



## Avaliação do custo sistêmico total da geração de energia eólica em face da substituição das fontes hidrelétrica e termoeétrica considerando as externalidades socioeconômicas e ambientais

*Evaluation of the total systemic cost of wind power generation in face of the replacement of hydroelectric and thermoelectric sources considering socioeconomic and environmental externalities*

Guilherme Sperling Trapp<sup>1</sup>  
Luis Henrique Rodrigues<sup>1</sup>

**Resumo:** O mercado de geração de energia está em contínua expansão no Brasil. Este mercado é formado por diferentes fontes de geração de energia, as quais acarretam diferentes impactos socioeconômicos e ambientais atrelados às suas operações. Estes impactos geram externalidades na forma de dano para a sociedade e a compensação destes não é de consenso comum entre os atores envolvidos. Neste sentido, o presente artigo busca, com a aplicação do método do pensamento sistêmico, criar um modelo computacional de dinâmica de sistemas que possibilite a avaliação do custo sistêmico total, considerando as externalidades, da geração de energia. Para este fim, foi aplicada uma adaptação do método do PSPC – Pensamento Sistêmico e Planejamento por Cenários. Na primeira fase, gerou-se um entendimento maior sobre a temática. Em seguida, realizou-se a construção do modelo computacional e, por fim, o modelo foi aplicado a três usinas reais a fim de se fazer uma avaliação da inserção da energia eólica em face da substituição das fontes hidrelétrica e termoeétrica a carvão. Os resultados obtidos apresentaram uma evolução no entendimento na comparação do real custo da energia para a sociedade, devido ao aprendizado proporcionado pela utilização do pensamento sistêmico em conjunto com a modelagem dinâmica de sistemas. Os dados encontrados também apontaram para uma mudança nas decisões sobre a matriz energética, se adotado um custo sistêmico para avaliação de novos projetos.

**Palavras-chave:** Pensamento sistêmico; Custo sistêmico total; Externalidades da geração de energia; Modelagem dinâmica de sistemas; Tomada de decisão.

**Abstract:** *The power generation market has been under constant expansion in Brazil. This market consists of different sources of power generation, which carry different socioeconomic and environmental impacts linked to their operations. These impacts generate externalities in the form of damage to society, and their compensation is not of common consensus among stakeholders. In this sense, through the application of the systems thinking method, this article aims to create a computer model of system dynamics that enables the evaluation of the total systemic cost, considering the externalities of power generation. To this end, an adaptation of the STSP – Systems Thinking and Scenario Planning method was applied. In the first phase, a greater understanding of the subject was raised. Subsequently, there was the construction of the computational model. Finally, the model was applied to three real plants in order to assess of the integration of wind power in face of the replacement of hydroelectric and thermal (coal) sources. The results show an evolution in the understanding on the comparison of the actual cost of energy to society due to the learning provided by the use of systems thinking in conjunction with the dynamic modeling of systems. The findings also indicate a change in the decisions about the energy matrix, if a systemic cost for evaluating new projects is adopted.*

**Keywords:** *Systems thinking; Total systemic cost; Power generation externalities; System dynamics modeling; Decision-making.*

<sup>1</sup> Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção e Sistemas – PPGEPS, Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, Avenida Unisinos, 950, Cristo Rei, CEP 93022-000, São Leopoldo, RS, Brasil, e-mail: lhr@unisinos.br; guigatrapp@gmail.com

Recebido em Fev. 4, 2016 - Aceito em Maio 23, 2016

Suporte financeiro: CAPES.

## 1 Introdução

Energia, água e ar são elementos essenciais para a sobrevivência humana. A dinâmica mundial trouxe um momento em que há evolução constante da indústria e tecnologia; esta evolução é fomentada, em grande parte, pela disputa econômica entre empresas e nações. Deste modo, a energia apresenta-se como um dos fatores fundamentais para que se tenha atingido este cenário e, à medida que a sociedade avança, avança também o montante de energia necessário.

Em vista disso, há um contínuo e consequente aumento dos parques geradores de energia. De acordo com Rafaj & Kypreos (2007), um empreendimento de geração de energia produz impactos negativos ao ambiente, gerando um custo que muitas vezes não é contabilizado de forma integral no custo total da geração de energia. O custo sistêmico total é composto pelos custos interno e externo, sendo este último não contabilizado e referente aos impactos gerados e não compensados

O custo sistêmico total é adotado para comparar estratégias de intervenção, repousando sobre a avaliação dos custos monetários relativos aos resultados que são expressos em moeda diferente de dinheiro, que tem o seu valor calculado por uma função matemática desenvolvida particularmente para cada caso, chegando-se assim a um valor econômico (Jensen et al., 2015). Este valor corresponde ao quanto seria desembolsado em ações para compensar os impactos gerados. Deste modo, o conceito do custo sistêmico total é formado pela soma do custo tradicional com o valor monetário correspondente a todos os impactos, positivos ou negativos, gerados pela organização e suas operações.

Em sua pesquisa, Klaassen & Riahi (2007) afirmam que os maiores impactos geradores de custo externo estão relacionados às emissões de partículas no ar, o que também é considerado por Zhang et al. (2007) como gerador de custos externos relacionados ao dano da saúde humana no que diz respeito à emissão de poluentes e ao dano da mudança climática. De maneira geral, os custos internos são aqueles contábeis e considerados. Externalidade é o custo (ou benefício) gerado para uma terceira parte, resultando de uma atividade na qual esta terceira parte não está envolvida, e não é adequadamente compensada (ou cobrada) por este (Puma, 2011), assim sendo, o custo sistêmico total é a soma destes, e é apresentado em um valor monetário.

De acordo com Pereira et al. (2012), o mundo continua a consumir principalmente energia oriunda de combustível fóssil e, quando se fala em consumo final de energia, esta representa 79% da matriz energética mundial. Embora este modelo apresente inúmeros avanços econômicos e tecnológicos, caso não ocorra uma mudança e a sociedade continue seguindo as mesmas estratégias para fornecimento

de energia, possivelmente ocorrerão modificações nas estruturas climáticas, ecológicas e sociais com efeitos catastróficos para o ser humano (Allen & Varga, 2013).

Empreendimentos de energia renovável geralmente são tomados como sustentáveis e “amigos do meio ambiente” (Davidsson et al., 2012). No entanto, todas as atividades que o humano executa na concepção de um novo produto (bens e serviços) geram impacto ao ambiente, e isto também ocorre quando um novo empreendimento de geração de energia é construído (Varun et al., 2009). Porém, a falta de uma contabilização dos impactos gerados – para um comparativo com diferentes fontes de energia - pode trazer distorção nas decisões referentes à avaliação impacto-benefício (Mahapatra et al., 2012).

Do ponto de vista acadêmico, Davidsson et al. (2012) concluem em seus estudos que existem muitas controvérsias sobre a avaliação dos impactos gerados pela energia eólica. Este impasse impacta na contabilização do custo sistêmico. Ainda segundo este mesmo autor, há muitos estudos sobre o mesmo tema que utilizam metodologias distintas, e não se sabe qual seria a maneira melhor de abordar esta temática. O estudo também conclui que temas mais relevantes para estudo da cadeia de energia eólica são o uso de recursos, energia e materiais.

Além disto, a modelagem dos impactos nos sistemas de geração de energia é dotada de limitações e incertezas, que estão ligadas (entre outros motivos) à distribuição da receita, variações tecnológicas e diferenças regionais (Rafaj & Kypreos, 2007). Abordando o futuro da pesquisa na área energética, Jansson & Fülöp (2013) concluem que pesquisas que avaliem o uso sustentável de recursos naturais devem ser de alta prioridade para governo, universidades e indústrias.

Neste contexto acadêmico, e visando a um futuro em que se faz necessária maior acurácia nas decisões sobre matriz energética para atender à crescente demanda de energia, necessitam-se avaliações que estabeleçam a melhor relação de custo benefício na opção por determinada fonte de energia. Esta avaliação deve considerar o custo sistêmico total, analisando não só os aspectos socioeconômicos e ambientais mas também seus impactos para as organizações. Todos estes tópicos se mostram relevantes à medida que vêm sendo discutidos, porém, ao serem unificados, encontra-se uma lacuna para a qual o presente estudo pretende contribuir.

Diante do exposto, o objetivo geral deste estudo é criar um artefato que possibilite a avaliação do custo sistêmico total, considerando as externalidades da geração de energia. Servindo, assim, de apoio à tomada de decisão sobre investimentos em matriz energética.

