

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E  
SISTEMAS  
NÍVEL MESTRADO**

**GUILHERME SPERLING TRAPP**

**AVALIAÇÃO DO CUSTO SISTÊMICO TOTAL DA GERAÇÃO DE ENERGIA  
EÓLICA FRENTE A SUBSTITUIÇÃO DAS FONTES HIDRELÉTRICA E  
TERMOELÉTRICA CONSIDERANDO AS EXTERNALIDADES  
SOCIOECONÔMICAS E AMBIENTAIS**

**SÃO LEOPOLDO**

**2015**

Guilherme Sperling Trapp

AVALIAÇÃO DO CUSTO SISTÊMICO TOTAL DA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA  
FRENTE A SUBSTITUIÇÃO DAS FONTES HIDRELÉTRICA E TERMOELÉTRICA  
CONSIDERANDO AS EXTERNALIDADES SOCIOECONÔMICAS E AMBIENTAIS

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para obtenção do título de Mestre pelo  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de  
Produção e Sistemas da Universidade do Vale  
do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Luis Henrique Rodrigues, PhD

São Leopoldo

2015

T774a

Trapp, Guilherme Sperling

Avaliação do custo sistêmico total da geração de energia eólica frente a substituição das fontes hidrelétrica e termoelétrica considerando as externalidades socioeconômicas e ambientais. / Guilherme Sperling Trapp. – São Leopoldo, 2015.

128 f.: il.

Orientador: Prof. PhD. Luis Henrique Rodrigues

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2015.

1. Pensamento sistêmico. 2. Custo sistêmico total. 3. Externalidades. 4. Geração de energia. 5. Modelagem dinâmica de sistemas. 6. Energia eólica. I. Rodrigues, Luís Henrique. II. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade do Vale do Rio dos Sinos. III. Título.

CDU 658.5

Guilherme Sperling Trapp

AVALIAÇÃO DO CUSTO SISTÊMICO TOTAL DA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA  
FRENTE A SUBSTITUIÇÃO DAS FONTES HIDRELÉTRICA E TERMOELÉTRICA  
CONSIDERANDO AS EXTERNALIDADES SOCIOECONÔMICAS E AMBIENTAIS

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para obtenção do título de Mestre pelo  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
de Produção e Sistemas da Universidade do  
Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Nei Marçal – Universidade Estadual do Rio Grande do Sul

---

Prof. Dr. José Antônio Valle Antunes Júnior – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

---

Prof. Dr. Daniel Pacheco Lacerda – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Dedico este trabalho aos meus primeiros, e eternos, mestres, que sempre me apoiaram incondicionalmente, trazendo inspiração para ser cada vez melhor. Pai e Mãe, muito obrigado!

## AGRADECIMENTOS

Neste momento me sinto inundado por um mar de sentimentos, os quais não sou capaz de descrever. Certamente há muita felicidade e orgulho por ter concluído este desafio, alegria e muita gratidão por ter tido esta imensa oportunidade de aprendizado e convívio com pessoas incríveis. Sinto que, agora, após esta metamorfose, aumenta a minha responsabilidade de trabalhar por um Brasil melhor.

São muitas as pessoas a quem gostaria de agradecer pelo apoio, incentivo e presença durante esta caminhada, onde cada um faz parte desta conquista. Mesmo não havendo espaço para agradecer a todos, quero assinalar aqui alguns agradecimentos especiais.

Agradeço em especial ao meu mestre, e orientador, Luis, a quem admiro muito por seus valores, pelo profissional que és e pela forma que trata a pessoas ao seu redor. Muito obrigado pela amizade, pela confiança, pelos ensinamentos, pelas oportunidades que me proporcionaste, pela dedicação em me desafiar a ir sempre além, e por todo aprendizado gerado pelo convívio com este grande Colorado que és.

Agradeço ao “amado mestre”, Professor Junico, e ao professor Daniel Lacerda, nosso “capitão”, pelas contribuições, tanto em sala de aula, como na convivência fora dela, que trouxeram grande crescimento intelectual, profissional e pessoal.

Agradeço aos professores Sellitto, Vaccaro e André, que com seu conhecimento e dedicação contribuíram muito para minha formação, e também aos demais professores e funcionários do PPGEPS da UNISINOS que se empenham a cada dia para construir um programa de mestrado do qual todos podemos nos orgulhar.

Agradeço à CAPES pelo suporte financeiro concedido durante o curso, sem o qual não seria possível a realização deste mestrado.

Agradeço aos meus colegas de Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas da UNISINOS, turma de 2013, de onde surgiram boas amizades. Aprendi, cresci e dei boas risadas com vocês.

Agradeço aos excelentes profissionais, que cederam seu tempo e conhecimento para contribuir na construção deste trabalho. A participação de vocês foi muito importante!

Agradeço ao grupo de pesquisa GMAP | UNISINOS, esta família que me acolheu, me proporcionou muitos ensinamentos, e grandes amigos. Tenho muito orgulho de ter a oportunidade de poder estar em meio a este grupo seleta!

Obrigado Secundino, este irmão dentro do GMAP, que a cada conversa me contagia de boas energias e a quem muito admiro pela sua história e caminhada.

Obrigado Maria Isabel pela tua amizade, dedicação em compartilhar teus conhecimentos e também pelas aulas de cultura geral obtidas em cada dia de convívio.

Um GRANDE muito obrigado também ao demais amigos do GMAP, Aline, Damasio, Douglas, Felipe, Lissandra, Mansa, Mateus, Rosiane e Pedro. Vocês contribuíram muito e tornaram essa caminhada muito mais engrandecedora e divertida.

Agradeço aos amigos Anderson, Edmar, Fernando e Jonatan. Poder desopilar e celebrar ao lado de amigos como vocês com certeza me traz energia para encarar todos desafios. Também agradeço a todos amigos, que estiveram sempre ao meu lado, e fazem parte desta conquista.

Agradeço em especial ao meu grande amigo e, não pelo sangue mas por escolha, irmão Dieter! Este irmão tem grande “culpa” por esta jornada. Muito obrigado por levar-me à bifurcação onde estava este caminho, e por todo incentivo para vencer cada desafio desta caminhada. Por estas (e por muitas outras) sei que esta amizade e parceria será eterna!

Obrigado aos meus tios, primos, avós, pelo carinho e amor. Um muito obrigado à minha tia Sônia, que me incentiva, ajuda e apoia com muito amor e carinho desde antes dos meus primeiros passos, até minhas mais recentes palavras aqui escritas, não é minha editora?

Agradeço de forma muito especial à minha parceira de todas as horas Jaqueline. Tua companhia fez a travessia deste percurso ter sido muito mais alegre, prazerosa, divertida e interessante. Teu amor e tua cumplicidade tem um valor inestimável em cada passo que eu dou. Muito obrigado por TUDO!

E especialmente quero agradecer MUITO àqueles que são a razão por tudo que sou hoje, minha família. Minha irmã Mônica, a quem admiro muito, e não mede esforços para combater qualquer mal que nos ameace, e assim revela o amor incondicional que sentimos um pelo outro. Meu irmão Gustavo que possui uma memória incrível e o coração mais puro e bom que eu conheço, que me ensina muito a cada um de seus, frequentes, gestos de amor. Meus pais Paulo e Glória, de quem a cada dia sinto mais orgulho pela forma como mantêm a união da família e os valores que nos ensinam. Minha admiração por vocês é incalculável! Por falar em cálculo, Pai admiro muito a sabedoria que me passa a cada dia, e a forma como mescla impecavelmente a razão e a emoção. Mãe, aprecio muito a forma humana e espontânea que regem teus atos, aprendo muito contigo, do teu conhecimento e do teu coração. Muito obrigado pelo suporte, pelo incentivo, pela paciência, pelo apoio e pelo amor incondicional. Tenho muito orgulho ser desta família!

Por fim, a todos, o meu sincero MUITO OBRIGADO!

*"Deve haver uma maneira melhor de fazer as coisas que queremos,  
de forma a não estragar o céu, ou a chuva ou a terra"*

Paul McCartney

## 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 atreladas as 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, a presente dissertação busca, através da 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 sociais econômicas e ambientais 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, posteriormente, o modelo foi aplicado a três usinas reais a fim de se fazer uma avaliação da inserção da energia eólica frente a substituição das fontes hidroelétrica e termoelétrica a carvão. Os resultados obtidos apresentaram uma evolução no entendimento na comparação do real custo da energia para 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; Geração de energia; Modelagem dinâmica de sistemas; Energia Eólica.

## ABSTRACT

The power generation market still expanding in Brazil. This market consists of different sources of power generation, which cause different socioeconomic and environmental impacts besides its operations. These impacts generate externalities in the form of damage to society and the compensation of these are not common consensus among stakeholders. In this way, this thesis research through the application of systems thinking method, create a computer model of systems dynamic that enable the evaluation of the total systemic cost, considering the externalities of power generation. To this end was applied an adaptation of the method PSPC - Systems Thinking and Planning for Scenarios. In the first phase was generate a greater understanding on the subject. After there was the construction of the computational model, and finally the model was applied to three real plants in order to assessment the option of wind energy against replacement of hydroelectric sources and thermal coal. The results showed an evolution in understanding the comparison of the real cost of energy to society due to the learning provided by the use of systems thinking in conjunction with the systems dynamic modeling. The data also pointed to a change in decisions about energy matrix, if adopted a total systemic cost for evaluation of new projects.

**Key-words:** Systems Thinking; Total Systemic Cost; Energy Externalities; Systems Dynamic Modeling; Wind Energy;

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Demanda de energia elétrica prevista no Brasil.....	17
Figura 2 - Níveis da realidade ilustrados pela metáfora do iceberg. ....	23
Figura 3 - Linguagem sistêmica. ....	25
Figura 4 - Estrutura com enlaces reforçador e balanceador. ....	25
Figura 5 - Exemplo de diagrama utilizando fluxos e estoque. ....	28
Figura 6 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte no Brasil em 2012. ....	29
Figura 7 - Classificação de custos propostas. ....	31
Figura 8 - Atividades DSR. ....	41
Figura 9 – Macro Fases do método de trabalho.....	44
Figura 10 – ES representando o negócio de geração de energia. ....	54
Figura 11 - ES da relação econômica da emissão de CO2. ....	55
Figura 12 - ES dos enlaces balanceadores do setor negócio. ....	55
Figura 13 - ES dos impactos econômicos no ambiente local. ....	56
Figura 14 - ES Enlaces R2, R3 e R4. ....	57
Figura 15 - ES impacto do georreferenciamento.....	57
Figura 16 - ES Impactos a saúde humana local.....	58
Figura 17 – ES Impactos ambientais. ....	59
Figura 18 - ES impactos ambientais relacionados a terra. ....	60
Figura 19 - ES impactos ambientais urbanos.....	60
Figura 20 - Parte da ES - Impactos sociais.....	61
Figura 21 - ES envolvimento da população local com o projeto.....	62
Figura 22 - Parte da ES - Impactos ao sistema interligado nacional.....	63
Figura 23 - Estrutura Sistêmica completa da situação estudada.....	65
Figura 24 - Modelo computacional de dinâmica de sistemas.....	68
Figura 25 – Ilustração da tela principal da Interface do Modelo Computacional. ....	69
Figura 26 - Ilustração do painel de visualização gráfica das variáveis do Modelo. ....	69
Figura 27 - Ilustração do painel de visualização de valores das variáveis do Modelo.....	70
Figura 28 - MDS - setor de capacidade usina.....	71
Figura 29 - MDS - setor do negócio financeiro da usina.....	73
Figura 30 – ES e MDS - setor de emissões. ....	75
Figura 31 - MDS setor de Externalidade Terra. ....	76
Figura 32 - MDS - Setor custo externo sociedade.....	79

Figura 33 – MDS - Adição de receitas públicas.....	81
Figura 34 – MDS – Setor de externalidades sistema interligado nacional.....	82
Figura 35 – Resultado geração eólica pelo modelo e real. ....	84
Figura 36 - Resultado geração hidroelétrica pelo modelo e real. ....	85
Figura 37 - Construção dos cenários. ....	87
Figura 38 - Usina de geração eólica avaliada. ....	92
Figura 39 - Usina geração hidroelétrica avaliada. ....	94
Figura 40 - Localização do negócio de geração termoelétrica. ....	95
Figura 41 - Resultado acumulado para cenário 1. ....	98
Figura 42 - Resultado acumulado para cenário 2. ....	100
Figura 43 - Resultado acumulado para cenário 3. ....	102
Figura 44 - Resultados acumulados para cenário 4. ....	104

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais bases de informações pesquisadas .....	18
Quadro 2 - Buscas realizadas e respectivos resultados. ....	18
Quadro 3 - Características do Design Science Research .....	41
Quadro 4 - Lista de especialistas entrevistados. ....	45
Quadro 5 - Valores das incertezas aplicadas na simulação por cenários.....	90
Quadro 6 - Descrição planta eólica.....	93
Quadro 7 - Descrição planta hidroelétrica. ....	94
Quadro 8 - Descrição da usina termelétrica.....	96

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Custos, preço e fator de capacidade de geração de energia elétrica por fonte (R\$/MWh) .....	72
Tabela 2 - Quantidade de emissões CO <sub>2</sub> .....	75
Tabela 3 - Quantidade de emissões na geração. ....	77
Tabela 4 - Custo das emissões para a sociedade. ....	78
Tabela 5 - Dados utilizados para as relações durante no MDS. ....	83
Tabela 6 - Resultado acumulado comparativo entre dados Real e Modelo para verificação... ..	85
Tabela 7 - Dados das usinas utilizados para realização dos cenários. ....	96
Tabela 8 - Externalidades geradas - Cenário 1. ....	99
Tabela 9 - Resumo dos resultados para o Cenário 1. ....	99
Tabela 10 - Resumo dos resultados para o Cenário 2. ....	101
Tabela 11 - Externalidades geradas - Cenário 2. ....	101
Tabela 12 - Resumo dos resultados para o Cenário 3. ....	103
Tabela 13 - Externalidades geradas – Cenário 3. ....	103
Tabela 14 - Externalidades geradas – Cenário 4. ....	105
Tabela 15 - Resumo dos resultados para o Cenário 4. ....	105
Tabela 16 - Comparação do resultado do negócio nos diferentes cenários. ....	106
Tabela 17 - Comparativo do custo sistêmico nos diferentes cenários. ....	107

## LISTA DE SIGLAS

ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulado
DSR	<i>Design Science Research</i>
ES	Estrutura Sistêmica
GEE	Gases do Efeito Estufa
ha	Hectare
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IPCA	Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt-hora
MDS	Modelo de Dinâmica de Sistemas
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-hora
O&M	Operação e manutenção
tonCO <sub>2</sub> eq	Tonelada de gás carbônico equivalente
UEL	Usina Eólica
UHE	Usina hidroelétrica
UTE	Usina termoelétrica.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>1.1 Questão Pesquisa</b> .....	14
<b>1.2 Objetivos</b> .....	15
1.2.1 Objetivo Geral .....	15
1.2.2 Objetivos Específicos .....	15
<b>1.3 Justificativa</b> .....	15
<b>1.4 Delimitação da pesquisa</b> .....	20
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	22
<b>2.1 Pensamento Sistêmico</b> .....	22
2.1.1 Princípios do Pensamento Sistêmico.....	22
2.1.2 Linguagem Sistêmica .....	24
2.1.3 Método do Pensamento Sistêmico.....	26
<b>2.2 Dinâmica de Sistemas</b> .....	27
<b>2.3 Setor Brasileiro de Energia</b> .....	29
<b>2.4 Custos de Geração de Energia e Externalidades</b> .....	31
2.4.1 Custo Interno Direto .....	32
2.4.2 Custo Interno Indireto.....	32
2.4.3 Custo Externo .....	33
2.4.3.1Análise de Ciclo de Vida - ACV .....	34
2.4.3.2ACV e impactos na geração de energia.....	36
<b>2.5 Incorporação das Externalidades no Custo da Energia</b> .....	38
<b>3. MÉTODO</b> .....	40
<b>3.1 Método Científico</b> .....	40
<b>3.2 Método de Trabalho</b> .....	42
3.2.1 Fase I.....	44
3.2.2 Fase II .....	47
3.2.3 Fase III:.....	49
<b>4. CONSTRUINDO O MODELO DE AVALIAÇÃO DO CUSTO SISTÊMICO</b> <b>TOTAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA</b> .....	52
<b>4.1 Construindo a Estrutura Sistêmica- ES do Custo Sistêmico Total de Geração de Energia</b> .....	52
<b>4.2 Definindo as Variáveis-Chave</b> .....	66
<b>4.3 Construção do Modelo de Dinâmica de Sistemas</b> .....	67
4.3.1 Setor Capacidade da Usina .....	70
4.3.2 Setor Negócio de Energia .....	71
4.3.3 Setor Emissões de CO <sub>2</sub> .....	74
4.3.4 Setor Externalidades da Terra.....	76
4.3.5 Setor Custo Externo Para Sociedade .....	77
4.3.6 Setor Receitas Públicas.....	80
4.3.7 Setor Sistema Interligado Nacional - SIN .....	81
<b>4.4 Avaliação do Modelo</b> .....	83
<b>4.5 Desenvolvimento e Avaliação dos Cenários</b> .....	86
<b>5. APLICAÇÃO DO MODELO DE AVALIAÇÃO DO CUSTO SISTÊMICO</b> <b>TOTAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA</b> .....	91
<b>5.1 Caso Analisado</b> .....	91
5.1.1 Fonte Eólica.....	91
5.1.2 Fonte Hidroelétrica .....	93

5.1.3	Fonte Termoelétrica a Carvão .....	95
5.1.4	Dados das Usinas Utilizados no MDS.....	96
<b>5.2</b>	<b>Visualização dos Cenários Com Uso do Modelo.....</b>	<b>97</b>
5.2.1	Cenário 1 – “Enchendo os Bolsos” .....	97
5.2.2	Cenário 2 – “Deixa Rolar”.....	100
5.2.3	Cenário 3 – “Pagando o Estrago” .....	102
5.2.4	Cenário 4 – “Sociedade Sustentável” .....	104
<b>5.3</b>	<b>Avaliação dos Resultados da Aplicação dos Cenários.....</b>	<b>106</b>
<b>6.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSOES .....</b>	<b>109</b>
<b>6.1</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>109</b>
<b>6.2</b>	<b>LIMITAÇÕES DA PESQUISA .....</b>	<b>110</b>
<b>6.3</b>	<b>SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>111</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Energia, água e ar são elementos essenciais para sobrevivência humana. A dinâmica mundial trouxe um momento onde há evolução constante da indústria e tecnologia; esta evolução é fomentada, em grande parte, pela disputa econômica entre empresas e nações. Todo este avanço possibilitou que se substituísse boa parte do trabalho manual por maquinário e, em razão disto, houve uma melhora na qualidade de vida humana. 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 conseqüente aumento dos parques geradores de energia. De acordo com Rafaj e 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; LAWSON; LUND, 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 a 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.

A mensuração dos custos externos na geração de energia elétrica, tais como os impactos sobre a saúde local, emissões de gases, impactos na economia local, impactos sobre os ecossistemas terrestres, efeitos da poluição da água, amenidade visual, ruído e etc, são úteis para a comparação entre diferentes opções de geração de energia, na relação impacto-benefício associada a cada uma delas. Estas informações servem de apoio para a tomada de decisões frente aos *trade-offs* de escolha de matriz energética (MAHAPATRA; SHUKLA; DHAR, 2012).

Considerar os custos externos na geração de energia, pode ainda impactar nas políticas de energia no que diz respeito aos movimentos como taxaço e subsídios de acordo com a fonte de energia utilizada. A energia disponível para utilização é oriunda de dois tipos de fontes: as Fontes Renováveis, cujas principais são as derivadas biomassa, hidráulica, eólica, solar, geotérmica e biogás, e as Fontes Não Renováveis, que são aquelas derivadas de combustíveis fósseis, como petróleo e seus subprodutos, mineral e nuclear (ANEEL, 2008).

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).

Todavia, a consciência mundial para que a composição da matriz energética componha-se ao máximo possível por fontes renováveis vem crescendo, e esta preocupação refere-se essencialmente aos impactos ambientais causados pelo combustível fóssil. Percebe-se esta mudança de consciência por meio das políticas de subsídios e incentivos para energias renováveis que são adotadas por alguns países (PEREIRA; SARAIVA, 2012). Há também uma tendência de que as decisões futuras, no que tange a composição de matriz de geração de energia, irão considerar indicadores de sustentabilidade e, embora estes impactos socioambientais sejam mais difíceis de se quantificar, os custos e benefícios das fontes renováveis são permanentemente discutidos por acadêmicos, profissionais, investidores e tomadores de decisões políticas (DAVIDSSON; HÖÖK; WALL, 2012).

Empreendimentos de energia renovável geralmente são tomados como sustentáveis e “amigos do meio ambiente” (DAVIDSSON; HÖÖK; WALL, 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 (BHAT; PRAKASH, 2009a). Porém, a falta de uma contabilização dos impactos gerados - para um comparativo frente as diferentes fontes de energia - pode trazer distorção nas decisões referentes a avaliação impacto-benefício (MAHAPATRA; SHUKLA; DHAR, 2012). Neste contexto, Bhat e Prakash (2009) trazem em sua pesquisa que, tratando-se de tecnologia solar fotovoltaica para geração de energia elétrica, alguns projetos levam mais de cinco anos para gerar a mesma quantidade de energia que foi consumida para concepção e implantação do projeto.

Neste sentido, a presente dissertação busca, por intermédio da aplicação do método do pensamento sistêmico, criar um modelo computacional de dinâmica de sistemas que possibilite a avaliação do custo sistêmico total de geração de energia eólica frente a substituição das fontes hidroelétrica e termoelétrica a carvão. O modelo se propõe a fazer o cálculo das externalidades da geração de energia, tomando como base o Brasil, e ainda traçar um comparativo entre a substituição das referidas fontes. O estudo é feito considerando-se os impactos gerados durante a vida útil das fontes de energia - através de uma análise de cenários futuros - por meio da utilização do modelo computacional. O estudo se aplica ao caso da substituição por geração de energia eólica no estado do Rio Grande do Sul, tomando-se como referência três usinas reais representadas abaixo:

- Usina eólica Osório Projeto 2, localizada em Osório/RS;
- Usina hidroelétrica 14 de Julho, localizada entre Bento Gonçalves/RS e Cotiporã/RS;
- Usina termoelétrica a carvão Candiota III, localizada em Candiota/RS.

Foram utilizados como base de dados para estas usinas relatórios apresentados para obtenção de créditos de carbono junto ao *Clean Development Mechanism* - CDM Project e dados fornecidos pelas próprias empresas proprietárias das usinas (CDM, 2006, 2012; CGTEE, 2014). Com base nestes dados buscou-se responder a questão de pesquisa, proposta, que é apresentada na próxima seção.

## 1.1 Questão Pesquisa

Em um contexto onde questões relativas aos impactos socioeconômicos e ambientais são cada vez mais discutidas, e com a crescente demanda de energia, surge uma lacuna de informação para a tomada de decisões no campo da matriz energética. Por esta razão, a presente pesquisa origina-se da necessidade de responder as seguintes questões:

- Qual o custo sistêmico total da geração de energia considerando as respectivas externalidades?

- Qual a vantagem da opção por energia eólica frente a energia hídrica e térmica quando considerado o custo sistêmico total?

## **1.2 Objetivos**

O objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho são descritos nesta seção.

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Uma vez levantada a questão de pesquisa, percebe-se que para cada fonte de energia, tem-se um projeto e também dinâmicas de projetos diferenciados. Estas diferenças ocorrem por diversos motivos, dos quais destacam-se essencialmente as alterações do ambiente local, os diferentes impactos e os custos envolvidos.

Diante do exposto, o objetivo geral deste estudo é gerar aprendizado sobre o custo sistêmico da geração de energia a fim de se estabelecer um conhecimento aprofundado sobre os impactos no tempo e no espaço, na hipótese da adoção do custo sistêmico para os novos projetos de geração de energia. Assim, esta pesquisa almeja servir de apoio à tomada de decisão sobre investimentos em matriz energética.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

São objetivos específicos do estudo:

- Desenvolver um modelo de dinâmica de sistemas por simulação computacional para cálculo do custo sistêmico total da geração de energia elétrica por fonte eólica;
- Avaliar o custo sistêmico total da geração de energia por fonte eólica frente a substituição das fontes hidrelétricas e termoeletricas;
- Ampliar o conhecimento sobre as decisões acerca das questões energéticas a partir da aplicação do pensamento sistêmico e planejamento por cenários.

## **1.3 Justificativa**

O acontecimento do impacto ambiental é um problema global muito discutido nos dias de hoje, há inúmeros argumentos sobre os prejuízos e danos causados ao meio ambiente e a

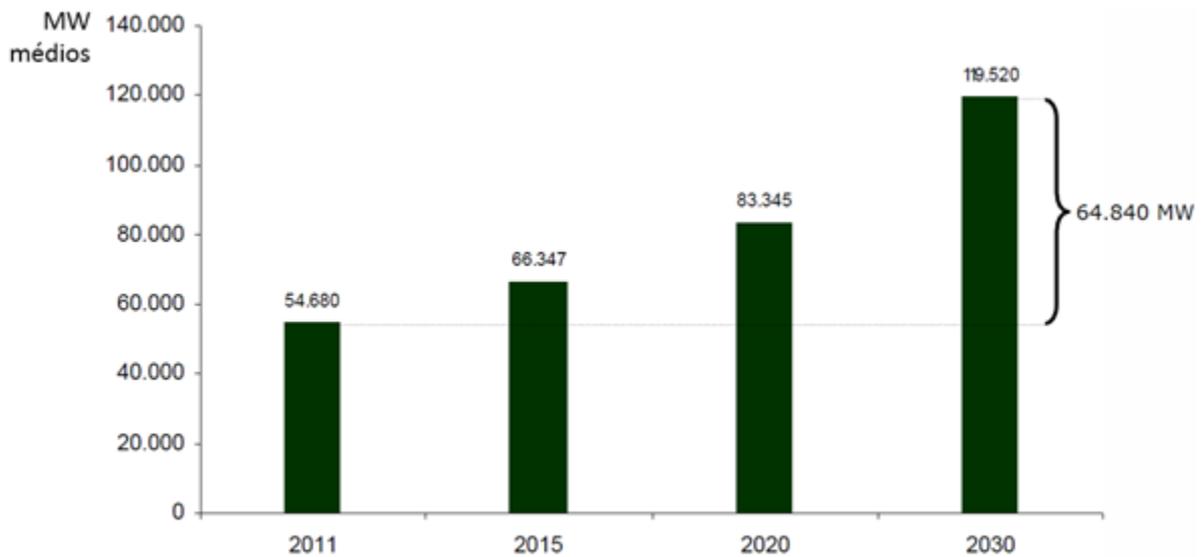
sociedade como um todo. Por esta razão, os avanços futuros da economia estão diretamente ligados ao desenvolvimento sustentável e suas contribuições, incluindo a utilização mais eficiente de recursos, conservação de energia e diminuição dos impactos gerados para o meio ambiente, e sociedade (GEORGAKELLOS, 2012). Nesta busca do desenvolvimento sustentável, percebe-se um movimento global que segue rumo a introdução de diversas tecnologias que utilizam fontes renováveis para geração de energia. Muitos países têm apresentado progressos promovendo fontes renováveis na composição de sua matriz energética. Estas decisões, porém, passam por desafios e interesses econômicos e políticos (GEORGAKELLOS, 2012; PEREIRA et al., 2013a) uma vez que um melhor conhecimento sobre os valores monetários despendidos em razão do impacto produz uma série de alterações nas decisões políticas (EYRE, 1997).

Sendo a energia um recurso básico para a indústria nos dias atuais, segundo Porter (2008), a redução de custos por compra de recursos é uma vantagem competitiva, logo, obtendo-se uma redução de custos em recursos - neste caso energia - é possível aumentarem-se os lucros do negócio. Deste modo, empresas que possuam a liberdade de escolha sobre seus suprimentos energéticos, podem utilizar este fato como uma estratégia para incrementar seus resultados.

Cerca de 26% de toda energia comercializada no país é negociada no Ambiente de Contratação Livre - ACL, ou seja, a negociação é feita diretamente entre consumidor e gerador, sem passar por concessionária. Esse montante de energia é consumido por aproximadamente doze mil clientes de grande porte, segundo dados referentes ao mês de novembro de 2013. Neste montante de energia contratada também contabilizam-se os autoprodutores, ou seja, indústrias que geram sua própria energia (CCEE, 2014). Esta parcela do mercado possui maior flexibilidade na tomada de decisão sobre a compra da energia, pois dispõe de ferramentas para avaliar os impactos de cada opção energética, podendo tomar suas decisões de forma precisa e acertada.

De acordo com estudos de empresas governamentais que trabalham no planejamento do setor energético, o crescimento da demanda de energia elétrica para o Brasil deve registrar um grande aumento para os próximos anos (MME; EPE, 2013). A projeção é que em 20 anos esta demanda dobre (Figura 1), ou seja, será necessário ter capacidade de geração de energia adicional do mesmo tamanho da capacidade total de geração disponível atualmente. Ainda pode se prever que os autoprodutores de energia tenham um crescimento médio de energia gerada de 8,8% ao ano, quando analisados os períodos dos próximos dez anos (MME; EPE, 2013).

Figura 1 - Demanda de energia elétrica prevista no Brasil.



Fonte: (MME; EPE, 2013)

Para suprir esta demanda serão necessários diversos novos empreendimentos de geração, e, ainda que o conhecimento dos impactos seja um fator importante para a tomada de decisões no mercado de energia e de seu desenvolvimento futuro, muitas ainda são tomadas sem embasamento e conhecimento dos impactos e seus custos externos (ZHANG et al., 2007). Ao implementar-se um projeto de usina de geração de energia, há um impacto não só ambiental mas também social e econômico que altera as relações entre diversos atores dentro do contexto (MAILLE; SAINT-CHARLES, 2012a). No Brasil, sistemas de geração baseados em carvão e óleo vão continuar crescendo, e estas fontes de energia são grandes geradores de emissões poluentes (PEREIRA et al., 2012). Portanto, aprofundar o conhecimento sobre o custo sistêmico total da matriz energética será um facilitador na tomada de decisão, uma vez que relacionam os danos ou benefícios - socioeconômicos e ambientais - gerados a valores monetários e seus impactos no tempo e espaço.

Do ponto de vista acadêmico, Davidsson; Höök; Wall (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.

A modelagem dos impactos nos sistemas de geração de energia é dotada de limitações e incertezas, que estão ligadas, entre outros motivos, a distribuição da receita, variações tecnológicas e diferenças regionais (RAFAJ; KYPREOS, 2007). Neste sentido, estudos devem considerar estes aspectos do âmbito local para uma correta avaliação da problemática. Abordando o futuro da pesquisa na área energética, Jansson; Fülöp (2013) conclui que pesquisas que avaliem o uso sustentável de recursos naturais devem ser de alta prioridade para governo, universidades e indústrias.

Entendendo-se a necessidade de examinar melhor esta temática, efetuou-se uma pesquisa preliminar e sistemática da literatura sobre este tema. Realizou-se uma busca nas Bases de informações de teses e dissertações nacionais e internacionais e Bases de periódicos científicos nacionais e internacionais. As principais Bases de informação pesquisadas são explicitadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Principais bases de informações pesquisadas

Macro bases	Amplitude Geográfica	Bases
Teses e dissertações	Nacional e Internacional	Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD); Dissertations&Theses (ProQuest); Portal Domínio Público (PDP);
Periódicos científicos	Nacional e Internacional	Scientific Electronic Library Online (SciELO); ABI/INFORM Complete (ProQuest); Academic Search Premier (EBSCO);

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da proposta a ser estudada, definiu-se quais palavras chaves seriam buscadas. Realizou-se a pesquisa nas bases selecionadas, tanto em português quanto em inglês. As palavras chaves e os resultados encontrados são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 - Buscas realizadas e respectivos resultados.

Palavras chaves pesquisadas	Resultados obtidos
external cost E energy generation	95206
custo externo E geração energia	79
system dynamics E energy external cost	1277
dinâmica de sistemas E custo externo	69
environmentalimpact E energygeneration	1057
impacto ambiental E geração energia	213
external cost E renewable energy	718
custo externo E energia renovável	15
energygeneration E social impact	2304
geração de energia E impacto social	28

Fonte: elaborado pelo autor.

