1762.

JANSEN, J. C.; ARKEL, W. Van; BOOTS, M. G. **Designing indicators of long-term energy supply security**. [S.l.]: Energy research Centre of the Netherlands ECN, 2004.

JIN, W.; XU, L.; YANG, Z. Modeling a policy making framework for urban sustainability: Incorporating system dynamics into the Ecological Footprint. **Ecological Economics**, out. 2009. v. 68, n. 12, p. 2938–2949.

JUÁREZ, A. A. *et al.* Development of the wind power in Brazil: Political, social and technical issues. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, nov. 2014. v. 39, p. 828–834.

KELLOGG, W. D. *et al.* Generation unit sizing and cost analysis for stand-alone wind, photovoltaic, and hybrid wind/PV systems. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, mar. 1998. v. 13, n. 1, p. 70–75.

KIANI, B.; MIRZAMOHAMMADI, S.; HOSSEINI, S. H. A Survey on the Role of System Dynamics Methodology on Fossil Fuel Resources Analysis. **International Business Research**, 11 jun. 2010. v. 3, n. 3, p. 84.

KONSTANTINOS, J. *et al.* Energy supply security in the EU: Benchmarking diversity and dependence of primary energy. **Applied energy**, 2017.

KRUTILLA, K.; REUVENY, R. The systems dynamics of endogenous population growth in a renewable resource-based growth model. **Ecological Economics**, fev. 2006. v. 56, n. 2, p. 256–267.

KRUYT, B. *et al.* Indicators for energy security. **Energy Policy**, jun. 2009. China Energy Efficiency. v. 37, n. 6, p. 2166–2181.

LACERDA, D. P. *et al.* Algumas caracterizações dos métodos científicos em Engenharia de Produção: uma análise de periódicos nacionais e internacionais. *In*: XXVII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2007, Foz do Iguaçu. **Anais eletrônicos...** Foz do Iguaçu: Abepro, 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Daniel_Lacerda/publication/267967689_ALGUMAS_CHARACTERIZACOES_DOS_METODOS_CIENTIFICOS_EM_ENGENHARIA_DE_PRODUCAO UMA_ANALISE_DE_PERIODICOS_NACIONAIS_E_INTERNACIONAIS/links/54df31020cf2510fcee63cc6/ALGUMAS-CARACTERIZACOES-DOS-METODOS-CIENTIFICOS-EM-ENGENHARIA-DE-PRODUCAO-UMA-ANALISE-DE-PERIODICOS-NACIONAIS-E-INTERNACIONAIS.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2017.

LE COQ, C.; PALTSEVA, E. Measuring the security of external energy supply in the European Union. **Energy Policy**, nov. 2009. v. 37, n. 11, p. 4474–4481.

LEAN, H. H.; SMYTH, R. Are fluctuations in US production of renewable energy permanent or transitory? **Applied Energy**, jan. 2013. Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. v. 101, p. 483–488.

LEE, C.-C.; CHANG, C.-P. Energy consumption and GDP revisited: A panel analysis of developed and developing countries. **Energy Economics**, nov. 2007. v. 29, n. 6, p. 1206–1223.

LEME, A. A. Reform of the electrical sector in Brazil, Argentina and Mexico: contrasts and perspectives in debate. **Revista de Sociologia e Política**, jun. 2009. v. 17, n. 33, p. 97–121.

LIMA, F. *et al.* Analysis of energy security and sustainability in future low carbon scenarios for Brazil. **Natural Resources Forum**, 1 ago. 2015. v. 39, n. 3–4, p. 175–190.

LIMA, F. A. **A regulação por contratos no setor elétrico brasileiro**. [S.l.]: O, 2006.

LINARES, P. Multiple criteria decision making and risk analysis as risk management tools for power systems planning. **IEEE Transactions on Power Systems**, ago. 2002. v. 17, n. 3, p. 895–900.

LINS, M. E. *et al.* Performance assessment of Alternative Energy Resources in Brazilian power sector using Data Envelopment Analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, jan. 2012. v. 16, n. 1, p. 898–903.

LÖSCHEL, A.; MOSLENER, U.; RÜBBELKE, D. T. G. Indicators of energy security in industrialised countries. **Energy Policy**, abr. 2010. v. 38, n. 4, p. 1665–1671.

LOUREIRO, P. G. C. Custo Marginal do déficit de energia elétrica: histórico, avaliação e proposta de uma nova metodologia. **Coppe/UFRJ, Rio de Janeiro**, 2009.

LUCENA, A. F. P. *et al.* The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil. **Energy Policy**, mar. 2009. v. 37, n. 3, p. 879–889.

LUCENA, A. F. P. *et al.* Climate policy scenarios in Brazil: A multi-model comparison for energy. **Energy Economics**, maio. 2016. v. 56, p. 564–574.

