

O USO DA DINÂMICA DE SISTEMAS PARA APOIO AO PLANEJAMENTO ELÉTRICO BRASILEIRO

Filipe Rodrigues Nogueira Campos¹
Gisele de Lorena Diniz Chaves¹

¹*Universidade Federal do Espírito Santo*

DOI: <https://doi.org/10.47168/rbe.v25i1.421>

RESUMO

O consumo energético mundial vem mostrando padrões de crescimento sistemático, exigindo assim uma capacidade cada vez maior de produção e distribuição de energia elétrica. No cenário brasileiro, devido à alta participação hidrelétrica na matriz elétrica brasileira, diversos riscos podem incidir, o que requer o planejamento de expansão e diversificação desse setor. Dentre os modelos para planejamento de sistemas de energia, destacam-se os baseados em Dinâmica de Sistemas (DS). Este artigo verifica a existência de estudos envolvendo a aplicação do método de DS no planejamento do sistema elétrico nacional, com foco no uso de recursos energéticos renováveis (RER). O levantamento bibliográfico a partir da base Scopus, indica poucas publicações relacionadas ao cenário brasileiro, assim como envolvendo a segurança energética em modelos de DS em nível internacional. Dessa forma, este trabalho contribui ao propor um modelo inicial para análise dinâmica da diversidade e segurança do setor elétrico brasileiro baseando-se em RER.

Palavras-chave: Segurança do Suprimento Elétrico, Diversidade Energética, Recursos Energéticos Renováveis, Sistemas de Energia.

ABSTRACT

The world's energy consumption has been showing patterns of systematic growth, thus requiring an increasing capacity of production and distribution of electric energy. In the Brazilian scenario, due to the high hydroelectric participation in the Brazilian electricity matrix, several risks may be involved, which requires expansion planning and diversification of this sector. Among the models for planning of energy

systems, the ones based on System Dynamics (SD) stand out. This article verifies the existence of studies involving the application of the SD method in the planning of the national electric system, focusing on the use of renewable energy resources (RER). The literature review from the Scopus database indicates few publications related to the Brazilian scenario, as well as involving energy security in SD models at the international level. Thus, this work contributes to propose an initial model for dynamic analysis of the diversity and safety of the Brazilian electric sector based on RER.

Keywords: Electrical Supply Security, Energy Diversity, Renewable Energy Resources, Energy Systems.

1. INTRODUÇÃO

Os últimos anos registraram um crescimento sólido no uso global das energias renováveis, de forma a fornecer 28% da eletricidade global em 2018 e com projeções de alcançar 50% do fornecimento até 2050 (EIA, 2019). No entanto, mesmo com incentivos recentes para fontes alternativas de energia e políticas de eficiência energética, a participação dos combustíveis fósseis (tende a permanecer dominante no contexto global, caracterizado pelo crescimento econômico e pela segurança energética nacional ameaçada. Reduzir as emissões de GEE associadas à demanda e oferta de energia sem afetar a qualidade de vida da população mundial exige um grande esforço para, além de diversificar a matriz energética, mudar os padrões de consumo (UNEP, 2011).

A diversificação de recursos e fornecedores para a produção de eletricidade diminui o risco de fornecimento de energia (Mathiesen et al., 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 e Ross, 2003; IEA, 2007a).

À medida que as economias globais crescem, aumenta-se a concorrência pelos recursos naturais, fazendo com que várias nações coloquem a SSE como prioridade em sua agenda de desenvolvimento futuro. Para isso, planejamento é fundamental. No entanto, as constantes mudanças nos aspectos econômicos, políticos, demográficos, mercadológicos, tecnológicos, entre outros, aumentam a complexidade das decisões relacionadas ao uso da energia. Além disso, o horizonte de planejamento no setor energético é de longo prazo (Chaves e Tosta, 2016).

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 e Tosta, 2016). Por mais de 30 anos, a DS desempenhou um papel notável no desenvolvimento da política energética para muitos estados, empresas e países (Aslani et al., 2014; Ford, 1997).

Aslani et al. (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 dos RER sobre a segurança energética. Neste sentido, este estudo visa verificar se existem trabalhos na literatura que abordem os conceitos de segurança energética e diversidade no planejamento do sistema energético brasileiro por meio da utilização do método de DS e que envolvam RER.