Após a realização desta pesquisa, constatou-se que para as bases pesquisadas o tema de “custo externo” relacionado a “geração de energia” é largamente discutido, porém, quando relacionado a “energias renováveis”, o número de pesquisas efetuadas é menor. E ainda, ao se pesquisar os temas no idioma português, buscando remeter a estudos aplicados no Brasil, o número de pesquisas sobre esta temática é sensivelmente inferior comparando-se a estudos internacionais, principalmente quando o termo “custo externo” é relacionado a “geração de energia em seus impactos sociais e ambientais”. Dada a importância destas pesquisas serem realizadas na esfera regional, segundo Rafaj; Kypreos, (2007), evidencia-se a existência de uma lacuna no âmbito nacional.

Algumas pesquisas, como a de Cepeda; Finon, (2013), que estudam formas de corrigir as externalidades ocasionadas pela geração de energia, demonstram a presença de consequências econômicas distintas para as diferentes políticas adotadas na geração de energia, sugerindo, pois, que estas devam ser estudadas. No âmbito social, (BARCELLA, 2012; BRANNSTROM; JEPSON; PERSONS, 2011; MAILLE; SAINT-CHARLES, 2012b; ROBALINO-LÓPEZ; MENA-NIETO; GARCÍA-RAMOS, 2014) conduzem pesquisas que abordam a temática dos impactos sociais causados por usinas de geração de energia, porém, suas pesquisas não fazem a análise destes frente a outros impactos, como ambientais e econômicos.

Além dos impactos sociais, as externalidades ambientais são largamente pesquisadas, a exemplo de diversos estudos (KLAASSEN; RIAHI, 2007; KOSUGI et al., 2009; LAES; MESKENS; VAN DER SLUIJS, 2011; RENTIZELAS; GEORGAKELLOS, 2014; STREIMIKIENE; ALISAUSKAITE-SESKIENE, 2014; ZHANG et al., 2007) que fazem uma avaliação das externalidades e de sua internalização, porém, os autores não englobam em suas pesquisas os aspectos social, econômico e ambiental de maneira conjunta.

Neste contexto acadêmico, visando a um futuro onde se faz necessária uma maior acurácia nas decisões sobre matriz energética para atender à crescente demanda de energia, necessitam-se de 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 a medida que vem sendo

discutidos, porém, ao serem unificados, encontra-se uma lacuna para a qual o presente estudo pretende contribuir.

#### **1.4 Delimitação da pesquisa**

No que tange aos objetivos propostos e englobando a avaliação do custo sistêmico por meio da construção de um modelo computacional de dinâmica de sistemas, este estudo fica delimitado a fazer uma avaliação do custo sistêmico, para assim gerar aprendizado sobre as decisões no âmbito das políticas energéticas das organizações governamentais ou não. Cabe ressaltar que o presente estudo não tem como objetivo apresentar em seus resultados uma previsão assertiva destes custos, também não é de objetivo desta pesquisa refutar modelos e teorias existentes para formação de preço econômico de energia.

Esta pesquisa direciona-se a avaliação da fonte de geração eólica. Em razão das diferentes interações com os ambientes (social, econômico e ambiental) das diferentes fontes de energia, esta pesquisa não pode ser generalizada para outras fontes. A comparação do benefício da substituição das fontes hidrelétrica e termoeétrica pela fonte eólica tem como comparativo as externalidades destas fontes, baseada em resultados encontrados por outras pesquisas. Assim, a pesquisa fica delimitada aos dados encontrados nestas pesquisas, bem como aos dados das usinas avaliadas, as quais também são oriundos de outras pesquisas. Para as usinas eólica e hidroelétrica obtiveram-se dados completos, com acesso às informações financeiras. Porém, estes dados são projetados, e não séries históricas e, deste modo, podem apresentar valores diferentes no futuro. Para a usina termoeétrica conseguiu-se apenas dados genéricos, ficando a pesquisa delimitada a estes dados.

Outra delimitação da metodologia trata-se da realização de entrevistas para o desenvolvimento do modelo, pois a construção do conhecimento fica limitada à visão do grupo de especialistas que foi entrevistado, ainda que tenha sido constituído um grupo com ampla experiência e conhecimento na respectiva área de pesquisa.

No que diz respeito ao local, as conclusões da pesquisa ficam limitadas ao ambiente do Rio Grande do Sul, âmbito de condução desta. Em relação aos resultados obtidos, delimitam-se ao conhecimento e experiência provenientes do grupo de especialistas selecionados para a condução desta pesquisa.

Existe ainda uma delimitação ligada à ferramenta utilizada para a modelagem dinâmica de sistemas, embora existam outras soluções comerciais disponíveis no mercado, o software utilizado, é o *ithink 10.0.3* da empresa da *High Performance Systems Inc. 1994*.

Ligada aos resultados, apresenta-se a delimitação de que não pretende-se validar o método no intuito de representar fielmente a realidade. É prevista, no entanto, a avaliação por parte de especialistas para verificar se há uma visualização das tendências de comportamento para os diversos cenários do futuro e a coerência destes.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

Neste capítulo são explicitados os conceitos utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa. Inicialmente, apresenta-se o pensamento sistêmico e sua forma de gerar conhecimento, após são abordados os temas da dinâmica de sistemas e de custos, englobando o custo externo. Também apresentam-se conceitos de Análise do Ciclo de Vida - ACV, que aborda assuntos sobre impactos socioeconômicos e ambientais, seus modelamentos matemáticos, e formas de monetarização dos impactos causados na geração de energia, que são empregados para construção do modelo proposto neste estudo. Por fim, fez-se uma breve descrição do setor de geração de energia no Brasil.

### **2.1 Pensamento Sistêmico**

O Pensamento Sistêmico é o elemento base utilizado para realização desta pesquisa, e a partir deste, se desenvolverá o estudo frente a temática escolhida. Nesta seção são tratados os conceitos do pensamento sistêmico.

#### **2.1.1 Princípios do Pensamento Sistêmico**

O Pensamento sistêmico tem seu surgimento com base na Dinâmica de Sistemas, onde o pesquisador Peter M. Senge teve contato na década de 70, trabalhando em pesquisas voltadas a dinâmica de sistemas em processos gerenciais. No início dos anos 90, Senge formaliza os princípios e práticas do auto aprimoramento contínuo, que é baseado no pensamento sistêmico (MORANDI, 2008).

O Pensamento Sistêmico é uma forma de conceituar a maneira como se percebe a complexidade do mundo, ou no caso, uma situação específica. Através desta 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 uma 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*. A 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 abaixo, Figura 2 que mostra a metáfora do *iceberg* para a percepção da realidade de acordo com Andrade et al., (2006).

Figura 2 - Níveis da realidade ilustrados pela metáfora do iceberg.



Fonte: (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, através desta, as pessoas explicam 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. Para isto são utilizados gráficos que mostram o comportamento das variáveis associadas a estes eventos.

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

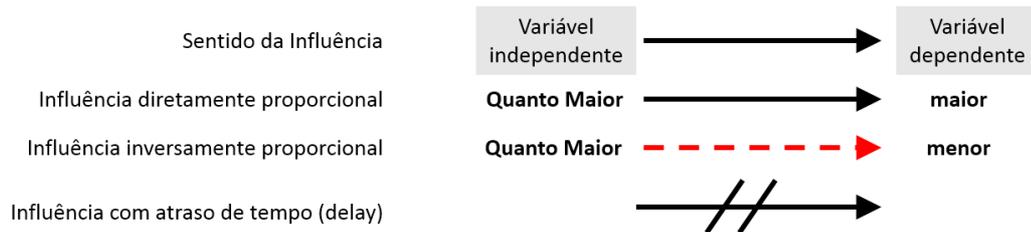
Segundo Andrade et al. (2006), qualquer sistema pode ser explicado por estes níveis, porém nos sistemas que envolvem a sociedade, há um nível de complexidade a mais que remete ao que as pessoas carregam em suas mentes. Os **modelos mentais** são os responsáveis pela tomada de decisão nas mais diversas áreas e, devido a 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) “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”

### 2.1.2 Linguagem Sistêmica

Para que seja possível colocar em prática as ideias sistêmicas, utiliza-se uma linguagem própria, que é muito simples, empregando apenas símbolos para representar as relações entre as variáveis dentro do mapa do sistema. Assim como pode ser visto na Figura 3, uma seta representa uma relação causal entre uma variável e outra, sendo que a influência ocorre no sentido da seta. Se a linha for contínua significa uma influência direta, quanto maior uma variável, maior a outra. Algumas variáveis exercem influência inversa, ou seja, quanto maior a variável, menor a outra, e estas são representadas por uma seta com linha pontilhada. Além da proporcionalidade e sentido da influência, é representado também o aspecto temporal da influência. Ela pode ser instantânea (linhas sem interrupções) ou a sua influência acontece apenas após algum tempo, e este atraso é representado por duas linhas paralelas que cortam a seta principal como pode ser visto na Figura 3(ANDRADE et al., 2006).

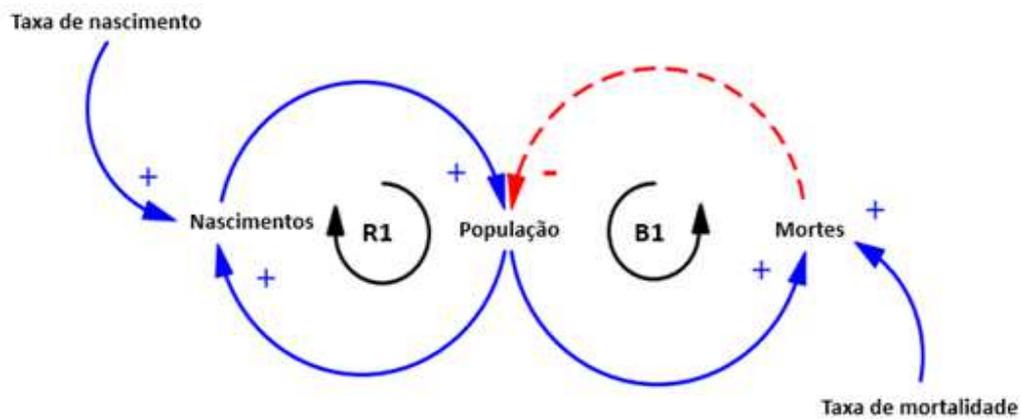
Figura 3 - Linguagem sistêmica.



Fonte: Adaptado de (ANDRADE et al., 2006)

Utilizando esta linguagem se monta o mapa que relaciona as variáveis, e em um mesmo mapa podemos ter várias relações. As relações podem ter enlaces que realimentam as variáveis, ou seja, a variável “A” causa efeito sobre “B”, e “B” por sua vez causa efeito em “A”. Estes enlaces podem ser reforçadores quando as duas variáveis causam influência direta uma na outra, ou ainda, quando há um número par de influências inversas no enlace. Estes, podem ainda ser balanceadores, ou seja, quando há um número ímpar de influências inversas no enlace (LIU; BURNS, 2011). Um exemplo destes enlaces pode ser visto na Figura 4, que mostra uma representação da população onde R1 é um enlace reforçador e B1 é um enlace balanceador.

Figura 4 - Estrutura com enlaces reforçador e balanceador.



Fonte: Adaptado de (LIU; BURNS, 2011).

Nota-se que quanto maior a população, maior o número de nascimentos, e conseqüentemente maior a população. Este é um enlace reforçador, que tem seu crescimento limitado pela taxa de nascimentos. Por outro lado, quanto maior a população também é maior o número de mortes, o que causa uma diminuição na população. Este enlace é balanceador, pois limita o crescimento da população e sua magnitude está ligada a taxa de mortalidade. Por

meio desta linguagem lógica de influências entre as variáveis, é que se monta um mapa sistêmico para explicar a situação de interesse na realidade.

### 2.1.3 Método do Pensamento Sistêmico

A utilização do Pensamento Sistêmico se dá por meio da utilização do método sistêmico que é composto por nove passos. Estes passos são elencados abaixo e são propostos por Andrade et al., (2006):

- 1. Definir uma situação complexa de interesse:** O objetivo é fazer uma clara definição da situação de interesse a ser utilizada. Pode ser uma problemática ou uma questão de interesse estratégico, a situação é definida em uma frase.
- 2. Apresentar histórico por meio de eventos:** Analisar eventos relevantes que sejam relacionados com a situação de interesse. Evento é um acontecimento observável; é importante que seja ampliada a visão e o domínio da história acerca da situação de interesse.
- 3. Identificar as variáveis chave:** São as variáveis que podem representar os eventos. Estas variáveis podem ser representadas graficamente, e cada um dos eventos pode ser observado por pelo menos uma variável. Deve-se encontrar estas variáveis chave.
- 4. Traçar os padrões de comportamento:** São coletados os dados históricos das variáveis e traçados gráficos que fornecem um entendimento do comportamento da variável a longo prazo.
- 5. Desenhar o mapa sistêmico:** O objetivo é identificar as relações causais entre os fatores. Estas relações são feitas a partir da comparação de curvas das variáveis, hipóteses preliminares, intuições e conhecimento de especialistas. Assim é desenhada a estrutura sistêmica.
- 6. Identificar modelos mentais:** O objetivo é levantar quais são as crenças e os pressupostos que os atores da temática mantêm em suas mentes, e que influenciam seu comportamento frente as decisões do mundo real.
- 7. Realizar cenários:** Está a forma de se visualizar futuros alternativos. São feitos especialmente para desafiar modelos mentais acerca do futuro e possíveis

desdobramentos que possam ocorrer neste. Incertezas críticas e forças determinantes para estes cenários são a fonte da reflexão.

- 8. Modelar em computador:** Este é o processo onde se constrói um modelo computacional para simular e testar estratégias e seus efeitos ao longo do tempo. É feito através da dinâmica de sistemas e softwares desta disciplina. As entradas principais para este processo são o mapa sistêmico e os cenários.
- 9. Definir direcionadores estratégicos:** A partir do aprendizado adquirido na simulação do sistema e seus cenários, são criadas estratégias e planos de ação para alavancar o sistema e direcioná-lo, a fim de se alcançar o objetivo desejado.

## 2.2 Dinâmica de Sistemas

A dinâmica de sistemas (*System Dynamics*) teve início por volta dos anos 60, onde seu precursor, Jay E. Forrester, criou a técnica para simular problemas industriais, na época então chamada *Industrial Dynamics*. A técnica é focada na utilização de modelos computacionais dinâmicos para simular determinada realidade e seu comportamento com o passar do tempo. A sua utilização atingiu rapidamente as dinâmicas sociais e econômicas, e sua aplicabilidade é praticamente universal; entre as principais aplicações estão relacionadas energia e meio ambiente (FORRESTER, 2007).

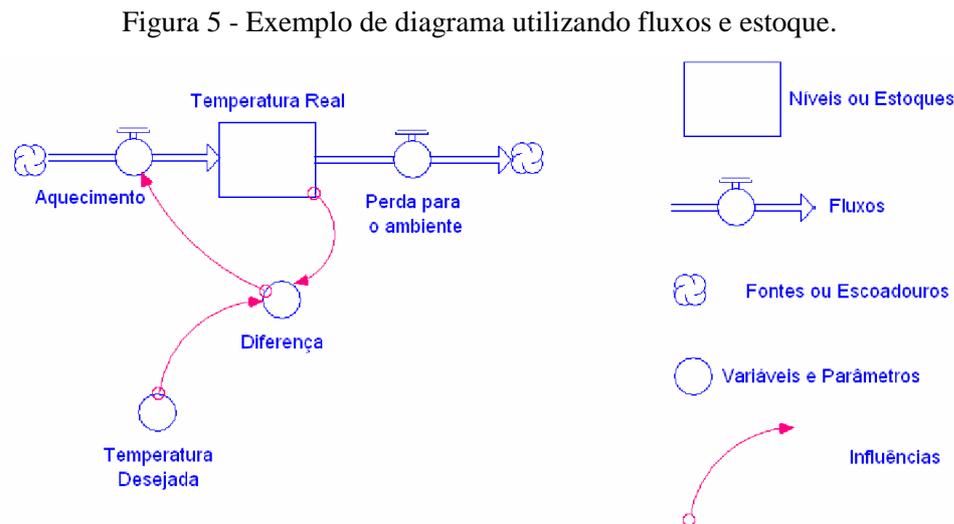
Uma de suas características é elucidar aquilo que é não é intuitivo. Uma vez que a mente humana tem certas limitações, ao se deparar com situações de maior complexidade tem a tendência de concluir respostas baseadas na intuição. Em se tratando de situações de grande complexidade, a intuição muitas vezes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

Buscando conclusões sobre uma realidade complexa por meio da modelagem computacional, Morandi (2008) considera que “A modelagem computacional parte de um modelo qualitativo para a criação de um modelo quantitativo, usando para isto as técnicas da Dinâmica de Sistemas, os Diagramas de Estoque e Fluxo”. Para construção destes

digramas utiliza-se uma linguagem formada pelos seguintes elementos, segundo Morandi (2013) e Pidd (2003):

- Estoques: registra a acumulação de determinada variável;
- Fluxos: representa a taxa de mudança de recursos ou informações;
- Funções decisão: é a forma como são controlados os fluxos;
- *Delays*: é o tempo que certa influência atrasa para causar efeitos;
- Fontes e escoadouros: origem e destino dos fluxos;
- Variáveis e parâmetros: são auxiliares para estabelecer ajustes ao sistema por meio de realização de operações algébricas.

Um exemplo de um diagrama de modelagem dinâmica de sistemas utilizando fluxos e estoques pode ser visualizado na Figura 5. Este modelo representa a simulação do controle de temperatura de um sistema de climatização.



Fonte: (MORANDI, 2008).

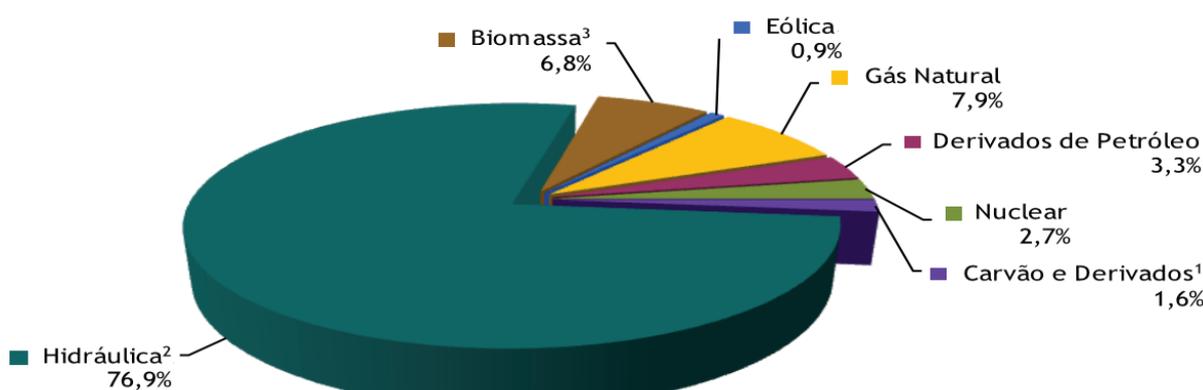
A Dinâmica de Sistemas – DS vem sendo utilizada em diversos estudos na área de energia, impactos socioeconômicos e ambientais, e externalidades. Cepeda; Finon (2013) faz uma proposição para compensação das externalidades geradas por usinas eólicas. Já Shih; Tseng, (2014) usa a Modelagem Dinâmica de Sistemas - 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; LYLE; MIAO, 2010; LIU; BURNS, 2011; LIUGUO; SHIJING; JIANBAI, 2012; MOVILLA; MIGUEL; BLÁZQUEZ, 2013; STASINOPOULOS

et al., 2011; WU; HUANG; LIU, 2011). A DS também é considerada uma importante ferramenta que ajuda a entender a complexidade de decisões política 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), que utiliza a MDS para avaliar os custos externos das diferentes opções de geração de energia para seu país. Este assunto é também abordado nas próximas seções, que fazem um breve descritivo do mercado brasileiro, e após entra-se no assunto dos custos externos da geração de energia.

### 2.3 Setor Brasileiro de Energia

O Brasil tem uma matriz energética diferenciada, que para o ano de 2012 teve uma produção primária de energia com 54% oriundos de fonte não-renovável e os 46% restantes de fontes renováveis. Quando analisada a geração de energia elétrica, a participação de fontes não-renováveis foi de apenas 16,5% no ano de 2012, sendo a energia hidráulica líder absoluta (Figura 6). Este número, porém, já fora menor em 2011, quando as fontes não-renováveis representavam 11,9% da geração de energia elétrica total nacional (EPE, 2013). Cenário este que, segundo Pereira et al. (2013), é diferente do padrão mundial, e garante ao Brasil uma matriz com um custo de energia menor.

Figura 6 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte no Brasil em 2012.



Notas/ Notes:

<sup>1</sup> Inclui gás de coqueria

<sup>2</sup> Inclui importação de eletricidade

<sup>3</sup> Inclui lenha, bagaço de cana, lixívia e outras recuperações

Fonte: (EPE, 2013)

O mercado de geração de energia de um país é reflexo de suas políticas. No Brasil, o mercado de geração de energia elétrica é regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL. Existem dois ambientes de comercialização de energia normatizados pela ANEEL, o Ambiente de Contratação Livre – ACL e o Ambiente de Contratação Regulado – ACR. O ACL é destinado a consumidores livres e especiais, que possuem uma grande demanda de energia e podem escolher como contratar sua energia; consumidores livres têm carga de 3000 kW ou mais, podendo comprar de qualquer fonte energética, já os consumidores especiais possuem carga de 500 kW a 3000 kW e podem comprar apenas de empreendimentos de geração por fonte renovável. Para todos os demais consumidores (carga menor a 500 kW) é possível apenas a contratação pelo ACR.

O mercado Brasileiro de energia no ACR é baseado no sistema de leilões de energia, tendo como referência o valor do MWh que será vendido pelo empreendimento. Também há o ambiente de contratação livre, onde os valores do preço da energia são acertados diretamente entre os geradores de energia e os grandes consumidores habilitados a participar deste mercado. Em ambos os casos a atratividade dos empreendimentos é calculado baseado em valores econômicos.

Para 2013, cerca de 74% da energia é negociada no ACR (EPE, 2013), onde a partir de uma projeção de demanda são abertos leilões de compra de energia para suprir esta nova demanda. A dinâmica destes leilões é que se concorra pelo preço final que será entregue a energia para o sistema (valor do MWh) independentemente do tipo de empreendimento e fonte de energia a ser utilizada. Logo, todas fontes concorrem de igual para igual, considerando apenas os valores econômicos diretos relacionados, ou seja, não são contabilizados os custos externos gerados.

De toda energia elétrica gerada no Brasil, segundo EPE (2013) 14,1% foi produzida por autoprodutores, considerando todas as fontes. Autoprodutores são pessoas físicas, jurídicas ou empresas reunidas em consórcio que recebem autorização para produzir energia elétrica para consumo próprio (ANEEL, 2008). A autoprodução está concentrada nos segmentos de siderurgia, mineração, petroquímica e papel e celulose, e o valor total de energia produzida por autoprodutores irá duplicar dentro dos próximos 10 anos (MME; EPE, 2013). Isto significa investimento em novos empreendimentos de geração e, assim sendo, a adoção de um custo sistêmico total para geração de energia pode alterar a maneira como estes investimentos serão feitos e, conseqüentemente, como será o panorama energético futuro do Brasil.

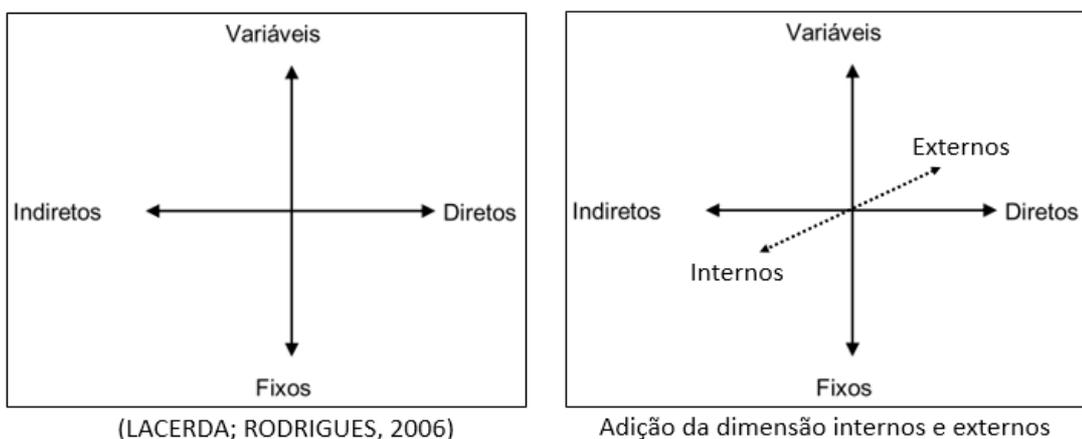
## 2.4 Custos de Geração de Energia e Externalidades

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 (PRIA, 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. Esta seção discute um pouco a respeito da classificação dos custos, e sobre o custo sistêmico.

A classificação de custos varia de acordo com a atividade e a organização. Uma das finalidades destas classificações é a apuração dos resultados obtidos ao longo de suas operações, logo, uma melhor classificação dos custos leva a uma avaliação mais apurada do resultado, atrelado a cada atividade da organização (LACERDA; RODRIGUES, 2006). Este mesmo autor propõe uma classificação em duas dimensões (custos diretos, indiretos, fixos e variáveis). No presente estudo, para a composição do custo sistêmico total, ainda é proposta uma classificação para outra dimensão (internos e externos), apresentado na Figura 7, e este custo sistêmico é o resultado do somatório de todas estas dimensões.

Figura 7 - Classificação de custos propostas.



(LACERDA; RODRIGUES, 2006)

Adição da dimensão internos e externos

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Lacerda; Rodrigues, (2006)

Assim, esta seção discute acerca da classificação destes custos sob a perspectiva das dimensões: interno ou externo e direto ou indireto.

#### 2.4.1 Custo Interno Direto

Os custos internos diretos são aqueles observados sob perspectiva dos investidores privados, ou seja, aqueles puramente econômicos, como capital investido para implantação, custo de operação e manutenção. Estes custos variam de acordo com o projeto, dependendo da fonte de energia a ser explorada, potencial energético disponível, das condições socioeconômico e ambientais locais, entre outras (TIMILSINA; CORNELIS VAN KOOTEN; NARBEL, 2013).

Um dos maiores desafios das análises econômicas é conhecer as variações destes custos de acordo com os fatores locais onde o projeto será implantado. Em um parque eólico, os custos diretos são compostos principalmente pelo custo das turbinas e equipamentos relacionados ao aerogerador, custos de construção, de compra ou aluguel da área da usina, custos de acesso (construção de estradas e terraplanagem), infraestrutura de ligação com a rede, operação (mão de obra, combustível, taxas e impostos), custo do capital e de manutenção (reposição de peças, mão de obra, manutenção área, segurança) (CUSTÓDIO, 2013).

Existe a tendência do custo direto reduzir-se gradualmente devido ao avanço da tecnologia e políticas de incentivo. Segundo estudo realizado e publicado pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL), dos Estados Unidos, em 2012, que analisou 18 cenários possíveis, este custo pode reduzir em 40% até 2030 se considerado o valor base de 2012. Este estudo, bem como os cenários estudados, foram elaborados por pesquisadores e entidades de vários países (CUSTÓDIO, 2013).

#### 2.4.2 Custo Interno Indireto

Os custos internos indiretos estão relacionados a natureza da fonte energética a ser explorada e incluem a forma com que esta fonte gera impacto no mix energético, os perfis de carga do sistema energético e a forma de entrega da energia. Uma fonte intermitente como,

por exemplo, a eólica não pode ser armazenada (considerando alternativas economicamente viáveis) e, assim, seu impacto na dinâmica do sistema energético é diferente do impacto de uma usina hidroelétrica, que pode armazenar energia por meio da capacidade de suas barragens. Deste modo, podem acontecer flutuações na capacidade do sistema como um todo e, conseqüentemente, nos custos relacionados a este. Ainda, dentre os custos internos indiretos também são contabilizadas as compensações sociais e ambientais exigidas pelos órgãos públicos (TIMILSINA; CORNELIS VAN KOOTEN; NARBEL, 2013).

As usinas de geração eólica, estão situadas em locais com potencial eólico que, muitas vezes, não são próximos dos centros de consumo de energia, sendo desta forma necessária a construção de novas linhas de transmissão. No mercado brasileiro de energia, as linhas de transmissão são empreendimentos independentes dos empreendimentos de geração, pagando-se pela utilização destas linhas de transmissão. De forma geral, a composição das taxas de uso do sistema de transmissão e custo da energia, consideram os investimentos necessários para garantir o fornecimento a todos os pontos necessários (ANEEL, 2008; EPE, 2013; MME; EPE, 2013; TIMILSINA; CORNELIS VAN KOOTEN; NARBEL, 2013).

Ao adicionar ao sistema uma fonte intermitente, como a eólica, faz-se necessário adicionar outras fontes que possuam capacidade de armazenar energia, tais como hidrelétricas e termoelétricas, sendo assim possível se fazer um gerenciamento que garanta uma geração constante de energia para suprir as necessidades do sistema (ANEEL, 2008; MME; EPE, 2013; TIMILSINA; CORNELIS VAN KOOTEN; NARBEL, 2013). Com tal característica, ao adicionar-se a fonte intermitente eólica ao sistema, torna-se necessário existirem outras fontes com capacidade de *backup* de energia para os momentos de menor geração e, por conseguinte, um investimento adicional em infraestrutura de geração - que eventualmente ficará ociosa –sendo este custo parcialmente incorporado ao custo final da energia.

#### 2.4.3 Custo Externo

Finalizando a composição dos custos totais, está o custo externo, que é composto pelas externalidades geradas para a sociedade. 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). 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).

Os custos externos diretos relacionam-se diretamente com a atividade da empresa, tais como a contabilização dos impactos socioeconômicos e ambientais ocasionados na construção de uma nova usina, na geração de energia, na queima de combustível, e nas demais operações relacionadas às atividades da usina de geração de energia.

Já os custos externos indiretos são aqueles gerados, e não possuem uma relação direta com a geração de energia, como os impactos gerados ao Sistema Interligado Nacional por meio da construção de novas linhas de transmissão, ou ainda, pela adição de outras usinas de geração de energia para garantir o fornecimento médio constante, apesar das flutuações na geração por fontes intermitentes.

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 a 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)*. Esta técnica é explicada no próximo tópico.

#### 2.4.3.1 Análise de Ciclo de Vida - ACV

A Análise de Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica utilizada para avaliar o impacto de um produto ao longo da sua vida útil. Ao se falar em produto, refere-se a bens e serviços. Esta técnica foi originalmente desenvolvida no final da década de 1960 e durante os anos 70 com o objetivo de se entender os impactos ambientais das diferentes opções de embalagens. Inicialmente, os impactos de interesse eram relativos ao consumo de energia e produção de rejeitos sólidos, e os impactos gerados por estes. Porém, o escopo da técnica foi crescendo e começou-se a olhar para outros impactos como emissões de gases poluentes e contaminação de águas (UNEP, 2009). A utilização da ACV começou a evoluir na metade dos anos 80. A

técnica avalia o que é injetado e extraído no sistema durante seu ciclo de vida, verificando os impactos ambientais. Atualmente, é muito utilizada para sistemas de geração de energia, mas em muitos estudos seu uso fica restrito a análise do balanço de energia utilizada/gerada e o balanço das emissões de CO<sub>2</sub> (DAVIDSSON; HÖÖK; WALL, 2012).

O estudo de ACV deve ser sistematicamente e adequadamente elaborado de acordo com o sistema que será estudado. A profundidade com que se faz a análise depende dos objetivos e também do escopo do projeto (BHAT; PRAKASH, 2009). As análises de ACV também englobam os impactos sociais, ao identificar os principais atores envolvidos e analisar quais impactos ocorrem com estes, podendo ser negativos ou positivos. De forma geral, quando se analisam os impactos sociais, espera-se que sejam positivos, já quando se estudam os impactos ambientais, espera-se que estes não aconteçam (UNEP, 2009).