MACHADO, A. C. F. A Evolução do Mercado Livre de Energia. *In*: ENASE - ENCONTRO NACIONAL DOS AGENTES DO SETOR ELÉTRICO, 2007, São Paulo. **Anais eletrônicos...** São Paulo: [s.n.], 2007. Disponível em: <http://www.zonaeletrica.com.br/downloads/ctee/enase2007/Antonio_Carlos_Fraga_Machado.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2017.

MÅNSSON, A.; JOHANSSON, B.; NILSSON, L. J. Assessing energy security: An overview of commonly used methodologies. **Energy**, ago. 2014. v. 73, p. 1–14.

MARTIN, L. Incorporating values into sustainability decision-making. **Journal of Cleaner Production**, 15 out. 2015. Decision-support models and tools for helping to make real progress to more sustainable societies. v. 105, p. 146–156.

MATHIESEN, B. V.; LUND, H.; KARLSSON, K. 100% Renewable energy systems, climate mitigation and economic growth. **Applied Energy**, fev. 2011. The 5th Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water and

Environment Systems, held in Dubrovnik September/October 2009. v. 88, n. 2, p. 488–501.

MEDIAVILLA, M. *et al.* The transition towards renewable energies: Physical limits and temporal conditions. **Energy Policy**, jan. 2013. v. 52, p. 297–311.

MELO, E. Fonte eólica de energia: aspectos de inserção, tecnologia e competitividade. **Estudos Avançados**, 2013. v. 27, n. 77, p. 125–142.

MERCEDES, S. S. P.; RICO, J. A. P.; POZZO, L. De Y. Uma revisão histórica do planejamento do setor elétrico brasileiro. **Revista USP**, 5 mar. 2015. v. 0, n. 104, p. 13–36.

MORECROFT, J. D. W. **Strategic modelling and business dynamics: a feedback systems approach**. Second edition ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2015.

MORESI, E. (Org.). **Metodologia da pesquisa**. Brasília: Universidade Católica de Brasília (UCB), 2003.

NAGY, K.; KÖRMENDI, K. Use of renewable energy sources in light of the “New Energy Strategy for Europe 2011–2020”. **Applied Energy**, ago. 2012. Smart Grids. v. 96, p. 393–399.

NAILL, R. F. **Managing the discovery life cycle of a finite resource: a case study of US natural gas**. [S.l.]: Massachusetts Institute of Technology, 1972. Dissertação de Mestrado. Disponível em: <<https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/37491/23747322-MIT.pdf?sequence=2>>. Acesso em: 27 jul. 2017.

NAILL, R. F. A system dynamics model for national energy policy planning. **System Dynamics Review**, 1992. v. 8, n. 1, p. 1–19.

NAIM, M. M.; TOWILL, D. R. Establishing a Framework for Effective Materials Logistics Management. **The International Journal of Logistics Management**, jan. 1994. v. 5, n. 1, p. 81–88.

NARAYAN, P. K.; PRASAD, A. Electricity consumption–real GDP causality nexus: Evidence from a bootstrapped causality test for 30 OECD countries. **Energy Policy**, fev. 2008. v. 36, n. 2, p. 910–918.

NOGUEIRA *et al.* Will thermal power plants with CCS play a role in Brazil’s future electric power generation? **International Journal of Greenhouse Gas Control**, maio. 2014. v. 24, p. 115–123.

NOOIJ, M. DE; KOOPMANS, C.; BIJVOET, C. The value of supply security: The costs of power interruptions: Economic input for damage reduction and investment in networks. **Energy Economics**, mar. 2007. v. 29, n. 2, p. 277–295.

NOURGALIEV, R.; DINH, N.; YOUNGBLOOD, R. Development, Selection, Implementation, and Testing of Architectural Features and Solution Techniques for

Next Generation of System Simulation Codes to Support the Safety Case of the LWR Life Extension. **INL/EXT**, 2010. v. 10, p. 19984.

OLIVEIRA, A. De. Liberalização interrompida. **Revista USP**, 5 mar. 2015. v. 0, n. 104, p. 51–62.

OLSINA, F. **Long-Term Dynamics of Liberalized Electricity Markets**. San Juan, Argentina: Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), 2005. Tese de Doutorado. Disponível em: <<http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/paperspdf/Olsina.pdf>>. Acesso em: 7 jul. 2017.

OLSINA, F.; GARCÉS, F.; HAUBRICH, H.-J. Modeling long-term dynamics of electricity markets. **Energy Policy**, ago. 2006. v. 34, n. 12, p. 1411–1433.

PAO, H.-T.; FU, H.-C. Renewable energy, non-renewable energy and economic growth in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, set. 2013. v. 25, p. 381–392.

PEARCE, D.; WEBB, M. Rural electrification in developing countries. **Energy Policy**, 1 ago. 1987. v. 15, n. 4, p. 329–338.