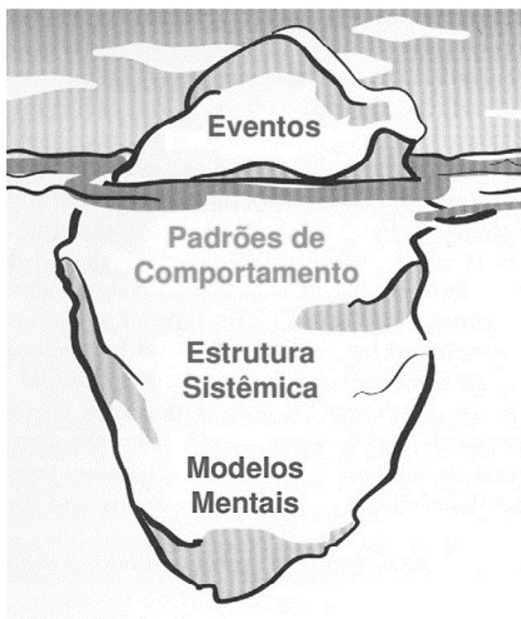
## 2 Referencial

### 2.1 Princípios do pensamento sistêmico

O Pensamento Sistêmico é uma forma de conceituar a maneira como se percebe a complexidade do mundo ou, no caso, uma situação específica. Com esta técnica é possível – por meio de relações lógicas – descrever um mundo complexo de forma coerente. O Pensamento Sistêmico une a visão do individual e coletivo na busca do aprendizado sobre situações complexas, para que seja possível criar estratégias que levem em direção aos resultados buscados. A utilização do pensamento sistêmico desenvolve capacidades que provocam novos níveis de percepções, sensibilidade e consciência (Sterman, 2002).

A sua utilização vem ao encontro da busca de melhor percepção humana da realidade. Esta realidade é estruturada em camadas, que requerem diferentes níveis de percepção. Com uma visão superficial, é possível enxergar esta realidade, adotando-se a metáfora do *iceberg*, apenas a ponta do *iceberg*. À medida que se adotam instrumentos mais elaborados de percepção, como modelos que representem a realidade (Pidd, 2003), vai se avançando em níveis de conhecimento e o *iceberg* passa a ser visualizado melhor. Estes níveis de percepção são ilustrados na Figura 1, que mostra a metáfora do *iceberg* para a percepção da realidade de acordo com Andrade et al. (2006).

Em um primeiro nível, estão os **eventos** que ocorrem e são percebidos pelas pessoas envolvidas. A percepção de eventos é característica da natureza humana, e, por meio desta, as pessoas explicam



**Figura 1.** Níveis da realidade ilustrados pela metáfora do iceberg. Fonte: Andrade et al. (2006).

situações e reagem a elas (Andrade et al., 2006; Morandi et al., 2013).

Entretanto, estes eventos são evidências da variação dos **padrões de comportamento** da realidade descrita e, para avançar a percepção, é necessário analisar as tendências ao longo do tempo e verificar as suas implicações.

O próximo nível busca explicar quais as causas dos comportamentos observados e remete à compreensão da **estrutura sistêmica** da realidade. Por mostrar como as variáveis se influenciam, este é o nível mais rico e traz a compreensão do que pode ser alterado para mudar os comportamentos indesejáveis ou levar a um comportamento desejável.

Segundo Andrade et al. (2006), qualquer sistema pode ser explicado por estes níveis, porém, nos sistemas que envolvem a sociedade, há um nível de complexidade a mais que remete ao que as pessoas carregam em suas mentes. Os **modelos mentais** são os responsáveis pela tomada de decisão nas mais diversas áreas e, devido à sua forte influência nas estruturas, é necessário identificar estes modelos e entendê-los para que assim seja possível modificá-los (Sterman, 2002).

Desta forma, o Pensamento Sistêmico traz um aprendizado que leva a mudanças efetivas sobre uma determinada situação. Assim diz Senge (2004) apud Morandi (2008, p. 41): “o pensamento sistêmico é uma disciplina para ver o todo. É um quadro referencial para ver inter-relacionamentos, ao invés de eventos: para ver os padrões de mudança, em vez de fotos instantâneas”

### 2.2 Dinâmica de sistemas

A dinâmica de sistemas (*System Dynamics*) é uma técnica focada na utilização de modelos computacionais dinâmicos para simular determinada realidade e seu comportamento com o passar do tempo. Entre as principais aplicações estão relacionadas energia e meio ambiente (Forrester, 2007).

Uma de suas características é elucidar aquilo que é não é intuitivo. Uma vez que a mente humana tem certas limitações, ao se deparar com situações de maior complexidade, tem a tendência de concluir respostas baseadas na intuição. Em grande parte dos modelos dinâmicos simulados, as conclusões são surpreendentes por mostrarem resultados totalmente diferentes do que se pensava (Andrade et al., 2006).

A Dinâmica de Sistemas – DS vem sendo utilizada em diversos estudos na área de energia, impactos socioeconômicos e ambiental, e externalidades. Cepeda & Finon (2013) fazem uma proposição para compensação das externalidades geradas por usinas eólicas. Já Shih & Tseng (2014) usam a Modelagem Dinâmica de Sistemas - MDS para fazer uma avaliação do benefício social de uma política energética sustentável envolvendo energias renováveis e eficiência energética, entre outros, a

exemplo dos estudos feitos por (Ansari & Seifi, 2012; Arbault et al., 2014; Elliott et al., 2010; Liu & Burns, 2011; Liuguo et al., 2012; Movilla et al., 2013; Stasinopoulos et al., 2011; Wu et al., 2011). A DS Também é considerada uma importante ferramenta que ajuda a entender a complexidade de decisões políticas e seus efeitos (Sterman, 2002), por esta razão, a Dinâmica traz importantes contribuições para esta pesquisa, como acontece no estudo de Streimikiene & Alisauskaite-Seskiene (2014), em que utilizam a MDS para avaliar os custos externos das diferentes opções de geração de energia para seu país.

### 2.3 Custos de geração e externalidades

A energia é gerada para a sociedade, e o seu custo sistêmico total para esta é composto por custos internos (diretos e indiretos) e externalidades. Por vezes, é difícil compreender estes custos de forma isolada, a exemplo do sistema brasileiro de geração de energia, que, quando em ambiente regulado, tem um mercado baseado na forma de leilões. Estes custos são acompanhados por investidores e não consideram as externalidades (Custódio, 2013).

Embora exista uma tendência de adoção do custo sistêmico no futuro - a começar pela internalização dos danos ambientais - as externalidades são cercadas de muitas incertezas, e sua contabilização na ordem de valores monetários ainda não é dotada de um método universalmente aceito (PRI, 2011). Assim, as comparações entre diferentes fontes de energia não são feitas com base em seus custos totais, ou seja, não levam em conta as externalidades.

### 2.4 Custo externo

O custo externo é composto pelas externalidades geradas para a sociedade. As externalidades podem ser percebidas gerando um custo ou receita. Custo, quando a atividade gera um impacto sobre o ambiente, e receita, quando a atividade gera um benefício. Estas externalidades se manifestam de diversas formas, como degradação ambiental, poluição atmosférica, saúde humana, impactos visuais, ruídos, alteração da fauna, impactos econômicos e alterações sociais (Georgakellos, 2010; Rentizelas & Georgakellos, 2014; Puma, 2011).

A energia elétrica é oriunda de diferentes fontes, e cada uma destas fontes possui impactos socioeconômicos e ambientais diferentes, logo, suas externalidades também são diferentes (Larkin, 2013). Diversos pesquisadores têm estudado o valor monetário destas externalidades para diferentes fontes de energia (Carlson, 2002; Costs, 2011; Kosugi et al., 2009; Rafaj & Kypreos, 2007; Shindell, 2013). Porém estes valores são dotados de incertezas e não levam em consideração aspectos locais, referindo-se à região sul do Brasil. Uma das formas de se estimar este

impacto é a metodologia de Análise de Ciclo de Vida (ACV), ou em inglês, *Life Cycle Analysis (LCA)*.

### 2.5 Incorporação das externalidades no custo da energia

Nos empreendimentos de energia, o custo pelo qual a energia será produzida é muitas vezes calculado com base na implementação dos projetos. Em se tratando do mercado regulado de energia do Brasil, o preço é indicador-chave para tomada de decisão na composição da matriz energética, já que este funciona por meio de leilões.

Os modelos atuais de cálculo do custo da energia elétrica não consideram a totalidade das externalidades geradas pelos impactos ocasionados pela geração desta energia (Elliott et al., 2010). Modelos apropriados de custo de energia deveriam incluir os débitos ambientais ocasionados, e também débitos e créditos socioeconômicos causados pelos empreendimentos. Acredita-se que, ao considerar estes custos (e benefícios), eles possam ser incorporados gradualmente ao preço final da energia. Essa atitude traz um melhor conhecimento sobre o real custo da energia para a sociedade. Consequentemente, poderão se tomar melhores decisões sobre as políticas energéticas (Elliott et al., 2010).