Avaliações do ciclo de vida geralmente seguem quatro passos básicos: Objetivos e escopo; Inventário de ciclo de vida; Avaliação do impacto e Interpretação. O Objetivo e escopo definem quais serão as fronteiras do estudo, o método a ser utilizado e também o nível de detalhamento a ser utilizado para a análise. O Inventário de ciclo de vida é a etapa onde se analisam os fluxos físicos do que é consumido e gerado pelo sistema e que tenham relevância no impacto ambiental. Também se verifica como este impacto acontece, gerando informações sobre as consequências do impacto. O próximo passo é realizar a avaliação do impacto do ciclo de vida, baseado nas informações obtidas nos passos anteriores. É importante que para a avaliação não se utilize apenas fatores objetivos, mas também valores subjetivos que possam ser impactados. Por fim são feitas as interpretações, de onde são extraídos os aprendizados sobre a avaliação (DAVIDSSON; HÖÖK; WALL, 2012).

O objetivo da ACV é fazer um comparativo entre diferentes práticas e opções no que tange aos impactos gerados por esta escolha, sejam ambientais ou socioeconômicos. Esta análise é feita sob aspectos distintos, muitas vezes subjetivos e não comparáveis entre si. Quando se utilizam indicadores qualitativos, pode ser difícil cotejar os resultados de diferentes situações de interesse, e para que isso seja possível, é preciso utilizar uma unidade funcional de comparação. Uma boa forma de se fazer uma comparação mais apurada é expressar os impactos na forma de valores monetários, ou seja, converter os impactos nos custos monetários gerados ou economizados em razão dos impactos. Quando estes impactos são expressados em valores monetários, aumenta-se a capacidade de identificar as consequências das decisões (UNEP, 2009).

#### 2.4.3.2 ACV e impactos na geração de energia

Uma das aplicações da ACV é avaliar o impacto gerado por empreendimentos de geração de energia.

Os impactos de um parque eólico podem ser positivos, e este evento relaciona-se ao fato de gerar energia produzindo um impacto menor quando comparado a outras fontes (ex. petróleo, carvão, gás, e outros combustíveis). Os principais impactos positivos diretos são a redução de emissões de gases do efeito estufa e a diminuição do consumo de água (SAIDUR et al., 2011).

Existem diversos impactos, diretos e indiretos, de longo prazo gerados pelos parques eólicos. Estes impactos não são perceptíveis em um primeiro momento, mas devem ser levados em consideração nos estudos. Embora não sejam muito claros, eles impactam principalmente sobre a vida humana, animal e mudanças climáticas. Aves são afetadas diretamente pelas turbinas eólicas, porém o número de mortes devido às turbinas eólicas é desprezível se comparado a outras intervenções humanas como, por exemplo, a urbanização (LEUNG; YANG, 2012).

Os impactos referentes a vida selvagem, tratam da mortalidade de aves e morcegos. Os principais fatores que afetam a mortalidade de aves, segundo Saidur et al., (2011), são:

- Impactos de iluminação: Aves ficam desorientadas em mau tempo e nebulosidade durante a noite, conseqüentemente são atraídas pela iluminação das torres eólicas, aumentando assim a quantidade de aves que voam através dos parques eólicos. Isto eleva o número de mortes por colisão;

- Impactos do clima: Menos de 10% das fatalidades acontecem quando o clima não é um dos fatores causa. Com o clima ruim, chuvoso, com nuvens baixas ou ventos fortes, as aves voam em alturas mais baixas, aumentando assim o potencial de se chocarem contra as turbinas.

- *Design* da torre: As torres antigas em geral são menores em altura e diâmetro de hélice, e mesmo sendo menores, por sua maior velocidade de rotação acabam gerando maior número de mortes. Quando são torres metálicas treliçadas atraem ninhos de aves.

- Altura da torre: As diferentes espécies de aves voam normalmente em diferentes alturas. Assim as turbinas não afetam todas espécies. Estudos apontam que as aves ajustam sua altura padrão de voo após passarem por uma sequência de turbinas.

O impacto direto e inerente, mais notável e crítico dos parques eólicos são os ruídos e o impacto visual. O ruído é de origem mecânica ou aerodinâmica (atrito com o vento). Este barulho incomoda os moradores que vivem próximo aos parques eólicos, e representa um impacto relevante que pode causar alguns distúrbios ao ser humano (LEUNG; YANG, 2012; SAIDUR et al., 2011).

Há também a ocorrência do impacto visual, que é de difícil mensuração por se tratar de um aspecto subjetivo. Uma pesquisa conduzida no Reino Unido mostrou que 70% dos pesquisados não têm opiniões negativas sobre as turbinas eólicas, porém alguns alegam que os geradores eólicos causam uma poluição visual forte e podem estragar áreas propensas ao turismo (LEUNG; YANG, 2012). O impacto visual e sua magnitude também depende do tamanho, cor e distância da qual está a turbina. O contraste da cor da turbina com a paisagem pode causar desconforto, e quanto mais próximo das residências maior será o impacto. Um outro impacto visual é a sombra oscilante, que acontece pelo movimento das pás da hélice, causando sombra diretamente, que fica oscilando conforme as hélices giram, ou indiretamente pelo reflexo das pás. Esta sombra pode causar distúrbios para residentes próximos às turbinas. Este impacto, porém, não é considerado muito relevante, pois as sombras são de tamanho relativamente pequeno, contudo, à medida que as turbinas vão aumentando de tamanho, este impacto também aumenta (SAIDUR et al., 2011).

Os impactos negativos existem, porém muito se pode fazer para mitigá-los. Em relação aos ruídos, este impacto é mitigado pelo uso de materiais isolantes de som para evitar os ruídos mecânicos. Já para reduzir o ruído produzido pela aerodinâmica, estudos de design de torres e pás já apresentam resultados positivos (MAGOHA, 2002). Uma outra forma de se isolar este impacto seria construir usinas eólicas afastadas de residências ou adaptar as construções existentes para que sejam isoladas do ruído. Em se tratando dos impactos gerados aos animais, existem tecnologias como dispositivos de radar que ao detectarem um bando de aves sobrevoando a área do parque eólico desativam automaticamente as turbinas até que o bando saia da área de risco. Já existem pesquisas - em parcerias de indústrias e organizações de proteção às aves - para criar e aprimorar tecnologias de sinalização que não atraiam aves (LEUNG; YANG, 2012).

Brannstrom; Jepson e Persons (2011), em seu estudo sobre os impactos socioeconômicos de empreendimentos eólicos, conduzido no estado do Texas, Estados Unidos, revelaram mudanças econômicas na região, na política de impostos, no mercado imobiliário e distribuição de renda.

Uma outra característica da ACV refere-se à sua utilização para um número limitado de parâmetros. Modificando-se a tecnologia a ser analisada e outras situações locais, existem fatores específicos que devem ser considerados (PEHNT, 2006). Este mesmo autor descreve que a ACV pode ser utilizada em uma avaliação estática direta ou dinâmica, situação onde as causas e efeitos dos impactos são considerados durante um período maior de tempo. Em sua pesquisa, Pehnt (2006), com o objetivo de analisar os impactos ao longo do tempo, utiliza dados de entrada que são previsões futuras dos parâmetros que influenciam os impactos. Neste sentido, percebe-se uma lacuna no que tange a uma avaliação dinâmica, e espera-se que a utilização em conjunto da ACV e Pensamento Sistêmico, possa contribuir para a elucidação desta.

## **2.5 Incorporação das Externalidades no Custo da Energia**

Estabelecer custo é uma tarefa desafiadora para qualquer bem ou serviço. 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; LYLE; MIAO, 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 sociedade. Conseqüentemente, poderão se tomar melhores decisões sobre as políticas energéticas (ELLIOTT; LYLE; MIAO, 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 termoeletricas movidas a carvão (custo somente associado as 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), onde afirmou 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 através desta ferramenta, o mercado brasileiro de energia poderá sofrer algumas alterações.

A partir da exposição destes conceitos e considerando-se o contexto em que está inserida esta pesquisa, elaborou-se uma metodologia para que sejam contemplados os objetivos propostos no presente estudo. Esta metodologia é detalhadamente apresentada no capítulo seguinte.

### 3. MÉTODO

Esta seção apresenta os aspectos metodológicos considerados para o desenvolvimento desta pesquisa. Primeiramente é abordado o método científico, que trata das estratégias e do desenho de pesquisa que é utilizado neste estudo de forma a construir o conhecimento. Em um segundo momento é exposto o método de trabalho, que mostra a sequência de etapas transpostas para atingir os objetivos do estudo.

#### 3.1 Método Científico

Uma investigação científica é composta por um conjunto de procedimentos intelectuais oriundos da linha de raciocínio lógico adotados na pesquisa. (SILVA; MENEZES, 2005). Segundo Marconi e Lakatos (2005), toda a ciência se caracteriza pela utilização de métodos científicos, e ao apresentar uma gama de métodos, o autor salienta a importância para a utilização destes procedimentos para auxílio de decisões do pesquisador. Por outro lado, Silva e Menezes (2005) concluem que a ciência não é fruto de um roteiro totalmente previsível, e que portanto a problemática não deve ser encarada com uma única maneira de raciocínio, dada complexidade do mundo das investigações científicas.

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, neste estudo adotou-se o método *Design Science Research* (DSR). Este método visa a construção do conhecimento por meio da criação de um artefato, podendo ser utilizado para projetar soluções (LACERDA et al., 2013; VAN AKEN, 2004). À vista disso, a proposta deste estudo é possibilitar a geração de aprendizado para tomada de decisões.

O *Design Science Research* (DSR) ajuda a entender o fenômeno e, segundo Lacerda et al., (2013), tem o objetivo de prescrever e projetar artefatos que são objetos artificiais, visando ao cumprimento de um objetivo em um determinado ambiente. Demais características apontadas pelos autores são apresentadas no Quadro 3.

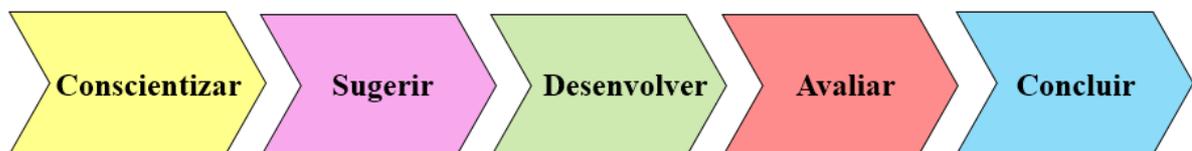
**Quadro 3-** Características do Design Science Research

Características	Design Science Research
Objetivos	Desenvolver artefatos que permitam soluções satisfatórias aos problemas práticos.
	Prescrever e Projetar
Principais Atividades	Conscientizar; Sugerir; Desenvolver; Avaliar; Concluir
Resultados	Artefatos (Constructos, Modelos, Métodos, Instanciações)
Tipo de Conhecimento	Como as coisas deveriam ser
Papel do Pesquisador	Construtor e Avaliador do Artefato
Base Empírica	Não obrigatória
Colaboração Pesquisador-Pesquisado	Não obrigatória
Implementação	Não obrigatória
Avaliação dos Resultados	Aplicações; Simulações; Experimentos
Abordagem	Qualitativa e/ou Quantitativa

Fonte: adaptado de Lacerda et al. (2012).

A análise do método *Design Science Research* (DSR) mostrou que este método tem características que vão ao encontro do objetivo proposto. Como observado no Quadro 3, o DSR tem como principais atividades: Conscientizar, Sugerir, Desenvolver, Avaliar e Concluir; que são executadas nesta ordem, respectivamente (Figura 8). Estas atividades são detalhadas a seguir de acordo com os estudos de (LACERDA et al., 2013; MANSON, 2006).

Figura 8 - Atividades DSR.



Fonte: Elaborado pelo Autor a partir de Lacerda et al. (2012)

**Conscientizar:** Esta é a parte inicial da pesquisa, onde o pesquisador toma ciência de uma problemática. Neste momento, o pesquisador faz uma avaliação inicial explicando a

situação de interesse, o contexto em que se encontra, o que já se sabe sobre a temática, e por fim é feita uma proposta para se iniciar uma nova pesquisa.

**Sugerir:** Esta fase da pesquisa é essencialmente criativa, pois são feitas tentativas do projeto de pesquisa. Estes projetos de pesquisa desenhados são diretamente conectados à proposta previamente feita. É importante que nesta fase se conduza um projeto de pesquisa, e que cada pesquisador projete a pesquisa de uma forma, propondo diferentes teorias para abordar um conjunto similar de observações.

**Desenvolver:** Etapa em que é construído um artefato, ou mais, proposto pelo pesquisador. Este artefato pode ser, entre outros, um software, um método, um modelo teórico ou um modelo computacional de simulação. As técnicas utilizadas são as mais diversas, dependendo do artefato que será construído. As formas de utilização do artefato também são explicitadas nesta etapa.

**Avaliar:** Após a construção do artefato, este deve ser testado e avaliado em relação ao que foi proposto na fase inicial da pesquisa, as formas de avaliação do artefato devem ser explicitadas, e devem-se criar hipóteses que busquem descrever seu modo de funcionamento. Neste sentido, os desvios em relação ao comportamento esperado do artefato trazem um maior conhecimento sobre este. Ainda nesta etapa devem ser sugeridas as limitações do artefato, bem como as possíveis mudanças para que ele se comporte de forma aceitável frente aos objetivos da pesquisa.

**Concluir:** Quando o artefato estiver bom o suficiente para os objetivos propostos, deve-se consolidar os resultados e registrá-los. Assim, são sintetizadas as principais aprendizagens e justificadas as contribuições para a temática em questão.

Nesta pesquisa utilizou-se o DSR com intuito de construir o artefato, que é um modelo para cálculo do custo sistêmico da energia gerada por fonte eólica. Fez-se a escolha deste método, pois a DSR tem como principais objetivos prescrever e projetar artefatos para a busca de soluções de problemas (LACERDA et al., 2013).

### 3.2 Método de Trabalho

A definição da temática baseou-se nas inquietações do pesquisador, frente as decisões acerca da definição de matriz energética. Estas inquietações tomaram direcionamentos após conversas informais com atores envolvidos na temática proposta. Também foram pesquisados periódicos nacionais e internacionais, bases de dados de teses, dissertações e outras fontes a

fim de se verificar pesquisas que vêm sendo realizados neste sentido. Por fim, munido do aprendizado obtido em pesquisas, conversas informais e conhecimentos do pesquisador, definiu-se a situação de interesse a ser pesquisada.

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

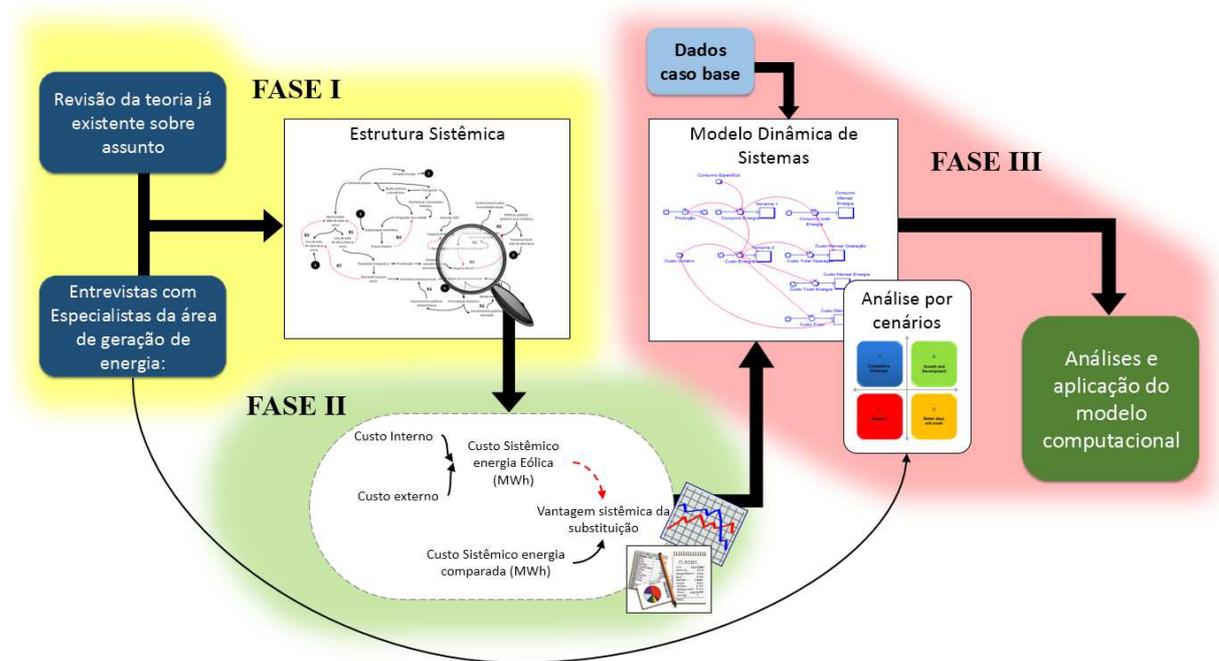
Optou-se por utilizar, para o desenvolvimento desta pesquisa, uma adaptação do método do Pensamento Sistêmico e Planejamento por Cenários (PSPC), assim como é proposto por Andrade et al., (2006). Esta opção foi feita pois o método traz um melhor conhecimento sobre a realidade, por meio do princípio da alavancagem, podendo assim gerar estratégias frente ao 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 situação complexas desde seu surgimento, e sua abrangência está expandido a 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, sendo todos estes temas presentes neste estudo (ANDRADE et al., 2006; FORRESTER, 2007). Esta definição foi feita com objetivo de criar-se um modelo computacional para maior entendimento da dinâmica dos custos oriundos da geração de energia. Hasani-Marzooni; Hosseini, 2011, utilizaram esta abordagem em seu estudo sobre decisões de investimentos no mercado de energia eólica. A utilização conjunta destas abordagens já mostrou sucesso ao atingir os objetivos propostos no estudo realizado por Morandi et al. (2013), que estudou 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 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 9). 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.

Figura 9 – Macro Fases do método de trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

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

### 3.2.1 Fase I

Fase inicial é a fase de aquisição do conhecimento, onde é gerado o entendimento sobre a situação e se dão os primeiros passos em direção aos objetivos.

**Passo 1 – Revisão da literatura:** Uma das condições para a realização de um trabalho científico satisfatório é o conhecimento do que já foi desenvolvido sobre o assunto, sendo essa condição de domínio especial da bibliografia (STROHL, 1926 apud VOLPATO, 2000). Assim, primeiramente os esforços foram direcionados para uma pesquisa de referências baseada na literatura. Foi feita uma revisão bibliográfica, que teve como finalidade colocar o pesquisador em contato direto com o que está escrito sobre assunto estudado, buscando

verificar as possíveis e diferentes interpretações que cercam a temática. (MARCONI; LAKATOS, 2005).

**Passo 2 – Elaboração da entrevista semiestruturada:** Segundo Yin e Grassi (2001), entrevistas são uma das mais importantes fontes de informação para um estudo. Então, neste passo optou-se por obter informações por meio de entrevistas semiestruturadas aplicadas a especialistas.

Entrevistas quando conduzidas de forma espontânea, assumindo um caráter de conversa informal, e que indaguem os respondentes a darem suas opiniões sobre fatos e acrescentar suas interpretações sobre o assunto aproximam este respondente do papel de informante (YIN; GRASSI, 2001). 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 obtivesse as informações relacionadas aos impactos socioeconômicos decorrentes de um empreendimento de geração de energia. A entrevista é apresentada no ANEXO I.

**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 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.

Esta seleção foi feita a fim de se formar um grupo de especialistas de todas as áreas que englobam esta pesquisa. Assim, selecionou-se um grupo de pessoas a ser entrevistadas, que é apresentado no Quadro 4.

Quadro 4 - Lista de especialistas entrevistados.

	<b>Formação</b>	<b>Área atuação</b>	<b>Experiência</b>
ESP1	Me. Engenharia Elétrica	Concessionária de distribuição de energia	Técnica operacional em distribuição e geração de energia; Gestor de área de planejamento de expansão de negócios de energia; Presidente de empresa de geração de energia; Presidente de concessionária de energia; Atuação em conselho de empresa de regulação na área de energia.
ESP2	MBA em Gestão Empresarial	Fabricante de equipamentos de geração de energia eólica	Técnica e operacional na implantação de empreendimentos de geração de energia eólica; Gestor de marketing e atuante no relacionamento poder público, privado e sociedade na região de implantação dos empreendimentos de geração de energia eólica;
ESP3	MBA em Logística	Fabricante de equipamentos de geração de energia eólica	Gerente de Logística; coordenação de atividades operacionais; controle de custos e prazos; negociações junto a fornecedores e clientes; avaliação do desempenho de operações;
ESP4	Me. Engenharia Energia - Eólica	Geração de energia, entre as 3 maiores do Brasil	Engenharia de projetos e implantação de empreendimentos de geração de energia (eólica e hidráulica); Diretor de engenharia

	<b>Formação</b>	<b>Área atuação</b>	<b>Experiência</b>
			para desenvolvimento de novos projetos (eólica e hidráulica); Diretor de negócios de energia atuando na gestão do projeto e implantação de parques de geração eólica.
ESP5	Dr. Engenharia Elétrica	Desenvolvimento de projetos de geração de energia eólica, solar e hidroelétrica	Experiência acadêmica na área elétrica; Gerência de empresa de projetos de geração de energia responsável pela gestão e coordenação do desenvolvimento de projetos.
ESP6	Me. Engenharia Energias Renováveis	Desenvolvimento de projetos de geração de energia eólica, solar e hidroelétrica	Pesquisador na área de energias renováveis e impactos cumulativos na geração de energia em um dos maiores institutos de pesquisa de energias renováveis da Alemanha; Técnico no desenvolvimento de projetos de geração de energia solar e eólica.
ESP7	Área administrativa de negócios	Desenvolvimento de projetos de geração de energia eólica, solar e hidroelétrica	Diretora da área comercial e de negócios, responsável pelo gerenciamento dos negócios, busca de novas áreas para implantação de projetos de geração eólica, através do contato direto com proprietários das áreas e visitas constantes a site. Com experiência nesta área há mais de 25 anos.
ESP8	Dr. Gestão e tratamento de resíduos	Área acadêmica e de pesquisa; Projetos tecnológicos e consultoria na área ambiental	Experiência na área de Engenharia sanitária e ambiental, com ênfase em Análise do Ciclo de Vida, atuando principalmente nos seguintes temas: gestão ambiental, resíduos sólidos, apoio à decisão e análise multicritério.
ESP9	Dr. Engenharia Mecânica	Acadêmica e de pesquisa na área de geração de energia	Experiência técnica operacional em projetos de geração termoeletrica; Experiência profissional em duas das maiores empresas de geração de energia que operam no estado do Rio Grande do Sul; Pesquisadora da Rede Nacional de Combustão e da Rede Carvão; Pesquisas na área de energia eólica e hídrica.
ESP10	Dr. Engenharia Aeroespacial	Acadêmica e de pesquisa na área de geração de energia	Pesquisa e ensino na área de mecânica de fluidos e simulação numérica com aplicação nas áreas de resfriamento eletrônico, análise de turbulência e energia eólica; estudo de novas tecnologias voltados a geração eólica;
ESP11	Engenharia Elétrica	Desenvolvimento de projetos de geração de energia eólica, solar e hidroelétrica	Pesquisas na área elétrica voltada ao impacto de usinas de geração de energia na rede; Atividades técnicas em projetos de usinas de energia eólica; Projetos de implantação de usinas de energia.
ESP12	Engenharia Civil	Desenvolvimento de projetos de geração de energia eólica, solar e hidroelétrica	Desenvolvimento de projetos e implantação de usinas hidroelétricas; Estudo de viabilidade técnico-econômica de projetos de geração hídrica e eólica; Gestão da implantação de projetos de PCH; Auditoria de projetos e levantamentos de potencial eólico de geração.
ESP13	Me. Engenharia Mecânica	Desenvolvimento de projetos de geração de energia eólica, Investidor em negócios de geração de energia eólica	Desenvolvimento, implantação, operação e gestão de usinas geradoras de energia. Participou da implantação das primeiras usinas de geração de energia eólica em grande porte. Larga experiência no relacionamento entre usina, poderes públicos e sociedade. Diretor de empresa de geração de energia eólica, que atua também como investidora do ramo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Passo 4 – Aplicação das entrevistas:** Para cada um destes especialistas aplicou-se uma entrevista focal semiestruturada, que se assemelha a uma conversa informal e é norteadas por um conjunto de perguntas. A entrevista, apresentada no (ANEXO I), está focada na temática dos impactos socioeconômicos e ambientais durante o ciclo de vida do empreendimento e todos os custos percebidos acerca destes projetos. As perguntas foram construídas de forma a conduzir que o entrevistado pensasse no empreendimento como um todo, ou seja, no ciclo completo de um empreendimento, desde o projeto de concepção até sua desativação, onde ambiente voltaria à configuração inicial. Cada entrevista durou aproximadamente 50 minutos.

As entrevistas foram gravadas, analisadas e, após, foram ouvidas novamente a fim de se atingir uma compreensão mais aprofundada do conteúdo através 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 foi complementada com a adição de cada uma das estruturas que haviam sido transcritas das entrevistas. As relações apresentadas na estrutura sistêmica foram então verificadas do ponto de vista teórico, no aprendizado extraído das entrevistas, e do ponto de vista técnico e teórico do pensamento sistêmico. Assim, a ES foi apresentada a um especialista do Pensamento Sistêmico para validação. A formação deste especialista é Ph. D Management Science na Inglaterra, e possui experiência na área de Gestão e Manufatura há mais de 20 anos, atuando principalmente nos seguintes temas: Gestão Estratégica, Pensamento Sistêmico e Planejamento de Cenários, Pesquisa Operacional (Programação Matemática e Simulação computacional), Teoria das Restrições (TOC) e sincronização da produção, teoria das restrições e Pensamento Sistêmico. Co-autor do livro Pensamento Sistêmico Caderno de Campo, e consultor de grandes empresas nacionais. Coordenador de projetos internacionais em Cingapura e Angola. Após concluída a validação, foram feitas as correções na ES e assim foi concluída a Fase I.

### 3.2.2 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:** Neste passo é importante analisar a ES e identificar os eventos e variáveis que são chaves para explicar a

situação de interesse. O objetivo foi definir os eventos e indicadores relevantes que são relacionados aos custos totais gerados por um empreendimento de geração por fonte eólica. Foram então identificadas as variáveis que melhor explicam estes eventos, ou seja, variáveis que têm uma variação percebida no acontecimento deste evento.

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.

Após, 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. Foram utilizados dados históricos, e também padrões de comportamentos qualitativos baseados em pesquisas para aumentar o entendimento. Buscou-se na literatura dados que representassem as relações propostas pelo modelo. Além das relações, os dados de entrada das variáveis selecionadas para compor o modelo foram buscados e registrados em uma planilha eletrônica que serviu de banco de dados de entrada da pesquisa. 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. Este passo foi feito buscando-se o melhor balanço entre a baixa complexidade das relações e a capacidade de explicar a situação.

A forma como as variáveis se relacionam também foi definida nesta fase. 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. Após, estas funções foram 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 objetivo de identificar os impactos ambientais na geração de energia e posteriormente estimar seu custo para 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, onde 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, onde, utilizando-se dados e hipóteses levantadas, as relações foram estabelecidas e formalizadas.

**Passo 8 – Verificação do MDS:** Após a 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 inconsistências, o teste piloto foi concluído.

Após, 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 estatístico, para se verificar compatibilidade com as projeções futuras para os projetos de referência.

Ainda, o modelo foi apresentado a dois especialistas, ESP1 (Quadro 4) e 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.

### 3.2.3 Fase III:

Na fase final, foram definidos os cenários futuros a que se submeteria o modelo. Após, 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 tem 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 foram construídos com a participação dos especialistas, que na fase das entrevistas responderam também sobre as possíveis incertezas críticas um cenário futuro. Além do apontado pelos especialistas, foram baseados na literatura pesquisada e seguiram os objetivos desta pesquisa.

**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. Os resultados são descritos e comentados.

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. Tanto o modelo quanto a coerência dos resultados são analisados neste passo. Também são feitos testes de comportamento estrutural do modelo, no que tange a adequação das fronteiras do modelo, a estrutura, consistência dimensional das relações matemáticas, parâmetros utilizados e comportamento sob condições extremas, que segue o proposto por Qudrat-Ullah; Seong, (2010). Após o teste, quando identificadas as inconsistências, volta-se a fase de desenvolvimento do artefato e, munido deste conhecimento, são feitas as alterações necessárias no modelo.

Sob o ponto de vista científico do *Design Science Research* (DSR), a Fase I está enquadrada nas etapas de Conscientizar e Sugerir e inicia-se a atividade de Desenvolver. A Fase II está imersa no centro da atividade de Desenvolver, enquanto na Fase III ainda existe uma parte de desenvolvimento, no que tange a construção do modelo dinâmico de sistemas, e as atividades de Avaliar, e por fim Concluir.

Na parte final, explica-se e sintetiza-se todo o aprendizado adquirido e também as conclusões obtidas no presente estudo. Aplicando-se estes passos distribuídos nas três fases, busca-se alcançar os objetivos propostos para esta pesquisa.

#### 4. CONSTRUINDO O MODELO DE AVALIAÇÃO DO CUSTO SISTÊMICO TOTAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA

Este capítulo tem como objetivo apresentar a descrição da aplicação do processo metodológico de construção do modelo computacional de simulação, o qual é proposto por este estudo. A descrição engloba desde a etapa da construção da estrutura sistêmica até as rodadas de teste e validação do modelo. Desta forma, este capítulo é dividido em quatro subcapítulos:

- Construção da estrutura sistêmica: descreve a construção da estrutura sistêmica.
- Construção do modelo de simulação: neste subcapítulo é apresentada a construção do modelo e a modelagem matemática necessária para este modelo.
- Avaliação do modelo de simulação: apresenta os procedimentos realizados para avaliação do modelo.
- Definição dos cenários considerados para aplicação do Modelo: são descritos e apresentados os cenários prováveis que foram utilizados de base para a fase de avaliação do modelo.

##### 4.1 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.

Os trabalhos pesquisados auxiliaram no entendimento das possíveis influências e originaram uma primeira estrutura sistêmica. Porém, esta estrutura não apresentava as externalidades de uma forma satisfatória.

Para complementar o aprendizado na revisão da literatura, também nesta fase do estudo foram realizadas as entrevistas com especialistas das diferentes áreas que integram a situação de interesse pesquisada. O grupo de pessoas entrevistadas apresentou resultados focados em suas experiências e conhecimentos, de acordo com os diferentes perfis, gerando desta forma

uma diversidade de variáveis. As entrevistas auxiliaram no estabelecimento das relações entre os fatores qualitativos que englobam a pesquisa e construção de um mapa sistêmico para cada uma das entrevistas.

Assim, realizou-se a identificação dos fatores que se relacionam com os custos internos e contábeis da geração de energia, como custo de implantação, custo fixo de operação, valor locação/royalties das terras, volume de energia produzido, tamanho da usina (negócio) entre outros. Realizou-se ainda uma busca das variáveis para a caracterização dos custos externos à geração, não contábeis, e as alterações no ambiente socioeconômico-ambiental local com a inserção de uma usina. São exemplos destas variáveis: Índice de Desenvolvimento Humano – IDH, Taxa de mortalidade, área utilizada pela usina, qualidade ambiental da região entre outras que englobam também a saúde da economia local no município da usina. Desta forma, selecionou-se uma gama de variáveis que melhor explicam a situação, vindo ao encontro dos objetivos propostos por esta pesquisa.

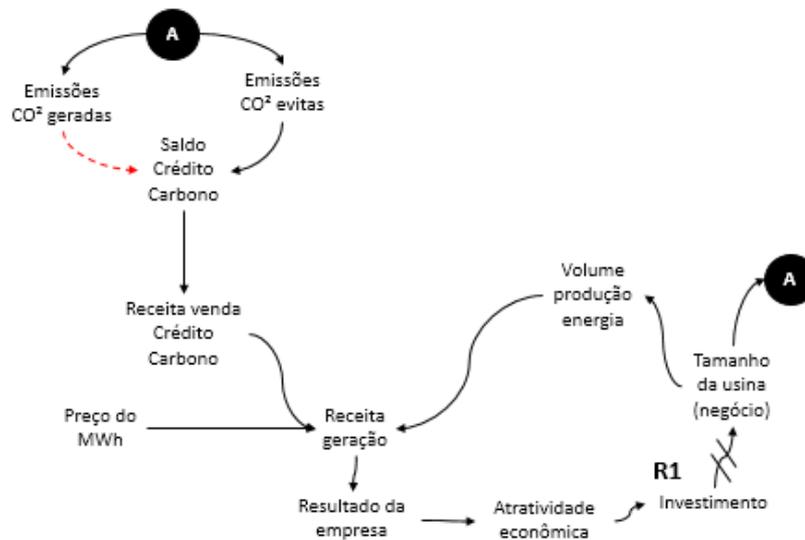
De posse destas variáveis iniciou-se a construção de uma Estrutura Sistêmica – ES, única, para descrever a situação de interesse. A ES foi construída gradualmente, e após sua construção foi dividida em setores de acordo com a temática principal da qual tratavam as variáveis agrupadas. Para um melhor entendimento, a ES também será apresentada seguindo estas divisões. Os setores nos quais a ES foi dividida são apresentados abaixo:

- Negócio de geração de energia;
- Impactos econômicos;
- Impactos sociais;
- Impactos ambientais;
- Impactos à saúde humana local;
- Impactos ao sistema interligado nacional.