PEDROSA, P. Modelo setorial e perspectivas de evolução para o mercado livre de energia, apresentação feita no Seminário–5 anos do Novo Modelo do Setor Elétrico Brasileiro. **Rio de Janeiro, RJ**, 2009.

PEREIRA, A. L.; CHAVES, G. De L. D. Organização e regulação do setor elétrico. *In*: CHAVES, G. de L. D.; TOSTA, M. de C. R. (Org.). **Gestão de Sistemas de Energia**. Curitiba: Editora CRV, 2016.

PEREIRA, M. G. *et al.* The renewable energy market in Brazil: Current status and potential. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, ago. 2012. v. 16, n. 6, p. 3786–3802.

PEREIRA, M. J. **Energia: eficiência & alternativas**. [S.l.]: Ciência Moderna, 2009.

PFENNINGER, S.; HAWKES, A.; KEIRSTEAD, J. Energy systems modeling for twenty-first century energy challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, maio. 2014. v. 33, p. 74–86.

PNUD. **World energy assessment: overview : 2004 update**. New York, NY: Programa das Nações Unidas para o desenvolvimento, 2004.

PORTUGAL-PEREIRA, J. *et al.* Agricultural and agro-industrial residues-to-energy: Techno-economic and environmental assessment in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, out. 2015. v. 81, p. 521–533.

PRADO JUNIOR, F. A. De A.; SILVA, A. L. R. Da. Sobre reformas e concessões no setor elétrico brasileiro: uma análise crítica. **Revista Estratégica**, 15 maio. 2013. v. 11, n. 2. Disponível em: <<http://estrategica.faap.br/ojs/index.php/estrategica/article/view/10>>. Acesso em: 9 jun. 2017.

QUDRAT-ULLAH, H.; SEONG, B. S. How to do structural validity of a system dynamics type simulation model: The case of an energy policy model. **Energy Policy**, maio. 2010. v. 38, n. 5, p. 2216–2224.

RANJAN, A.; HUGHES, L. Energy security and the diversity of energy flows in an energy system. **Energy**, ago. 2014. v. 73, p. 137–144.

REIBSTEIN, D. J.; CHUSSIL, M. J. Primeiro a lição, depois o teste: usando simulações para analisar e desenvolver estratégias competitivas. **DAY, George S.; _____**. **A dinâmica da estratégia competitiva**. Rio de Janeiro: Campus, 1999.

REN, J.; SOVACOOOL, B. K. Quantifying, measuring, and strategizing energy security: Determining the most meaningful dimensions and metrics. **Energy**, nov. 2014. v. 76, p. 838–849.

RICHARDSON, G. P. Problems with causal-loop diagrams. **System dynamics review**, 1986. v. 2, n. 2, p. 158–170.

_____. System dynamics, the basic elements of. **Complex Systems in Finance and Econometrics**. [S.l.]: Springer, 2009, p. 856–862.

SANTOS, M. J. *et al.* Scenarios for the future Brazilian power sector based on a multi-criteria assessment. **Journal of Cleaner Production**, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617305966>>. Acesso em: 12 abr. 2017.

SCHAEFFER, R. *et al.* Energy sector vulnerability to climate change: A review. **Energy**, fev. 2012. v. 38, n. 1, p. 1–12.

SENGE, P. M. **The fifth discipline: The art and practice of the learning organization**. [S.l.]: Broadway Business, 2006.

SENGE, P. M.; FORRESTER, J. W. Tests for building confidence in system dynamics models. **System dynamics, TIMS studies in management sciences**, 1980. v. 14, p. 209–228.

SHIN, J.; SHIN, W.-S.; LEE, C. An energy security management model using quality function deployment and system dynamics. **Energy Policy**, mar. 2013. v. 54, p. 72–86.

SILVA, E. L. D.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4ª ed. Florianópolis: UFSC, 2005. V. 123.

SILVA, M. V. M. Da; BERMAN, C. O planejamento energético como ferramenta de auxílio às tomadas de decisão sobre a oferta de energia na zona rural. *In*: 4º ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 2002, , [S.l.] . **Anais eletrônicos...** [S.l.]: [s.n.], 2002. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC000000022002000200034&script=sci_arttext&tling=pt>. Acesso em: 1 jun. 2017.

SOUZA, A. R. De. As trajetórias do planejamento governamental no Brasil: meio século de experiências na administração pública. **UNICIÊNCIAS**, 2004. v. 8, n. 1. Disponível em: <<http://pgsskroton.com.br/seer/index.php/uniciencias/article/view/1245>>. Acesso em: 9 jun. 2017.

SOVACOOOL, B. K.; MUKHERJEE, I. Conceptualizing and measuring energy security: A synthesized approach. **Energy**, ago. 2011. v. 36, n. 8, p. 5343–5355.

STERMAN, J. D. **Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world**. Nachdr. ed. Boston: Irwin/McGraw-Hill, 2000.