A fim de buscar uma análise global do equilíbrio de sistemas de energia, deve-se utilizar uma abordagem que trate dos impactos da internalização dos custos externos originados na produção de energia. Esta abordagem deve impor taxas adicionais na geração de eletricidade, estas taxas são um reflexo do dano local gerado ao ambiente, saúde, mudanças climáticas, risco de acidentes, lixo, ruído, e outros impactos (Rafaj & Kypreos, 2007).

Em um estudo de análise da internalização dos custos externos, Georgakellos (2010) relata que os custos externos chegam a um valor que é igual a 70% do custo médio da produção de energia para o caso de termoelétricas movidas a carvão (custo somente associado às emissões do CO<sub>2</sub>). Desta forma, o autor conclui que há um grande impacto do custo externo gerado pela produção de energia sobre as decisões de matriz energética.

A incorporação das externalidades foi o tema estudado pela pesquisa de Streimikiene & Alisauskaite-Seskiene (2014), em que afirmaram que este é o mais importante critério ambiental para a tomada de decisão dos sistemas elétricos. Ainda foi feita uma estimativa dos custos externos gerados por cada fonte e uma comparação entre elas. Segundo os dados da pesquisa, as fontes renováveis são as que menos causam externalidades. Neste sentido, ao adotar o custo sistêmico total para geração de energia, pode-se obter uma avaliação comparativa das vantagens entre a fonte de energia. E, por meio desta ferramenta, o mercado brasileiro de energia poderá sofrer algumas alterações.

### 3 Método

Com o intuito de organizar a pesquisa em uma ordem lógica de raciocínio e satisfazendo os objetivos propostos sem limitar-se a uma pesquisa explicativa e descritiva, este estudo adotou o método *Design Science Research* (DSR). Este método visa à construção do conhecimento por meio da criação de um artefato, podendo ser utilizado para projetar soluções (Lacerda et al., 2013; Van Aken, 2004).

A situação de interesse refere-se à avaliação da contabilização dos custos externos que decorrem da escolha por determinada matriz energética. O conhecimento obtido a respeito dos custos externos visa possibilitar um entendimento sobre o real custo da geração de energia elétrica, considerando os custos externos, e assim um melhor posicionamento diante das decisões sobre as questões energéticas. Este estudo foi direcionado à fonte eólica de energia substituindo as fontes hidrelétrica e termoeletrica.

Optou-se por utilizar, para o desenvolvimento desta pesquisa, uma adaptação do método do Pensamento Sistêmico e Planejamento por Cenários (PSPC), assim como é proposto por Andrade et al. (2006). Esta opção foi feita pois o método traz um melhor conhecimento sobre a realidade, por meio do princípio da alavancagem, podendo assim gerar estratégias para o aprendizado; neste caso, decisões sobre matriz energética e suas externalidades.

Optou-se, em complemento ao PSPC, pela utilização da abordagem de Dinâmica de Sistemas. Esta abordagem vem sendo utilizada em diversas situações complexas desde seu surgimento, e sua abrangência está expandido à medida que a ciência avança. Dentre suas aplicações estão os temas de

sistemas de energia e ambiente, desenvolvimento sustentável, planejamento estratégico e tomada dinâmica de decisões, estando todos estes temas presentes neste estudo (Andrade et al., 2006; Forrester, 2007). A utilização conjunta destas abordagens já mostrou sucesso ao atingir os objetivos propostos por Morandi et al. (2013), que estudaram a dinâmica de precificação de minério.

O presente estudo se propõe a criar um artefato para ser utilizado em meio a um ambiente real da geração de energia e para identificação do real custo das decisões sobre matriz energética; esta lógica de pensamento segue o apresentado por Van Aken, (2004). O artefato resultante desta pesquisa é um modelo para o cálculo do custo da energia gerada por fonte eólica, considerando-se também as externalidades vinculadas a este tipo de empreendimento.

A fim de se atingirem os objetivos propostos, adotou-se um método de trabalho de múltiplos passos durante o desenvolvimento e análise desta pesquisa (Figura 2). Os passos são divididos em três fases principais: I - Entendendo a situação; II - Construindo o custo sistêmico; III - Avaliando o custo sistêmico nos diferentes cenários. O desenho do método de trabalho teve como objetivo organizar a sequência de atividades nesta pesquisa.

A descrição das fases do método de trabalho é detalhada a seguir:

**Fase I:** Nesta fase, ocorre a estruturação dos dados e informações que servirão de apoio para a construção do Modelo de Dinâmica de Sistemas.

**Passo 1 – Revisão da literatura:** Foi feita uma revisão bibliográfica, que teve como finalidade colocar o pesquisador em contato direto com o que está

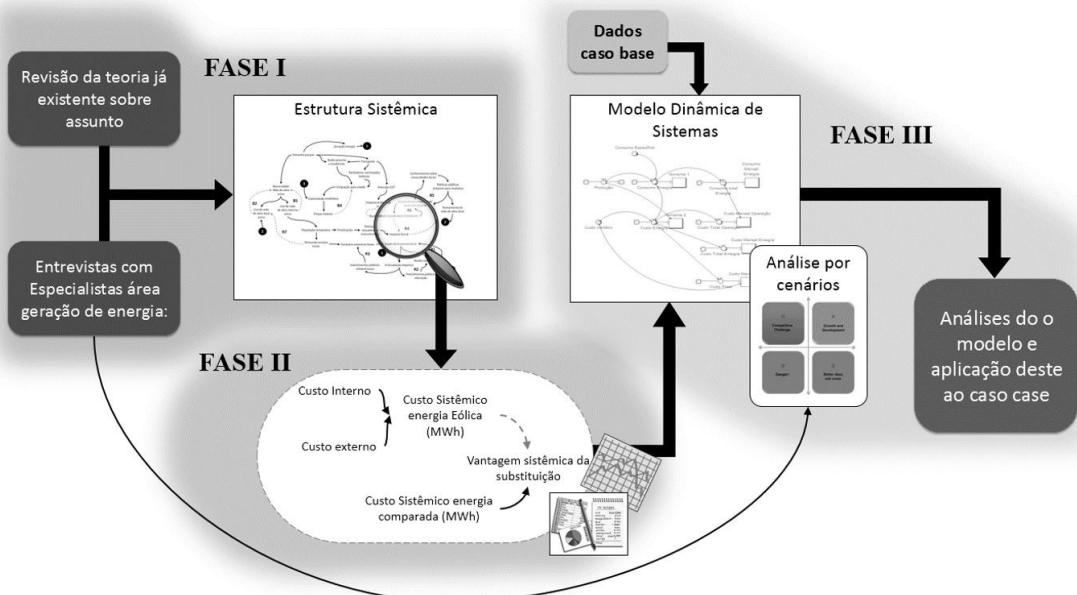


Figura 2. Macro fases do método de trabalho. Fonte: Elaborado pelo autor.

escrito sobre o assunto estudado, buscando verificar as possíveis e diferentes interpretações que cercam a temática. (Marconi & Lakatos, 2005).

**Passo 2 – Elaboração da entrevista semiestruturada:**

Nesta pesquisa, aplicou-se uma entrevista focal semiestruturada, que se assemelha a uma conversa informal e é norteada por um conjunto de perguntas. O roteiro da entrevista foi elaborado após análise da literatura selecionada, para que se obtivessem as informações relacionadas aos impactos socioeconômicos decorrentes de um empreendimento de geração de energia.

**Passo 3 – Seleção dos entrevistados:** Com base nas áreas de estudo que a pesquisa contemplaria, definiram-se os perfis dos especialistas que deveriam ser entrevistados. O Grupo de especialistas selecionados foi composto por 11 profissionais, dentre eles: engenheiros de campo, gestores de projetos, pesquisadores e profissionais da área de geração de energia ambiental que atuam diretamente com a implantação de empreendimentos de geração de energia.

**Passo 4 – Aplicação das entrevistas:** A entrevista está focada na temática dos impactos socioeconômicos e ambientais durante o ciclo de vida do empreendimento e todos os custos percebidos acerca destes projetos. Cada entrevista durou aproximadamente 50 minutos. As entrevistas foram gravadas, analisadas e, a seguir, foram ouvidas novamente, a fim de se atingir uma compreensão mais aprofundada do conteúdo por meio da inferência e interpretação. Como resultado de cada uma das entrevistas, obteve-se uma lista dos eventos relacionados com a situação de interesse das variáveis que explicam estes eventos e também dos fatores que possuem correlação em seus comportamentos.