O primeiro setor, negócio de geração de energia, da ES é apresentado na Figura 10, onde as variáveis descritas estão relacionadas com os custos internos da produção de energia. Neste sentido, a ES mostra que quanto maior o tamanho do negócio, maior é o volume de produção de energia e ainda, somado a isto, quanto maior o preço do MWh, maior será a receita e o resultado da empresa proprietária do negócio de geração. O resultado da empresa influencia positivamente a atratividade econômica e é esta ação de investimento que, com o passar do tempo, resultará no crescimento do negócio; deste modo, se tem um enlace



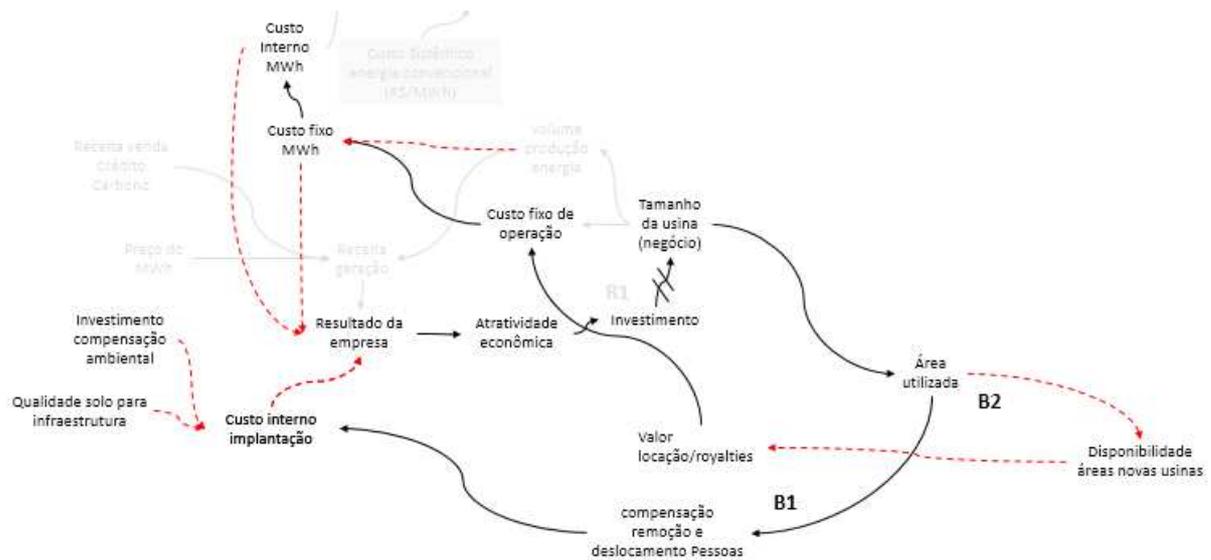
Figura 11 - ES da relação econômica da emissão de CO<sub>2</sub>.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em contrapartida, quanto maior o tamanho da usina, maior a área utilizada, o que diminui a disponibilidade de área para novas usinas; por conseguinte, quanto menos áreas disponíveis maior é o valor de locação e, conseqüentemente, os custos fixos de operação, do MWh e custos internos aumentam, reduzindo os resultados da empresa, formando assim, um enlace balanceador, B1 (Figura 12).

Figura 12 - ES dos enlaces balanceadores do setor negócio.



Fonte: Elabora pelo autor.

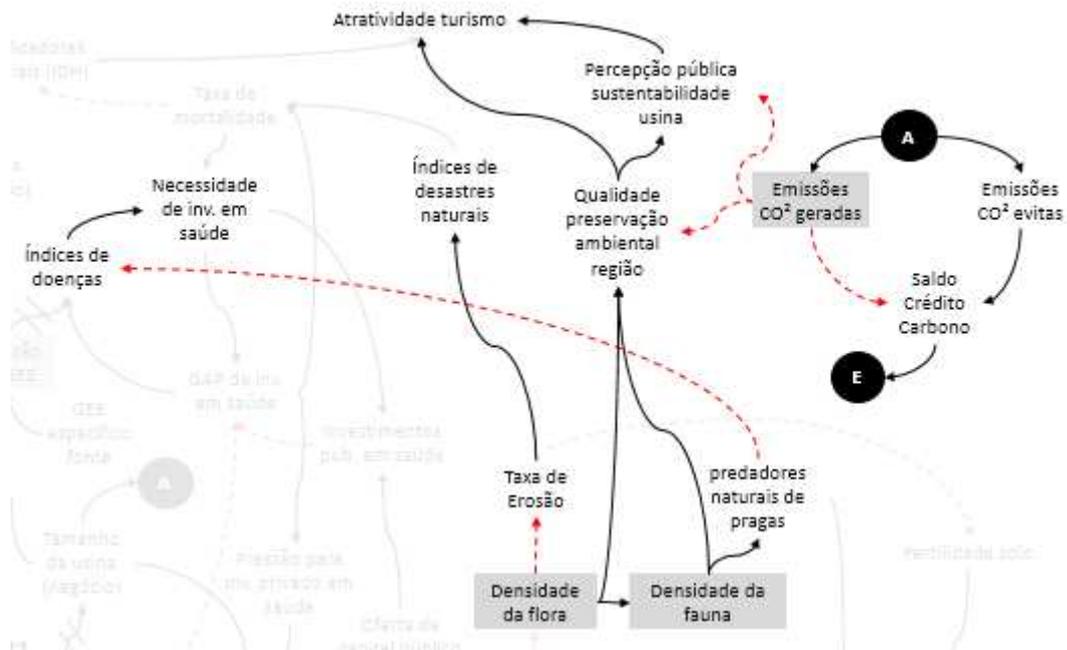






sustentabilidade da usina, e, conforme apontaram alguns dos especialistas entrevistados, essa condição aumenta a atratividade do turismo (ou diminui se a percepção for negativa).

Figura 17 – ES Impactos ambientais.



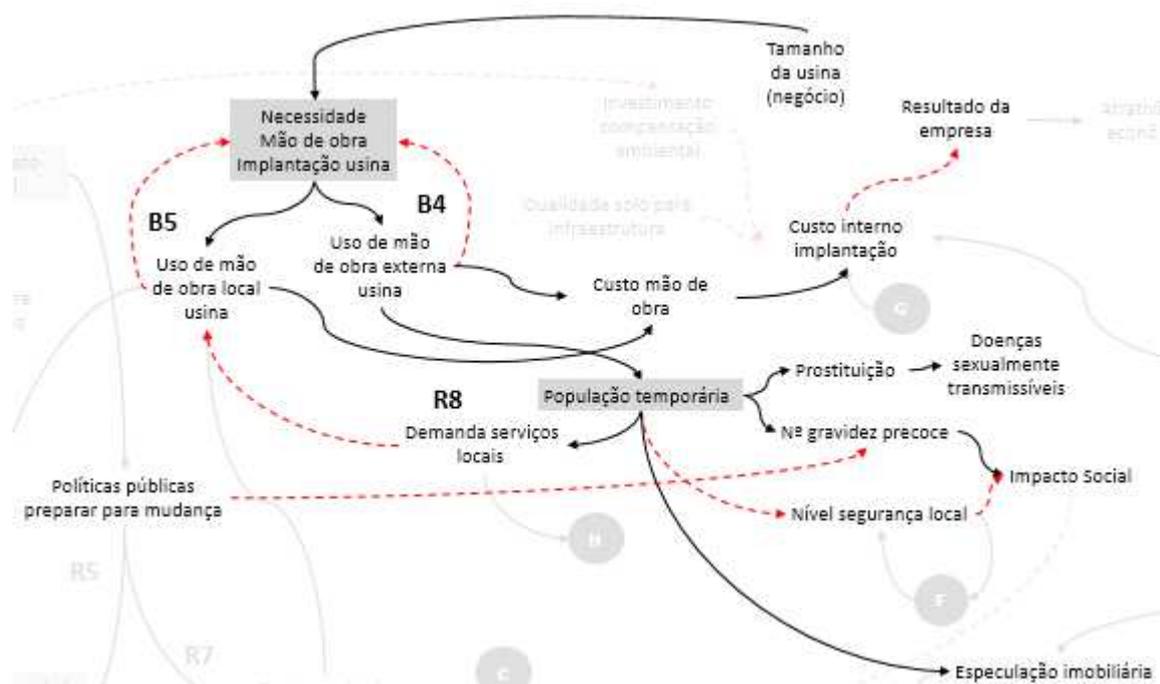
Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando outro setor de grande importância, a Figura 18 descreve como a geração de energia pode impactar no meio ambiente. Neste sentido, o tamanho da usina exerce grande influência sobre: a área utilizada, a densidade da flora, a taxa de erosão e os índices de desastres naturais. O aumento da erosão, por sua vez, influencia na fertilidade do solo. A redução de flora, afeta a densidade de fauna, o que afeta os predadores de pragas, e com um menor controle natural de pragas, há uma diminuição da produção da terra, diminuindo-se assim a sua rentabilidade.



corresponde aos impactos sociais, Figura 20, aponta que a necessidade da mão de obra varia de acordo com o tamanho da usina. Essa mão de obra pode ser composta por colaboradores locais – região onde a usina será construída – ou colaboradores externos, vindos de outras localidades, e são representados nos enlaces B5 e B4 (Figura 20). Esta situação traz para a localidade uma população temporária. De acordo com o que foi relatado nas entrevistas, esta população traz consigo uma série de impactos para a cidade, tais como o aumento da prostituição e das doenças sexualmente transmissíveis.

Figura 20 - Parte da ES - Impactos sociais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda, de acordo com o relato dos entrevistados, percebe-se que esta população temporária – composta em grande maioria por homens - ao residirem na cidade onde a usina será construída, relacionam-se com as residentes locais, menores de idades, gerando situações como uma gravidez precoce e indesejada. Este fato se dá pelo baixo conhecimento e pela falta de políticas públicas que preparem a sociedade local para a chegada desta população temporária. Há ainda, em decorrência deste fato, um acréscimo no número de brigas e roubos, o que diminui o nível de segurança local. Esta população temporária também gera uma especulação imobiliária (Figura 20).

Por outro lado, a população temporária gera um impacto positivo no aumento da demanda dos serviços locais, já que passam a consumir e gastar parte dos seus recursos

localmente. Esta relação faz com que diminua ainda mais a oferta de mão de obra local (enlace R8 Figura 20), já que esta é requisitada para os serviços, e assim faz com que seja maior a necessidade da mão de obra externa.

Entretanto, quando a mão de obra local é utilizada na obra, a população enxerga a usina como algo positivo para região e acaba tendo um maior envolvimento com o projeto, fator que leva a comunidade a interagir mais com os representantes da empresa, levando muito mais informações para quem projetou a usina e assim há uma melhora no projeto sócio ambiental. Caso fossem implementadas políticas preparando a comunidade local para estas mudanças, haveria um maior envolvimento com o projeto, reforçando todo este ciclo, como pode ser visto no enlace R5 da Figura 21. A implementação desta política estimularia o treinamento e a capacitação, para que uma parte da mão de obra pudesse ser extraída da comunidade local, diminuindo a necessidade de mão de obra externa e, conseqüentemente, a proporção dos impactos gerados por esta.

Figura 21 - ES envolvimento da população local com o projeto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, uma questão relevante apontada nas entrevistas foi o impacto da escolha da fonte de geração de energia adicionada ao Sistema Interligado Nacional – SIN e no planejamento energético Nacional, apresentado na Figura 22. Existe uma demanda média de energia esperada pelo sistema, e esta demanda deve ser suprida. De acordo com o tipo de fonte de energia há intermitência da geração de energia, como eólica. Há também a

capacidade de armazenar energia, seja combustível ou reservatório (hidroelétrica) e assim uma melhor capacidade de gestão do montante de energia gerado. Existem diferentes tempos de construção de cada tipo de usina. Estes fatores, aliados ao tamanho da usina, resultam em uma maior ou menor variação da geração média de energia que é injetada ao sistema. Quando esta variação é alta, acontece uma falta de geração, a demanda necessária não é atendida, e ocorre um GAP de energia no sistema. Para que não ocorra esta falta de energia, existem usinas de backup para suprir este GAP. Porém, manter um número maior de usinas em backup acarreta um maior custo da energia, pois esse custo deve ser diluído no custo geral gerando um maior custo sistêmico da energia.

Figura 22- Parte da ES - Impactos ao sistema interligado nacional



Fonte: Elaborado pelo autor.

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 (Seção 3.2.1), que possui vasta experiência em pesquisas no setor de mineração e energia.

O resultado desta verificação resultou em algumas alterações pontuais. Foram levantadas algumas dúvidas sobre determinadas relações, que acreditou-se estarem inversas ao que realmente acontece. Em alguns casos, as entrevistas foram revisadas, e as relações foram corrigidas, ou mantidas após esta verificação. Outro ponto de análise foram as questões conceituais, pois inicialmente a receita da venda dos créditos de carbono estava influenciando

o custo de geração do MWh, porém o correto seria que estas influenciassem as receitas da geração, e assim efetuou-se esta alteração. Além disto, inseriu-se a variável “emissão específica de GEE”, pois a emissão de GEE é resultado da razão desta com o volume de energia produzido. Feita a verificação e as correções da ES conclui-se Fase I.

A ES completa e revisada, apresentando todos os setores e a forma com que eles se relacionam está representada na Figura 23. Esta ES serviu de subsídio para a construção do Modelo de Dinâmica de Sistemas - MDS, conforme descrito nas subseções que são apresentadas adiante.



## 4.2 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 frente a comparação com térmica a carvão e hídrica.

O Modelo, buscando responder as questões que motivaram este estudo, deve representar a realidade e suas tendências da forma mais precisa possível. Assim identificaram-se as variáveis mais relevantes para a situação de interesse. Esta identificação foi feita 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 - CST é composto pelo custo (ou benefício) interno e externo, e a partir daí selecionaram-se as principais variáveis que influenciam estas. Por exemplo, a variável Receita Pública, referente a arrecadação de taxas e impostos, visa ao entendimento da importância do valor arrecadado e revertido para a mitigação dos impactos gerados, sendo que este benefício diminui o CST. Se o benefício for maior, acaba que o saldo entre as externalidades fica em um impacto positivo, onde o CST poderia ser considerado negativo, ou seja, a empresa estaria gerando mais benefícios do que prejuízos para sociedade.

Desta forma, buscou-se selecionar as variáveis que são consideradas externalidades geradoras de custo (ou benefício), que fazem parte da composição do CST. Seguindo esta lógica buscou-se, na estrutura sistêmica, por variáveis que são representativas e têm influência no CST, e assim foram consideradas chave para composição deste. As variáveis chaves que foram selecionadas, são apresentadas abaixo:

- Saldo de Emissões evitadas;
- Custo Emissões de Gases de Efeito Estufa;
- Custo do dano da População Temporária, composto pelas variáveis número de gravidezes precoces geradas, e perda por violência;
- Custo Necessidade de usinas de *backup* no Sistema Interligado;
- Receita da geração de energia;

- Volume de energia gerada;
- Custo da utilização de área para usina, no que tange as perdas de área nativa ou produtiva;
- Custo operacional da usina, que é a parcela do custo interno.

Estas foram as variáveis chave desdobradas da estrutura sistêmica e que serviram de base para a modelagem. A modelagem partiu destas variáveis, e a medida que foi avançando, foram se desdobrando outras variáveis, que são apresentadas na próxima seção.

### 4.3 Construção do Modelo de Dinâmica de Sistemas

Visando a coerência nas relações e melhor organização da construção do modelo, esta etapa do trabalho dividiu-se em blocos com observação das especificidades de cada conjunto de variáveis. Esta sessão descreve a construção do modelo, onde cada bloco surgiu das relações levantadas na ES utilizando-se as variáveis de chave definidas. Deste modo, a ES foi analisada e suas relações foram escritas para o modelo criado através da 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 encontradas na literatura. Este tópico apresenta a construção do modelo de simulação, as relações e dados utilizados por este.

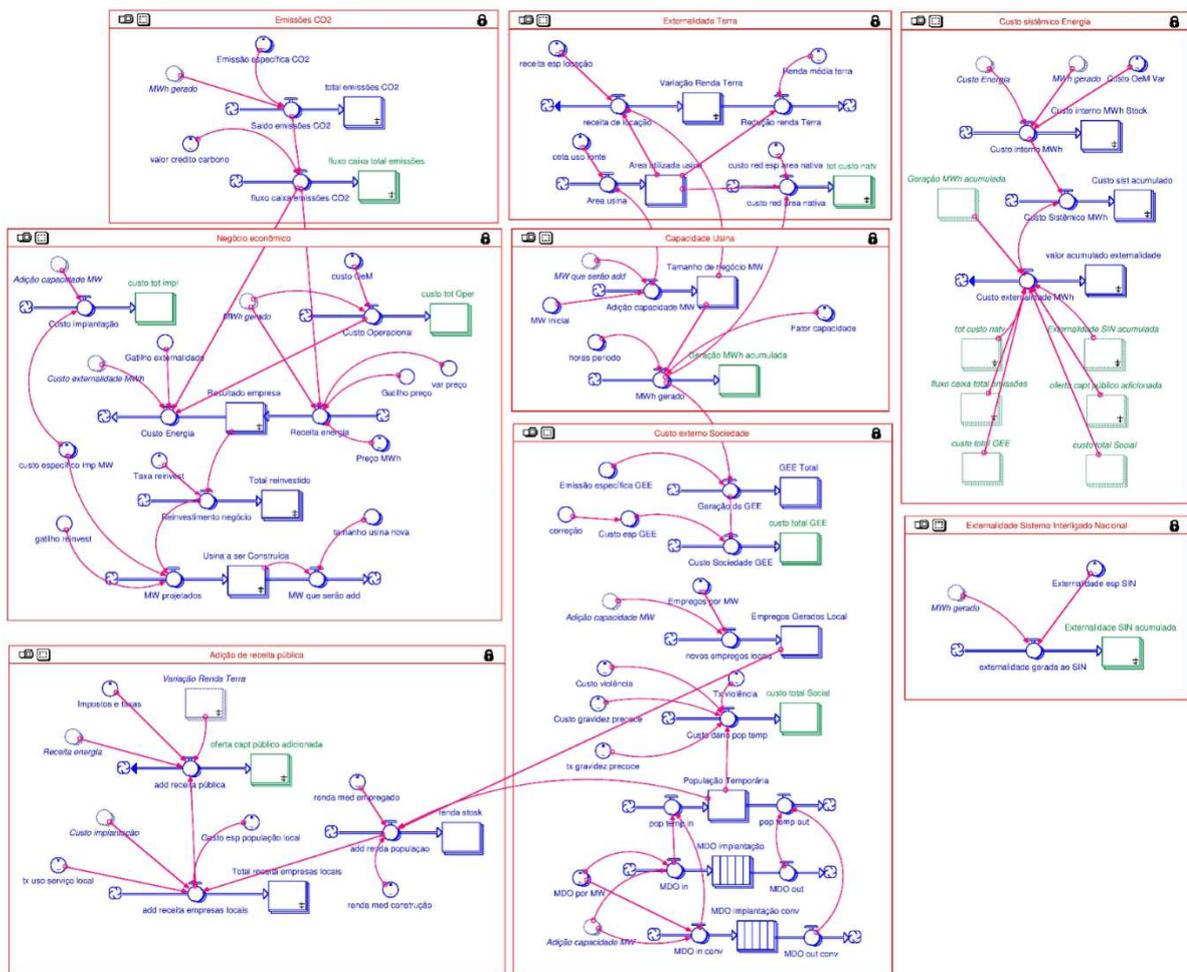
O modelo foi todo construído em três dimensões, sendo uma para cada fonte de energia; desta forma garantiu-se que o comparativo entre as fontes fosse feito sob os mesmos aspectos. De modo geral, é como se fossem três modelos distintos, que rodam simultaneamente e geram resultados diferentes para cada uma das fontes avaliadas para posterior comparativo.

O período de simulação foi definido com uma sensibilidade anual, uma vez que a geração renovável é sazonal de ciclo anual, onde há uma variação na geração de energia, principalmente por fonte eólica que não pode ser armazenada. Este fato ocorre devido a variação do regime de chuvas e ventos durante as diferentes estações do ano. Na comparação anual da média de geração, os valores são semelhantes. (ANEEL, 2008; EPE, 2013; MARRECO, 2007; PEREIRA et al., 2013b). Além disso, os dados obtidos das usinas, nas quais se aplicou o estudo, são para valores anuais.

O tempo definido de simulação foi de 20 anos, que é o prazo de fornecimento estipulado nos leilões para geração de energia no Brasil, e também o tempo de vida útil

estimado para uma usina eólica, antes de intervenções mais pesadas para prolongamento de vida útil. 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 24. A sua construção é descrita posteriormente e sua formulação em equações é mostrada no ANEXO II.

Figura 24 - Modelo computacional de dinâmica de sistemas.

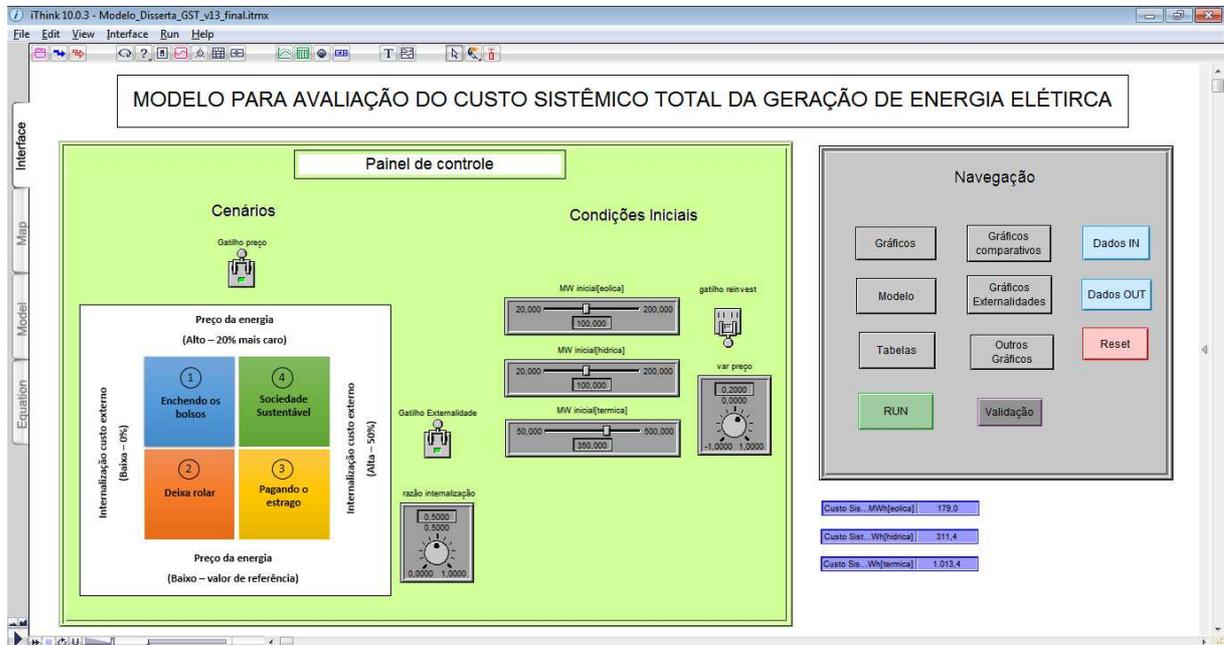


Fonte: Elaborado pelo autor.

A interface de operação do modelo é simples e conta com as funções básicas para se avaliar os cenários e alterar as condições iniciais apontadas. Na tela Principal aparecem controles para acionar os cenários, e as alterações de dados iniciais (Figura 25). Também há nesta o painel de navegação que leva para planilha de dados de entrada, para visualização gráfica de variáveis selecionadas, como custo externo gerado e resultado da empresa (Figura 26) e para tabela de acompanhamento dos valores das variáveis indicadas, custos externos das

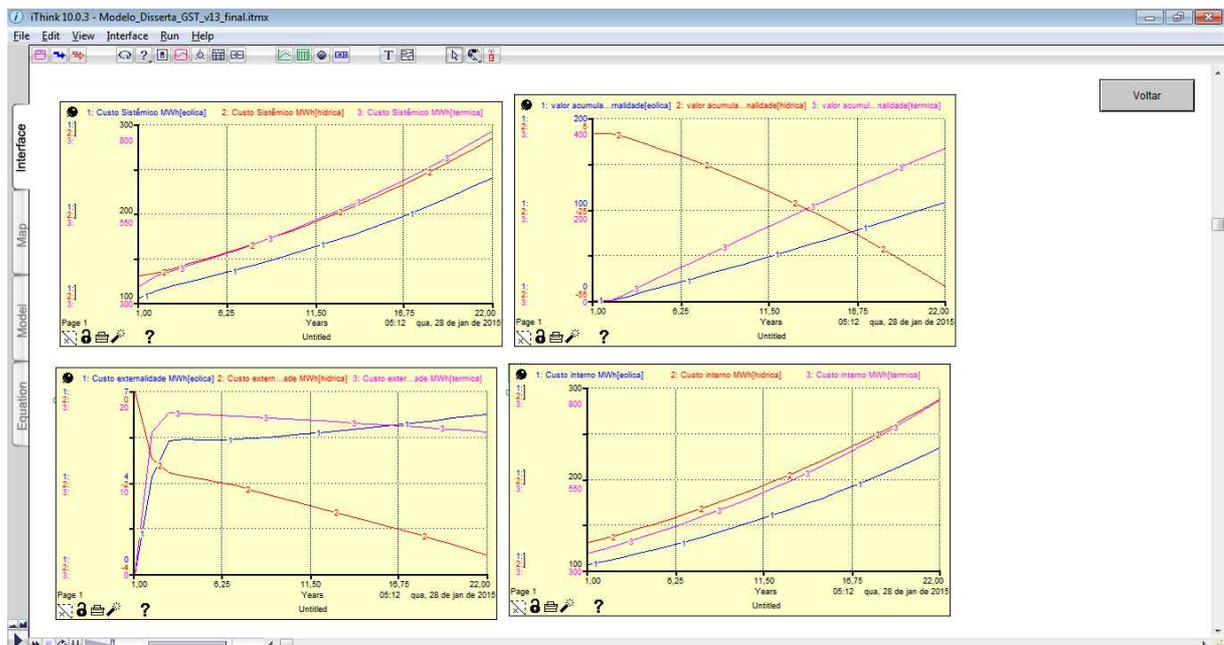
variáveis apresentadas na seção 4.2 além do custo sistêmico total e resultado da empresa (Figura 27).

Figura 25– Ilustração da tela principal da Interface do Modelo Computacional.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 - Ilustração do painel de visualização gráfica das variáveis do Modelo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 - Ilustração do painel de visualização de valores das variáveis do Modelo.

Years	Initial	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Resultado empresa[ecolica]	0,00	207,33	21.530.030,98	43.882.007,03	67.085.105,08	91.172.047,71	116.194.372,00	142.152.873,78	169.108.672,18	197.100.872,20	226.167.916,47	256.946.338,27	287.675.220,45	320.213,
Resultado empresa[hidrica]	0,00	288,91	30.007.247,16	61.167.610,09	93.519.482,06	127.111.202,08	162.000.219,19	198.229.862,81	235.843.641,71	274.909.392,28	315.482.932,19	357.614.203,91	401.358.294,23	446.796,
Resultado empresa[termica]	0,00	502,80	183.393.778,88	374.445.895,20	573.409.747,85	790.606.714,15	996.417.869,84	1.221.129.867,82	1.455.035.201,82	1.696.580.733,58	1.952.138.299,32	2.216.039.527,33	2.490.550.205,27	2.776.521,
Empregos Gerados Local[ecolica]	0,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00
Empregos Gerados Local[hidrica]	0,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00
Empregos Gerados Local[termica]	0,00	603,75	603,75	603,75	603,75	603,75	603,75	603,75	603,75	603,75	603,75	603,75	603,75	603,75
População Temporária[ecolica]	0,00	1.540,00	1.540,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
População Temporária[hidrica]	0,00	1.130,00	1.130,00	1.130,00	1.130,00	1.130,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
População Temporária[termica]	0,00	5.040,00	5.040,00	5.040,00	5.040,00	5.040,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tamanho de negocio MWh[ecolica]	0,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Tamanho de negocio MWh[hidrica]	0,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Tamanho de negocio MWh[termica]	0,00	350,00	350,00	350,00	350,00	350,00	350,00	350,00	350,00	350,00	350,00	350,00	350,00	350,00
add receita pública[ecolica]	11,40	1.402.882,08	1.406.729,14	1.317.308,22	1.377.544,05	1.440.444,94	1.505.451,82	1.572.610,83	1.642.870,18	1.715.790,84	1.791.142,30	1.869.144,12	1.950,	
add receita pública[hidrica]	17,10	1.929.793,13	2.007.982,08	2.086.973,96	2.173.237,89	2.261.391,83	2.179.235,11	2.292.491,91	2.363.913,52	2.446.820,28	2.546.945,23	2.646.511,89	2.755,	
add receita pública[termica]	35,28	13.549.715,43	14.078.882,40	14.621.008,87	15.187.496,61	15.780.143,48	15.802.314,20	16.204.345,82	16.638.840,89	17.491.285,41	18.166.647,02	18.869.982,49	19.807,	
Custo externalidade MWh[ecolica]	0,00	3,28	4,53	4,58	4,53	4,53	4,55	4,58	4,61	4,61	4,58	4,69	4,73	
Custo externalidade MWh[hidrica]	0,00	-2,00	-2,47	-2,55	-2,63	-2,71	-2,80	-2,82	-3,03	-3,14	-3,26	-3,37		
Custo externalidade MWh[termica]	0,00	14,85	16,79	16,89	16,80	16,50	16,39	16,28	16,14	16,01	15,88	15,75		
Custo dano pop temp[ecolica]	0,00	289.871,35	302.815,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Custo dano pop temp[hidrica]	0,00	212.697,81	222.195,89	232.099,53	242.474,67	253.381,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Custo dano pop temp[termica]	0,00	948.698,88	991.032,99	1.035.204,99	1.081.478,93	1.130.124,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Custo interno MWh[ecolica]	104,90	109,00	113,24	117,62	122,18	126,94	131,87	136,96	142,30	147,84	153,56	159,48		
Custo interno MWh[hidrica]	129,20	134,25	139,47	144,87	150,48	156,35	162,42	168,69	175,26	182,08	189,13	196,44		
Custo interno MWh[termica]	349,22	362,67	376,57	390,92	405,89	421,49	437,64	454,33	471,82	489,58	508,75	528,19		
Custo Sistêmico MWh[ecolica]	104,90	112,27	117,77	122,20	126,71	131,48	136,42	141,54	146,95	152,48	158,25	164,22		
Custo Sistêmico MWh[hidrica]	129,20	132,25	137,00	142,31	147,89	153,64	159,62	165,77	172,23	178,94	185,88	193,07		
Custo Sistêmico MWh[termica]	349,22	377,52	393,36	407,82	422,46	437,99	454,04	470,69	487,95	505,99	524,84	543,94		

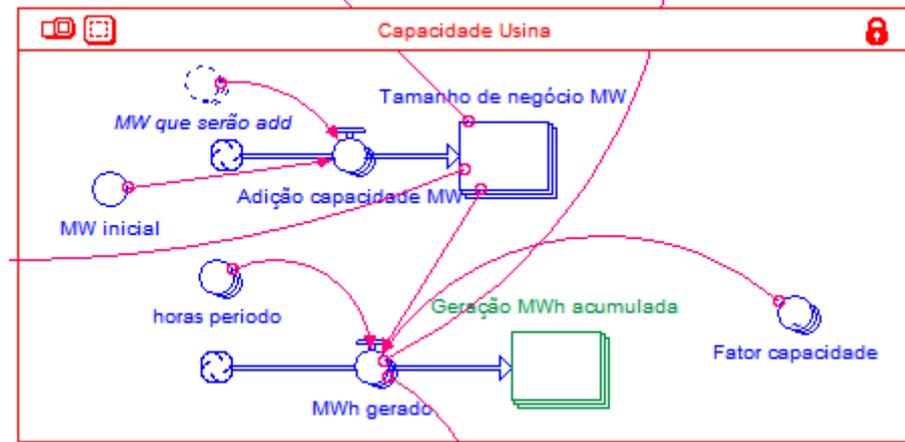
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 27 cada linha representa o valor para uma variável, já as colunas representam cada ano simulado, desta forma pode-se acompanhar a evolução das variáveis ano em seu valor. Para facilitar o acompanhamento do comportamento, estas são transcritas em gráficos (Figura 26). Apresentada a interface de interação e visualização de resultados que está servido o modelo é iniciada a apresentação da construção do MDS.