Desta forma, uma análise da literatura foi realizada. Um levantamento das principais e mais atuais publicações relacionadas aos objetivos desta pesquisa foi realizado na plataforma Scopus. Esta base possui um espectro de periódicos expandido e recente, apresentando uma análise de citações mais rápida e ampla (Aghaei Chadegani et al., 2013). Foram pesquisados artigos 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 os temas deste artigo. Obteve-se 40.077 publicações relacionadas a energias renováveis (“renewable energy”). Desses, 723 trabalhos 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). Após leitura dos resumos, identificou-se que dos 25 artigos com aplicação direta do método de DS no planejamento energético com uso de RER, apenas cinco artigos apresentavam alguma relação com segurança energética.

Após esta introdução, a Seção 2 apresenta uma breve revisão bibliográfica a respeito do setor elétrico brasileiro, da importância do planejamento energético e dos conceitos e alguns indicadores de segurança do suprimento elétrico. As Seções 3 e 4 apresentam, respectivamente, uma revisão do método de dinâmica de sistemas e sua aplicação no planejamento do setor elétrico de maneira global, destacando os principais trabalhos publicados nesse segmento. Na Seção 5 é proposto um modelo preliminar para análise da segurança e diversidade do setor elétrico brasileiro utilizando o método de DS. Por fim são apresentadas as considerações finais desta pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O setor elétrico brasileiros

O Brasil abriga uma das matrizes energéticas mais renováveis do mundo, com 45,3% de energia proveniente desse tipo de fonte (EPE, 2019a). Em 2018, a geração de energia elétrica no país foi predominantemente composta por fontes de energia renovável distribuídas em 66,6% de hidrelétricas, 8,5% de biomassa e 7,6% de energia eólica e 0,5% solar. O gás natural e os produtos petrolíferos representam uma quota de 8,6% e 2,4%, respectivamente, enquanto os produtos do carvão representam 3,2% e nuclear 2,5% (EPE, 2019a). Esses percentuais fizeram com que o Brasil ocupasse, ainda em 2018, o terceiro lugar mundial em capacidade instalada baseada em energia renovável, atrás apenas da China e dos Estados Unidos. (REN21, 2019).

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 (entre 65 a 80% da energia elétrica provém da hidrelétrica nos últimos dez anos) (EPE, 2019), cuja expansão de capacidade instalada enfrenta sérios desafios. Além disso, sendo altamente dependentes 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 (Pao e 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. Desta forma, fica claro que a segurança do suprimento elétrico (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 de 3,2% entre 2019 e 2029 (EPE, 2019b), 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 (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 e Tosta, 2016). Entretanto, o caso brasileiro não reflete tais aspectos. Bajay (2013) aponta um alto nível de discordância (ou falta de coordenação) entre diversos agentes do setor elétrico brasileiro no que tange a planejamento, simulação, operacionalização e operação de longo prazo.

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.

Chaves e Tosta (2016) enfatizam a importância do suporte consistente de informações confiáveis que subsidiam técnicas e metodologias de planejamento. O planejamento energético deve ser capaz de acompanhar os aspectos políticos, econômicos, tecnológicos e culturais da sociedade, o que reforça a importância de escolher um bom método de planejamento para simulação dessas abordagens.

2.2 Planejamento Energético

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)

(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 e Bermann, 2002).

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, conforme determinado pela Constituição Brasileira de 1988 (Chaves e 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 e Bermann, 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.

2.3 Segurança do suprimento energético

Há, na literatura, diversas tentativas de definição de segurança do suprimento elétrico (SSE) e de elaboração de seus indicadores (Kruyt et al., 2009; Yao e Chang, 2014). Entretanto, a definição mais citada é um fornecimento confiável e adequado de energia a preços razoáveis (Chester, 2008; Sovacool e Mukherjee, 2011; Pfenninger et al., 2014). Alguns autores também incorporam um aspecto ambiental ao definir a SSE (Gouveia et al., 2014; Vera e Langlois, 2007).

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 abrangente, capaz de envolver toda a complexidade do conceito (Sovacool e Mukherjee, 2011).