**Passo 5 – Construção da estrutura sistêmica:**

Uma vez elaborada a lista de eventos das entrevistas, construiu-se um mapa de relações causais entre os fatores identificados e suas relações apontadas pelos especialistas. Em um segundo momento, cada uma das entrevistas foi transcrita em uma Estrutura Sistêmica - ES, para representar as reais relações entre os fatores. A partir disso, elaborou-se uma estrutura única que foi construída inicialmente com relações baseadas na teoria aprendida durante a revisão da literatura, e que foi complementada com a adição de cada uma das estruturas que haviam sido transcritas das entrevistas. A ES foi apresentada para validação a um especialista do Pensamento Sistêmico, com experiência na área de Gestão e Manufatura há mais de 20 anos, atuando principalmente nos temas de Gestão Estratégica, Pensamento Sistêmico e Planejamento de Cenários, Pesquisa Operacional, Teoria das Restrições (TOC) e sincronização da produção, teoria das restrições e Pensamento Sistêmico. Depois de concluída a validação, foram feitas as correções na ES e assim foi concluída a Fase I.

**Fase II:** Nesta fase, ocorre a estruturação dos dados e informações que servirão de apoio para a construção do Modelo de Dinâmica de Sistemas.

**Passo 6 – Identificação de variáveis-chave e coleta de dados:** Nesta fase, o objetivo foi abstrair do mapa sistêmico as principais relações que explicam o custo sistêmico de um empreendimento de geração de energia, analisando os elementos do mapa um a um. Assim, foram identificadas as relações e enlaces que compõem o custo sistêmico da energia. As variáveis foram selecionadas quando consideradas de impacto relevante para a avaliação proposta, com base no aprendizado da literatura e entrevistas. Em seguida, iniciou-se a coleta de dados para compor as séries históricas destas variáveis e gerar um melhor entendimento sobre estas, analisando seu comportamento a longo prazo. As variáveis selecionadas e os dados obtidos foram utilizados para a construção do modelo computacional.

**Passo 7 – Construção do Modelo de Dinâmica de Sistemas:** De posse das variáveis e dados, e após uma avaliação da ES, definiram-se quais elementos desta estrutura melhor explicam o custo sistêmico da energia. Deste modo, construiu-se a função matemática, analisou-se como as variáveis se relacionam, e qual influência uma exerce sobre a outra. Este processo foi feito por modelagem matemática baseada em pesquisas na literatura e nos dados coletados para cada variável em específico. Estas funções foram então utilizadas no modelo de dinâmica de sistemas para a simulação computacional. Para esta etapa, foram utilizados conceitos da Análise do Ciclo de Vida (ACV) com o objetivo de identificar os impactos ambientais na geração de energia e posteriormente estimar seu custo para a sociedade. As relações entre as variáveis e também a monetarização de eventos não financeiros foram feitas com base nas relações apresentadas em outras pesquisas e pelos especialistas durante as entrevistas. Deste modo, construiu-se o modelo dinâmico de sistema, no qual os esforços foram aplicados na modelagem computacional da estrutura sistêmica. A modelagem por dinâmica de sistemas utilizou-se de fluxos e estoques para representar o comportamento do sistema. Foi necessário identificar quais variáveis são estoques e fluxos, e aplicar as relações matemáticas entre as variáveis e os enlaces realimentadores identificados na ES, construída na Fase I, na qual, utilizando-se dados e hipóteses levantadas, as relações foram estabelecidas e formalizadas.

**Passo 8 – Verificação do MDS:** Depois da conclusão do processo de modelagem dinâmica do sistema, dispõe-se do modelo de simulação que em cada rodada gera aprendizado sobre a situação de interesse. Primeiramente foi feito um teste piloto do modelo, de forma que foram imputados dados hipotéticos, e as relações foram conferidas uma a uma. As partes do modelo que apresentaram comportamento muito diferente do esperado, foram analisadas da

consistência de suas relações matemáticas. Assim, após corrigidas todas as inconsistências, o teste piloto foi concluído. A seguir, selecionaram-se dados de um caso de referência para as usinas, e estes foram imputados ao modelo a fim de verificar se este poderia representar a realidade. Os resultados gerados pelo modelo foram comparados a dados reais de usinas existentes. Os resultados foram submetidos a testes estatísticos, para se comprovar a representação da realidade. Ainda, o modelo foi apresentado a dois especialistas, e a um profissional que não participou da rodada de entrevistas, com formação superior em engenharia em energia, que atua com docência e elaboração de projetos de sistemas elétricos de geração de energia. Os especialistas interagiram com o modelo, aplicando inicialmente dados das usinas de referência. Em seguida, simularam situações extremas para os dados. Ao finalizarem os referidos testes, os dois especialistas emitiram seu parecer a respeito dos resultados gerados pelo modelo.

**Fase III:** Na fase final, foram definidos os cenários futuros a que se submeteria o modelo. A seguir, o modelo foi avaliado e foram realizadas as simulações dos cenários previstos. Por fim, foi feita uma análise do modelo, dos resultados e da pesquisa como um todo.

**Passo 9 – Construção dos cenários:** Neste ponto, são definidas as hipóteses para se construir um planejamento por cenários. Identificam-se as forças motrizes, que são baseadas na realidade e têm grande impacto na dinâmica da situação de interesse. Estas forças são geralmente externas. Então foram selecionadas as incertezas críticas e criados os possíveis cenários futuros, para verificar como se comportará o modelo num futuro próximo. O planejamento por cenários seguiu o proposto por Van Der Heijden (1996). Neste processo, as hipóteses e os cenários são baseados nas sugestões dos especialistas e na literatura pesquisada.

**Passo 10 – Aplicação do MDS:** Neste passo, são feitas diferentes rodadas de simulação para cada cenário projetado. São observados os padrões de comportamento para cada um dos cenários, e, assim, gera-se um entendimento sobre a situação de interesse. As informações do banco de dados foram imputadas ao modelo, e este executou as simulações. O período de simulação foi de 20 anos. Foram alterados os parâmetros de acordo com cada cenário, e as rodadas de simulação foram executadas e registradas.

**Passo 11 – Avaliação do modelo e seus resultados:** A simulação nos diversos cenários serve para avaliar as implicações e limitações do modelo. Também são feitos testes de comportamento estrutural do modelo, no que tange à adequação das fronteiras do modelo, à estrutura, consistência dimensional das relações matemáticas, parâmetros utilizados e comportamento sob condições extremas, que segue o proposto por Qudrat-Ullah & Seong (2010). Depois do teste, quando identificadas as inconsistências, volta-se à fase de desenvolvimento do artefato e, munido deste

conhecimento, são feitas as alterações necessárias no modelo.

### 3.1 Construindo a Estrutura Sistêmica (ES) do custo sistêmico total de geração de energia

Em um primeiro momento, para o entendimento do problema a ser abordado, analisaram-se artigos que se referem ao tema das externalidades da geração de energia, conforme apresentado nos capítulos anteriores. Também buscaram-se subsídios para entender quais os impactos identificados nas localidades em que estão instalados os parques geradores de energia, sendo estes por fonte eólica, hídrica ou térmica fóssil. Desta forma, selecionou-se uma gama de variáveis que melhor explicam a situação, vindo ao encontro dos dados da pesquisa. A ES foi construída gradualmente, e, na sequência, sua construção foi dividida em setores de acordo com a temática principal da qual tratavam as variáveis agrupadas. Os setores nos quais a ES foi dividida são: Negócio de geração de energia; Impactos econômicos; Impactos sociais; Impactos ambientais; Impactos à saúde humana local; Impactos ao sistema interligado nacional.

As relações apresentadas na estrutura sistêmica foram verificadas do ponto de vista teórico, sendo avaliado o conhecimento adquirido por meio das entrevistas e primordialmente sob a ótica do pensamento sistêmico. Esta verificação foi realizada por um especialista do Pensamento Sistêmico, que possui vasta experiência em pesquisas no setor de mineração e energia. A ES completa e revisada, apresentando todos os setores e a forma com que eles se relacionam, está representada na Figura 3. Esta ES serviu de subsídio para a construção do Modelo de Dinâmica de Sistemas – MDS.

### 3.2 Definindo as variáveis-chave

Os objetivos do MDS centram-se na identificação das variáveis internas e externas à produção de energia, resultando no cálculo do Custo Sistêmico Total da Energia Gerada. Cabe ressaltar que a ES desenvolvida e o próprio modelo são genéricos, ou seja, podem ser analisados por diversas fontes de geração de energia. Porém, neste estudo, as variáveis consideradas foram pensadas com relação à geração de energia eólica em comparação com térmica a carvão e hídrica.

O Modelo deve representar a realidade e suas tendências da forma mais precisa possível. Assim identificaram-se as variáveis mais relevantes para a situação de interesse, analisando-se os setores da ES e comparando-se com a literatura e informações obtidas na fase das entrevistas, sendo o Custo Sistêmico Total a variável central de maior importância, pois é este que se deseja mensurar.