#### 4.3.1 Setor Capacidade da Usina

Como primeiro passo da construção do modelo, projetou-se o setor que modela as condições físicas da usina de geração de energia - em termos de capacidade e geração total de energia - Figura 28. O Fator de Capacidade - FC, que é a geração média de energia em relação à capacidade instalada, baseou-se nos valores de projetos dos últimos leilões de energia (EPE, 2014) e é apresentado na Tabela 1. O tamanho inicial da usina é dado de entrada do sistema para os projetos que desejam comparar essa capacidade, e pode ser incrementado com a construção de novas usinas, de acordo com o resultado financeiro gerado por esta usina.

Figura 28 - MDS - setor de capacidade usina.



Elaborado pelo autor.

#### 4.3.2 Setor Negócio de Energia

Ainda, neste contexto, sabe-se que diretamente ligado ao tamanho do negócio está a parte financeira dele (Figura 29). Neste setor são estimados os custos internos do negócio. Para este estudo, foram utilizados como custo de Operação e Manutenção ( O&M ) das usinas um valor agregado já contabilizando os custos de impostos, encargos setoriais, operação, manutenção, despesas financeiras e todos os custos relativos ao negócio, com base em valores encontrados em pesquisas e em relatórios de empresas geradoras de energia (CDM – EXECUTIVE BOARD, 2012; CDM, 2012; CUSTÓDIO, 2013; MARRECO, 2007; TANCREDI; ABBUD, 2013). Estes valores são apresentados na Tabela 1 para o ano 1 de referência da simulação. Conforme levantado junto aos especialistas, os empreendimentos efetuam o pagamento dos financiamentos nos primeiros anos. Desta forma utilizou-se um fator de ajuste, onde os custos operacionais foram considerados mais altos no início e foram decrescendo nos primeiros anos até o décimo ano, onde já permaneceram constantes, sendo apenas corrigidos pelo IPCA anualmente. Porém, este fator não alterou o somatório acumulado dos valores corrigidos, mantendo este idêntico para os dois casos, e assim apenas simulando o efeito do pagamento do financiamento.

Para o preço da energia base, foram utilizados os valores médios praticados nos últimos leilões de energia. Estes valores estão também apresentados na Tabela 1 (EPE, 2014; LOSEKANN; ALMEIDA; ROMEIRO, 2014). Para as simulações, todos os valores monetários foram reajustados a uma taxa de 5,4% ao ano, referente a média da variação do

Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo - IPCA. Assim, a usina é remunerada pelo preço de venda para cobrir seus custos fixos, de acordo com um fator de capacidade.

Tabela 1 - Custos, preço e fator de capacidade de geração de energia elétrica por fonte (R\$/MWh)

<b>FONTE</b>	<b>Custo Fixo</b>	<b>CVU (R\$/MWh)*</b>	<b>Preço Venda</b>	<b>FC**</b>
<b>Eólica</b>	99,8	-	136,08	47,04%
<b>Hidroelétrica</b>	129,2	-	161,97	58,34%
<b>Térmica a carvão</b>	167,9	176,85	201,98	95,14%

\*CVU é o custo variável unitário do combustível para geração de 1 MWh.

\*\* FC é o fator de capacidade médio da fonte

Fonte: (CDM – EXECUTIVE BOARD, 2012a, 2012b; CUSTÓDIO, 2013; MARRECO, 2007; TANCREDI; ABBUD, 2013; EPE, 2014; LOSEKANN; ALMEIDA; ROMEIRO, 2014)

Nota-se que para a usina térmica a carvão existe ainda o Custo Unitário Variável – CVU, que é constituído de duas parcelas vinculadas, respectivamente, ao custo do combustível e aos demais custos variáveis quando em operação, devido a sua natureza. Para estas usinas a sua receita é dada de acordo com um fator de capacidade preestabelecido, mesmo que esta usina não esteja gerando energia. O fator de capacidade estabelecido é o valor mínimo de capacidade que a usina deve atender quando solicitada, e esta remuneração é utilizado para viabilizar usinas de *backup* de energia (CES-FGV, 2013), também chamado de geração inflexível.

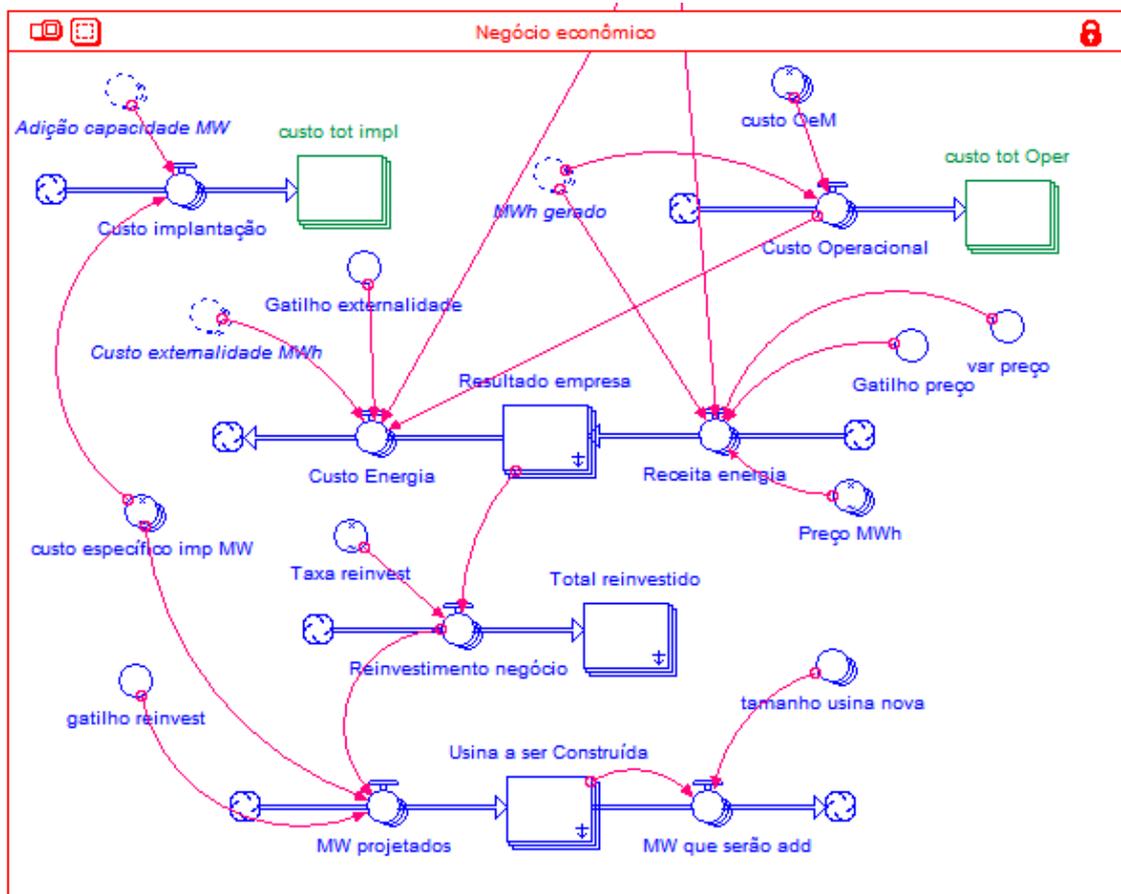
Teoricamente, uma usina térmica pode gerar a sua capacidade máxima (MARRECO, 2007), e como é contratada apenas uma parcela desta capacidade, a usina fica com possibilidade de produzir mais. Quando solicitado pelo Operador Nacional do Sistema – ONS, que a usina térmica gere além da capacidade contratada, esta recebe o valor do CVU para cobrir os custos variáveis da geração (MME, 2007). Assim, o CVU representa basicamente o custo de combustível e de operação/manutenção para geração de 1 MWh acima da geração inflexível. Como as usinas eólicas e hidroelétricas não consomem combustível, e geram de acordo um regime de ventos e chuvas, elas são consideradas com CVU igual a zero de acordo com a política nacional de energia (CES-FGV, 2013). O valor do CVU é estipulado pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE, anteriormente aos leilões de energia.

Diante desta perspectiva, entende-se que para a simulação dos cenários, o valor da CVU não é considerado para o cálculo do custo operacional médio da usina, uma vez que este só acontece por ordem especial do ONS.

O custo interno do negócio é calculado com a multiplicação do montante de energia produzida pelos custos específicos operacionais. Já a receita do negócio é calculada pela razão do volume de energia produzido com o preço desta energia, somando-se a receita da venda de crédito de carbono, quando houver.

Para avaliação comparativa do custo sistêmico total, os custos externos são internalizados, ou seja, passam a ser somados ao custo externo, afetando assim o resultado da empresa. Conforme exposto na Figura 29, a modelagem utiliza-se de uma chave binária para ativar esta internalização. Por sua vez, a externalidade positiva - quando ocorrer - será adicionada às receitas da empresa. Nesta hipótese, o empreendimento seria remunerado pelo benefício gerado para sociedade.

Figura 29 - MDS - setor do negócio financeiro da usina.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda na Figura 29 foi modelado que, de acordo com o desempenho financeiro da usina, haverá reinvestimento no negócio e a capacidade da usina será aumentada. A taxa de reinvestimento no negócio considerada é de 10,5% do resultado da empresa que, segundo

Fernandes; Cunha, (2013), é a taxa de reinvestimento média dos negócios no Brasil. A modelagem foi feita para que a capacidade de geração de cada negócio fosse aumentada quando atingido um valor de reinvestimento capaz de instalar uma usina com capacidade mínima de 30MW. Este valor foi estipulado por ser o tamanho máximo de capacidade para uma usina, entre outros fatores, se enquadrar como energia incentiva e obter incentivos fiscais no Brasil. Comumente as usinas eólicas são compostas por vários parques com capacidade menor do que 30MW. A funcionalidade de reinvestimento pode ser ativada ou desativada na operação do modelo. Para adição de capacidade foram considerados os valores de 4,497 milhões de reais por MW para fonte eólica, e 1,995 e 2,940 milhões de reais por MW para fonte hídrica e térmica respectivamente (CES-FGV, 2013; CUSTÓDIO, 2013). Este valor foi utilizado para simular a expansão e o impacto externo na economia local, não sendo considerado no custo interno da geração, pois já utilizou-se um valor de operação que pondera os custos financeiros de construção das usinas.

#### 4.3.3 Setor Emissões de CO<sub>2</sub>

Compondo receita, o setor da modelagem das emissões de CO<sub>2</sub> é apresentada na Figura 30, que também exhibe a parte da ES na qual estas relações são derivadas para exemplificar melhor a construção do modelo. Este setor simula a relação das emissões geradas ou evitadas de acordo com o tipo de fonte. As emissões geradas ou evitadas são calculadas pela razão do volume de energia produzido com a emissão específica de cada fonte, sendo o modelo construído de acordo com as relações encontradas na ES (Figura 30). Os valores de emissão médias evitadas considerados foram de 0,2055 tCO<sub>2</sub>/MWh produzido por usina eólica e de 0,1526 tCO<sub>2</sub>/MWh para fonte hidroelétrica (CDM – EXECUTIVE BOARD, 2012; CDM, 2012; CES-FGV, 2013). Já para térmica, as emissões não são evitadas, elas são geradas, e estas emissões são de 1,02 tCO<sub>2</sub>/MWh para geração de eletricidade em usina térmica a carvão (MIRANDA, 2012; RODRIGUES, 2011; SHIH; TSENG, 2014) e são apresentados na Tabela 2.

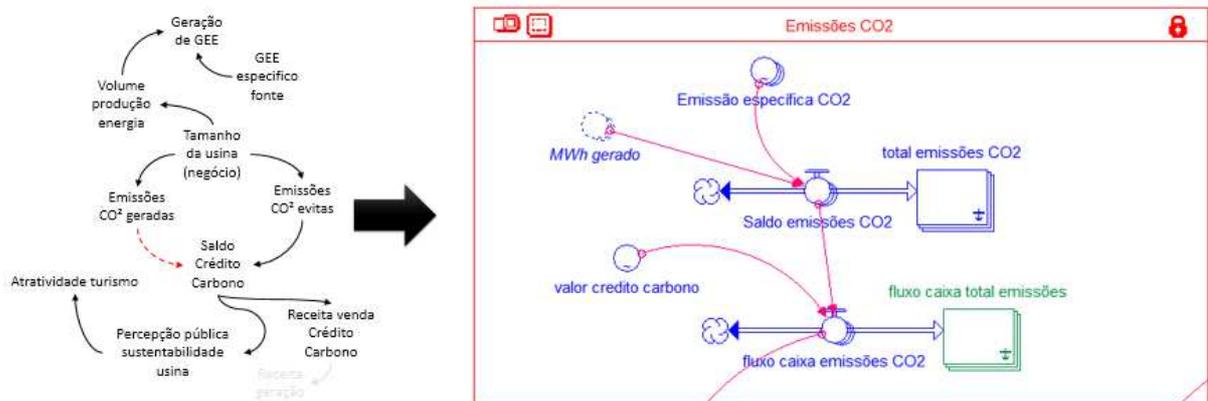
Tabela 2 - Quantidade de emissões CO<sub>2</sub>

Quantidade de emissões CO <sub>2</sub> evitadas e geradas		
	Evitadas (tonCO <sub>2</sub> /MWh)	Emitidas (tonCO <sub>2</sub> /MWh)
Eólica	0,2055	-
Hidroelétrica	0,1526	-
Carvão	-	1,02

Fonte: (CDM – EXECUTIVE BOARD, 2012; CDM, 2012; MIRANDA, 2012)

Após, o modelo calcula o valor a ser recebido pela razão do saldo das emissões de CO<sub>2</sub> evitadas e o preço do Crédito de Carbono. Ao analisar os valores médios mensais desde a data de 01/11/2009, observou-se que estes valores variam de R\$ 3,48 por tonCO<sub>2</sub> a R\$ 16,99 por tonCO<sub>2</sub> (INVESTING.COM, 2015), como esta variação não gerou uma curva específica, para simulação foi utilizada uma função aleatória entre estes valores para cada período simulado. Atualmente, as emissões geradas no Brasil não são oneradas, porém na modelagem fez-se a opção para que fossem contabilizados os valores, para o caso da termoeletrica - como custo - com o mesmo valor do crédito de carbono.

Figura 30 – ES e MDS - setor de emissões.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Originalmente, encontrou-se na ES uma relação onde as emissões geradas ou evitadas teriam uma influência sobre a atratividade para o turismo nesta região. Entretanto, segundo Sajjad; Noreen; Zaman (2014), não é possível traçar uma relação sobre as taxas de turismo e as emissões geradas ou evitadas em certo local, concluindo assim que as emissões não exercem influência significativa para o turismo e, desta forma, esta relação não apareceu na MDS.



utilizada a relação de prejuízo causada pela remoção da área nativa. Este valor é estimado em R\$ 166.456,38 por km<sup>2</sup> por ano, que é o valor prognosticado do prejuízo por remoção de área nativa, de acordo com os achados de (KOSUGI et al., 2009), já corrigido para valores de 2014 ao índice de 5,4% ao ano. Para mineração de carvão, a área afetada foi considerada pela relação da energia gerada em MWh e o uso de carvão, e chegou-se a uma relação aproximada de  $1,55 \times 10^{-6}$  km<sup>2</sup> por MWh gerado (SÜFFERT; FERNANDO; ALBUQUERQUE, 1997; TOLMASQUIM, 2007).

#### 4.3.5 Setor Custo Externo Para Sociedade

Seguindo a linha das externalidades, o setor do custo externo para sociedade (Figura 32) é a parte que contabiliza os prejuízos sistêmicos para cada fonte de energia. Na parte superior da figura aparecem os impactos devidos à Geração de Gases Efeito Estufa – GEE. O montante de gases emitidos é calculado a partir da quantidade de energia produzida, dadas as quantidades de emissão específica de cada fonte, que são apresentadas na Tabela 3 (SHIH; TSENG, 2014).

Tabela 3 - Quantidade de emissões na geração.

Quantidade de emissões de gases em g/kWh gerado

	<b>GEEs (1)</b>	<b>SOx</b>	<b>CO</b>	<b>NOx</b>
Carvão	973,00	0,78	0,37	1,54
Eólica	23,60	0,05	0,09	0,05
Hidroelétrica	36,90	0,07	0,05	0,08

(1) Apenas os gases de efeito estufa CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O são considerados, e apresentados em valores de gCO<sub>2</sub>eq/kWh

Fonte: (SHIH; TSENG, 2014; SHINDELL, 2013)

Em seguida, estas quantidades são transformadas em valor monetário, a fim de se contabilizarem os custos que estas emissões geram para sociedade em razão dos impactos negativos apontados por Shindell (2013), como danos à saúde, mudanças no clima, alteração na incidência de sol e alterações na produção agrícola. Os valores utilizados para este trabalho são apresentados na Tabela 4 e estas emissões são provenientes de estudos que utilizam a metodologia de análise de custo de vida.

Tabela 4 - Custo das emissões para a sociedade.

Custo emissões para sociedade em R\$/ton emitida				
	<b>GEEs (1)</b>	<b>SOx</b>	<b>CO</b>	<b>NOx</b>
R\$/ton	68,9	52400,0	1152,8	6812,0

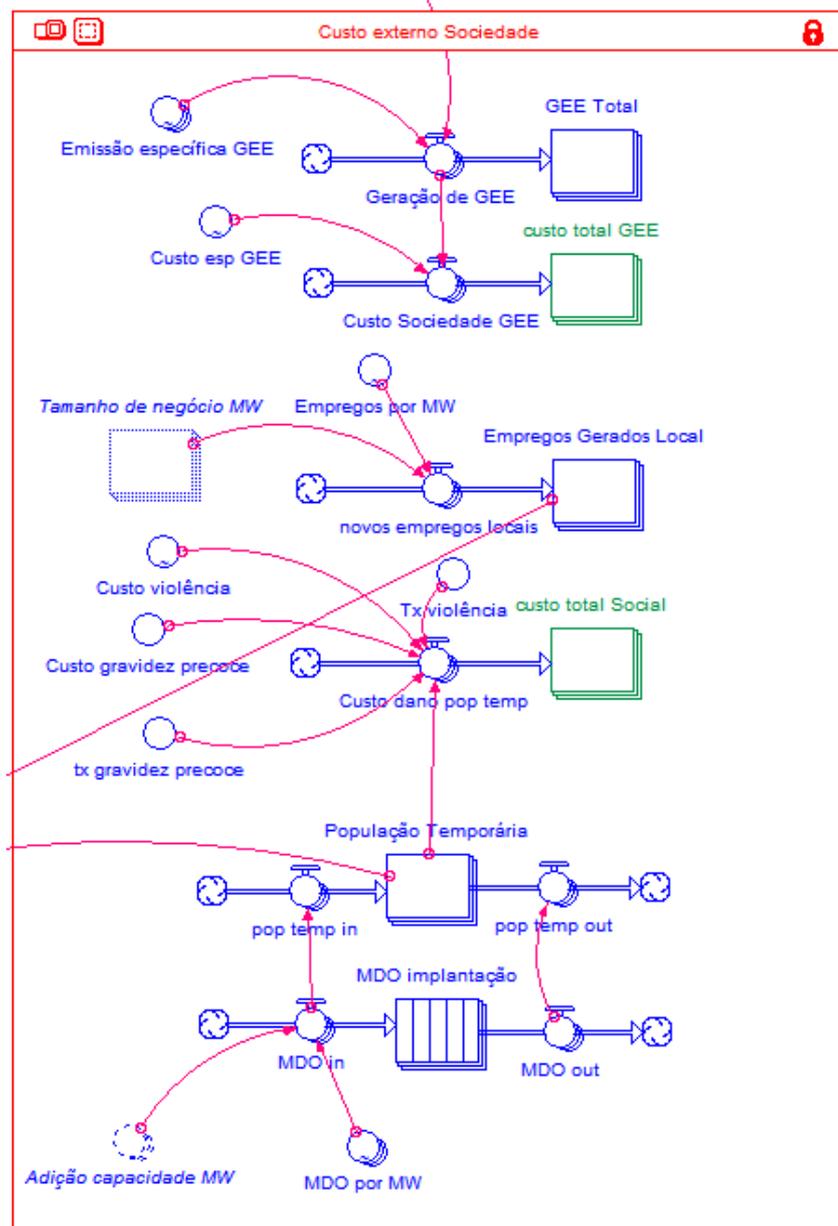
(1) Apenas os gases de efeito estufa CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O são considerados.

Fonte: (SHIH; TSENG, 2014; SHINDELL, 2013)

Em seguida, na Figura 32 são apresentadas as externalidades geradas pela a população temporária. Esta população é calculada pela razão da capacidade construída pela geração específica de mão de obra para cada fonte. Esta é de 15,40 pessoas por MW de capacidade instalada para fonte eólica, 11,3 pessoas por MW para hidroelétrica e de 14,40 pessoas por MW para usina térmica a carvão (CES-FGV, 2013; SIMAS, 2012). Ainda, segundo estes mesmos autores, o tempo médio de construção de uma usina é de 1,5 anos para eólica e de 5 a 10 anos para hidroelétricas e termoelétricas. Neste estudo foram adotados os valores de 5 anos para fonte hidroelétrica e termoelétrica, pois trata-se da maior antecedência padrão entre o leilão de energia e o fornecimento de energia no mercado regulado; cabe ressaltar que neste referido estudo não foram considerados os atrasos de obra.

Conhecendo-se esta população temporária, é possível estimar os custos que ela causa para sociedade. Em se tratando dos custos relacionados à violência e gravidez precoce, os índices são, respectivamente, de 3,24 gravidez precoce, em meninas menores de 18 anos, para cada 1000 habitantes segundo o (IBGE, 2014), sendo que cada gravidez precoce custa cerca R\$ 15.124,76 para a sociedade (valores atuais corrigidos em 5,4% ao ano) (CHAABAN; CUNNINGHAM, 2011). Já para a violência no Brasil, a taxa de morte, seja por homicídio, crimes violentos, mortes no trânsito, suicídios e outras causas, é de 80,9 mortes para cada cem mil habitantes, e esta perda de capital humano custa ao cofres públicos R\$ 162.635,46 por morte (FÓRUM BRASILEIRO DE SEGURANÇA PÚBLICA, 2014; IBGE, 2014). Estas taxas e valores foram calculados para populações temporárias para se chegar a um custo social estimado por esta população.

Figura 32 - MDS - Setor custo externo sociedade.



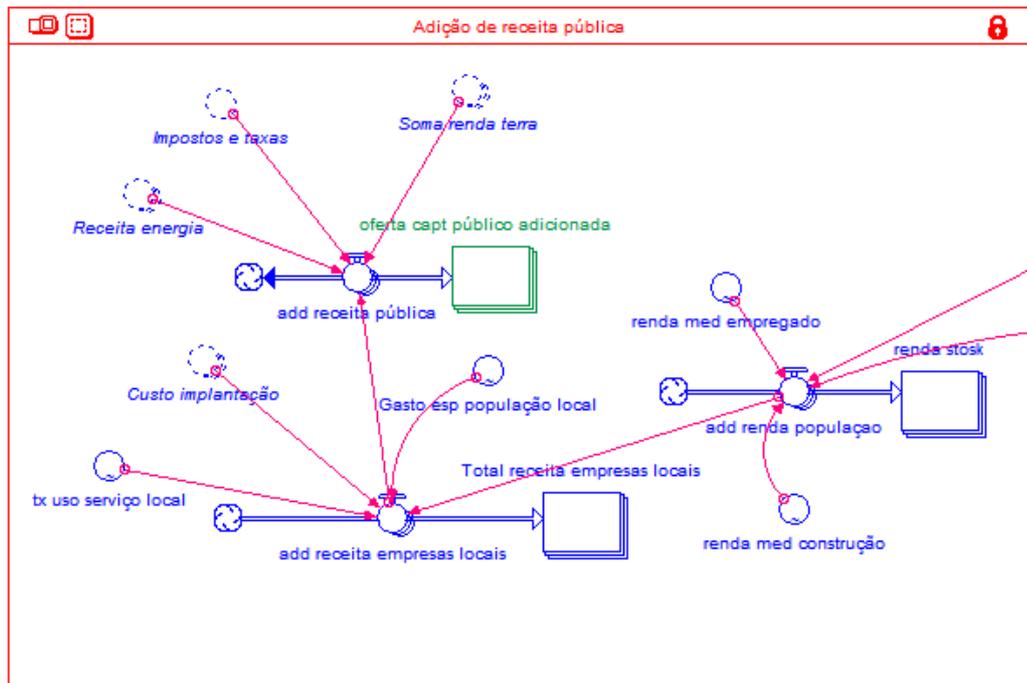
Fonte: Elaborado pelo autor.

Por outro lado, neste setor há uma externalidade positiva que é a geração de empregos para operação e manutenção (O&M) da usina. Os valores utilizados foram em empregos de O&M por MW de capacidade instalada, de 0,40 para eólica, 0,22 para hidroelétrica e 1,73 para termoeétrica a carvão (CES-FGV, 2013; SIMAS, 2012).

#### 4.3.6 Setor Receitas Públicas

Esta geração de empregos, seja permanente para operação e manutenção da usina, seja temporária na construção desta, gera um impacto positivo na economia local uma vez que esta população passa a consumir localmente, e este consumo finalizará num aumento de receita pública. A simulação desta relação é apresentada na Figura 33 que mostra o setor da adição de receita pública. A razão entre os empregos permanentes e temporários, gerados pelo salário médio resultam na renda adicionada ao local, sendo a renda média considera de R\$ 11.136,00 ao ano para mão de obra temporária, na grande maioria para construção civil, e de R\$ 27.124,76 ao ano para empregados permanentes da usina (FILHO; GALHARDO, 2008). Estima-se, segundo Silveira; Bertasso; Magalhães (2003), que desta renda adicionada são derivados os gastos locais feitos em alimentação, vestuário, transporte, higiene e cuidados pessoais, recreação e cultura, serviços pessoais e outras despesas diversas, que giram em torno de 56% da renda da população. Este montante foi considerado como injetado na economia local, e sob esse valor foi calculado a geração de impostos que seriam adicionados aos cofres públicos. Os valores foram reajustados também em 5,4% ao ano na simulação. O desdobramento de outras consequências da adição desta receita ao ambiente não foi considerado.

Figura 33 – MDS - Adição de receitas públicas.



Fonte: Elaborado pelo autor

A receita das empresas é fomentada no momento da obra da usina. Segundo dados obtidos durante as entrevistas, menos de 1% do valor total da obra da usina é gasto localmente, como em terraplanagem, abertura de estradas, transportes, aluguel de imóveis, alimentação, entre outros. Por não se obterem dados concretos sobre este valor, o mesmo foi desconsiderado. Os impostos gerados pela adição de receita na economia local foram somados aos impostos da receita da venda da energia da usina, e também aos impostos gerados pela adição de receita da terra. Assim estimou-se o incremento total gerado localmente para os cofres públicos, calculados com base em um imposto de 2% que comumente é o cobrado pela municipalidade sobre serviços locais.

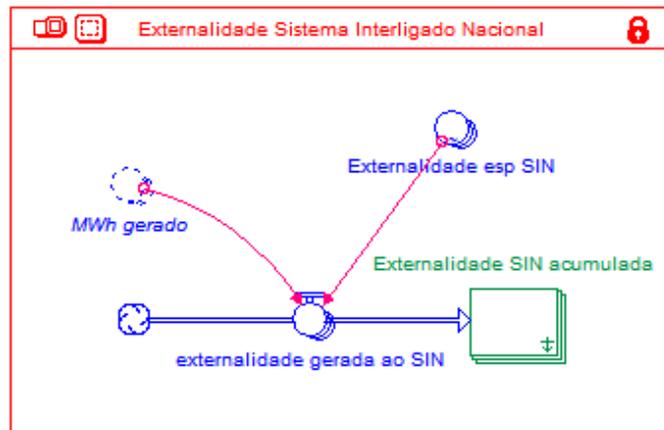
#### 4.3.7 Setor Sistema Interligado Nacional - SIN

Para finalizar a contabilização das externalidades, considerou-se a intermitência para o Sistema Interligado Nacional. Durante as entrevistas, houve um apontamento de que esta seria possivelmente a maior desvantagem da energia eólica, pois não há como fazer uma gestão do montante de energia a ser gerada. Por outro lado, a fonte hidroelétrica, embora também intermitente, pois depende do regime de chuvas, é munida de um reservatório pelo qual pode

se ter certa gestão da energia gerada. Já a termoelétrica garante uma gestão total, uma vez que esta pode ser acionada de forma muito ágil, podendo corrigir a relação entre oferta e demanda com a entrada em operação evitando que ocorra uma falta de energia no sistema.

Assim, as fontes hidroelétrica e termoelétrica não causam externalidades negativas para SIN. Por outro lado, a fonte eólica causa um impacto negativo de valor estimado em R\$ 6,00 por MWh gerado, segundo Joskow; Frank, (2014) e Marcantonini; Ellerman, (2013), pois, devido a sua natureza intermitente, é necessário que haja capacidade de geração ociosa, para garantir que não ocorra uma falta de fornecimento nos momentos onde a geração eólica diminui devido ao regime dos ventos. O setor que simula esta externalidade é apresentado na Figura 34.

Figura 34 – MDS – Setor de externalidades sistema interligado nacional.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, criou-se um bloco que executa a soma de todas as externalidades geradas no sistema e a divide pelo montante de energia gerada para se chegar a um valor monetário total da externalidade por MWh de cada fonte, para que se contabilizasse o custo sistêmico total da energia.

Para sintetizar, as premissas e dados utilizados na construção do modelo são apresentadas na Tabela 5. 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. A fonte dos dados foi apresentada ao longo desta seção.

Tabela 5 - Dados utilizados para as relações durante no MDS.

Relação	Relações utilizadas no MDS			
	Unidade medida	Eólica	Hídrica	Térmica
Área inutilizada pela usina	MW/km <sup>2</sup>	50	8,65	406
Custo associada à intermitência	R\$/MWh	6,00	-	-
Custo associada à redução de área nativa	RS/km <sup>2</sup> /ano		166456,38	
Empregos gerados OeM	pessoa/MW	0,4	0,22	1,725
Estatística gravidez Precoce	gravidez/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/km <sup>2</sup> /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\$/km <sup>2</sup> /ano	7200	15061,14	-

OBS.: 1- Os valores em moeda, foram reajustados anualmente em 5,4%, referente ao valor médio do IPCA para o período de 2005 a 2014; 2- Quando apenas um valor, representa o mesmo valor para todas fontes.

Fonte: Diversas. Elaborado pelo autor.

Desta forma, concluiu-se a fase da construção do MDS e o modelo foi submetido a uma avaliação que é apresentada no próximo tópico deste estudo.

#### 4.4 Avaliação do Modelo

Esta etapa da pesquisa teve como objetivo avaliar o modelo para que este possa visualizar os comportamentos futuros. Usualmente, para se realizar a avaliação do modelo, são utilizadas séries históricas e conhecidas visando comparar os dados reais com os do modelo, verificando, deste modo, se os dados são similares. Também são feitos testes sob condições extremas para verificar se os resultados são coerentes com estas situações (QUDRAT-ULLAH; SEONG, 2010).