A diversidade de fontes de energia é outro importante indicador de segurança por parte da oferta (Jansen et al., 2004) e a diversidade entre os fornecedores um indicador de segurança do mercado (IEA, 2007a). 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 et al. (2004) apontam os dois principais índices utilizados para medir a diversidade, destacando-se 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. Vários estudos aplicaram o índice de Shannon ou uma variação do mesmo para avaliar a diversidade de combustível (Pfenninger et al., 2014; Ranjan e Hughes, 2014).

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, 2007b). Jansen et al. (2004) baseiam a sua medida de estabilidade sociopolítica em 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 (Equação 1). Em seu estudo, Jansen et al. (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 et al., 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, 2007b).

De outro modo, Galarraga et al. (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 et al., 2012). Seu cálculo é demonstrado na Equação 2.

$$DES = - \left(\frac{\sum_{i=1}^N a_i \cdot \ln(a_i)}{\ln(N)} \right) \quad (2)$$

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 (Dybvig e 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 e Hughes, 2014).

Por fim, vale destacar o trabalho de Aslani et al. (2012), que implementa dois indicadores (sendo um deles o DES – Equação 2) para a verificação da segurança energética dos países nórdicos (Finlândia, Suécia, Noruega, Dinamarca e Islândia). O estudo desta região, em termos políticas de diversificação e promoção de RER, se mostra interessante devido às características regionais. Em outro trabalho, Aslani et al. (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.

3. MÉTODOS DE DINÂMICA DE SISTEMAS

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. As variáveis deste sistema 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 (Morecroft, 2015). A Figura 1, adaptada de Aslani et al. (2014), mostra os estágios de desenvolvimento da metodologia de dinâmica de sistemas.

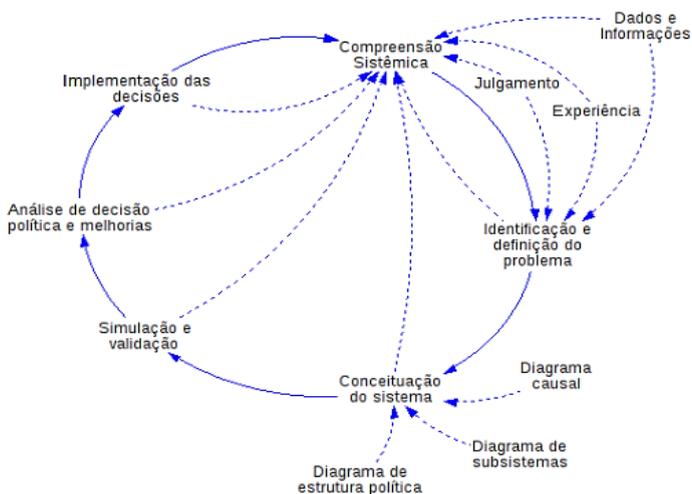


Figura 1 - Metodologia de Dinâmica de Sistemas

O método inicia com a identificação do sistema e a definição de seus limites e interfaces, ou seja, as limitações do sistema e o objetivo do estudo, bem como as variáveis de entrada e saída. Em seguida, o modelo conceitual é construído com o Diagrama de Causa e Efeito (DCE), que representa a relação causal entre as variáveis identificadas e ajuda a definir as hipóteses causais preliminares para simplificar a representação do sistema (Morecroft, 2015). Um DCE consiste em “variáveis conectadas por setas, denotando as influências causais entre as variáveis” (Sterman, 2000, p.138).

O detalhamento do sistema consiste no Diagrama de Estoque e Fluxo (DEF), ou seja, acumulação de recursos e a taxa de mudança dos recursos (Sterman, 2000). A partir dessa representação podem ser formuladas as expressões matemáticas (Morecroft, 2015). Uma das técnicas possíveis para solução do modelo é a simulação computacional que, a partir do DEF, configura as equações diferenciais numericamente resolvidas com auxílio de softwares especializados (Morecroft, 2015).

No estágio de verificação do modelo, o comportamento esperado para as condições estabelecidas é verificado. Feito isso, o tomador de decisão usa o modelo para criar diferentes cenários futuros para o sistema analisado (Senge, 2014). A análise de diferentes cenários permite a estruturação do problema o mais próximo possível da realidade, diminuindo as incertezas na tomada de decisão e maximizando a robustez da análise.