Como visto anteriormente, o Custo Sistêmico Total é composto pelo custo interno e externo, e,

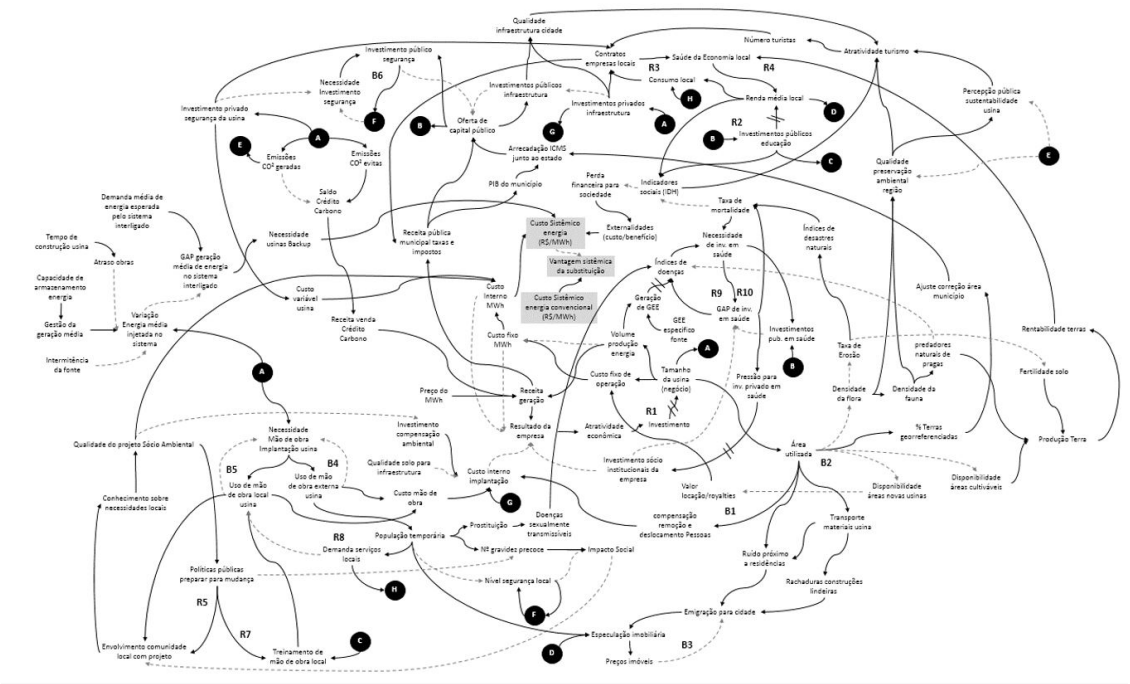


Figura 3. Estrutura Sistêmica completa da situação estudada. Fonte: Elaborada pelo autor.

a partir daí, selecionaram-se a principais variáveis que influenciam estas. Por exemplo, a variável Receita Pública, referente à arrecadação de taxas e impostos, visa ao entendimento da importância do valor arrecadado e o revertido para a mitigação dos impactos gerados. Seguindo esta lógica, as demais variáveis-chave que foram selecionadas são: Saldo de Emissões evitadas; Custo de Emissões de Gases de Efeito Estufa; Custo do dano da População Temporária; Custo da Necessidade de usinas de backup no Sistema Interligado; Receita da geração de energia; Volume de energia gerada; Custo da utilização de área para usina; Custo operacional da usina.

### 3.3 Construção do modelo de dinâmica de sistemas

A ES foi analisada e suas relações foram escritas para o modelo criado com a utilização do software de Modelagem de Dinâmica de Sistemas – MDS – *iThink*, versão 10.0.3. A modelagem matemática por trás do modelo foi feita com base em relações e dados estatísticos encontrados na literatura. O modelo foi todo construído em três dimensões, sendo uma para cada fonte de energia; desta forma, garantiu-se que o comparativo entre as fontes fosse feito sob os mesmos aspectos. De modo geral, é como se tivéssemos três modelos distintos, que rodam simultaneamente, e geram resultados diferentes para cada uma das fontes avaliadas para posterior comparativo.

O período de simulação foi definido com sensibilidade anual, uma vez que a geração renovável

é sazonal de ciclo anual (ANEEL, 2008; EPE, 2013; Marreco, 2007; Pereira et al., 2013). Além disso, o tempo definido de simulação foi de 20 anos, que é o prazo de fornecimento estipulado nos leilões para geração de energia no Brasil. O modelo dinâmico de sistemas final que foi utilizado para as estimativas deste estudo – e também para as simulações nos diferentes cenários – é apresentado na Figura 4.

As premissas e dados utilizados na construção do modelo são apresentadas na Tabela 1. Nesta tabela, estão representadas na primeira linha as fontes de energia e na primeira coluna, o nome do bloco do MDS e a unidade de medida.

### 3.4 Desenvolvimento e avaliação dos cenários

Na fase das entrevistas, uma das questões aplicadas foi: “Quais seriam, na sua opinião, as incertezas críticas sobre os cenários futuros no tratamento da internalização dos custos externos?”. As respostas obtidas nesta fase da entrevista foram utilizadas para construção dos cenários para as possíveis realidades futuras. Esta construção iniciou-se com a identificação das forças motrizes, cujo comportamento no futuro não é claro, e, por isso, são definidas como incertezas críticas, de acordo com o conceito apresentado por Schwartz (2006) apud (Rudibert, 2009). Foram identificadas 11 incertezas críticas; alguns exemplos são: Preço do crédito de carbono; Produto Interno Bruto – PIB nacional; Oferta de energia; Mudança na regulação de energia; entre outros.



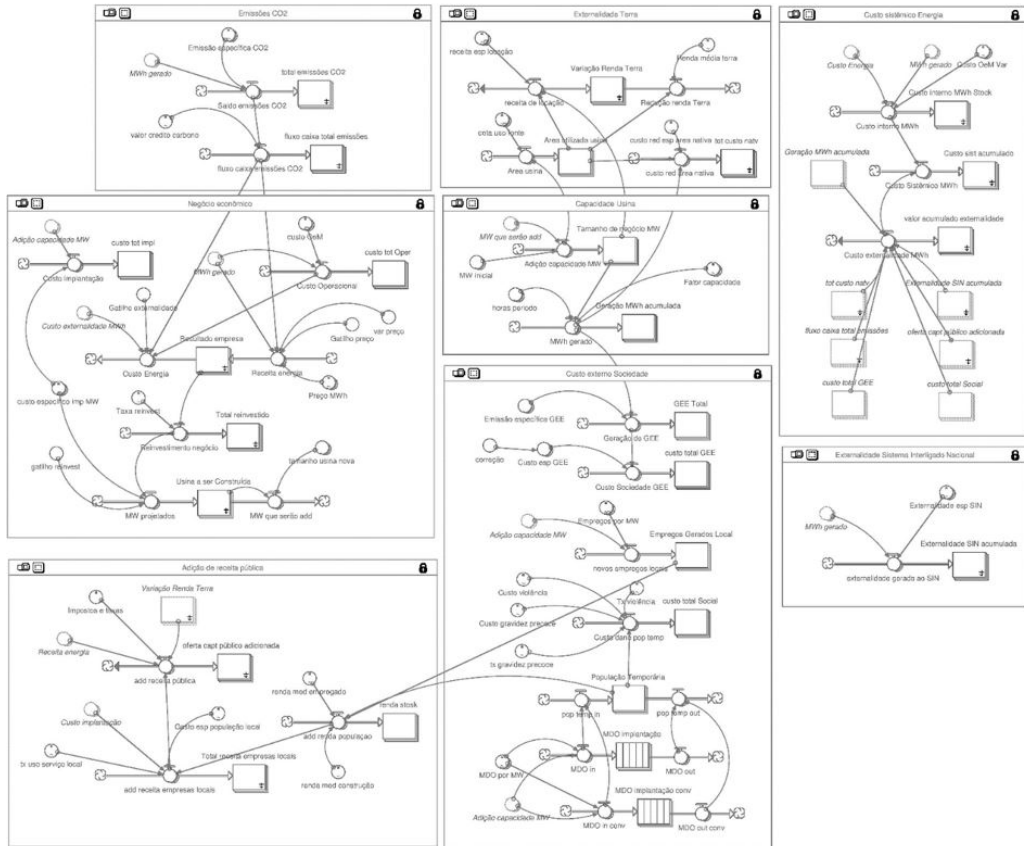


Figura 4. Modelo computacional de dinâmica de sistemas. Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 1. Dados utilizados para as relações no MDS.