STIRLING, A. On the economics and analysis of diversity. **Science Policy Research Unit (SPRU), Electronic Working Papers Series, Paper**, 1999. v. 28, p. 1–156.

TANG, V.; VIJAY, S. System dynamics. [S.I.]: [s.n.], 2001. Disponível em: <<https://stuff.mit.edu/afs/sipb/project/wine/dosdevices/z:/afs/athena/course/other/esd.83/www/notebook/System%20Dynamics%20final.doc>>. Acesso em: 7 jul. 2017.

TEUFEL, F. *et al.* Review of System Dynamics models for electricity market simulations. 2013. Disponível em: <<https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000034732>>. Acesso em: 7 jul. 2017.

TOLMASQUIM, M. T. Perspectivas e planejamento do setor energético no Brasil. **Estudos avançados**, 2012. v. 26, n. 74, p. 247–260.

TRAPPEY, A. J. C. *et al.* The analysis of renewable energy policies for the Taiwan Penghu island administrative region. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, jan. 2012. v. 16, n. 1, p. 958–965.

UNFCCC. **Brazil information on Appendix 2 of the Copenhagen Accord**. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Disponível em: <https://unfccc.int/files/meetings/cop_15/copenhagen_accord/application/pdf/brazilcp_haccord_app2.pdf>. Acesso em: 2 maio. 2017.

VENTOSA, M. *et al.* Electricity market modeling trends. **Energy Policy**, maio. 2005. v. 33, n. 7, p. 897–913.

VERA, I.; LANGLOIS, L. Energy indicators for sustainable development. **Energy**, jun. 2007. v. 32, n. 6, p. 875–882.

VIVODA, V. Evaluating energy security in the Asia-Pacific region: A novel methodological approach. **Energy Policy**, set. 2010. v. 38, n. 9, p. 5258–5263.

WEC. Bioenergy. **World Energy Resources 2016**. 24. ed. [S.I.]: World Energy Council (WEC), 2017.

WOLDE-RUFAEL, Y. Electricity consumption and economic growth in transition countries: A revisit using bootstrap panel Granger causality analysis. **Energy Economics**, jul. 2014. v. 44, p. 325–330.

WU, J.-H.; HUANG, Y.-L.; LIU, C.-C. Effect of floating pricing policy: An application of system dynamics on oil market after liberalization. **Energy Policy**, jul. 2011. Special Section: Renewable energy policy and development. v. 39, n. 7, p. 4235–4252.

XAVIER, Marcos Vinícius Eloy et al. Energy scenarios for the Minas Gerais State in Brazil: an integrated modeling exercise using System Dynamics. **Energy, Sustainability and Society**, v. 3, n. 1, p. 17, 2013.

YAO, L.; CHANG, Y. Energy security in China: A quantitative analysis and policy implications. **Energy Policy**, abr. 2014. v. 67, p. 595–604.

ZHAO, H. *et al.* Review of energy storage system for wind power integration support. **Applied Energy**, 2015. v. 137, p. 545–553.

ZHANG, Y et al. Multi-regional input–output model and ecological network analysis for regional embodied energy accounting in China. **Energy Policy**, v. 86, p. 651-663, 2015.

APÊNDICE A

Quadro 3 - Equacionamento das variáveis do modelo

(continua)

Tipo	Variável	Equação	Unidade	Numeração
	Demanda elétrica	$Demanda = \int_{t_0}^t (VDem) dt + Demanda_0$	TWh	8
	Capacidade Hidrelétrica	$CapH = \int_{t_0}^t (AC_H - RC_H) dt + CapH_0$	TWh	10
	Capacidade Termelétrica Biomassa	$CapB = \int_{t_0}^t (AC_B - RC_B) dt + CapB_0$	TWh	20
Estoque	Capacidade Energia Solar	$CapS = \int_{t_0}^t (AC_S - RC_S) dt + CapS_0$	TWh	21
	Capacidade Energia Eólica	$CapE = \int_{t_0}^t (AC_E - RC_E) dt + CapE_0$	TWh	22
	Capacidade Termelétrica Gás Natural	$CapT = \int_{t_0}^t (AC_T - RC_T) dt + CapT_0$	TWh	23
	Capacidade Nuclear	$CapN = \int_{t_0}^t (AC_N - RC_N) dt + CapN_0$	TWh	24
Fluxo	Variação da Demanda anual	$VDem = TV_{dem} * (Demanda - DELAY 1(Demanda, 1))$	Twh/ano	9
	Aumento da capacidade dos sistemas Hidrelétricos	$AC_H = AM_H (PV_H - DELAY 1(PV_H, 1))$	MW/ano	11

Quadro 3 - Equacionamento das variáveis do modelo

(continuação)