4. DINÂMICA DE SISTEMAS APLICADA AO PLANEJAMENTO ENERGÉTICO

Muitos trabalhos foram desenvolvidos com esta temática (Ford, 1997). Naill (1992), por exemplo, descreveu um exemplo emblemático: o modelo de política energética norte-americano chamado FOSSIL2/IDEAS, 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 modelo com o mesmo método, o Sistema de Modelagem de Energia Nacional (National Energy Modeling System – NEMS) (Backus e Amlin, 2009).

Xavier et al. (2013) apresentam uma extensa revisão a respeito dos modelos de análise e planejamento de sistemas integrados de energia, oferecendo maior destaque aos modelos Threshold 21 (T21), de Bassi (2010), e IMAGE/TIMER, de Van der Sluijs et al. (2002). O primeiro mostra-se um modelo causal-descritivo, em que a DS é empregada representando relações sociais, econômicas e ambientais. Esse modelo oferece uma abordagem complementar que permite avançar em direção a fluxos de energia ideais, ao mesmo tempo em que simula a interação de um grande número de ciclos de feedback com os principais fatores no restante da economia, da sociedade e do meio ambiente (Bassi e Shilling, 2010). Isso fornece informações úteis para análise e formulação de políticas (Morecroft, 2015).

Já o IMAGE/TIMER é um modelo de simulação que não otimiza os resultados do cenário durante um período de modelagem completo com base na previsão perfeita, mas simula as decisões de investimento ano a ano com base em uma combinação de informações bottom-up e regras específicas sobre investimento comportamento, substituição de combustível e tecnologia. A saída é uma imagem bastante detalhada de como a demanda de energia, os custos de combustível e as tecnologias de fornecimento concorrentes poderiam se desenvolver ao longo do tempo em várias regiões. Os principais insumos exógenos incluem crescimento do PIB, população, desenvolvimento tecnológico e esgotamento de recursos (Xavier et al., 2013).

Diferentemente do T21, o TIMER não leva em conta os feedbacks que ligam o setor de energia a outros (Xavier et al., 2013). Embora as incertezas envolvidas nesses feedbacks possam ser grandes, a falta de inter-relações entre os diferentes setores é uma limitação importante que não é abordada com modelos de otimização ou econométricos, razão pela qual o autor tenta propor uma abordagem mais abrangente das questões energéticas.

Alguns pesquisadores utilizaram a DS para avaliar a estrutura física dos sistemas de energia e criar diferentes cenários (Chi et al., 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 (Han e Yoshitsugu, 2008; Jin et al., 2009; Trappey et al., 2012; Feng et al., 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 na política energética em termos de segurança do abastecimento de energia (Chi et al., 2009; Huang e Liu, 2011; Shin et al., 2013; Xavier et al., 2013; Aslani et al., 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 e Reuveny, 2006; Aslani et al., 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 2, adaptada de Mediavilla et al. (2013, p. 298), 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.

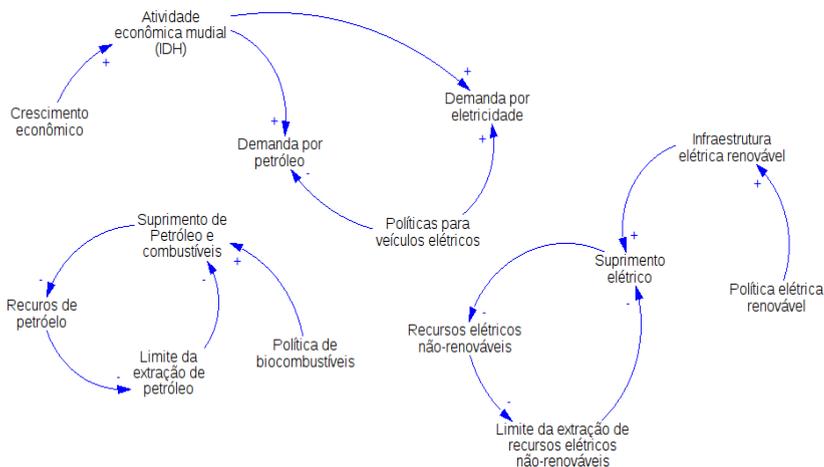


Figura 2 - Diagrama de causa e efeito da substituição dos combustíveis fósseis por renováveis

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 em 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 et al. (2010) destacam a aplicação de DS à análise de sistemas energéticos que utilizam combustíveis fósseis (Figura 3). 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, voltadas 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.