Relação	Relações utilizadas no MDS			
	Unidade medida	Eólica	Hídrica	Térmica
Área inutilizada pela usina	MW/km2	50	8,65	406
Custo associado à intermitência	R\$/MWh	6,00	-	-
Custo associado à redução de área nativa	RS/km2/ano		166456,38	
Empregos gerados OeM	pessoa/MW	0,4	0,22	1,725
Estatística gravidezes Precoces	gravidezes/100mil habitantes		321,29	
Estatística mortes por violência	mortes/100 mil habitantes		80,9	
Gasto da renda localmente	%		56%	
Imposto municipal	%		2%	
Perda financeira da gravidez precoce	R\$/grávida/ano		15124,76	
Perda financeira de uma morte	RS/Morte/ano		162635,46	
Renda de terras cultiváveis	RS/km2/ano		130000	
Renda média OeM	R\$/ano/pessoa	27124,76		11136
Renda média população temporária	R\$/ano/pessoa		11136	
Vagas construção da usina	pessoa/MW	15,4	11,3	14,4
Valor em locação/royalties terra utilizada	R\$/km2/ano	7200	15061,14	-

Obs.: 1- Os valores em moeda foram reajustados anualmente em 5,4%, referentes ao valor médio do IPCA para o período de 2005 a 2014; 2- Quando apenas um valor representa o mesmo valor para todas as fontes. Fonte: (CDM, 2006, 2012; CES-FGV, 2013; CGTEE, 2014; EPE, 2014; Georgakellos, 2010; Marreco, 2007; Shih & Tseng, 2014; Simas, 2012; Streimikiene & Alisauskaitė-Seskiene, 2014; Tancredi & Abbud, 2013).

Foi realizada uma análise destas incertezas críticas e selecionaram-se duas (Figura 5). Seguindo os objetivos desta pesquisa, selecionou-se a incerteza “Internalização das externalidades”. Esta é a incerteza que compreende o custo sistêmico total, e é este que se pretendia avaliar. Para a segunda incerteza, elencou-se aquela que poderia ter o maior impacto para o mercado de geração de energia na opinião do pesquisador. Está opção ainda foi discutida com um especialista que possui experiência com planejamento por cenários, e este julgou apropriada esta segunda incerteza, que foi: preço da energia.

Para configuração dos cenários (Figura 5), foram considerados dois níveis extremos e, para a simulação, alteraram-se as incertezas entre estes níveis. Assim é possível verificar o impacto destas incertezas no resultado do negócio, e as consequências para a empresa no futuro. Para a internalização do custo externo, foram definidos os níveis de não se aplicar esta política, ou 0%, e aplicar esta política parcialmente, ou 50%, que foi considerado como internalizar 50% do custo sistêmico total. Este valor foi adotado, pois imagina-se que uma política desta magnitude seria implementada gradualmente. Para a incerteza do preço, foram definidos para o nível baixo, a continuação dos preços atuais, reajustados apenas ao IPCA anualmente.

Para o nível alto, foi definido um aumento de 20% sobre o preço atual corrigido pelo IPCA. Este valor foi definido com base nas tendências apontadas pelos especialistas.

Colocando-se as incertezas críticas sobre dois eixos perpendiculares, originou-se a formação de quatro quadrantes (Figura 5). Cada um destes quadrantes gera um cenário com os valores das incertezas de acordo com os eixos, por exemplo: o cenário 2 tem nível baixo de preço, e nível baixo de internalização do custo externo. Também são atribuídos nomes mnemônicos, sendo esta uma prática comumente adotada para facilitar a identificação do cenário com seu conteúdo (Andrade et al., 2006; Van Der Heijden, 1996). Os cenários foram projetados para enxergar 20 anos no futuro.

Os valores utilizados na incerteza crítica do preço da energia foram aplicados sobre o valor base do preço na energia, corrigidos ao índice de 5,4% ao ano ao longo dos anos.

Depois da criação dos cenários, estes foram implementados no MDS, aplicando-se aos dados das usinas reais para o comparativo do impacto da utilização do custo sistêmico total para o negócio. Os dados utilizados são apresentados na Tabela 2.

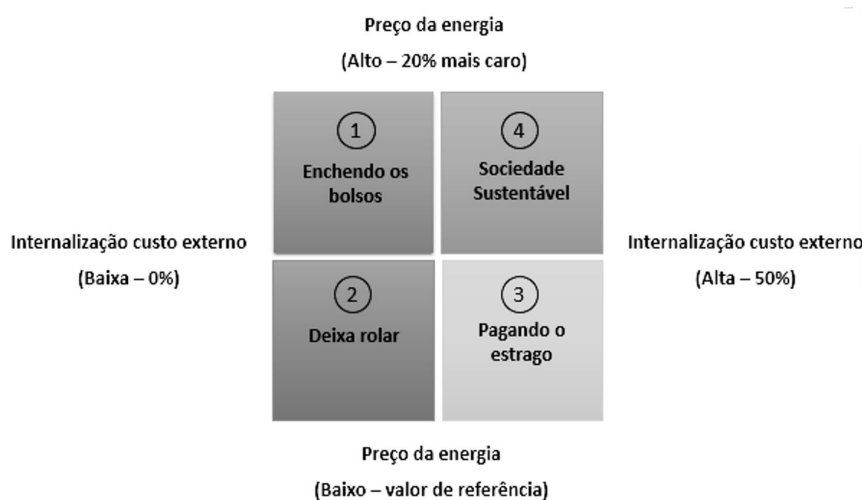


Figura 5. Construção dos cenários. Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2. Dados das usinas utilizados para realização dos cenários.

Dado de entrada	Banco de dados de entrada usina			
	Unidade	Eólica	Hídrica	Térmica
Tamanho da Usina	MW	100	100	350
Fator de Capacidade	%	39,8%	50,0%	83,0%
Custo O&M* **	R\$/MWh	99,8	129,2	167,9
Preço contrato de Energia*	R\$/MWh	136,08	161,97	201,98
Custo de Implantação	Milhões R\$/MW	4,497	1,995	2,940
Tempo amortização financiamento	anos	10	10	10
Vida útil considerada	anos	20	20	20

\*Valores referência inicial, reajustados a 5,4% ao ano. \*\* Este valor foi multiplicado por um fator de correção para simular a amortização do financiamento. Fonte: (CDM, 2006, 2012; CES-FGV, 2013; CGTEE, 2014; EPE, 2014; Marreco, 2007; Tancredi & Abbud, 2013).

## 4 Avaliação dos resultados da aplicação dos cenários

Os resultados obtidos nos cenários são válidos para as premissas adotadas (dados, relações e incertezas críticas) neste estudo, principalmente a contabilização dos custos externos, que representam a visualização do futuro para este contexto. O fato de que o modelo não foi validado quantitativamente evidencia que estes resultados são uma visualização de tendências, e não podem ser assumidos como totalmente precisos. Mesmo assim, é notável que exista uma tendência à viabilidade da adoção do custo sistêmico total para compor o custo da geração da energia nos cenários futuros, porém somente para as fontes renováveis abordadas neste estudo, como pode ser visto na Tabela 3, que mostra o resultado econômico dos empreendimentos ao final de cada cenário.

Para cada uma das fontes, calcularam-se as externalidades pelo MDS geradas em cada cenário. A externalidade da Receita pública adicionada é um benefício que a geração de energia causa para a sociedade, e este é maior para a térmica a carvão, especialmente em razão de esta ter um preço maior, o que causa maior arrecadação de tributos.

Analisando estas externalidades para as opções de energia, nota-se que cada uma das três fontes possui seus custos externos principais distribuídos em impactos distintos. A fonte eólica tem uma relevante externalidade contabilizada com os custos gerados ao Sistema Interligado Nacional – SIN, por conta da sua intermitência e também pela incapacidade de armazenamento de energia, sendo assim inviável fazer uma gestão da geração de acordo com a curva de carga do sistema, o que traz a necessidade de inserir usinas de *backup* no SIN e assim não ficar à mercê da intermitência dos ventos. Já para a hidroelétrica, há

um custo mais relevante no que tange ao dano causado pela redução de área nativa, devido ao alagamento do reservatório. Por fim, as termoelétricas têm suas externalidades quase que totalmente concentradas nas emissões de gases, e estas emissões apresentaram um alto custo para a sociedade, corroborando com demais pesquisas que abordam o tema das emissões (Kudelko, 2006; Rentizelas & Georgakellos, 2014; Streimikiene & Alisaukaite-Seskiene, 2014).

Estes diferentes impactos também afetam o custo sistêmico da energia de diferentes formas. Assim, dada as condições base de cada fonte e as condições em cada cenário, obtivemos números de custo sistêmico bastante diferentes (Tabela 4). Os resultados mostram uma vantagem para energia eólica em todos os cenários, pois obteve o menor custo sistêmico.

Observou-se ainda que a fonte eólica não apresentou externalidade de dano à área nativa. Este fato se deve às características do Rio Grande do Sul, onde as usinas eólicas estão situadas, na maior parte, em áreas de cultivo. Deste modo, as usinas reduzem as áreas cultiváveis e, por sua vez, a renda da terra e receita pública, sendo esta uma das causas pelas quais a usina eólica causa um menor benefício por conta da arrecadação.