Em se tratando da internalização das externalidades ambientais, econômicas e sociais, não foram encontrados estudos que apresentassem séries históricas a respeito destes valores. Desta forma uma análise quantitativa mais profunda ficou prejudicada, configurando uma limitação do estudo. Segundo Quadrat-Ullah; Seong, (2010), os Modelos de Dinâmica de Sistemas são muitas vezes utilizados para avaliar o impacto futuro de políticas

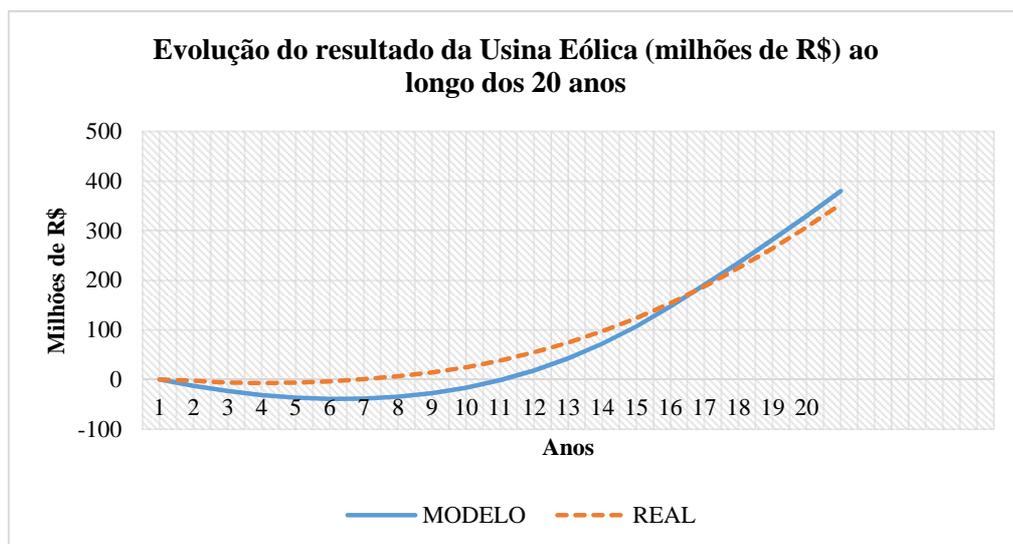
governamentais em diversos campos, dentre eles o setor energético, e para este fim uma análise de padrão de comportamentos torna-se base para tomada de decisões, não sendo necessária um alto nível de acurácia.

A importância dos dados de qualidade, análise de sensibilidade e testes de modelo é crítica. Porém, segundo Goh; Love, (2012), quando não há dados de qualidade disponíveis, os modelos preliminares podem ser avaliados com base na avaliação de especialistas e usando dados qualitativos. Este autor pontua ainda que, quando pronto, este tipo de modelo é especialmente útil na ocorrência de cenários muito complexos, então são utilizados para avaliar estes diretamente ou envolvendo novos projetos.

Com a ausência de dados para uma avaliação quantitativa do modelo, e com o objetivo de se verificar o impacto nos resultados econômicos da empresa geradora de energia, foi feita uma validação junto a dois especialistas (Seção 3.2.2, Passo 8) do comportamento do modelo frente aos cenários.

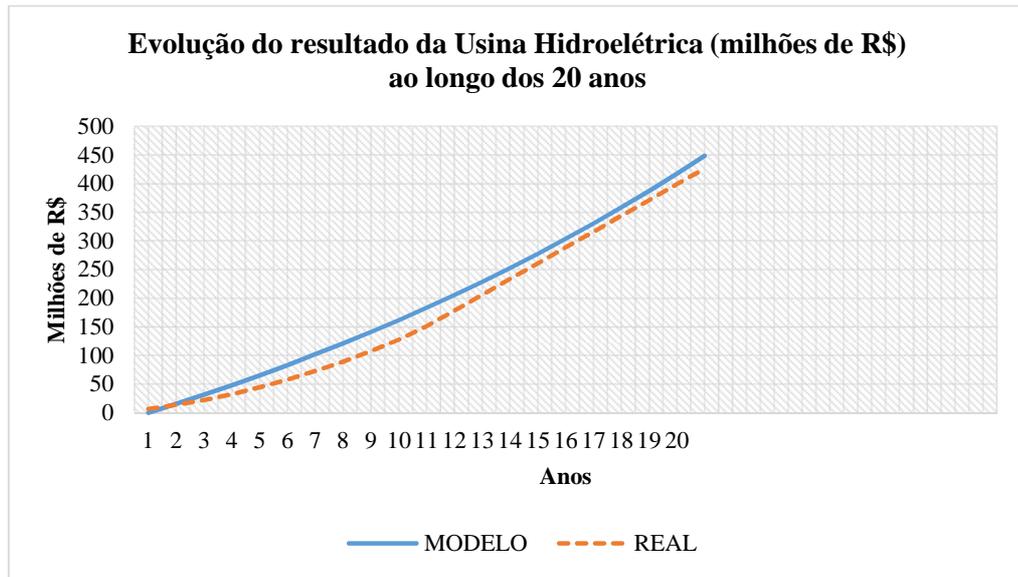
Para o caso estudado do negócio geração de eólica e a usina de geração hidroelétrica, foram obtidos dados de projeções financeiras do resultado das empresas. Desta forma se obteve uma rodada de comparação entre os dados financeiros reais destes dois negócios e os dados simulados pelo modelo, seguindo o mesmo cenário considerado pelo projeto destes dois negócios. As análises comparativas do resultado financeiro acumulado - em milhões de reais - dos negócios ao longo de vinte anos, são apresentadas na Figura 35 para usina eólica e Figura 36 para hidrelétrica.

Figura 35 – Resultado geração eólica pelo modelo e real.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 36 - Resultado geração hidroelétrica pelo modelo e real.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando de maneira gráfica visual, pôde ser percebida uma semelhança nos resultados, porém, quando submetidas ao teste estatístico de comparação das médias, teste T, as curvas não foram significativamente semelhantes. Os resultados financeiros obtidos nesta avaliação são apresentados na Tabela 6.

Mesmo que estes resultados não foram precisos, de acordo com os especialistas, as projeções financeiras de longo prazo para projetos de energia são dotadas de incertezas e são tomadas avaliando-se o comportamento em diversos cenários. Desta forma, estes profissionais consideram que o modelo pode representar o comportamento dos resultados financeiros de uma situação real. Uma vez que o objetivo é visualizar comportamentos futuros, o modelo, no que diz respeito a fonte eólica e hídrica, foi considerado pronto.

Tabela 6 - Resultado acumulado comparativo entre dados Real e Modelo para verificação.

<b>Resultado acumulado para valores em milhões de Reais.</b>					
	<b>ano 1</b>	<b>ano 5</b>	<b>ano 10</b>	<b>ano 15</b>	<b>ano 20</b>
Eólica REAL	-2,03	-3,27	38,25	154,13	353,67
Eólica MODELO	-1,03	-38,92	-0,99	147,81	379,97
Hídrica REAL	-0,03	57,73	150,69	288,40	426,37
Hídrica MODELO	0,97	83,06	183,02	303,43	448,58

OBS.: 1- Os valores em moeda, foram reajustados anualmente em 5,4%, referente ao valor médio do IPCA para o período de 2005 a 2014.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a usina termoeletrica, não se teve acesso aos dados reais do projeto. Como já visto, pode-se avaliar um modelo observado seu comportamento em funcionamento (GOH; LOVE, 2012). Na ausência de dados, pode-se fazer uma avaliação qualitativa, observando-se o modelo como um todo e seus resultados avaliados por especialistas (TAKO; ROBINSON, 2010). Em adição a isto foram analisados o comportamento do modelo sob dados de entrada com valores extremos (QUADRAT-ULLAH; SEONG, 2010).

O modelo foi posto para que os dois especialistas pudessem arbitrar os dados de entrada. Desta forma, os especialistas avaliaram que o comportamento estava dentro do adequado, e a ordem de grandeza dos valores simulados estava coerente com a realidade. Também foram simuladas condições extremas, como a variação das incertezas, como preço, internalização, fator de capacidade e valor de taxas e impostos para níveis extremos. Os especialistas emitiram parecer que os comportamentos tiveram uma coerência com projetos reais. Desta forma deu-se por encerrada a avaliação do modelo, e este foi considerado apto para simular os cenários, assunto da próxima seção.

#### **4.5 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 frente as possíveis realidades futuras.

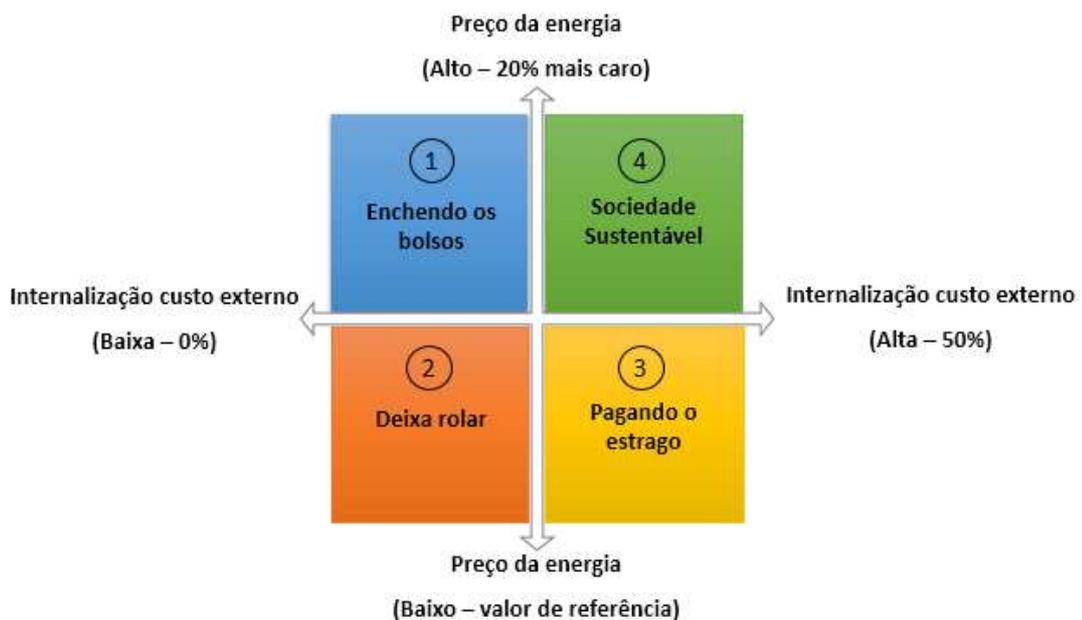
Esta construção iniciou-se com a identificação das forças motrizes, cujo comportamento no futuro não é claro, e por isso são definidas como incertezas críticas, de acordo com o conceito apresentado por Schwartz (2006) apud (RUDIBERT, 2009). Foram identificadas 11 incertezas críticas; alguns exemplos são: Preço do crédito de carbono; Produto Interno Bruto - PIB nacional; Oferta de energia; Mudança na regulação de energia; entre outros.

Foi realizada uma análise destas incertezas críticas, num primeiro momento, verificando qual estava mais alinhada com os objetivos desta pesquisa, e após qual teria maior impacto na situação estudada, como um todo, e selecionou-se duas. Seguindo os objetivos desta pesquisa, selecionou-se a incerteza Internalização das externalidades. Esta é a incerteza que compreende ao 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. Esta opção ainda foi discutida com o Especialista de Pensamento Sistêmico (apresentado na seção 3.2.2 passo 5), pois este possui experiência com planejamento por cenários e julgou apropriada esta segunda incerteza, que foi: Preço da Energia.

Para configuração dos cenários foram considerados dois níveis extremos, e para a simulação dos cenários, alteraram-se as incertezas entre estes níveis, para que fosse possível verificar o impacto destas incertezas no resultado do negócio, e ainda avaliar quais seriam as consequências para a empresa no futuro. Os cenários, bem como os valores das incertezas utilizadas para a simulação, são apresentados na (Figura 37). Para a internalização do custo externo foram definidos os níveis de não se aplicaresta 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, então optou-se pelo valor representativo de 50%. 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.

Figura 37 - Construção dos cenários.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Colocando-se as incertezas críticas sobre dois eixos perpendiculares originou-se a formação de quatro quadrantes (Figura 37). 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. Abaixo, seguem as descrições de como seriam as situações em cada um dos cenários:

- **Cenário 1: Enchendo os bolsos:** neste cenário a internalização dos custos externos não é feita, assim como hoje, e o valor do preço da energia é aumentado em 20%. Deste modo, a empresa não se preocupa com a internalização dos custos externos gerados e está recebendo um valor alto pela geração de energia, fato que é gerador do nome deste cenário. Não houve um planejamento energético adequado e, com uma baixa oferta de energia, a falta desta afeta o país; por conseguinte, os preços da energia foram aumentados a fim de se controlar a demanda. O crescimento do PIB está estagnado, pois os altos preços da energia encareceram a produção industrial que perdeu competitividade. Não há preocupações com o tipo de fonte utilizada na expansão do sistema, apenas se quer expandir. Para as empresas de grande porte é vantajoso ser autoprodutor de energia, e o mercado energético para autoprodutores e ACL é aumentado. Para negócios de geração, os custos de operação continuam estáveis, porém a receita é aumentada em virtude dos valores mais altos, o ambiente de contratação livre de energia opera com preços exorbitantes de energia.

- **Cenário 2- Deixa Rolar:** neste cenário a internalização dos custos externos continua não sendo feita. O valor do preço da energia está em baixa, segue os valores atuais, fruto de um bom planejamento da expansão da matriz energética, acarretando em uma oferta de energia que supre a demanda sem problemas. Desta forma, as empresas geradoras de energia têm um perfil de resultados na geração de energia com valores semelhantes ao longo dos 20 anos. O PIB está crescendo, pois o custo da produção industrial está estável. Não há tendência de aumento dos preços da energia gerada, e o mercado da autogeração continua com crescimento estável, com usinas já em operação vendendo a sua energia excedente a preços muito semelhantes ao praticado no ACR. Aliás, no ACR a concorrência está acirrada e prioriza-se a competição por custos internos e disponibilidade de energia, sem preocupações com as externalidades.

- **Cenário 3- Pagando o estrago:** as externalidades geradas passaram a ser reivindicadas pela população e o Estado passa a exigir uma internalização parcial dos custos

causados pelas externalidades a uma taxa de 50% do valor estimado; estes agora devem ser pagos pelo negócio. O valor do preço da energia continua estável, e mesmo havendo uma internalização de 50 % do custo das externalidades, os preços não foram repassados para a sociedade. Assim, diminuem-se os resultados das empresas e o mercado de energia fica menos atrativo. O governo passou a subsidiar algumas operações de geração de energia e as estatais que operam neste setor estão em constante crescimento, o que garante a oferta de energia. As energias renováveis aumentam em taxas superiores e a política da adoção do custo sistêmico desestimula os investimentos em energias convencionais. O PIB Brasil está estável e houve uma redução do governo com gastos devido à emissão de GEE.

- **Cenário 4- Sociedade Sustentável:** em um ambiente onde predomina a consciência ecológica e a preocupação com a minimização dos impactos gerados, uma parcela dos custos externos gerados é agora compensada pelo negócio, com adoção do custo sistêmico total. A preocupação da sociedade com as emissões levou a uma disposição a pagar mais caro pela energia, e esta, agora tem um preço 20% maior, o que compensa o custo das externalidades pago pelas empresas geradoras de energia. O negócio tem maior custo com as externalidades, porém maior receita com a venda de energia, portanto ele continua viável. O Crescimento do PIB é desacelerado devido a um aumento no custo de produção industrial. A tendência é que o consumo de energia seja mais consciente, e não há tendências de falta de energia. O mercado de autoprodução e ACL crescem quase que exclusivamente em meio as tecnologias renováveis, já que com a internalização do custo externo, estas apresentam o custo sistêmico mais atrativo. O comércio do crédito de carbono está aquecido e o país passa a receber incentivos monetários pois evita a emissão de CO<sub>2</sub> e GEE.

Para a simulação dos cenários no modelo, 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. Para a internalização das externalidades foi considerada a adição de 0% ou 50% do custo sistêmico total aos custos internos. Os valores das incertezas críticas utilizadas para cada cenário (Figura 37) são apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 - Valores das incertezas aplicadas na simulação por cenários.

Cenário	Variação Preço Venda energia	Internalização do custo externo
1 Enchendo os bolsos	+ 20%	0%
2 Deixa Rolar	0%	0%
3 Pagando o estrago	0%	50%
4 Sociedade Sustentável	+ 20%	50%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a 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. Este procedimento é explicado na próxima seção.

## **5. APLICAÇÃO DO MODELO DE AVALIAÇÃO DO CUSTO SISTÊMICO TOTAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA**

Este capítulo descreve a aplicação do modelo criado para a comparação entre três negócios de geração de energia de fontes distintas. A aplicação refere-se a uma estimativa baseada em negócios reais, utilizando-se os dados reais destes negócios.

Inicialmente, são apresentadas as usinas, o contexto em que estão inseridas e suas condições iniciais, que servirão de base para este comparativo. Os dados utilizados para cada usina no MDS são apresentados na seção 5.1 na Tabela 7.

Após, é realizada a aplicação dos cenários, onde é feito uma rodada de simulação para as incertezas de cada um, e o acompanhamento dos resultados. Por fim, os cenários são comparados e é feita uma discussão sobre os comparativos, o comportamento do modelo e suas limitações.

### **5.1 Caso Analisado**

O objetivo desta pesquisa foi construir um artefato para comparação da vantagem da substituição da energia convencional frente à energia alternativa eólica. Para este fim, foram selecionados três empreendimentos de geração de energia, uma eólica, uma hidroelétrica de médio porte e uma termoeétrica a carvão.

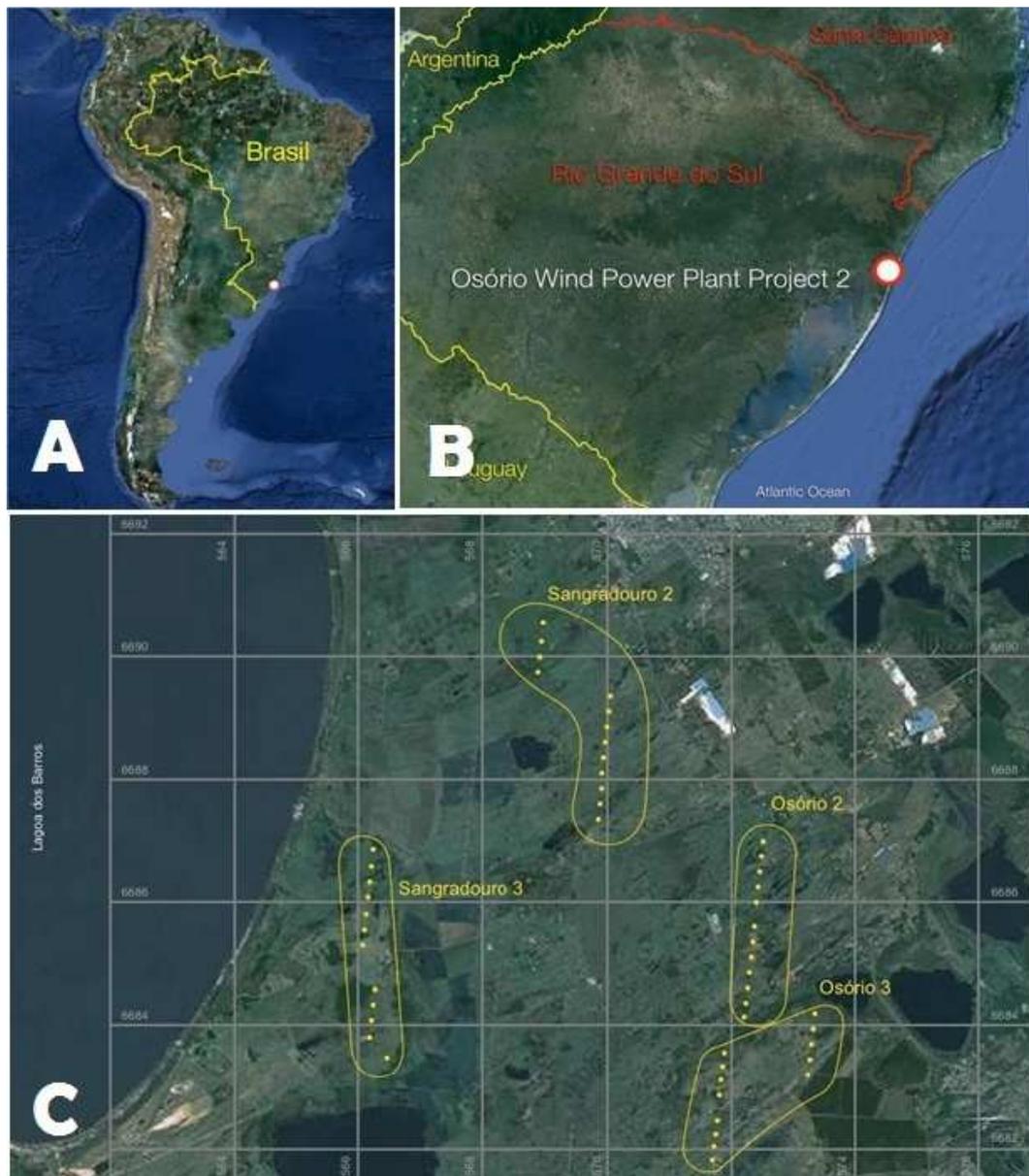
Estas fontes foram escolhidas por se tratarem de fontes muito utilizadas no estado do Rio Grande do Sul, que possui grande potencial eólico, potencial hidroelétrico e também é detentor das maiores reservas de carvão mineral do país.

#### **5.1.1 Fonte Eólica**

O negócio eólico a ser analisado é a usina eólica Osório Wind Power Plant Project 2. A usina consiste em 50 turbinas eólicas de 2 MW, com alturas de 110 m, tendo assim uma capacidade total instalada de 100 MW, e é subdividida em quatro parques eólicos que estão localizados no município de Osório, estado do Rio Grande do Sul. A localização da usina pode ser vista na Figura 38, que mostra em A) a localização no Brasil, em B) a localização

dentro do estado do Rio Grande do Sul e em C) a localização de cada um dos quatro parques que compõem o negócio.

Figura 38 - Usina de geração eólica avaliada.



Fonte: (CDM, 2012)

O projeto prevê um tempo de vida útil de 20 anos, e o fator de capacidade médio previsto neste projeto é de 39,8%. Mesmo que a média de projetos novos tenha um FC mais alto, este será considerado para a simulação dos cenários. Os parques eólicos que compõem a usina começaram a operar no ano de 2012 e são apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 - Descrição planta eólica.

<b>Parque eólico</b>	<b>Capacidade instalada (MW)</b>	<b>Início da operação comercial</b>
Osório 2	24	01/06/2012
Osório 3	26	01/10/2012
Sangradouro 2	26	01/04/2012
Sangradouro 3	24	01/04/2012

Fonte:(CDM, 2012)

Os dados específicos do negócio, como área, custos internos projetados, preços e taxas associados a este projeto, embora disponíveis, não foram utilizados para a construção das relações do modelo de simulação. O MDS utilizou-se de valores médios aferidos em diversos empreendimentos a fim de se criar um modelo para novas usinas. Entretanto, para a avaliação na realização cenários, foram considerados os dados para esta usina eólica composta por quatro parques eólicos.

#### 5.1.2 Fonte Hidroelétrica

Para a avaliação da fonte hidroelétrica foi utilizada a usina Usina Hidroelétrica – UHE 14 de Julho. A UHE está localizada no Rio das Antas, na bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas, entre as cidades de Bento Gonçalves (margem esquerda), Cotiporã e Veranópolis (margem direita), no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, podendo ser vista na Figura 39 que mostra em A) a sua localização geográfica, em B) a localização do reservatório, e casa de máquinas, e em C) detalhe da casa de máquinas que abriga as unidades geradoras.

Figura 39 - Usina geração hidroelétrica avaliada.



Fonte: (CDM, 2006)

A usina possui capacidade instalada de 100MW, e é composta por duas unidades geradoras de 50MW de capacidade cada (Quadro 7), que são impulsionadas por uma queda de água de 33,50 m que é obtida através de um duto sob um morro, que liga a barragem com a casa de máquinas que, por sua vez, está situada em um trecho mais inferior do rio (Figura 39 B). A UHE entrou em operação no ano de 2008. A sua produção de energia assegurada é de 50 MW em média, ou seja, um FC de 50%, o qual foi utilizado na simulação.

Quadro 7 - Descrição planta hidroelétrica.

Unidade Geradora	Capacidade instalada (MW)	Início da operação comercial
1	50	01/07/2008
2	50	01/09/2008

Fonte: (CDM, 2006)

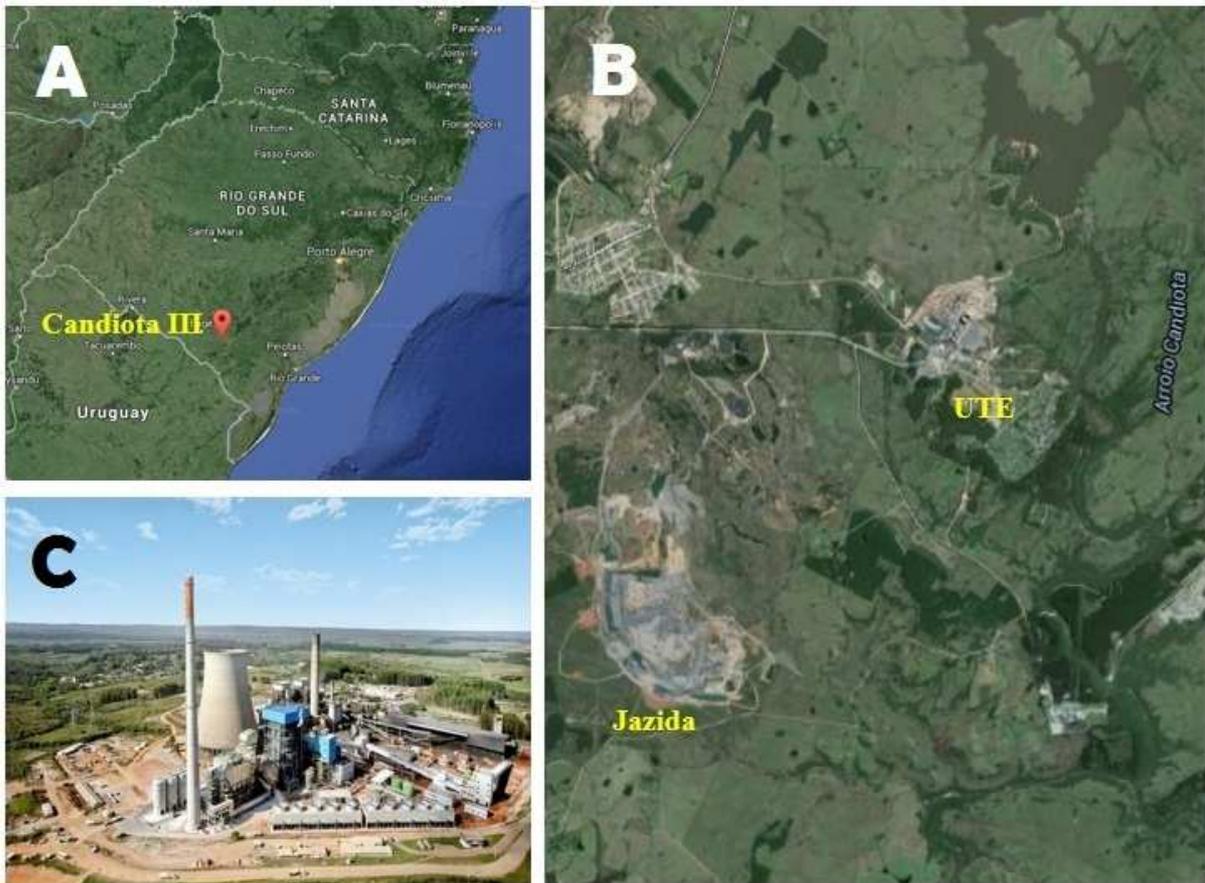
Seguindo os mesmos padrões utilizados para usinas eólica, para as hidroelétricas também foram utilizados os dados genéricos (média para diversas usinas) durante a modelagem das relações no MDS, com o mesmo propósito de se obter uma avaliação de uma

nova usina, onde há diversidade de nos valores de projetos. Porém, quando feita a simulação por cenários, foram utilizados dados para esta usina.

### 5.1.3 Fonte Termoelétrica a Carvão

A usina de referência para a avaliação foi a usina termelétrica Candiota III (Fase C) com uma capacidade instalada de 350MW. A UTE Candiota III está localizada no município de Candiota - RS, distante 400 quilômetros de Porto Alegre. A localização pode ser vista na Figura 40 que mostra em A) a localização no estado, em B) área em que a usina está instalada e em C) uma foto do complexo onde também estão instaladas as usinas Candiota I e II, ao fundo, próximo a torre de resfriamento.

Figura 40 - Localização do negócio de geração termoelétrica.



Fonte: (CGTEE, 2014)

A usina é composta por uma unidade geradora que usa como combustível carvão mineral oriunda da Jazida Candiota. A usina entrou em operação no ano de 2011 e a sua geração média garantida é de 293 MWh o que nos dá um FC de aproximadamente 83%. O consumo de carvão para sua operação é de 1085 kg/MWh de energia gerada.

Quadro 8 - Descrição da usina termelétrica.

Unidade Geradora	Capacidade instalada (MW)	Início da operação comercial
1 Candiota III	350	01/01/2011

Fonte: (CGTEE, 2014)

Da mesma forma, para a simulação desta usina foram utilizados dados reais coletados, e para os dados não disponíveis foram utilizados dados genéricos para usinas deste tipo. A modelagem seguiu o padrão de se utilizar de dados genéricos para compor as relações.

#### 5.1.4 Dados das Usinas Utilizados no MDS

Os negócios de geração de energia apresentados foram utilizados como base para simulação dos cenários e comparação dos custos externos gerados na geração de energia. Os dados base utilizados para a simulação dos cenários no MDS para estes negócios são apresentados na Tabela 7 - Dados das usinas utilizados para realização dos cenários.

Tabela 7 - Dados das usinas utilizados para realização dos cenários.

Banco de dados de entrada usina				
Dado de entrada	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)

Para o Custo O&M foi considerado um valor incorporando todos os custos internos decorrentes do negócio, desde operação e manutenção até impostos e financiamento. Como

este valor foi dado como médio para o empreendimento como um todo (TANCREDI; ABBUD, 2013), este foi multiplicado por um fator de correção para simular o impacto da amortização do financiamento. Foi feito da seguinte forma: o valor base do custo foi reajustado a um IPCA de 5,4% ao ano, adotado para esta pesquisa. Após a projeção para este valor ao longo dos vinte anos, o Custo O&M foi multiplicado pelo fator ano a ano. O fator de correção adotado foi tal, que para o primeiro ano seu valor foi de 1,8, e reduzindo ano até estabilizar em 0,7 e continuar com este valor até o vigésimo ano.

Avaliando estas três usinas (Tabela 7) e considerando todos os dados primários de entrada para cálculo das externalidades (Tabela 5), o próximo passo foi a simulação dos cenários para a análise comparativa destas fontes de energia elétrica.

## **5.2 Visualização dos Cenários Com Uso do Modelo**

O objetivo da avaliação por cenários não é prever o futuro, mas auxiliar nas percepções sobre as alterações do ambiente, e na melhor maneira de se adaptar a elas – nos possíveis cenários futuros – por meio das decisões tomadas no presente. Esta avaliação possibilita navegar em uma diversidade de perspectivas, onde as pessoas e organizações aprendem a lidar com as incertezas que cercam o futuro (RUDIBERT, 2009).

Em se tratando da utilização de um custo sistêmico total, onde as externalidades ou parte delas são internalizadas ao custo, a utilização de cenários teve por objetivo verificar as incertezas, podendo assim se visualizar as estratégias para um correto direcionamento.