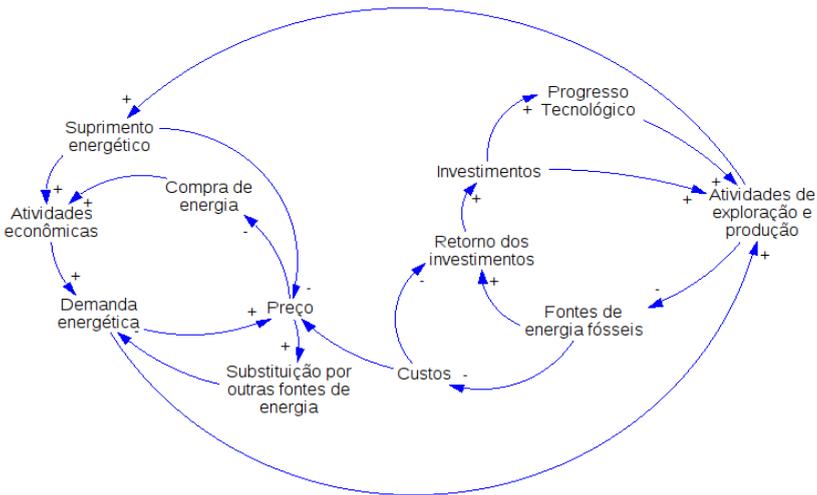


Figura 3 - Diagrama de cauda e efeito do setor de energia

Para obter uma visão significativa do comportamento em longo prazo dos mercados de energia liberalizados, Olsina (2005) propôs um modelo que envolve uma análise de seu comportamento em longo prazo, em que os preços e a confiabilidade da oferta em longo prazo são o centro de interesse, de acordo com a Figura 4.

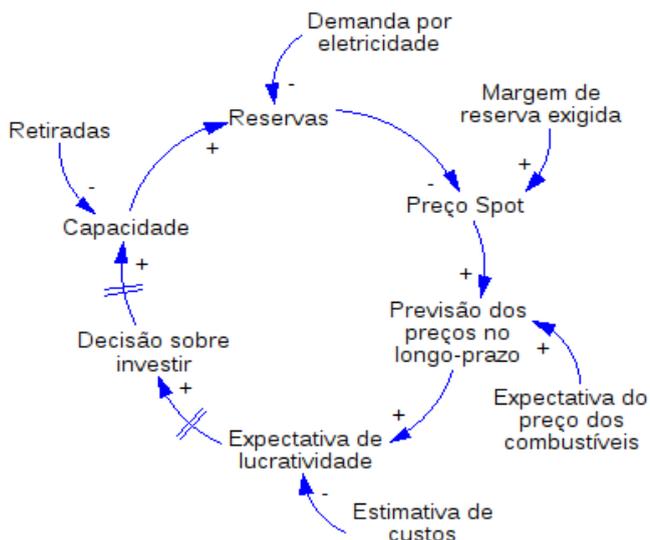


Figura 4 - Diagrama de causa e efeito para o mercado de energia

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 influencia 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 de investimentos futuros, influenciando no aumento da capacidade de produção no médio ou longo prazo.

Aslani et al. (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 5), que é avaliado por meio de três cenários para as políticas de energias renováveis

do setor energético de um país, apresenta um foco especial no papel das fontes renováveis, o que contribui para os objetivos deste artigo. 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. Neste sentido, a próxima seção apresenta um modelo preliminar aplicado à realidade brasileira.

5. PROPOSTA DE MODELO PARA O CASO BRASILEIRO

O estudo de Aslani et al. (2014) forneceu 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 et al. (2014), propõe-se para o caso brasileiro, relacionar as políticas de RER para a geração de eletricidade sobre a diversidade e, consequentemente, a segurança de suprimento elétrico brasileiro. As variáveis de interesse para essa análise e suas relações podem ser visualizadas na Figura 6, que representa o diagrama de causa e efeito do papel da energia renovável para a SSE no Brasil.

Deve-se levar em consideração que a população e o crescimento econômico afetam positivamente o PIB de um país (Lee e 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 e, por consequência, a demanda de energia aumentará (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 (Aslani et al., 2014).