É possível verificar que o dano social causado possui valores baixos para ambas as fontes. Este valor é ligeiramente maior para a fonte hídrica, devido ao fato de esta utilizar a maior mão de obra na sua construção civil.

Neste contexto, o presente modelo apresentou, em suas respostas, as emissões de GEE como a externalidade de maior impacto no custo sistêmico total. Mesmo que não se tenham obtido dados históricos para comparar e verificar quantitativamente o modelo nas questões das externalidades, ainda assim é possível inferir que as conclusões provenientes das análises dos cenários

**Tabela 3.** Comparação do resultado do negócio nos diferentes cenários.

FONTE	Resultado Acumulado para o negócio (milhões R\$/MW)*/**			
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Eólica	6,80	3,90	3,43	6,36
Hidroelétrica	8,91	4,58	4,01	8,38
Térmica a carvão	15,95	6,97	(-7,08)	1,97

\*Resultado ao final do período de 20 anos para cada MW de capacidade instalada. \*\*Valores representam a média dos 20 anos considerando os reajustes anuais. Fonte: Elaborado pelo autor.

**Tabela 4.** Comparativo do custo sistêmico nos diferentes cenários.

FONTE	Custo sistêmico médio (R\$/MWh)*/**			
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Eólica	153,81	153,81	160,72	160,37
Hidroelétrica	205,11	205,11	211,94	211,53
Térmica a carvão	258,77	258,77	358,30	357,79

\*Resultados ao final do período de 20 anos para cada MW de capacidade instalada. \*\*Valores representam a média dos 20 anos considerando os reajustes anuais. Fonte: Elaborado pelo autor.

tendem a representar uma visualização do futuro. O processo de construção e aplicação do modelo trouxe um melhor conhecimento dos fatores que influenciam o custo externo da geração de energia, como o fato de existirem emissões de GGE na geração eólica e hidroelétrica. Superficialmente, as emissões são associadas com a queima de combustível e, sob esta perspectiva, as fontes eólica e hídrica não poderiam gerar emissões. Porém, ocorrem emissões durante a sua concepção e também de seus componentes, pela decomposição de matéria orgânica, principalmente nos reservatórios, para o caso das hidroelétricas.

Cabe ressaltar novamente que estes achados referem-se especificamente ao contexto desta pesquisa, na qual foi simulada a adoção do custo sistêmico total, não podendo ser considerados para outra situação que não a descrita por esta pesquisa.

Ainda, foi possível verificar que para cada um dos cenários existe uma tendência de que a tomada de decisão - acerca dos investimentos no setor de geração de energia - será diferente, ou seja, cada cenário exigirá uma postura diferente em decorrência de suas implicações.

Embora o modelo tenha apresentado um comportamento dentro do esperado, acredita-se que uma modelagem mais detalhada, no que tange à composição dos custos operacionais e financeiros da geração de energia, poderia trazer maior riqueza na avaliação dos cenários. Quanto a isso, poderia ter se utilizado a perspectiva da oferta e demanda de energia no país e, assim, avaliar o mercado como um todo, considerando opções futuras de energia. O modelo foi concebido para representar o crescimento de cada negócio, mas, por este estar também vinculado à oferta, à demanda e a outras dinâmicas, optou-se por não utilizar esta funcionalidade, deixando o modelo estático quanto à sua capacidade de geração.

Acredita-se que este modelo possa transferir-se do mundo acadêmico para o mundo corporativo, pois, adaptando-se a uma avaliação real, em que se teria a disponibilidade de dados, seria possível fazer uma estimativa do custo sistêmico total e sobre este promover a tomada de decisão.

## 5 Conclusão

Os procedimentos desta pesquisa levaram à construção de um modelo de dinâmica de sistemas, suas relações e externalidades. Embora existam diversas pesquisas abordando essa temática, os estudos tratam em sua grande maioria de questões ambientais. Ainda que este aspecto seja o mais eminente, pela presente pesquisa, foi possível verificar que existem outros fatores, também importantes, a serem considerados à medida que o conhecimento avança.

O modelo construído admitiu a avaliação de três fontes de energia distintas e seu comportamento quando considerados os custos externos. Para as premissas deste estudo, avaliando o custo sistêmico

total, a fonte eólica apresentou a menor geração de custo externo entre as fontes analisadas. Também foi possível verificar, que a fonte térmica a carvão tende a não ser viável, considerando-se a contabilização das externalidades.

A aplicação do modelo computacional criado como ferramenta de avaliação do custo sistêmico total mostrou que, possivelmente, se estejam tomando decisões no campo energético baseadas em informações distorcidas do real custo para a sociedade. Assim, uma inserção do custo sistêmico total na política energética tende a alterar o padrão de decisões no setor energético.

Mesmo que o modelo não tenha sido validado matematicamente como propõe o pensamento sistêmico, verificaram-se as tendências e padrões de comportamento para as condições futuras. Nesse sentido, é provável que a adoção do conceito de custo sistêmico total não inviabilizaria todos os negócios de energia, porém, com a revelação de uma grande diferença nos impactos externos entre as fontes renováveis e fóssil, é possível que passe a se optar mais por uma do que pela outra.

Tendo em vista a complexidade das decisões e políticas do mercado energético, aliadas a uma necessidade de adaptação às novas formas de interação entre as organizações, o meio ambiente e a sociedade, esta pesquisa se mostrou relevante ao gerar aprendizagem e construir uma ferramenta que permitirá melhor avaliação das decisões futuras das organizações visando ao crescimento sustentável.

A principal limitação deste estudo refere-se à modelagem, visto que o modelo não foi validado matematicamente e, por isso, não pôde representar a realidade. Contudo, este modelo não é final e definitivo, permanecendo aberto a melhorias. Mesmo que a pesquisa tenha se limitado aos dados disponíveis para avaliação, a criação do modelo trouxe uma facilidade na importação de dados referentes a outras usinas.

As conclusões desta pesquisa ainda ficam limitadas à visão do grupo de especialistas, uma vez que o grupo não foi composto por representantes de todas as classes. Por fim, é importante expor que o modelo foi aplicado a três usinas distintas e às suas condições. Assim, os resultados ficam vinculados a estas.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES o suporte financeiro (bolsa de mestrado).

## Referências

- Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. (2008). *Atlas de energia elétrica do Brasil*. 3. ed. Brasília: ANEEL. 236 p.
- Allen, P., & Varga, L. (2013). Exploring possible energy futures for the UK: evolving power generation. *Emergence*, 15(2), 38-63.