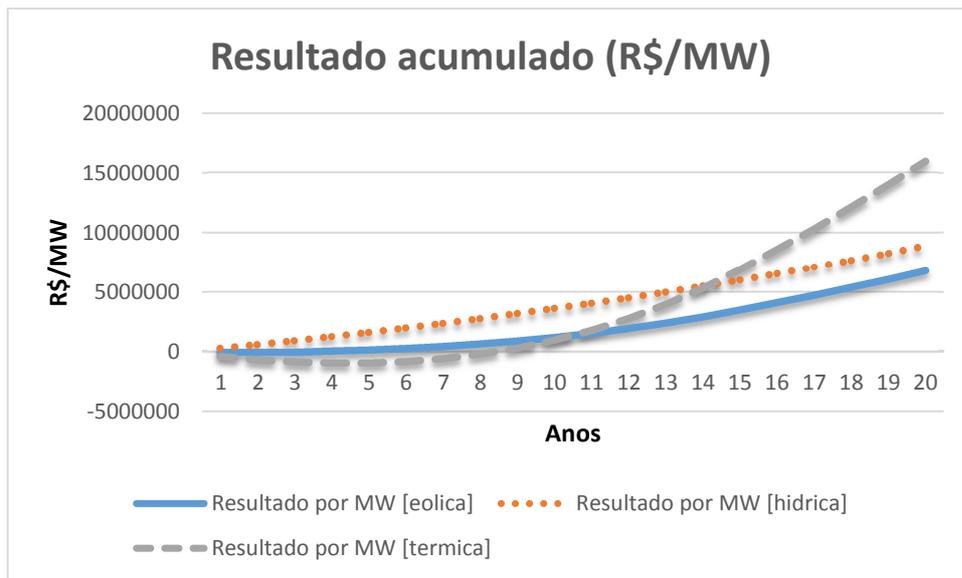
Estando os dados de entradas regulados para representarem as três usinas de geração de energia descritas, iniciou-se a utilização do modelo. A avaliação do comportamento do modelo para cada cenário é apresentada nesta seção, e ao final é feita uma avaliação geral dos resultados.

### **5.2.1 Cenário 1 – “Enchendo os Bolsos”**

Para o cenário 1 não ocorre a contabilização das externalidades e o preço da energia elétrica apresenta um preço 20% maior se comparado ao preço base reajustado. Como o próprio nome do cenário retrata, nesta situação as empresas têm um resultado muito superior ao que fora projetado antes do investimento. Para as premissas adotadas, este cenário

apresentou um melhor resultado acumulado para a usina térmica, quando analisado sob a ótica de resultado financeiro final acumulado por capacidade instalada. Os dados do valor final podem ser observados na Tabela 9, e a evolução do resultado acumulado na Figura 41.

Figura 41- Resultado acumulado para cenário 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para este cenário observou-se que a fonte térmica teve a maior evolução da receita (Figura 41). Nos primeiros anos, a evolução foi tímida e chegou a transitar em valores negativos, fato devido ao período de amortização do financiamento, que correspondia no primeiro ano um valor de 80% além do custo de geração médio, reduzindo em 10% ano a ano, de acordo com o fator de correção adotado neste estudo.

Se por um lado os investidores da fonte termoelétrica têm o maior resultado por capacidade instalada, por outro, é a fonte que apresenta os maiores custos externos de geração médios ao longo dos 20 anos (Tabela 8), Para formação do custo sistêmico, foram calculados os custos externos ocasionados em cada um dos setores da MDS, apresentados na Tabela 8 que apresenta a externalidade relativa a cada MWh gerado.

Tabela 8 - Externalidades geradas - Cenário 1.

<b>Custos externos gerados por tipo de impacto - valores em R\$/MWh</b>					
<b>FONTE</b>	<b>Custo dano social causado</b>	<b>Custo dano emissão GEE</b>	<b>Receita pública adicionada</b>	<b>Custo dano área nativa*</b>	<b>Custo SIN**</b>
<b>Eólica</b>	0,16	7,52	4,81	0,00	8,07
<b>Hidroelétrica</b>	0,23	10,92	5,51	5,91	0,00
<b>Térmica a carvão</b>	0,17	190,41	6,68	0,35	0,00

\*Para eólica foi considerado perda de áreas cultiváveis; \*\*Somente energia eólica causa externalidade para o SIN.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para se calcular o custo sistêmico total da energia deve-se somar todas as externalidades ao custo interno da energia. A externalidade da Receita pública adicionada é um benefício que a geração de energia causa para sociedade, quando calculado o custo sistêmico este é subtraído, ou seja, quanto maior este benefício, menor será o custo sistêmico total da energia. Os custos externos gerados apresentados (Tabela 8) são somadas e seu resultado é o custo da externalidade médio, em R\$/MWh, que é apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 - Resumo dos resultados para o Cenário 1.

<b>FONTE</b>	<b>Custo sistêmico total médio (R\$/MWh)***</b>	<b>Custo externalidade médio (R\$/MWh)**</b>	<b>Preço médio (R\$/MWh)**</b>	<b>Resultado Acumulado (milhões R\$/MW)*</b>
<b>Eólica</b>	153,81	10,94	250,81	6,80
<b>Hidroelétrica</b>	205,11	11,55	298,53	8,91
<b>Térmica a carvão</b>	258,77	184,24	372,27	15,95

\*Resultado ao final do período de 20 anos para cada MW de capacidade instalada considerando as premissas deste cenário.

\*\*Valores representam a média dos 20 anos considerando os reajustes anuais, preço é dado de entrada. \*\*\* A composição do custo sistêmico total considera as premissas do cenário como a hipótese de incluir ou não as externalidades.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para este cenário, o custo da externalidade médio é apresentado apenas para referência, pois ele não compõe o custo sistêmico devido ao nível da incerteza crítica (Tabela 9). Para cada ano, o resultado é calculado pela soma das receitas subtraindo-se o custo sistêmico total. O resultado acumulado é calculado pela soma dos resultados de cada ano. Por fim, o resultado total foi dividido pela capacidade da usina – uma vez que estas são diferentes – para se ter um valor por unidade de capacidade.

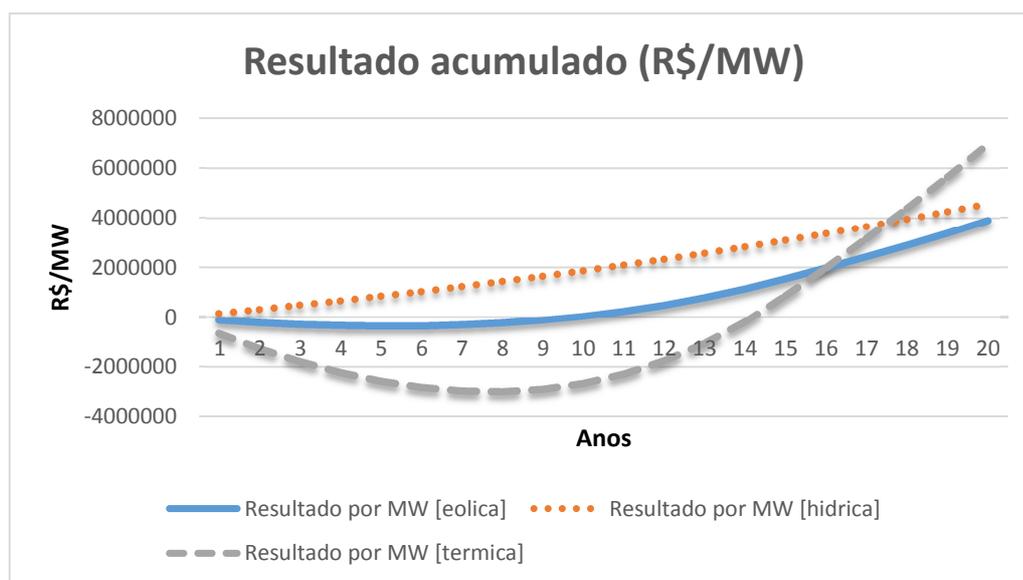
Como esperado, com o aumento dos preços da energia, o resultado das empresas fica potencializado a números altos – se comparados com as outras fontes - com tendência de enriquecimento das empresas. Este fato ocorre em virtude dos preços diferenciados por fonte (Tabela 9), pois se estes fossem equiparados, a usina com menor custo seria a com maior

receita. Para este cenário, as usinas que causam as maiores externalidades estão com a maior vantagem.

### 5.2.2 Cenário 2 – “Deixa Rolar”

Neste cenário, as incertezas avaliadas estão em seus níveis baixos, ou seja, os preços da energia continuam semelhantes aos valores atuais (0% de variação), e não há internalização das externalidades ao custo sistêmico total (0%). Todas as empresas continuam a ter resultado acumulado positivo em suas operações, porém a evolução ocorre em taxa menor (Figura 42).

Figura 42 - Resultado acumulado para cenário 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A termoelétrica continua apresentando o maior resultado final, seguida da hidroelétrica e eólica (Tabela 10). Os custos internos continuam semelhantes, como esperado, pois não há aplicação de um custo sistêmico total. Mesmo assim a termoelétrica continua obtendo o maior resultado final. O comportamento da evolução dos resultados da fonte térmica com mostra negativa até o décimo quarto ano. Este fato se deve à amortização dos financiamentos estarem condensados para os primeiros anos de operação do negócio com parcelas decrescentes. Desta forma geram fluxos de caixa negativos até que a soma do custo

de capital custo sistêmico alcance valor menor que as receitas. Empreendimentos de fonte térmica trabalham usualmente com vida útil média de 35 anos, e dada que a simulação proposta utiliza uma sensibilidade de 20 anos, esta situação é aceitável.

Tabela 10 - Resumo dos resultados para o Cenário 2.

<b>FONTE</b>	<b>Custo sistêmico médio (R\$/MWh)***</b>	<b>Custo externalidade médio (R\$/MWh)**</b>	<b>Preço médio (R\$/MWh)**</b>	<b>Resultado Acumulado (milhões R\$/MW)*</b>
<b>Eólica</b>	153,81	11,67	209,01	3,90
<b>Hidroelétrica</b>	205,11	12,42	248,77	4,58
<b>Térmica a carvão</b>	258,77	185,33	310,23	6,97

\*Resultado ao final do período de 20 anos para cada MW de capacidade instalada considerando as premissas deste cenário.

\*\*Valores representam a média dos 20 anos considerando os reajustes anuais, preço é dado de entrada. \*\*\* A composição do custo sistêmico total considera as premissas do cenário como a hipótese de incluir ou não as externalidades.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Nota-se que o custo médio da externalidade neste cenário (Tabela 10) está ligeiramente superior ao do cenário 1 (Tabela 9) para cada MWh gerado, acontece pois com o preço maior, a receita pela venda de energia é maior no cenário 1, e, conseqüentemente, a adição de verba aos cofres públicos pela geração de impostos é maior, trazendo assim um benefício ligeiramente maior (Tabela 11). Percentualmente, esta diferença para externalidade é irrelevante se comparada a diferença percentual do preço da energia praticado nestes cenários. Os danos que compõem a externalidade média por MWh (Tabela 10) são apresentados abaixo (Tabela 11).

Tabela 11 - Externalidades geradas - Cenário 2.

<b>Custos externos gerados por tipo de impacto - valores em R\$/MWh</b>					
<b>FONTE</b>	<b>Custo dano social causado</b>	<b>Custo dano emissão GEE</b>	<b>Receita pública adicionada</b>	<b>Custo dano área nativa*</b>	<b>Custo SIN**</b>
<b>Eólica</b>	0,16	7,52	4,08	0,00	8,07
<b>Hidroelétrica</b>	0,23	10,92	4,64	5,91	0,00
<b>Térmica a carvão</b>	0,17	190,41	5,59	0,35	0,00

\*Para eólica foi considerado perda de áreas cultiváveis; \*\*Somente energia eólica causa externalidade para o SIN.

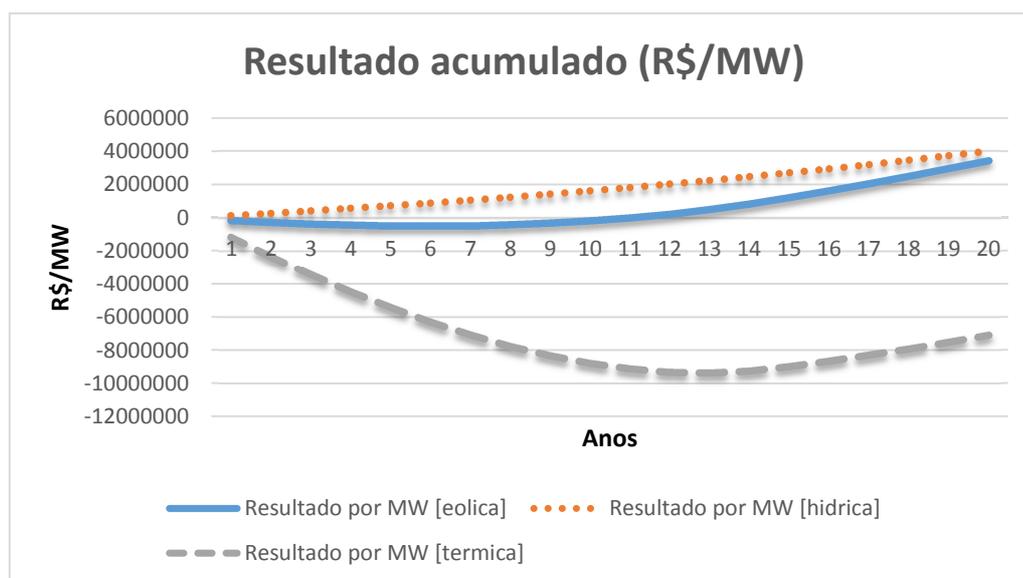
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Ainda é possível verificar que as externalidades geradas apresentam valores muito semelhantes aos valores do cenário 1. Do ponto de vista destes, a energia eólica continua sendo a mais vantajosa.

### 5.2.3 Cenário 3 – “Pagando o Estrago”

O custo sistêmico total passa a ser uma realidade no cenário 3, onde metade (50%) das externalidades agora passa a integrar a planilha de custos internos da empresa geradora de energia. Entretanto, os preços da energia seguem inalterados e, ao observar os resultados processados pelo modelo, é possível entender as razões que motivaram o nome deste cenário. Na Figura 43 percebe-se que a evolução do resultado acumulado para usinas eólica e hidroelétrica cresce em ritmo menor, e o resultado para a termoelétrica, que outrora fora o maior, agora aponta para números negativos. Seus altos custos externos, quando internalizados a uma taxa de 50% leva o custo sistêmico total a ultrapassar o preço de venda da energia, e, assim, ao final do período de 20 anos, o negócio apresenta-se com resultado negativo, o que certamente inviabilizaria investimentos. Pela tendência da curva é provável que em um maior horizonte de tempo, o resultado passe a ser positivo, porém, dificilmente será atrativo.

Figura 43 - Resultado acumulado para cenário 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por outro lado, mesmo sob estas condições, os negócios eólico e hídrico continuam com resultados positivos ao final dos 20 anos (Tabela 12). Neste cenário, as térmicas a carvão, que já são minorias nos certames de venda de energia (EPE, 2014), tendem a desaparecer por falta de viabilidade financeira. Agora o custo sistêmico passa a ser calculado considerando 50% do valor das externalidades.

Tabela 12 - Resumo dos resultados para o Cenário 3.

<b>FONTE</b>	<b>Custo sistêmico médio (R\$/MWh)***</b>	<b>Custo externalidade médio (R\$/MWh)**</b>	<b>Preço médio (R\$/MWh)**</b>	<b>Resultado Acumulado (milhões R\$/MW)*</b>
<b>Eólica</b>	160,72	11,67	209,01	3,43
<b>Hidroelétrica</b>	211,94	12,42	248,77	4,01
<b>Térmica a carvão</b>	358,30	185,33	310,23	-7,08

\*Resultado ao final do período de 20 anos para cada MW de capacidade instalada considerando as premissas deste cenário.

\*\*Valores representam a média dos 20 anos considerando os reajustes anuais, preço é dado de entrada. \*\*\* A composição do custo sistêmico total considera as premissas do cenário como a hipótese de incluir ou não as externalidades.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Embora a internalização tenha inviabilizado as usinas termoelétrica a carvão, pois o preço médio para esta fonte agora é menor que o custo sistêmico, e assim a usina opera com déficit (Tabela 12). Seguindo as premissas assumidas neste estudo, há uma tendência que aponta para a viabilidade das organizações geradoras de energia adotarem o custo sistêmico total para seus negócios, de acordo com o comportamento observado para as fontes eólica e hídrica. Este cenário aponta ainda, que, para eólica e hidroelétrica de médio porte, a adoção do custo sistêmico total não necessariamente irá onerar o consumidor de energia. Neste cenário, a tendência é que as fontes renováveis com menor custo externo serão as que mais irão se expandir, pois serão as mais viáveis.

Sob o ponto de vista das externalidades, a fonte eólica continua sendo vantajosa, pois é a fonte que tem o menor custo de externalidades (Tabela 13 e Tabela 12).

Tabela 13 - Externalidades geradas – Cenário 3.

<b>Custos externos gerados por tipo de impacto - valores em R\$/MWh</b>					
<b>FONTE</b>	<b>Custo dano social causado</b>	<b>Custo dano emissão GEE</b>	<b>Receita pública adicionada</b>	<b>Custo dano área nativa*</b>	<b>Custo SIN**</b>
<b>Eólica</b>	0,16	7,52	4,08	0,00	8,07
<b>Hidroelétrica</b>	0,23	10,92	4,64	5,91	0,00
<b>Térmica a carvão</b>	0,17	190,41	5,59	0,35	0,00

\*Para eólica foi considerado perda de áreas cultiváveis; \*\*Somente energia eólica causa externalidade para o SIN.

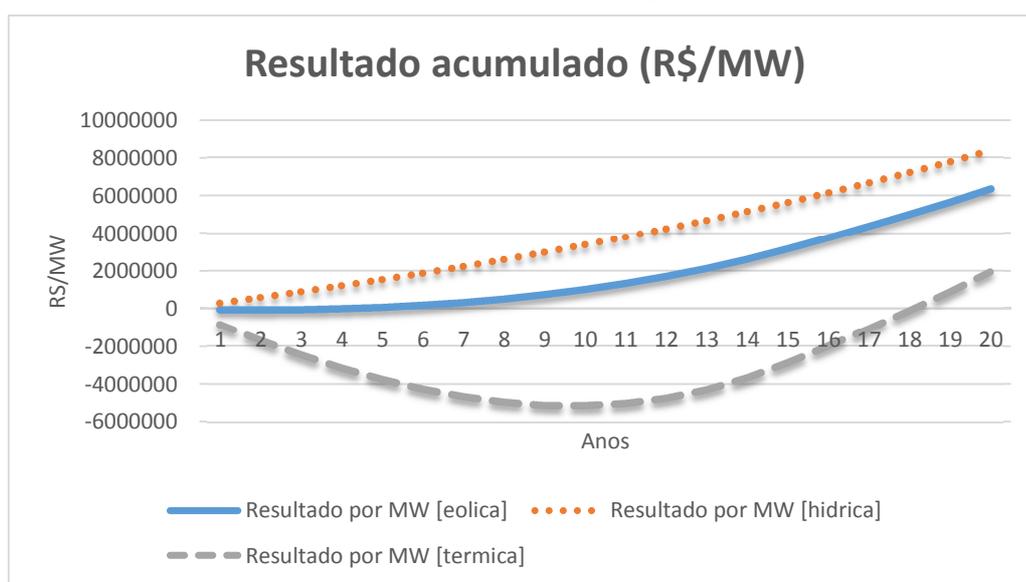
Fonte: Elaborado pelo Autor.

O custo social associado, embora medido em centavos por MWh, é menor para eólica, se analisados isoladamente os benefícios. Cabe ressaltar que estas conclusões são extraídas exclusivamente para este modelo e suas premissas, uma vez que os resultados não foram avaliados quanto a atratividade econômica relacionada à taxa de retorno sobre o capital.

#### 5.2.4 Cenário 4 – “Sociedade Sustentável”

Como cenário final a ser avaliado, está um cenário onde houve a adoção do custo sistêmico total considerando 50% dos custos externos, e também a um aumento de 20% no preço de venda da energia. Este aumento é calculado considerando-se como referência o preço médio praticado em leilões de energia. Neste cenário, o resultado acumulado dos negócios de geração de energia por fonte eólica e hidroelétrica foram altos, Figura 44, conferindo a estes empreendimentos uma boa condição financeira, apesar da internalização dos custos externos ocorrida através da adoção do custo sistêmico total para compor o custo interno ao negócio. A usina termoeletrica apresentou um resultado acumulado positivo, porém é provável que não seja atrativo a certas taxas de retorno financeiras.

Figura 44 - Resultados acumulados para cenário 4.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os resultados evoluem em taxas positivas para fontes eólica e hídrica desde os primeiros anos de operação. Com a internalização de 50% dos custos externos somando-se ao

fato do financiamento de capital onerar de forma mais intensa nos primeiros anos do negócio, a fonte térmica apresenta déficit até próximo do seu décimo ano de operação (Figura 44). Só após seu resultado operacional anual passar a ser positivo, o resultado acumulado apresenta um crescimento.

O desempenho - quando analisados os custos externos - permaneceu semelhante aos outros cenários, porém com uma leve alteração no benefício da adição de receita pública, Tabela 14. Este valor é devido ao preço da energia e semelhante ao cenário 1.

Tabela 14 - Externalidades geradas – Cenário 4.

<b>Custos externos gerados por tipo de impacto - valores em R\$/MWh</b>					
<b>FONTE</b>	<b>Custo dano social causado</b>	<b>Custo dano emissão GEE</b>	<b>Receita pública adicionada</b>	<b>Custo dano área nativa*</b>	<b>Custo SIN**</b>
<b>Eólica</b>	0,16	7,52	4,81	0,00	8,07
<b>Hidroelétrica</b>	0,23	10,92	5,51	5,91	0,00
<b>Térmica a carvão</b>	0,17	190,41	6,68	0,35	0,00

\*Para eólica foi considerado perda de áreas cultiváveis; \*\*Somente energia eólica causa externalidade para o SIN.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Tabela 15 é possível verificar que o custo médio da externalidade (soma dos valores apresentados na Tabela 14) para geração de energia para fontes eólica e hidroelétrica é bastante inferior ao custo da externalidade da térmica a carvão. Também é percebido que o custo sistêmico para esta situação seria bastante distinto entre as três fontes de energia, e este fato tende a direcionar decisões diferenciadas sobre a questão energética em se tratando de autoprodutores de energia e consumidores do ambiente de contratação livre de energia para este cenário. Ainda observa-se que para este cenário, mesmo com um aumento de 20% nos preços da energia, a usina de fonte térmica pode não ser viável, apontando para uma diminuição da participação da fonte fóssil na matriz energética.

Tabela 15 - Resumo dos resultados para o Cenário 4.

<b>FONTE</b>	<b>Custo sistêmico médio (R\$/MWh)***</b>	<b>Custo externalidade médio (R\$/MWh)**</b>	<b>Preço médio (R\$/MWh)**</b>	<b>Resultado Acumulado (milhões R\$/MW)*</b>
<b>Eólica</b>	160,37	10,94	250,81	6,36
<b>Hidroelétrica</b>	211,53	11,55	298,53	8,38
<b>Térmica a carvão</b>	357,79	184,24	372,27	1,97

\*Resultado ao final do período de 20 anos para cada MW de capacidade instalada considerando as premissas deste cenário.

\*\*Valores representam a média dos 20 anos considerando os reajustes anuais, preço é dado de entrada. \*\*\* A composição do custo sistêmico total considera as premissas do cenário como a hipótese de incluir ou não as externalidades.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para este cenário, a eólica também possui o menor custo sistêmico e continua detentora do menor custo externo, ainda que a maior parcela deste é o custo gerado ao Sistema Nacional Interligado (Tabela 14). Neste cenário, podemos ainda observar que a presença de uma política de preços diferenciada pode contribuir para a viabilização da adoção do custo sistêmico total para geração de energia. Mesmo assim, a tendência é que neste cenário as renováveis tenham maior, se não total, fatia do mercado.

### 5.3 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 16, que mostra o resultado econômico dos empreendimentos ao final de cada cenário.

Tabela 16 - 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
<b>Eólica</b>	6,80	3,90	3,43	6,36
<b>Hidroelétrica</b>	8,91	4,58	4,01	8,38
<b>Térmica a carvão</b>	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.

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 sociedade, e este é maior para a térmica a carvão, especialmente em razão desta ter um preço maior, o que causa uma 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 termoeletricas 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; ALISAUSKAITE-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 17). Os resultados mostram uma vantagem para energia eólica em todos os cenários, pois obteve o menor custo sistêmico.

Tabela 17 - Comparativo do custo sistêmico nos diferentes cenários.

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

\*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.

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 desta 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 obtidos 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 tendem a representar uma visualização do futuro. O processo de construção e aplicação do modelo trouxe um melhor conhecimento dos fatores que influenciam no 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, onde 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 a composição dos custos operacionais e financeiros da geração de energia, poderia trazer uma 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 a oferta, demanda e outras dinâmicas, optou-se por não utilizar esta funcionalidade, deixando o modelo estático quanto a 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, onde se teria a disponibilidade de dados, seria possível fazer uma estimativa do custo sistêmico total e sobre este promover a tomada de decisão.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Este capítulo final aborda as conclusões deste estudo, apresenta as limitações da pesquisa e encerra com sugestões de trabalhos futuros.

### 6.1 CONCLUSÕES

A energia elétrica nos dias atuais é uma necessidade para a continuação do desenvolvimento do ser humano e para gerar esta energia deve-se incorrer em algum impacto, por menor que seja. Neste sentido, a presente pesquisa se propôs a criar uma ferramenta que comparasse as fontes de energia, considerando suas externalidades em conjunto com seus custos econômicos tradicionais e o custo sistêmico total. A criação desta ferramenta abre um novo olhar sobre as opções de energia, pois sob a ótica do custo sistêmico total considera-se o custo real desta energia para sociedade.

Embora existam diversas pesquisas abordando a temática da contabilização das externalidades, estes estudos tratam, em sua grande maioria, de questões ambientais. Ainda que este aspecto seja o mais eminente, através da presente pesquisa foi possível verificar que existem outros fatores, também importantes, a serem considerados à medida que o conhecimento avança.

A aplicação do pensamento sistêmico e da modelagem dinâmica de sistemas mostram-se ainda mais contributivas quando utilizadas em conjunto. A união destas, tal como propõem Andrade et al., (2006) e Forrester, (2007), traz um aumento da percepção acerca do tema, possibilitando a compreensão de assuntos complexos para os quais seria inimaginável fazer uma avaliação sem a visão proposta por estas disciplinas. Ainda, promovendo o incentivo para que se quebrem os modelos mentais, o Pensamento Sistêmico se mostra propício para o estímulo do surgimento de novas soluções.

Neste sentido, o trabalho contribui para alçar o objetivo da produção de um maior conhecimento sobre os impactos da adoção do custo sistêmico total. A pesquisa mostrou que o aprendizado foi gerado durante todas as etapas do trabalho. Ao construir a ES obteve-se uma visualização de diversos fatores e relações que não são comumente vistos em outras pesquisas, possibilitando-se assim enxergar além das fronteiras.

Com relação ao objetivo específico da construção do MDS, conclui-se que os procedimentos desta pesquisa levaram à construção de um modelo de dinâmica de sistemas e

suas relações. Este modelo 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, esta pesquisa considerou a fonte eólica como de menor geração de custo externo entre as fontes analisadas. Assim também foi possível verificar que a fonte térmica a carvão tende a não ser viável, considerando-se a contabilização das externalidades. Também é possível verificar que a eólica tem a intermitência como um fator que limita sua competitividade.

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 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, 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 negócios de energia, porém com a revelação de uma 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, aliados a uma necessidade de adaptação as novas formas de interação entra as organizações, o meio ambiente e a sociedade, esta pesquisa se mostrou relevante ao gerar aprendizagem e construir uma ferramenta que permitirá uma melhor avaliação das decisões futuras das organizações visando ao crescimento sustentável.

## 6.2 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

A principal limitação deste estudo refere-se a 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. Desta forma, embora no presente estudo o modelo tenha se limitado a avaliar três usinas de geração, pode ser facilmente adaptado para outros empreendimentos.

Outra limitação refere-se ao conceito do custo sistêmico total, pois esta pesquisa não avaliou as externalidades na íntegra, e sim as encontradas na estrutura sistêmica. O fato de se

utilizarem dados provenientes de outros estudos para a composição das relações construídas na MDS fez com que os resultados encontrados e, por consequência, as conclusões da presente pesquisa ficassem limitadas a estas variáveis e aos dados para as condições destas 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. Os resultados comparados do custo sistêmico total são limitados aos impactos pesquisados. Podem existir outros impactos que não foram considerados, havendo assim espaço para aprimorar este modelo. A ausência de um especialista da área de sociologia também é uma limitação que prejudica a estimação dos impactos sociais.

O modelo foi construído como se fossem três modelos distintos que rodam simultaneamente e geram resultados diferentes para cada uma das fontes avaliadas para posterior comparativo. Assim fica limitado a não gerar um resultado integrado, em função das demandas energéticas e expansão projetadas da rede. Além disso, as diferentes fontes não interagem diretamente entre si.

Ainda é importante expor que o modelo foi aplicado a três usinas distintas e as suas condições. Assim, os resultados ficam estritamente vinculados a esta. A Usina hidroelétrica avaliada foi de médio porte, se avaliada uma usina de maior (ou menor) porte, os resultados poderiam ser diferentes.

### **6.3 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS**

Por fim, sugere-se para pesquisas futuras um estudo que considere todos os atores envolvidos nas questões que versam sobre esta temática da energia. É recomendado que sejam conduzidas pesquisas semelhantes para que se possa fazer uma comparação dos modelos e assim verificar com maior precisão a adequação dos seus resultados.

Também sugere-se uma ampliação do modelo, para assim considerar mais variáveis e se obter uma riqueza maior nos resultados. Também é sugerido aplicar este modelo a dados quantitativos referentes já realizados, podendo assim avaliar seu comportamento com base em dados históricos e com possibilidade de comprovar sua relação estatística, o que poderia gerar maior confiabilidade ao modelo. Por fim, espera-se que a partir deste estudo desenvolvam-se pesquisas sobre as formas de compensação dos impactos socioeconômicos e ambientais direcionando a sociedade para um mundo mais sustentável.

## REFERÊNCIAS

AGRO LINK. Produtor de soja poderá ter renda de R\$ 1.463/ha na safra 2012/13. **Portal de notícias Agro Link**, 2013.

ALLEN, P.; VARGA, L. EXPLORING POSSIBLE ENERGY FUTURES FOR THE UK: EVOLVING POWER GENERATION. **Emergence: ...**, v. 15, n. 2, p. 38–63, 2013.

ANDRADE, L. A. . et al. **PENSAMENTO SISTEMICO: CADERNO DE CAMPO - O DESAFIO DA MUDANÇA SUSTENTADA NAS ORGANIZAÇÕES E NA SOCIEDADE**. Porto Alegre: Bookman, 2006. p. 488

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3 ed. ed. Brasília: [s.n.]. p. 236

ANSARI, N.; SEIFI, A. A system dynamics analysis of energy consumption and corrective policies in Iranian iron and steel industry. **Energy**, v. 43, n. 1, p. 334–343, jul. 2012.

ARBAULT, D. et al. Integrated earth system dynamic modeling for life cycle impact assessment of ecosystem services. **The Science of the total environment**, v. 472, p. 262–72, 15 fev. 2014.

BARCELLA, S. ENERGIA EÓLICA E OS IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS : ESTUDO DE CASO EM PARQUE EÓLICO DO RIO GRANDE DO SUL, BRASIL. **Revista de Ciências Ambientais**, p. 5–18, 2012.

BHAT, I. K.; PRAKASH, R. LCA of renewable energy for electricity generation systems—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 5, p. 1067–1073, jun. 2009a.

BHAT, I. K.; PRAKASH, R. LCA of renewable energy for electricity generation systems—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 5, p. 1067–1073, jun. 2009b.

BRANNSTROM, C.; JEPSON, W.; PERSONS, N. Social perspectives on wind-power development in West Texas. **Annals of the Association of ...**, v. 2030, n. September 2010, p. 839–851, 2011.

CARLSON, A. Energy system analysis of the inclusion of monetary values of environmental damage. **Biomass and Bioenergy**, v. 22, p. 169–177, 2002.

CCEE. **O InfoMercado: ed 77 - Janeiro/2014Introdução**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[http://www.ccee.org.br/ccee/documentos/CCEE\\_173172](http://www.ccee.org.br/ccee/documentos/CCEE_173172)>. Acesso em: 15 jan. 2014.

CDM – EXECUTIVE BOARD. **Ferradura Small Hydro Power Plant – Small Scale CDM Project**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/TUEV-SUED1135874208.63/view>>.

CDM, E. B. Ceran's 14 de Julho Hydro Power Plant CDM Project Activity. n. July, p. 1–70, 2006.

CDM, E. B. **Osório Wind Power Plant Project 2 (OWPPP2)**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/LRQA Ltd1341480414.02/view>>.