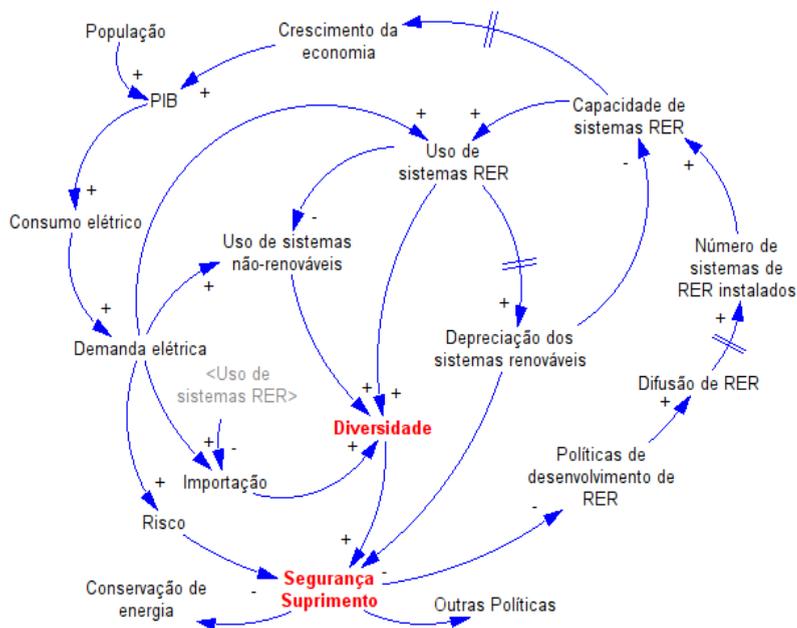


Figura 6 - Diagrama de causa e efeito do papel da energia renovável para a SSE no Brasil

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

Essas políticas envolvem elementos distintos e complementares, 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 et al., 2012; Kiani et al., 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. O comportamento de atraso no tempo relativo a essas variáveis é representado, na Figura 6, por duas retas perpendiculares ("||") às setas de indicação de relação.

O aumento da capacidade instalada baseada em RER permite um maior uso desses sistemas para suprimento elétrico, não só aumentando a diversidade e, conseqüentemente, a segurança energética no curto prazo, como proporcionando oportunidades para criação de empresas e empregos que promovem crescimento econômico e bem-estar social em longo prazo. 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 (Aslani et al., 2014).

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

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 em um modelo a ser simulado, de modo a se estabelecer as fronteiras do sistema estudado e, posteriormente, as equações sobre as quais serão simulados cenários.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Muitos países se esforçam para serem eficazes na gestão do abastecimento de energia. Neste sentido, a segurança do fornecimento de energia é caracterizada como um sistema complexo por sua importância e vários encadeamentos. À medida que a análise estratégica e política dos problemas de energia está se tornando mais complexa e difícil de gerenciar, a abordagem de modelagem de dinâmica de sistemas oferece uma importante contribuição para o planejamento do setor de energia. 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, partindo da verificação da existência de trabalhos envolvendo o método de DS como apoio ao planejamento energético brasileiro. Evidenciou-se apenas um trabalho em periódicos de alcance internacional que avalia o setor de energia pelo método de dinâmica de sistemas. Em função dos benefícios deste método no planejamento do setor público e casos já publicados de aplicação em outros países, este artigo propôs um modelo preliminar aplicável ao cenário nacional de geração elétrica. Para

pesquisas futuras, o diagrama criado pode servir de base para a criação do DEF para equacionamento e simulação de cenários de diversidade e segurança do setor elétrico brasileiro.

Espera-se que este estudo seja precursor de pesquisas futuras que envolvam os desafios do planejamento do setor energético por meio da DS. O planejamento energético carece de ferramentas adequadas que orientem, de forma mais técnica, a tomada de decisões envolvendo a complexidade dos elementos inerentes a este setor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGHAEI CHADEGANI, A.; SALEHI, H.; YUNUS, M.; FARHADI, H.; FOOLADI, M.; FARHADI, M.; ALE EBRAHIM, N.. A Comparison between Two Main Academic Literature Collections: Web of Science and Scopus Databases. *Asian Social Science*, Vol. 9, No. 5, pp. 18-26, April 27, 2013.

ASLANI, A. Private sector investment in renewable energy utilisation: strategic analysis of stakeholder perspectives in developing countries. *International Journal of Sustainable Energy*, v. 33, n. 1, p. 112-124, 2014.