Tipo	Variável	Equação	Unidade	Numeração
	Redução da capacidade dos sistemas Hidrelétricos	$RC_H = DELAY 1(AC_H, 1) * Dep_H$	MW/ano	14
	Aumento da capacidade dos sistemas de Termelétricas de Biomassa	$AC_B = AM_B(PV_B - DELAY 1(PV_B, 1))$	MW/ano	25
	Redução da capacidade dos sistemas Termelétricos de Biomassa	$RC_B = DELAY 1(AC_B, 1) * Dep_B$	MW/ano	26
	Aumento da capacidade dos sistemas de energia Solar	$AC_S = AM_S(PV_S - DELAY 1(PV_S, 1))$	MW/ano	27
	Redução da capacidade dos sistemas de energia Solar	$RC_S = DELAY 1(AC_S, 1) * Dep_S$	MW/ano	28
Fluxo	Aumento da capacidade dos sistemas de energia Eólica	$AC_E = AM_E(PV_E - DELAY 1(PV_E, 1))$	MW/ano	29
	Redução da capacidade dos sistemas de energia Eólica	$RC_E = DELAY 1(AC_E, 1) * Dep_E$	MW/ano	30
	Aumento da capacidade dos sistemas de Termelétricas de Gás Natural	$AC_T = AM_T(PV_T - DELAY 1(PV_T, 1))$	MW/ano	31
	Redução da capacidade dos sistemas Termelétricos de Gás Natural	$RC_T = DELAY 1(AC_T, 1) * Dep_T$	MW/ano	32
	Aumento da capacidade dos sistemas nucleares	$AC_N = AM_N(PV_N - DELAY 1(PV_N, 1))$	MW/ano	33
	Redução da capacidade dos sistemas nucleares	$RC_N = DELAY 1(AC_N, 1) * Dep_N$	MW/ano	34

Quadro 3 - Equacionamento das variáveis do modelo

(continuação)

Tipo	Variável	Equação	Unidade	Numeração
	Taxa de variação anual da demanda	TV_{dem}	TWh/ano	35
	Planejamento de nova capacidade hidrelétrica	PNC_H	MW	36
	Políticas voltadas às hidrelétricas	$PV_H = \frac{((PNC_H - CapH_0) * \tanh(b_H * (ano - 2017) + c_H) + (PNC_H + CapH_0))}{2}$	MW/ano	13
	Atingimento Meta Hidrelétrica	AM_H	%	37
	Capacidade Hidrelétrica Atual	$CapH_0$	MW	38
Auxiliar	Geração Hidrelétrica	$G_H = CapH + \bar{t}_H$	Twh/ano	15
	Participação Hidrelétrica	$P_H = \frac{G_H}{G_{tot}}$	%	17
	Planejamento de nova capacidade Termelétrica de Biomassa	PNC_B	MW	39
	Políticas voltadas às Termelétricas de Biomassa	$PV_B = \frac{((PNC_B - CapB_0) * \tanh(b_B * (ano - 2017) + c_B) + (PNC_B + CapB_0))}{2}$	MW/ano	40
	Atingimento Meta Biomassa	AM_B	%	41
	Capacidade Biomassa Atual	$CapB_0$	MW	42

Quadro 3 - Equacionamento das variáveis do modelo

(continuação)

Tipo	Variável	Equação	Unidade	Numeração
	Geração Biomassa	$G_B = CapB + \bar{t}_B$	Twh/ano	43
	Participação Biomassa	$P_B = \frac{G_B}{G_{tot}}$	%	44
	Planejamento de nova capacidade de energia Solar	PNC_S	MW	45
	Políticas voltadas à energia Solar	$PV_S = \frac{((PNC_S - CapS_0) * \tanh(b_S * (ano - 2017) + c_S) + (PNC_S + CapS_0))}{2}$	MW/ano	46
	Atingimento Meta Solar	AM_S	%	47
Auxiliar	Capacidade energia solar atual	$CapS_0$	MW	48
	Geração Solar	$G_S = CapS + \bar{t}_S$	Twh/ano	49
	Participação Solar	$P_S = \frac{G_S}{G_{tot}}$	%	50
	Planejamento de nova capacidade de energia Eólica	PNC_E	MW	51
	Políticas voltadas à energia Eólica	$PV_E = \frac{((PNC_E - CapE_0) * \tanh(b_E * (ano - 2017) + c_E) + (PNC_E + CapE_0))}{2}$	MW/ano	52
	Atingimento Meta Energia Eólica	AM_E	%	53

Quadro 3 - Equacionamento das variáveis do modelo

(continuação)