CEPEDA, M.; FINON, D. How to correct for long-term externalities of large-scale wind power development by a capacity mechanism? **Energy Policy**, v. 61, p. 671–685, 2013.

CES-FGV. **Propostas empresariais de políticas públicas para uma economia de baixo carbono no Brasil - Energia Elétrica** Centro de Estudos em Sustentabilidade - FGV, , 2013.

CGTEE. **Ficha Técnica Candiota III (fase C)**. Disponível em: <<http://www.cgtee.gov.br/sitenovo/index.php?secao=37>>. Acesso em: 5 jan. 2015.

CHAABAN, J.; CUNNINGHAM, W. Measuring the economic gain of investing in girls: the girl effect dividend. n. August, 2011.

COSTS, O. E. Hidden costs of energy: Unpriced consequences of energy production and use. **AIP Conference Proceedings**, v. 1401, n. 2011, p. 165–182, 2011.

CUSTÓDIO, R. DOS S. **Energia eólica para produção de energia elétrica**. 2. ed ed. [s.l.] Synergia; Acta; Abeeólica, 2013. p. 319

DAVIDSSON, S.; HÖÖK, M.; WALL, G. A review of life cycle assessments on wind energy systems. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 6, p. 729–742, 13 mar. 2012.

ELLIOTT, R. J.; LYLE, M. R.; MIAO, H. A model for energy pricing with stochastic emission costs. **Energy Economics**, v. 32, n. 4, p. 838–847, jul. 2010.

EPE. **Balanco Energético Nacional 2013: Ano base 2012**. Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: <[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)>. Acesso em: 13 jan. 2014.

EPE. **20º LEILÃO DE ENERGIA NOVA A-5 RESUMO VENDEDOR**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[http://epe.gov.br/leiloes/Documents/Leil%C3%B5es2014/Resumo\\_Vendedor\\_20len\\_a5.pdf](http://epe.gov.br/leiloes/Documents/Leil%C3%B5es2014/Resumo_Vendedor_20len_a5.pdf)>.

EYRE, N. External costs What do they mean for energy policy ? v. 25, n. I, p. 85–95, 1997.

FERNANDES, V. DE A.; CUNHA, M. DA. ESTIMAÇÃO DOS INVESTIMENTOS NA AVALIAÇÃO DE EMPRESAS NO BRASIL: UMA ANÁLISE DE ADERÊNCIA ENTRE A TEORIA EA PRÁTICA DE MERCADO. **ConTexto**, 2013.

FILHO, G.; GALHARDO, C. IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS DAS PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS INSERIDAS NO PROGRAMA DE INCENTIVO AS

FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA (PROINFA). **REVISTA BRASILEIRA DE ENERGIA**, v. 14, p. 145–166, 2008.

FORRESTER, J. W. System dynamics—a personal view of the first fifty years. **System Dynamics Review**, v. 23, n. 2, p. 345–358, 2007.

FORUM BRASILEIRO DE SEGURANÇA PÚBLICA. Anuário Brasileiro de Segurança Pública 2014. In: [s.l: s.n.].

GEORGAKELLOS, D. A. Impact of a possible environmental externalities internalisation on energy prices: The case of the greenhouse gases from the Greek electricity sector. **Energy Economics**, v. 32, n. 1, p. 202–209, jan. 2010.

GEORGAKELLOS, D. A. Climate change external cost appraisal of electricity generation systems from a life cycle perspective: the case of Greece. **Journal of Cleaner Production**, v. 32, p. 124–140, set. 2012.

GOH, Y. M.; LOVE, P. E. D. Methodological application of system dynamics for evaluating traffic safety policy. **Safety Science**, v. 50, n. 7, p. 1594–1605, ago. 2012.

HASANI-MARZOONI, M.; HOSSEINI, S. H. Dynamic model for market-based capacity investment decision considering stochastic characteristic of wind power. **Renewable Energy**, v. 36, n. 8, p. 2205–2219, ago. 2011.

IBGE. **Banco de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <<http://acessoainformacao.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 20 dez. 2014.

INVESTING.COM. **Carbon Emissions Historical Data**. Disponível em: <<http://br.investing.com/commodities/carbon-emissions-historical-data>>. Acesso em: 15 jan. 2015.

JANSSON, P.; FÜLÖP, T. A Sustainable Energy Future through Education and Research. **G-20 Youth Forum Conference**, 2013.

JENSEN, J. D.; LAWSON, L. G.; LUND, M. Systemic cost-effectiveness analysis of food hazard reduction – Campylobacter in Danish broiler supply. **European Journal of Operational Research**, v. 241, n. 1, p. 273–282, fev. 2015.

JOSKOW, P.; FRANK, C. Sun , wind and drain. **The Economist**, p. 1–2, 2014.

KLAASSEN, G.; RIAHI, K. Internalizing externalities of electricity generation: An analysis with MESSAGE-MACRO. **Energy Policy**, v. 35, n. 2, p. 815–827, fev. 2007.

KOSUGI, T. et al. Internalization of the external costs of global environmental damage in an integrated assessment model. **Energy Policy**, v. 37, n. 7, p. 2664–2678, jul. 2009.

KUDELKO, M. Internalisation of external costs in the Polish power generation sector: A partial equilibrium model. **Energy Policy**, v. 34, n. 18, p. 3409–3422, dez. 2006.

LACERDA, D. P. et al. Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. **Gestão & Produção**, v. 20, p. 741–761, 2013.

LACERDA, D.; RODRIGUES, L. Uma proposta de ampliação da taxonomia geral de custos: uma aplicação em uma Instituição de Ensino Superior (IES). **Sistemas & Gestão**, v. 1, n. 3, p. 244–257, 2006.

LAES, E.; MESKENS, G.; VAN DER SLUIJS, J. P. On the contribution of external cost calculations to energy system governance: The case of a potential large-scale nuclear accident. **Energy Policy**, v. 39, n. 9, p. 5664–5673, set. 2011.

LARKIN, A. **Environmental Debt: The Hidden Costs of a Changing Global Economy**. [s.l: s.n.].

LEUNG, D. Y. C.; YANG, Y. Wind energy development and its environmental impact: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 1, p. 1031–1039, jan. 2012.

LIU, C. A.; BURNS, J. R. ANALYSIS OF U . S . ELECTRICITY GENERATION USING THE TOOLS OF SYSTEM DYNAMICS. v. 6, n. 1, p. 17–31, 2011.

LIUGUO, S.; SHIJING, Z.; JIANBAI, H. Pricing Simulation Platform Based on System Dynamics. **Systems Engineering Procedia**, v. 5, n. 932, p. 445–453, jan. 2012.

LOSEKANN, L.; ALMEIDA, E.; ROMEIRO, D. **Escolha tecnológica na expansão do parque gerador brasileiro: as implicações da utilização do Índice Custo Benefício (ICB)**. Disponível em: <<https://infopetro.wordpress.com/2014/09/08/escolha-tecnologica-na-expansao-do-parque-gerador-brasileiro-as-implicacoes-da-utilizacao-do-indice-custo-beneficio-icb/>>.

MAGOHA, P. Footprints in the wind? Environmental impacts of wind power development. **Refocus September/October**, p. 30–33, 2002.

MAHAPATRA, D.; SHUKLA, P.; DHAR, S. External cost of coal based electricity generation: A tale of Ahmedabad city. **Energy Policy**, v. 49, p. 253–265, out. 2012.

MAILLE, M.; SAINT-CHARLES, J. Social cohesion in a community divided by a wind farm project. **Human Ecology Review**, v. 19, n. 2, 2012a.

MAILLE, M.; SAINT-CHARLES, J. Social cohesion in a community divided by a wind farm project. **Human Ecology Review**, v. 19, n. 2, 2012b.

MANSON, N. J. Is operations research really research. **Orion**, v. 22, n. 2, p. 155–180, 2006.

MARCANTONINI, C.; ELLERMAN, A. The Cost of Abating CO2 Emissions by Renewable Energy Incentives in Germany Claudio Marcantonini The Cost of Abating CO2 Emissions by. n. February, 2013.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de Metodologia Científica**. São Paulo: Atlas, 2005.

MARRECO, J. Planejamento de Longo Prazo da Expansão da Oferta de Energia Elétrica no Brasil sob uma Perspectiva da Teoria das Opções Reais. **COPPE/UFRJ**, 2007.

MENEZES, S. J. **METODOLOGIA PARA PARTILHA DA COMPENSAÇÃO FINANCEIRA PELO USO DE RECURSOS HÍDRICOS EM USINAS HIDRELÉTRICAS SEQUÊNCIAIS: O CASO DA BACIA DO RIO GRANDE**. [s.l: s.n.].

MIRANDA, M. Fator de emissão de gases de efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil: implicações da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida. **teses.usp.br**, 2012.

MME. **PORTARIA Nº 42, DE 1º DE MARÇO DE 2007**, 2007.

MME; EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2022**. Brasília: [s.n.].

MORANDI, M. **Entendimento da dinâmica da precificação de commodities através do pensamento sistêmico e do planejamento por cenários: uma aplicação no mercado**. [s.l: s.n.].

MORANDI, M. I. W. M. et al. Foreseeing Iron Ore Prices Using System Thinking and Scenario Planning. **Systemic Practice and Action Research**, 31 jan. 2013.

MOVILLA, S.; MIGUEL, L. J.; BLÁZQUEZ, L. F. A system dynamics approach for the photovoltaic energy market in Spain. **Energy Policy**, v. 60, p. 142–154, set. 2013.

PEHNT, M. Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies. **Renewable Energy**, v. 31, n. 1, p. 55–71, jan. 2006.

PEREIRA, A. J.; SARAIVA, J. T. Evaluation of the Impact of Wind Generation on the Electricity Market Prices and on the Profitability of New Wind Investments. **EPJ Web of Conferences**, v. 33, p. 01008, 2 out. 2012.

PEREIRA, A. O. et al. Perspectives for the expansion of new renewable energy sources in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 49–59, jul. 2013a.

PEREIRA, A. O. et al. Perspectives for the expansion of new renewable energy sources in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 49–59, jul. 2013b.

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

PIDD, M. **Tools for Thinking: Modelling in Management Science**. 2nd. ed. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd, 2003.

PORTER, M. E. The five competitive forces that shape strategy. **Harvard business review**, v. 86, n. 1, p. 78–93, 137, jan. 2008.

PRIA, P. OF R. I. A. Why environmental externalities matter to institutional investors. **Environmental Studies**, p. 69, 2011.

PUMA. **PUMA's Environmental Profit and Loss Account for the year ended 31 December 2010**. [s.l: s.n.].

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

RAFAJ, P.; KYPREOS, S. Internalisation of external cost in the power generation sector: Analysis with Global Multi-regional MARKAL model. **Energy Policy**, v. 35, n. 2, p. 828–843, fev. 2007.

RENTIZELAS, A.; GEORGAKELLOS, D. Incorporating life cycle external cost in optimization of the electricity generation mix. **Energy Policy**, v. 65, p. 134–149, fev. 2014.

ROBALINO-LÓPEZ, A.; MENA-NIETO, A.; GARCÍA-RAMOS, J. E. System dynamics modeling for renewable energy and CO2 emissions: A case study of Ecuador. **Energy for Sustainable Development**, v. 20, p. 11–20, 2014.

RODRIGUES, J. DE M. **Cálculo dos fatores de emissão de CO2 pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil**. [s.l.] Instituto de engenharia do Paraná (IEP), 2011.

RUDIBERT, K. J. Cenarização: a ferramenta essencial para uma estratégia efetiva. **Revista Eletrônica Boletim do TEMPO**, p. 1–38, 2009.

SAIDUR, R. et al. Environmental impact of wind energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 5, p. 2423–2430, jun. 2011.

SAJJAD, F.; NOREEN, U.; ZAMAN, K. Climate change and air pollution jointly creating nightmare for tourism industry. **Environmental science and pollution research international**, v. 21, n. 21, p. 12403–18, nov. 2014.

SHIH, Y.-H.; TSENG, C.-H. Cost-benefit analysis of sustainable energy development using life-cycle co-benefits assessment and the system dynamics approach. **Applied Energy**, v. 119, p. 57–66, abr. 2014.

SHINDELL, D. The social cost of atmospheric release. 2013.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. Florianópolis: [s.n.].

SILVEIRA, F.; BERTASSO, B.; MAGALHÃES, L. Tipologia Socioeconômica das Famílias das Grandes Regiões Urbanas Brasileiras e seu perfil de gastos. 2003.

SIMAS, M. Energia eólica e desenvolvimento sustentável no Brasil: estimativa da geração de empregos por meio de uma matriz insumo-produto ampliada. 2012.

STASINOPOULOS, P. et al. 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**, v. 17, n. 2, p. 199–207, 6 nov. 2011.

STERMAN, J. System dynamics: systems thinking and modeling for a complex world. **Proceedings of the ESD Internal Symposium**, 2002.

STREIMIKIENE, D.; ALISAUSKAITE-SESKIENE, I. External costs of electricity generation options in Lithuania. **Renewable Energy**, v. 64, p. 215–224, abr. 2014.

SÜFFERT, T.; FERNANDO, L.; ALBUQUERQUE, F. DE. CARVÃO NOS ESTADOS DO RIO GRANDE DO SUL. **Informe de Recursos Minerais**, 1997.

TAKO, A. A.; ROBINSON, S. Model development in discrete-event simulation and system dynamics: An empirical study of expert modellers. **European Journal of Operational Research**, v. 207, n. 2, p. 784–794, dez. 2010.

TANCREDI, M.; ABBUD, O. A. Por que o Brasil está trocando as hidrelétricas e seus reservatórios por energia mais cara e poluente? **Núcleo de Estudos e Pesquisas do Senado Federal**, 2013.

TIMILSINA, G. R.; CORNELIS VAN KOOTEN, G.; NARBEL, P. A. Global wind power development: Economics and policies. **Energy Policy**, v. 61, p. 642–652, out. 2013.

TOLMASQUIM, M. Plano Nacional de energia 2030. **Conselho Nacional de Política Energética-CNPE**, ..., 2007.

UNEP. **Guidelines for social life cycle assessment of products**. [s.l.: s.n.].

VAN AKEN, J. E. Management research based on the paradigm of the design sciences: the quest for field-tested and grounded technological rules. **Journal of management studies**, n. March, 2004.

VAN DER HEIJDEN, K. **Scenarios: the art of strategic conversation**. West Sussex, England: John Wiley & Sons, 1996.

VOLPATO, E. D. S. N. Pesquisa bibliográfica em ciências biomédicas. **Jornal de Pneumologia**, v. 26, n. 2, p. 77–80, abr. 2000.

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

YIN, R.; GRASSI, D. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

ZHANG, Q. et al. External costs from electricity generation of China up to 2030 in energy and abatement scenarios. **Energy Policy**, v. 35, n. 8, p. 4295–4304, ago. 2007.

## ANEXO I – entrevista semiestruturada. Elaborado pelo Autor.

## Questões:

- 1) Qual sua experiência em projetos de geração de energia?
  - Fontes (eólica, hidroelétrica, outras)? Realizados e em andamento.
- 2) Como é sua atuação nos projetos? (Gestor de projetos? Técnico? Trabalho de campo? Gestor do negócio? )
- 3) Considerando todo seu conhecimento na área, Quais são os impactos socioeconômicos gerados por um empreendimento eólico? (custo externo)
  - Quais as etapas do projeto geram maior impacto socioeconômico?
  - Existem impactos que no futuro podem ser mitigados através de investimentos dos empreendedores?
  - Quais são as formas de mitigação destes impactos? Custo?
  - Seria possível listar os 3 impactos negativos e 3 impactos positivos?
- 4) Quais são as principais diferenças nos impactos da escolha de matriz energética composta por fonte eólica e outras fontes??
  - Hidroelétrica;
  - Termoelétrica;
- 5) Que forma você sugeriria para medir os custos gerados por este impacto no tempo e no espaço?
- 6) Como seria um empreendimento que é considerado bem sucedido nas questões de impacto sócio econômica?
- 7) Quais seriam, na sua opinião, as incertezas críticas sobre os cenários futuros no tratamento da internalização dos custos externos.
- 8) Sugestões? (gerais sobre a pesquisa)

## ANEXO II - Equações do Modelo Dinâmico de Sistemas utilizadas no software itthink 10.0.3.

$$\text{Custo\_interno\_MWh\_Stock[Fonte]}(t) = \text{Custo\_interno\_MWh\_Stock[Fonte]}(t - dt) + (\text{Custo\_interno\_MWh[Fonte]}) * dt$$

$$\text{INIT Custo\_interno\_MWh\_Stock[Fonte]} = 0$$
**INFLOWS:**

$$\text{Custo\_interno\_MWh[Fonte]} = \text{Custo\_OeM\_Var} + (\text{Custo\_Energia/MWh\_gerado})$$

$$\text{Custo\_sist\_acumulado[Fonte]}(t) = \text{Custo\_sist\_acumulado[Fonte]}(t - dt) + (\text{Custo\_Sistêmico\_MWh[Fonte]}) * dt$$

$$\text{INIT Custo\_sist\_acumulado[Fonte]} = 0$$
**INFLOWS:**

$$\text{Custo\_Sistêmico\_MWh[Fonte]} = \text{Custo\_interno\_MWh} + \text{Custo\_externalidade\_MWh}$$

$$\text{Externalidade\_SIN\_acumulada[Fonte]}(t) = \text{Externalidade\_SIN\_acumulada[Fonte]}(t - dt) + (\text{externalidade\_gerada\_ao\_SIN[Fonte]}) * dt$$

$$\text{INIT Externalidade\_SIN\_acumulada[Fonte]} = 0$$
**INFLOWS:**

$$\text{externalidade\_gerada\_ao\_SIN[Fonte]} = \text{MWh\_gerado} * \text{Externalidade\_esp\_SIN}$$

$$\text{fluxo\_caixa\_total\_emissões[Fonte]}(t) = \text{fluxo\_caixa\_total\_emissões[Fonte]}(t - dt) + (\text{fluxo\_caixa\_emissões\_CO2[Fonte]}) * dt$$

$$\text{INIT fluxo\_caixa\_total\_emissões[Fonte]} = 0$$
**INFLOWS:**

$$\text{fluxo\_caixa\_emissões\_CO2[Fonte]} = \text{Saldo\_emissões\_CO2} * \text{valor\_credito\_carbono}$$

$$\text{Noname\_1[Fonte]}(t) = \text{Noname\_1[Fonte]}(t - dt) + (\text{Net\_profit[Fonte]}) * dt$$

$$\text{INIT Noname\_1[Fonte]} = 0$$
**INFLOWS:**

$$\text{Net\_profit[Fonte]} = \text{Receita\_energia} - \text{Custo\_Energia}$$

$$\text{oferta\_capt\_público\_adicionada[Fonte]}(t) = \text{oferta\_capt\_público\_adicionada[Fonte]}(t - dt) + (\text{add\_receita\_pública[Fonte]}) * dt$$

$$\text{INIT oferta\_capt\_público\_adicionada[Fonte]} = 0$$
**INFLOWS:**

$$\text{add\_receita\_pública[Fonte]} = (\text{Receita\_energia} + \text{Variação\_Renda\_Terra} + \text{add\_receita\_empresas\_locais}) * \text{Impostos\_e\_taxas}$$

$$\text{Resultado\_empresa[Fonte]}(t) = \text{Resultado\_empresa[Fonte]}(t - dt) + (\text{Receita\_energia[Fonte]} - \text{Custo\_Energia[Fonte]}) * dt$$

$$\text{INIT Resultado\_empresa[Fonte]} = 0$$
**INFLOWS:**

$$\text{Receita\_energia[eolica]} = (\text{MWh\_gerado[eolica]} * ((\text{Preço\_MWh[eolica]} * (1 + \text{Gatilho\_preço} * \text{var\_preço}))) + \text{fluxo\_caixa\_emissões\_CO2[eolica]})$$

$$\text{Receita\_energia[hidrica]} = (\text{MWh\_gerado[hidrica]} * (\text{Preço\_MWh[hidrica]} * (1 + \text{Gatilho\_preço} * \text{var\_preço}))) + \text{fluxo\_caixa\_emissões\_CO2[hidrica]}$$

$$\text{Receita\_energia[termica]} = \text{MWh\_gerado[termica]} * (\text{Preço\_MWh[termica]} * (1 + \text{Gatilho\_preço} * \text{var\_preço}))$$
**OUTFLOWS:**

$$\text{Custo\_Energia[eolica]} = \text{Custo\_Operacional[eolica]} + \text{internaliza\_ext} * \text{Custo\_externalidade\_MWh[eolica]} * \text{MWh\_gerado[eolica]}$$

$$\text{Custo\_Energia[hidrica]} = \text{Custo\_Operacional[hidrica]} + \text{internaliza\_ext} * \text{Custo\_externalidade\_MWh[hidrica]} * \text{MWh\_gerado[hidrica]}$$

$$\text{Custo\_Energia[termica]} = \text{Custo\_Operacional[termica]} + \text{internaliza\_ext} * ((\text{Custo\_externalidade\_MWh[termica]} * \text{MWh\_gerado[termica]}) + \text{fluxo\_caixa\_emissões\_CO2[termica]})$$

$$\text{tot\_custo\_natv[Fonte]}(t) = \text{tot\_custo\_natv[Fonte]}(t - dt) + (\text{custo\_red\_area\_nativa[Fonte]}) * dt$$

```

INIT tot_custo_natv[Fonte] = 0
INFLOWS:
custo_red_area_nativa[eolica] = 0
custo_red_area_nativa[hidrica] =
Area_utilizada_usina[hidrica]*custo_red_esp_area_nativa
custo_red_area_nativa[termica] = (MWh_gerado[termica]*0.000001550)*custo_red_esp_area_nativa
total_emissoes_CO2[Fonte](t) = total_emissoes_CO2[Fonte](t - dt) + (Saldo_emissoes_CO2[Fonte]) *
dt
INIT total_emissoes_CO2[Fonte] = 0
INFLOWS:
Saldo_emissoes_CO2[Fonte] = MWh_gerado*Emissao_especifica_CO2
Total_receita_empresas_locais[Fonte](t) = Total_receita_empresas_locais[Fonte](t - dt) +
(add_receita_empresas_locais[Fonte]) * dt
INIT Total_receita_empresas_locais[Fonte] = 0
INFLOWS:
add_receita_empresas_locais[Fonte] =
(add_renda_populacao*Gasto_esp_populacao_local)+(Custo_implantacao*tx_uso_servico_local)
Total_reinvestido[Fonte](t) = Total_reinvestido[Fonte](t - dt) + (Reinvestimento_negocio[Fonte]) * dt
INIT Total_reinvestido[Fonte] = 0
INFLOWS:
Reinvestimento_negocio[Fonte] = Resultado_empresa*Taxa_reinvest
Usina_a_ser_Construida[eolica](t) = Usina_a_ser_Construida[eolica](t - dt) + (MW_projetados[Fonte]
- MW_que_serao_add[Fonte]) * dt
INIT Usina_a_ser_Construida[eolica] = 0
Usina_a_ser_Construida[hidrica](t) = Usina_a_ser_Construida[hidrica](t - dt) +
(MW_projetados[Fonte] - MW_que_serao_add[Fonte]) * dt
INIT Usina_a_ser_Construida[hidrica] = 0
Usina_a_ser_Construida[termica](t) = Usina_a_ser_Construida[termica](t - dt) +
(MW_projetados[Fonte] - MW_que_serao_add[Fonte]) * dt
INIT Usina_a_ser_Construida[termica] = 0
INFLOWS:
MW_projetados[Fonte] = (gatilho_reinvest*Reinvestimento_negocio)/custo_especifico_imp_MW
OUTFLOWS:
MW_que_serao_add[Fonte] = IF Usina_a_ser_Construida >= tamanho_usina_nova THEN
tamanho_usina_nova ELSE 0
valor_acumulado_externalidade[Fonte](t) = valor_acumulado_externalidade[Fonte](t - dt) +
(Custo_externalidade_MWh[Fonte]) * dt
INIT valor_acumulado_externalidade[Fonte] = 0
INFLOWS:
Custo_externalidade_MWh[Fonte] =
(custo_total_GEE+tot_custo_natv+fluxo_caixa_total_emissoes+custo_total_Social+Externalidade_SI
N_acumulada-oferta_capt_publico_adicionada)/Geracao_MWh_acumulada
Variação_Renda_Terra[Fonte](t) = Variação_Renda_Terra[Fonte](t - dt) + (receita_de_locação[Fonte]
- Redução_renda_Terra[Fonte]) * dt
INIT Variação_Renda_Terra[Fonte] = 0
INFLOWS:
receita_de_locação[eolica] = Tamanho_de_negocio_MW[eolica]*receita_esp_locação[eolica]
receita_de_locação[hidrica] = Area_utilizada_usina[hidrica]*receita_esp_locação[hidrica]
receita_de_locação[termica] = 0

OUTFLOWS:
Redução_renda_Terra[eolica] = Area_utilizada_usina[eolica]*Renda_média_terra
Redução_renda_Terra[hidrica] = 0
Redução_renda_Terra[termica] = 0
Area_utilizada_usina[Fonte](t) = Area_utilizada_usina[Fonte](t - dt) + (Area_usina[Fonte]) * dt

```

INIT Area\_utilizada\_usina[Fonte] = 0

INFLOWS:

Area\_usina[Fonte] = Adição\_capacidade\_MW/cota\_uso\_fonte

custo\_total\_GEE[Fonte](t) = custo\_total\_GEE[Fonte](t - dt) + (Custo\_Sociedade\_GEE[Fonte]) \* dt

INIT custo\_total\_GEE[Fonte] = 0

INFLOWS:

Custo\_Sociedade\_GEE[eolica] = (Geração\_de\_GEE[eolica,  
GHS]\*Custo\_esp\_GEE[GHS])+(Geração\_de\_GEE[eolica,  
SOx]\*Custo\_esp\_GEE[SOx])+(Geração\_de\_GEE[eolica,  
CO]\*Custo\_esp\_GEE[CO])+(Geração\_de\_GEE[eolica, NOx]\*Custo\_esp\_GEE[NOx])

Custo\_Sociedade\_GEE[hidrica] = (Geração\_de\_GEE[hidrica,  
GHS]\*Custo\_esp\_GEE[GHS])+(Geração\_de\_GEE[hidrica,  
SOx]\*Custo\_esp\_GEE[SOx])+(Geração\_de\_GEE[hidrica,  
CO]\*Custo\_esp\_GEE[CO])+(Geração\_de\_GEE[hidrica, NOx]\*Custo\_esp\_GEE[NOx])

Custo\_Sociedade\_GEE[termica] = (Geração\_de\_GEE[termica,  
GHS]\*Custo\_esp\_GEE[GHS])+(Geração\_de\_GEE[termica,  
SOx]\*Custo\_esp\_GEE[SOx])+(Geração\_de\_GEE[termica,  
CO]\*Custo\_esp\_GEE[CO])+(Geração\_de\_GEE[termica, NOx]\*Custo\_esp\_GEE[NOx])

custo\_total\_Social[Fonte](t) = custo\_total\_Social[Fonte](t - dt) + (Custo\_dano\_pop\_temp[Fonte]) \* dt

INIT custo\_total\_Social[Fonte] = 0

INFLOWS:

Custo\_dano\_pop\_temp[Fonte] =

População\_Temporária[Fonte]\*(tx\_gravidez\_precoce\*Custo\_gravidez\_precoce+Custo\_violência\*Tx\_violência)

custo\_tot\_impl[Fonte](t) = custo\_tot\_impl[Fonte](t - dt) + (Custo\_implantação[Fonte]) \* dt

INIT custo\_tot\_impl[Fonte] = 0

INFLOWS:

Custo\_implantação[Fonte] = Adição\_capacidade\_MW\*custo\_específico\_imp\_MW

custo\_tot\_Oper[Fonte](t) = custo\_tot\_Oper[Fonte](t - dt) + (Custo\_Operacional[Fonte]) \* dt

INIT custo\_tot\_Oper[Fonte] = 0

INFLOWS:

Custo\_Operacional[Fonte] = (MWh\_gerado\*custo\_OeM)

Empregos\_Gerados\_Local[Fonte](t) = Empregos\_Gerados\_Local[Fonte](t - dt) + (novos\_empregos\_locais[Fonte]) \* dt

INIT Empregos\_Gerados\_Local[Fonte] = 0

INFLOWS:

novos\_empregos\_locais[Fonte] = Adição\_capacidade\_MW\*Empregos\_por\_MW

GEE\_Total[Fonte, GEE](t) = GEE\_Total[Fonte, GEE](t - dt) + (Geração\_de\_GEE[Fonte, GEE]) \* dt

INIT GEE\_Total[Fonte, GEE] = 0

INFLOWS:

Geração\_de\_GEE[Fonte, GEE] = MWh\_gerado[Fonte]\*Emissão\_específica\_GEE

Geração\_MWh\_acumulada[Fonte](t) = Geração\_MWh\_acumulada[Fonte](t - dt) + (MWh\_gerado[Fonte]) \* dt

INIT Geração\_MWh\_acumulada[Fonte] = 1

INFLOWS:

MWh\_gerado[Fonte] = Tamanho\_de\_negócio\_MW\*Fator\_capacidade\*horas\_periodo

População\_Temporária[Fonte](t) = População\_Temporária[Fonte](t - dt) + (pop\_temp\_in[Fonte] - pop\_temp\_out[Fonte]) \* dt

INIT População\_Temporária[Fonte] = 0

INFLOWS:

pop\_temp\_in[Fonte] = MDO\_in+MDO\_in\_conv

OUTFLOWS:

pop\_temp\_out[Fonte] = MDO\_out+MDO\_out\_conv

renda\_stosk[Fonte](t) = renda\_stosk[Fonte](t - dt) + (add\_renda\_população[Fonte]) \* dt

```

INIT renda_stok[Fonte] = 0
INFLOWS:
add_renda_populacao[eolica] =
(Empregos_Gerados_Local[eolica]*renda_med_empregado)+(Populacao_Temporaria[eolica]*renda_
med_construcao)
add_renda_populacao[hidrica] =
(Empregos_Gerados_Local[hidrica]*renda_med_empregado)+(Populacao_Temporaria[hidrica]*renda_
med_construcao)
add_renda_populacao[termica] =
(Empregos_Gerados_Local[termica]+Populacao_Temporaria[termica])*renda_med_construcao
Tamanho_de_negocio_MW[Fonte](t) = Tamanho_de_negocio_MW[Fonte](t - dt) +
(Adicao_capacidade_MW[Fonte]) * dt
INIT Tamanho_de_negocio_MW[Fonte] = 0.001
INFLOWS:
Adicao_capacidade_MW[Fonte] = IF TIME=1 THEN(MW_inicial+MW_que_serao_add) ELSE
(MW_que_serao_add)

zcust_tot_stok[Fonte](t) = zcust_tot_stok[Fonte](t - dt) + (Zcusto_total_sist[Fonte]) * dt
INIT zcust_tot_stok[Fonte] = 0
INFLOWS:
Zcusto_total_sist[Fonte] = Preço_MWh+Custo_externalidade_MWh+Custo_OeM_Var
MDO_implantacao[Fonte](t) = MDO_implantacao[Fonte](t - dt) + (MDO_in[Fonte] -
MDO_out[Fonte]) * dt
INIT MDO_implantacao[Fonte] = 0
    TRANSIT TIME = IF MDO_in[eolica] THEN 2 ELSE 5
    CAPACITY = INF
    INFLOW LIMIT = INF
INFLOWS:
MDO_in[eolica] = MDO_por_MW[eolica]*Adicao_capacidade_MW[eolica]
MDO_in[hidrica] = 0
MDO_in[termica] = 0
OUTFLOWS:
MDO_out[Fonte] = CONVEYOR OUTFLOW
MDO_implantacao_conv[Fonte](t) = MDO_implantacao_conv[Fonte](t - dt) + (MDO_in_conv[Fonte]
- MDO_out_conv[Fonte]) * dt
INIT MDO_implantacao_conv[Fonte] = 0
    TRANSIT TIME = 5
    CAPACITY = INF
    INFLOW LIMIT = INF
INFLOWS:
MDO_in_conv[eolica] = 0
MDO_in_conv[hidrica] = MDO_por_MW[hidrica]*Adicao_capacidade_MW[hidrica]
MDO_in_conv[termica] = MDO_por_MW[termica]*Adicao_capacidade_MW[termica]
OUTFLOWS:
MDO_out_conv[Fonte] = CONVEYOR OUTFLOW

```