ASLANI, A.; ANTILA, E.; WONG, K. V. Comparative analysis of energy security in the Nordic countries: The role of renewable energy resources in diversification. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, v. 4, n. 6, p. 062701, 2012.

ASLANI, A.; HELO, P.; NAARANOJA, M. Role of renewable energy policies in energy dependency in Finland: System dynamics approach. *Applied Energy*, v. 113, p. 758-765, 2014.

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*, v. 16, n. 4, p. 1977-1987, 2012.

BACKUS, G.; AMLIN, J. A history of making energy policy. In: *The 27th International Conference of the System Dynamics Society*. Albuquerque, New Mexico. 2009.

BAJAY, S. V. Integrating competition and planning: a mixed institutional model of the Brazilian electric power sector. *Energy*, v. 31, n. 6-7, p. 865-876, 2006.

_____. Evolução do planejamento energético no Brasil na última década e desafios pendentes. *Revista Brasileira de Energia*, Itajubá, v. 19, n. 1, p. 255-266.

BASSI, A. M. Evaluating the use of an integrated approach to support energy and climate policy formulation and evaluation. *Energies*, v. 3, n. 9, p. 1604-1621, 2010.

BASSI, A. M.; SHILLING, John D. Informing the US energy policy debate with Threshold 21. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 77, n. 3, p. 396-410, 2010.

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

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*, v. 29, n. 1-2, p. 109-132, 2008.

CHAVES, G. L. D.; TOSTA, M. C. R. Planejamento governamental do setor energético no Brasil. In: CHAVES, Gisele L. D.; TOSTA, Marielce 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. In: *Second International Association for Energy Economics (IAEE) Asian Conference: Energy Security and Economic Development under Environmental Constraints in the Asia-Pacific Region*. Curtin University of Technology, 2008. p. 97-122.

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

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*, v. 76, n. 3, p. 339-357, 2009.

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*, v. 24, p. 9-20, 2013.

CONNOLLY, D.; LUND, H.; MATHIESEN, B. V.; LEAHY, M. A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. *Applied Energy*, v. 87, n. 4, p. 1059-1082, 2010.

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

EIA. *International Energy Outlook*. [S.l.]: US Energy Information Administration (EIA), 2019.

EPE. Balanço Energético Nacional. Brasil: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2019a. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.697.7835&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 02 maio 2020.

_____. Plano Decenal de Expansão de Energia 2029. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2019b. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-423/topico-481/02%20Demandada%20de%20Energia.pdf>>. Acesso em: 02 maio 2020.

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*, v. 252, p. 44-52, 2013.

FORD, A. System dynamics and the electric power industry. *System Dynamics Review: The Journal of the System Dynamics Society*, v. 13, n. 1, p. 57-85, 1997.

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

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

GOUVEIA, J. P.; DIAS, L.; MARTINS, I.; SEIXAS, J.. Effects of renewables penetration on the security of Portuguese electricity supply. *Applied Energy*, v. 123, p. 438-447, 2014.

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

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

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

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

JANSEN, J. C.; ARKEL, W. V.; BOOTS, M. G. Designing indicators of long-term energy supply security. 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*, v. 68, n. 12, p. 2938-2949, 2009.

KIANI, B.; MIRZAMOHAMMADI, S.; HOSSEINI, S. H. A survey on the role of system dynamics methodology on fossil fuel resources analysis. *International Business Research*, v. 3, n. 3, p. 84, 2010.

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

KRUYT, B.; VAN VUUREN, D. P.; DE VRIES, H. J.; GROENENBERG, H. Indicators for energy security. *Energy policy*, v. 37, n. 6, p. 2166-2181, 2009.

LEE, Chien-Chiang; CHANG, Chun-Ping. Energy consumption and GDP revisited: a panel analysis of developed and developing countries. *Energy Economics*, v. 29, n. 6, p. 1206-1223, 2007.

LINS, M. E.; OLIVEIRA, L. B.; DA SILVA, A. C. M.; ROSA, L. P.; PEREIRA JR, Amaro O. Performance assessment of alternative energy resources in Brazilian power sector using data envelopment analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 1, p. 898-903, 2012.