Tipo	Variável	Equação	Unidade	Numeração
	Capacidade energia eólica atual	$CapE_0$	MW	54
	Geração Eólica	$G_E = CapE + \bar{t}_E$	Twh/ano	55
	Participação Eólica	$P_E = \frac{G_E}{G_{tot}}$	%	56
	Planejamento de nova capacidade Termelétrica de Gás Natural	PNC_T	MW	57
	Políticas voltadas às Termelétricas de Gás Natural	$PV_T = \frac{((PNC_T - CapT_0) * \tanh(b_T * (ano - 2017) + c_T) + (PNC_T + CapT_0))}{2}$	MW/ano	58
Auxiliar	Atingimento Meta Termelétrica	AM_T	%	59
	Capacidade Termelétrica Atual	$CapT_0$	MW	60
	Geração Termelétrica	$G_T = CapT + \bar{t}_T$	Twh/ano	61
	Participação Termelétrica	$P_T = \frac{G_T}{G_{tot}}$	%	62
	Planejamento de nova capacidade nuclear	PNC_N	MW	63
	Políticas voltadas à energia Nuclear	$PV_N = \frac{((PNC_N - CapN_0) * \tanh(b_N * (ano - 2017) + c_N) + (PNC_N + CapN_0))}{2}$	MW/ano	64

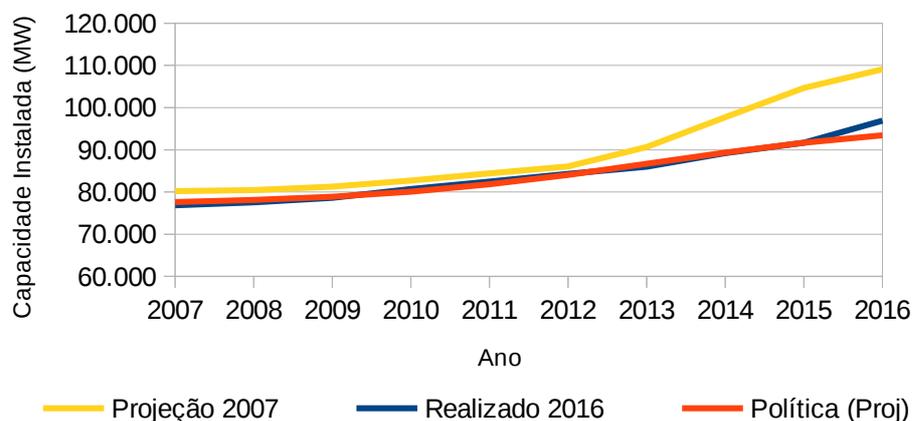
Quadro 3 - Equacionamento das variáveis do modelo

					(conclusão)
Tipo	Variável	Equação	Unidade	Numeração	
	Atingimento Meta Nuclear	AM_N	%	65	
	Capacidade Nuclear Atual	$CapN_0$	MW	66	
	Geração Nuclear	$G_N = CapN + t_N^-$	Twh/ano	67	
Auxiliar	Participação Nuclear	$P_N = \frac{G_N}{G_{tot}}$	%	68	
	Geração Total	$G_{tot} = G_H + G_B + G_S + G_E + G_T + G_N$	TWh	16	
	Diversidade	$DES = \frac{[(P_H * \ln(P_H)) + (P_B * \ln(P_B)) + (P_S * \ln(P_S)) + (P_E * \ln(P_E)) + (P_T * \ln(P_T)) + (P_N * \ln(P_N))]}{[\ln(6)]}$	%	18	
	Segurança	$Seguran\c{c}a = \frac{(G_H + G_R + G_{NR})}{Demanda}$	%	19	

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE B

Gráfico 27 - Capacidade hidrelétrica instalada entre 2006 e 2016 - Projeção, Realizado e Política

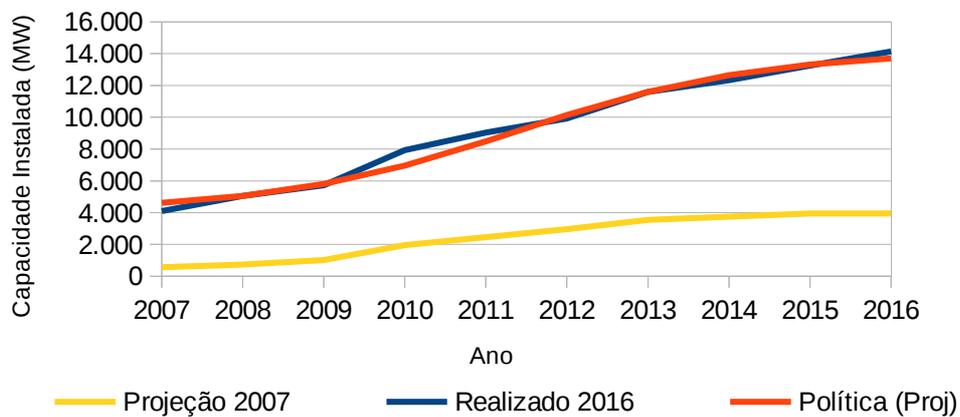


Ano	Projeção 2007	Realizado 2016	Política (Proj)
2007	80.193	76.869	77.607
2008	80.456	77.545	78.099
2009	81.243	78.610	78.885
2010	82.720	80.703	80.088
2011	84.386	82.459	81.813
2012	86.060	84.293	84.066
2013	90.686	86.018	86.679
2014	97.697	89.193	89.322
2015	104.660	91.650	91.650
2016	109.058	96.924	93.463

$$\text{Alcance} = \frac{\text{Realizado}}{\text{Projetado}} = \frac{96.924}{109.058} = 88,87\%$$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 28 - Capacidade de biomassa instalada entre 2006 e 2016 - Projeção, Realizado e Política