- Andrade, L. A., Seleme, A., Rodrigues, L. H., & Souto, R. (2006). *Pensamento sistêmico: caderno de campo: o desafio da mudança sustentada nas organizações e na sociedade*. Porto Alegre: Bookman. 488 p.
- Ansari, N., & Seifi, A. (2012). A system dynamics analysis of energy consumption and corrective policies in Iranian iron and steel industry. *Energy*, 43(1), 334-343. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.04.020>.
- Arbault, D., Rivière, M., Rugani, B., Benetto, E., & Tiruta-Barna, L. (2014). Integrated earth system dynamic modeling for life cycle impact assessment of ecosystem services. *The Science of the Total Environment*, 472, 262-272. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.099>. PMID:24291626.
- Carlson, A. (2002). Energy system analysis of the inclusion of monetary values of environmental damage. *Biomass and Bioenergy*, 22(3), 169-177. [http://dx.doi.org/10.1016/S0961-9534\(01\)00066-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0961-9534(01)00066-6).
- Cepeda, M., & Finon, D. (2013). How to correct for long-term externalities of large-scale wind power development by a capacity mechanism? *Energy Policy*, 61, 671-685. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.046>.
- Clean Development Mechanism – CDM. (2006). *Ceran's 14 de Julho hydro power plant CDM project activity* (pp. 1-70). Bonn: CDM.
- Clean Development Mechanism – CDM. (2012). *Osório Wind Power Plant Project 2 (OWPPP2)*. Bonn: CDM. Recuperado em 5 de janeiro de 2015, de <http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/LRQA/Ltd1341480414.02/view>
- Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica – CGTEE. (2014). *Ficha técnica candiota III (fase C)*. Porto Alegre: CGTEE. Recuperado em 5 de janeiro de 2015, de <http://www.cgtee.gov.br/sitenovo/index.php?secao=37>
- Costs, O. E. (2011). Hidden costs of energy: Unpriced consequences of energy production and use. *AIP Conference Proceedings*, 1401(2011), 165-182.
- Custódio, R. S. (2013). *Energia eólica para produção de energia elétrica*. 2. ed. Rio de Janeiro: Synergia; Acta; Abeólica. 319 p.
- Davidsson, S., Höök, M., & Wall, G. (2012). A review of life cycle assessments on wind energy systems. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(6), 729-742. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-012-0397-8>.
- Elliott, R. J., Lyle, M. R., & Miao, H. (2010). A model for energy pricing with stochastic emission costs. *Energy Economics*, 32(4), 838-847. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2009.11.001>.
- Empresa de Pesquisa Energética – EPE. (2013). *Balço Energético Nacional 2013: ano base 2012*. Rio de Janeiro: EPE. Recuperado em 13 de janeiro de 2014, de [https://www.labsolar.ufsc.br/disciplinas/emc5489/arquivos/pdf/textos/2010/relatorio\\_final\\_BEN\\_2010.pdf](https://www.labsolar.ufsc.br/disciplinas/emc5489/arquivos/pdf/textos/2010/relatorio_final_BEN_2010.pdf)
- Empresa de Pesquisa Energética – EPE. (2014). *20º Leilão de energia nova A-5 resumo vendedor*. Rio de Janeiro: EPE. Recuperado em 13 de janeiro de 2014, de [http://epe.gov.br/leiloes/Documents/Leil%C3%B5es\\_2014/Resumo\\_Vendedor\\_20len\\_a5.pdf](http://epe.gov.br/leiloes/Documents/Leil%C3%B5es_2014/Resumo_Vendedor_20len_a5.pdf)
- Forrester, J. W. (2007). System dynamics: a personal view of the first fifty years. *System Dynamics Review*, 23(2), 345-358. <http://dx.doi.org/10.1002/sdr.382>.
- Fundação Getúlio Vargas. Centro de Estudos em Sustentabilidade – CES-FGV. (2013). *Propostas empresariais de políticas públicas para uma economia de baixo carbono no Brasil: Energia Elétrica*. Rio de Janeiro: CES-FGV.
- Georgakellos, D. A. (2010). Impact of a possible environmental externalities internalisation on energy prices: the case of the greenhouse gases from the Greek electricity sector. *Energy Economics*, 32(1), 202-209. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2009.05.010>.
- Jansson, P.; Fülöp, T. (2013). A sustainable energy future through education and research. In *G-20 Youth Forum Conference* (Report). Saint-Petersburg.
- Jensen, J. D., Lawson, L. G., & Lund, M. (2015). Systemic cost-effectiveness analysis of food hazard reduction: *Campylobacter* in Danish broiler supply. *European Journal of Operational Research*, 241(1), 273-282. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2014.08.025>.
- Klaassen, G., & Riahi, K. (2007). Internalizing externalities of electricity generation: an analysis with Message-Macro. *Energy Policy*, 35(2), 815-827. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2006.03.007>.
- Kosugi, T., Tokimatsu, K., Kurosawa, A., Itsubo, N., Yagita, H., & Sakagami, M. (2009). Internalization of the external costs of global environmental damage in an integrated assessment model. *Energy Policy*, 37(7), 2664-2678. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2009.02.039>.
- Kudelko, M. (2006). Internalisation of external costs in the Polish power generation sector: a partial equilibrium model. *Energy Policy*, 34(18), 3409-3422. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2005.01.005>.
- Lacerda, D. P., Dresch, A., Proença, A., & Antunes Júnior, J. A. V. (2013). Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. *Gestão & Produção*, 20(4), 741-761. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-530X2013005000014>.
- Larkin, A. (2013). *Environmental debt: the hidden costs of a changing global economy*. New York: St. Martin's Griffin.
- Liu, C. A., & Burns, J. R. (2011). Analysis of U. S. electricity generation using the tools of system dynamics. *International Journal of Business & Economics Perspectives*, 6(1), 17-31.
- Liuguo, S., Shijing, Z., & Jianbai, H. (2012). Pricing simulation platform based on system dynamics. *Systems Engineering Procedia*, 5(932), 445-453. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sepro.2012.04.067>.

- Mahapatra, D., Shukla, P., & Dhar, S. (2012). External cost of coal based electricity generation: a tale of Ahmedabad city. *Energy Policy*, 49, 253-265. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.06.014>.
- Marconi, M. A., & Lakatos, E. M. (2005). *Fundamentos de metodologia científica*. São Paulo: Atlas.
- Marreco, J. (2007). *Planejamento de longo prazo da expansão da oferta de energia elétrica no Brasil sob uma perspectiva da teoria das opções reais*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ.
- Morandi, M. (2008). *Entendimento da dinâmica da precificação de commodities através do pensamento sistêmico e do planejamento por cenários: uma aplicação no mercado* (Dissertação de Mestrado). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo.
- Morandi, M. I. W. M., Rodrigues, L. H., Lacerda, D. P., & Pergher, I. (2013). Foreseeing iron ore prices using system thinking and scenario planning. *Systemic Practice and Action Research*, 27(3), 287-306. <http://dx.doi.org/10.1007/s11213-013-9277-9>.
- Movilla, S., Miguel, L. J., & Blázquez, L. F. (2013). A system dynamics approach for the photovoltaic energy market in Spain. *Energy Policy*, 60, 142-154. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.04.072>.
- Pereira, A. O., Jr, Costa, R. C., Costa, C. V., Marreco, J. M., & La Rovere, E. L. (2013). Perspectives for the expansion of new renewable energy sources in Brazil. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 23, 49-59. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.020>.
- Pereira, M. G., Camacho, C. F., Freitas, M. A. V., & Silva, N. F. (2012). The renewable energy market in Brazil: Current status and potential. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3786-3802. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.024>.
- Pidd, M. (2003). *Tools for thinking: modelling in management science*. 2. ed. West Sussex: John Wiley & Sons.
- Principles for Responsible Investment – PRI. (2011). *Why environmental externalities matter to institutional investors*. London: PRI. 69 p.
- Puma. (2011). *PUMA's environmental profit and loss account for the year ended*. Herzogenaurach: PUMA.
- Quadrat-Ullah, H., & Seong, B. S. (2010). How to do structural validity of a system dynamics type simulation model: The case of an energy policy model. *Energy Policy*, 38(5), 2216-2224. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2009.12.009>.
- Rafaj, P., & Kypreos, S. (2007). Internalisation of external cost in the power generation sector: Analysis with Global Multi-regional MARKAL model. *Energy Policy*, 35(2), 828-843. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2006.03.003>.
- Rentzelas, A., & Georgakellos, D. (2014). Incorporating life cycle external cost in optimization of the electricity generation mix. *Energy Policy*, 65, 134-149. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.023>.
- Rudibert, K. J. (2009). Cenarização: a ferramenta essencial para uma estratégia efetiva. *Revista Eletrônica Boletim do Tempo*, 4(29), 1-38.
- Shih, Y.-H., & Tseng, C.-H. (2014). Cost-benefit analysis of sustainable energy development using life-cycle co-benefits assessment and the system dynamics approach. *Applied Energy*, 119, 57-66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.031>.
- Shindell, D. (2013). The social cost of atmospheric release. *Climatic Change*, 130(2), 313-326.
- Simas, M. (2012). *Energia eólica e desenvolvimento sustentável no Brasil: estimativa da geração de empregos por meio de uma matriz insumo-produto ampliada* (Dissertação de Mestrado). Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Stasinopoulos, P., Compston, P., Newell, B., & Jones, H. M. (2011). A system dynamics approach in LCA to account for temporal effects—a consequential energy LCI of car body-in-whites. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(2), 199-207. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-011-0344-0>.
- Sterman, J. (2002). System dynamics: systems thinking and modeling for a complex world. In *Proceedings of the ESD Internal Symposium* (SD-WP-2003-01.13). Cambridge: MIT Sloan School of Management.
- Streimikiene, D., & Alisauskaitė-Seskiene, I. (2014). External costs of electricity generation options in Lithuania. *Renewable Energy*, 64, 215-224. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.11.012>.
- Tancredi, M., & Abbud, O. A. (2013). *Por que o Brasil está trocando as hidrelétricas e seus reservatórios por energia mais cara e poluente?* Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas do Senado Federal.
- Van Aken, J. E. (2004). Management research based on the paradigm of the design sciences: the quest for field-tested and grounded technological rules. *Journal of Management Studies*, 41(2), 219-246.
- Van Der Heijden, K. (1996). *Scenarios: the art of strategic conversation*. West Sussex: John Wiley & Sons.
- Varun, Bhat, I. K., & Prakash, R. (2009). LCA of renewable energy for electricity generation systems: a review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 13(5), 1067-1073. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.004>.
- Wu, J.-H., Huang, Y.-L., & Liu, C.-C. (2011). Effect of floating pricing policy: An application of system dynamics on oil market after liberalization. *Energy Policy*, 39(7), 4235-4252. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.04.039>.
- Zhang, Q., Weili, T., Yumei, W., & Yingxu, C. (2007). External costs from electricity generation of China up to 2030 in energy and abatement scenarios. *Energy Policy*, 35(8), 4295-4304. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2006.12.026>.