LUCENA, A. F. P.; CLARKE, L.; SCHAEFFER, R.; SZKLO, A.; ROCHE-DO, P. R.R.; NOGUEIRA, L. P. P.; DAENZER, K.; GURGEL, A.; KITOUS, A.; KOBER, T. Climate policy scenarios in Brazil: A multi-model comparison for energy. *Energy Economics*, v. 56, p. 564-574, 2016.

MEDIAVILLA, M.; DE CASTRO, C.; CAPELLÁN, I.; MIGUEL, L. J.; ARTO, I.; FRECHOSO, F. The transition towards renewable energies: Physical limits and temporal conditions. *Energy Policy*, v. 52, p. 297-311, 2013.

MORECROFT, J. DW. *Strategic modelling and business dynamics: a feedback systems approach*. John Wiley & Sons, 2015.

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

OLSINA, F. *Long-term dynamics of liberalized electricity markets*. Universidad Nacional de San Juan, 2005.

PAO, Hsiao-Tien; FU, Hsin-Chia. Renewable energy, non-renewable energy and economic growth in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 25, p. 381-392, 2013.

PEARCE, D.; WEBB, M. Rural electrification in developing countries: a reappraisal. *Energy Policy*, v. 15, n. 4, p. 329-338, 1987.

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.

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

REN21. Renewables 2019: Global status report. REN21 Secretariat, 2019. Disponível em: <https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf> Acesso em 04 de maio de 2020.

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

SANTOS, M. J.; FERREIRA, P.; ARAÚJO, M.; PORTUGAL-PEREIRA, J.; LUCENA, A. F. P.; SCHAEFFER, R. Scenarios for the future Brazilian power sector based on a multi-criteria assessment. *Journal of Cleaner Production*, v. 167, p. 938-950, 2017.

SENGE, P. M. The fifth discipline fieldbook: Strategies and tools for building a learning organization. Crown Business, 2014.

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

SILVA, M. V. M.; BERMANN, C. O planejamento energético como ferramenta de auxílio às tomadas de decisão sobre a oferta de energia na zona rural. Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural, 2002.

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

STERMAN, J. D. Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world. 2000.

STIRLING, A. On the economics and analysis of diversity. Science Policy Research Unit (SPRU), Electronic Working Papers Series, Paper, v. 28, p. 1-156, 1998.

TEUFEL, F.; MILLER, M.; GENOESE, M.; FICHTNER, W. Review of System Dynamics models for electricity market simulations. KIT Scientific Publishing, 2013.

TRAPPEY, A. J. C.; TRAPPEY, C. V.; LIN, G. Y. P.; CHANG, Yu-Sheng. The analysis of renewable energy policies for the Taiwan Penghu island administrative region. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 1, p. 958-965, 2012.

UNEP. *Towards a green economy: Pathways to sustainable development and poverty eradication*. [S.l.]: United Nations Environment Programme (UNEP), 2011.

VAN DER SLUIJS, J. P. et al. Uncertainty assessment of the IMAGE/TIMER B1 CO₂ emissions scenario, using the NUSAP method. Dutch National Research Programme on Global Air Pollution and Climate Change, Report No. 410, v. 200, p. 104, 2002.

VENTOSA, M.; BAILLO, Á.; RAMOS, A.; RIVIER, M. Electricity market modeling trends. *Energy policy*, v. 33, n. 7, p. 897-913, 2005.

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

VON HIPPEL, D.; SUZUKI, T.; WILLIAMS, J. H.; SAVAGE, T.; HAYES, P. Energy security and sustainability in Northeast Asia. *Energy policy*, v. 39, n. 11, p. 6719-6730, 2011.

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

XAVIER, M. V. E.; BASSI, A. M.; DE SOUZA, C. M.; BARBOSA FILHO, W. P.; SCHLEISS, K.; NUNES, F. 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*, v. 67, p. 595-604, 2014.

ZHANG, Y.; ZHENG, H.; YANG, Z.; SU, M.; LIU, G.; LI, Y. Multi-regional input-output model and ecological network analysis for regional embodied energy accounting in China. *Energy Policy*, v. 86, p. 651-663, 2015.

ZHAO, H.; WU, Q.; HU, S.; XU, H.; RASMUSSEN, C. N. Review of energy storage system for wind power integration support. *Applied Energy*, v. 137, p. 545-553, 2015.