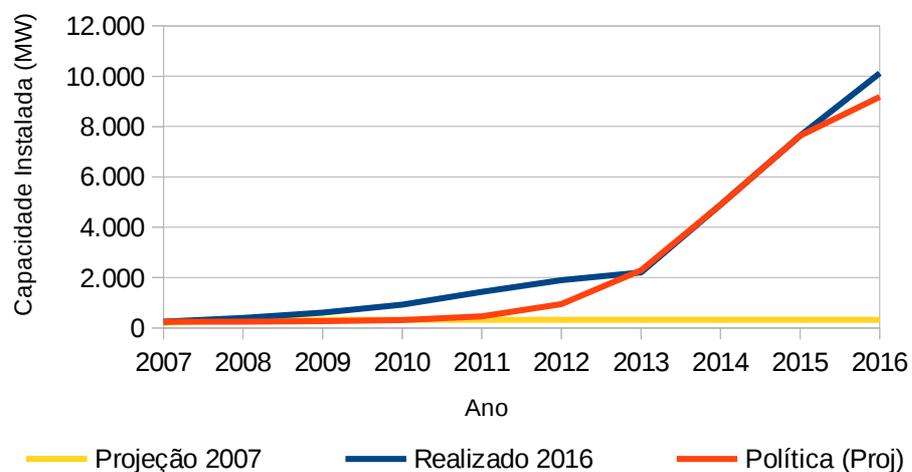


Ano	Projeção 2007	Realizado 2016	Política (Proj)
2007	570	4.103	4.614
2008	742	5.054	5.054
2009	1.021	5.717	5.804
2010	1.961	7.927	6.960
2011	2.464	9.028	8.488
2012	2.964	9.923	10.146
2013	3.544	11.601	11.601
2014	3.744	12.341	12.657
2015	3.944	13.257	13.323
2016	3.944	14.147	13.707

$$\text{Alcance} = \frac{\text{Realizado}}{\text{Projetado}} = \frac{14.147}{3.944} = 358,7\%$$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 29 - Capacidade eólica instalada entre 2006 e 2016 - Projeção, Realizado e Política

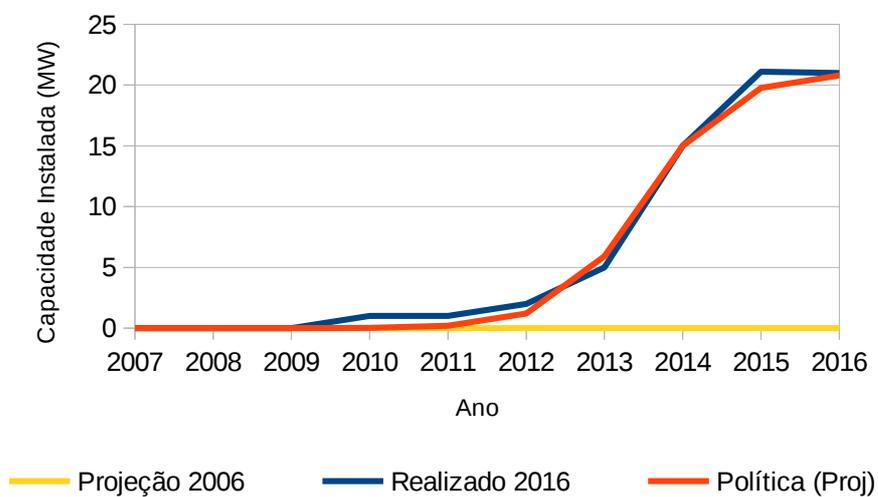


Ano	Projeção 2007	Realizado 2016	Política (Proj)
2007	208	247	249
2008	320	398	253
2009	320	602	266
2010	320	927	311
2011	320	1.426	463
2012	320	1.894	949
2013	320	2.202	2.291
2014	320	4.888	4.888
2015	320	7.633	7.633
2016	320	10.124	9.179

$$\text{Alcance} = \frac{\text{Realizado}}{\text{Projetado}} = \frac{10.124}{320} = 3163,75\%$$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 30 - Capacidade solar instalada entre 2006 e 2016 - Projeção, Realizado e Política

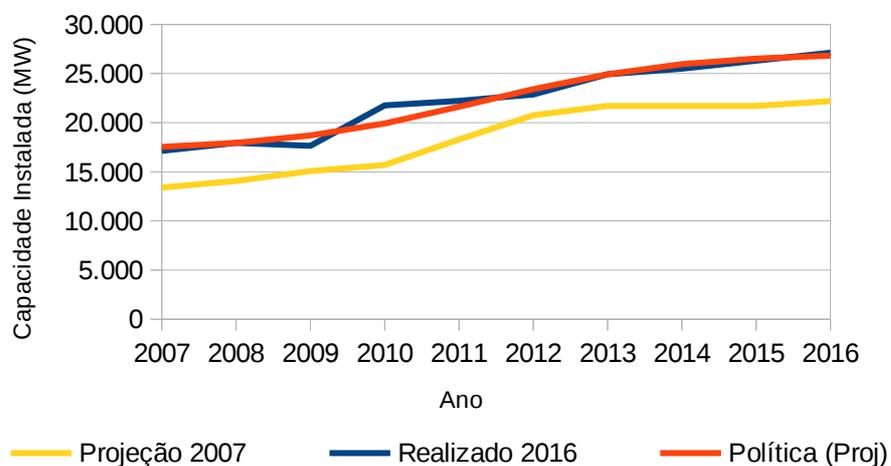


Ano	Projeção 2006	Realizado 2016	Política (Proj)
2007	0	0	0
2008	0	0	0
2009	0	0	0
2010	0	1	0
2011	0	1	0
2012	0	2	1
2013	0	5	6
2014	0	15	15
2015	0	21	20
2016	0	21	21

$$\text{Alcance} = \frac{\text{Realizado}}{\text{Projetado}} = \frac{21}{0} = \text{N/A}$$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 31 - Capacidade termelétrica instalada entre 2006 e 2016 - Projeção, Realizado e Política

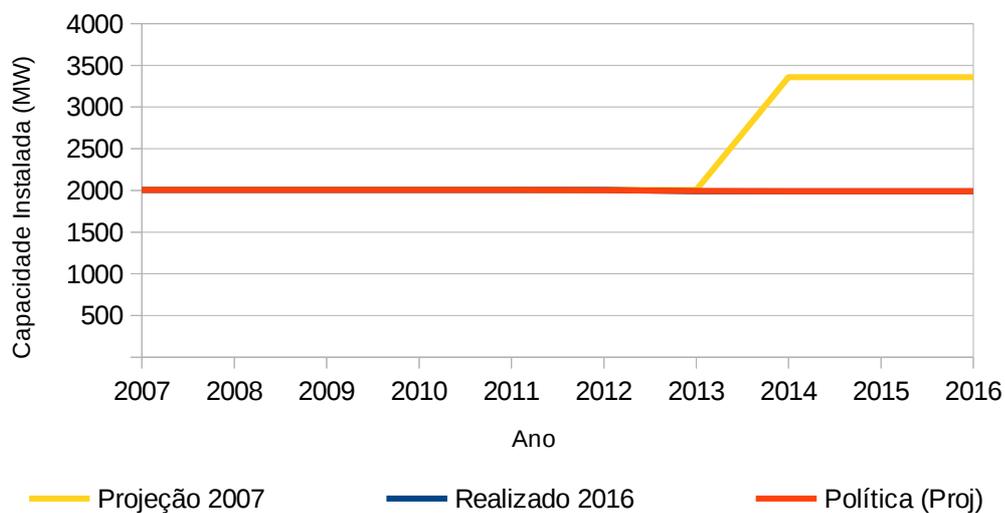


Ano	Projeção 2007	Realizado 2016	Política (Proj)
2007	13.393	17.126	17.536
2008	14.076	17.945	17.945
2009	15.080	17.633	18.697
2010	15.682	21.762	19.927
2011	18.278	22.215	21.610
2012	20.749	22.855	23.419
2013	21.699	24.927	24.927
2014	21.699	25.486	25.938
2015	21.699	26.307	26.520
2016	22.199	27.128	26.828

$$\text{Alcance} = \frac{\text{Realizado}}{\text{Projetado}} = \frac{27.128}{22.199} = 122,2\%$$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 32 - Capacidade nuclear instalada entre 2006 e 2016 - Projeção, Realizado e Política



Ano	Projeção 2007	Realizado 2016	Política (Proj)
2007	2007	2007	2.007,0
2008	2007	2007	2.007,0
2009	2007	2007	2.007,0
2010	2007	2007	2.007,0
2011	2007	2007	2.006,7
2012	2007	2007	2.003,6
2013	2007	1990	1.993,4
2014	3357	1990	1.990,3
2015	3357	1990	1.990,0
2016	3357	1990	1.990,0

$$\text{Alcance} = \frac{\text{Realizado}}{\text{Projetado}} = \frac{1990}{3357} = 59,28\%$$

Fonte: Elaborado pelo autor.