

Thiago Carrano de Albuquerque Bernardes

**PROPOSTA DE MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS
VOLTADO PARA O ENTENDIMENTO DAS RELAÇÕES
ENTRE AS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE DIFUSÃO DE
TECNOLOGIA SOLAR FOTOVOLTAICA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Uriona Maldonado

Florianópolis
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Bernardes, Thiago

Proposta de modelo de dinâmica de sistemas voltado para o entendimento das relações entre as variáveis do processo de difusão de tecnologia fotovoltaica/ Thiago Bernardes; orientador, Mauricio Maldonado - Florianópolis, SC, 2017.

176 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

Inclui referências

1. Engenharia de Produção. 2. Energia Solar Fotovoltaica. 3. Setor Residencial. 4. Modelo de Bass. 5. Difusão de Inovação. 6. Dinâmica de Sistemas. I. Maldonado, Mauricio. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. III. Título.

Thiago Carrano de Albuquerque Bernardes

**PROPOSTA DE MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS
VOLTADO PARA O ENTENDIMENTO DAS RELAÇÕES
ENTRE AS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE DIFUSÃO DE
TECNOLOGIA SOLAR FOTOVOLTAICA**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de
“Mestre” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Produção

Florianópolis, 1 de Dezembro de 2017.

Prof^ª. Lucila Maria de Souza Campos, Dr.^a
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Mauricio Uriona Maldonado, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Osmar Possamai, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Júlio Cesar Bastos de Figueiredo, Dr.
Escola Superior de Propaganda e Marketing

À Cármen, Inácia e Wanda, in
Memoriam.

AGRADECIMENTOS

À Jeová, por ter me concedido saúde, tanto física quanto mental, para chegar até o presente momento;

Aos meus pais e a minha namorada, pelo apoio incondicional nos momentos de dificuldade;

À Universidade Federal de Santa Catarina, que através do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, me possibilitou a realização desta pesquisa;

Ao professor Maurício por ter me apresentado a metodologia de Dinâmica de Sistemas e pela orientação realizada;

E a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

*I see no changes
Wake up in the morning and I ask myself
Is life worth living should I blast myself?
Tupac Shakur*

RESUMO

A geração de energia fotovoltaica distribuída ganha notoriedade nestes últimos anos como uma alternativa limpa e renovável de atendimento da demanda de eletricidade. Com esta possibilidade, o consumidor residencial passa a ter um papel ativo no sistema elétrico, agora podendo investir no seu próprio equipamento de geração de energia elétrica. Neste contexto, a presente pesquisa utiliza a metodologia de Dinâmica de Sistemas para simular a difusão dos sistemas fotovoltaicos em residências brasileiras. Para isto, foi formulado um modelo de difusão de Bass de acordo com a realidade deste mercado. O modelo, por sua vez, se baseou em características socioeconômicas do público alvo, do ponto de igualdade de valor entre a tarifa da rede e o custo da tecnologia, a evolução da curva de aprendizado e os impactos da dependência da tecnologia estrangeira. Já os resultados apresentados, em um cenário base, esta tecnologia atinge 558mil residências brasileiras até o ano 2030, com uma capacidade instalada de 2,23GWp, alimentando 2,3% da demanda de energia elétrica do setor residencial atual. Em cenários mais favoráveis o número de adotantes sobe para 787mil, podendo atingir uma potência instalada de 2,57GWp e gerando energia elétrica suficiente para suprir 3,2% das residências atuais.

Palavras-chave: Energia solar-fotovoltaica. Setor residencial. Modelo de Bass. Difusão de inovações. Dinâmica de Sistemas.

ABSTRACT

The distributed photovoltaic generation gains prominence in recent years as a clean and renewable alternative to meet growing demand for electricity. Regarding this possibility, the consumer begins to play a leading role on the electrical system, since they are now able to invest in their own generation equipment. In this context, the present research uses the Systems Dynamics methodology to simulate the diffusion of the photovoltaic systems in Brazilian residences. In order to do so, a Bass diffusion model was formulated according to the reality of this market. The model, in turn, was based on the socioeconomic characteristics of the target public, from the point of equality of value between the network tariff and the cost of technology, the evolution of the learning curve and the impacts of dependence on foreign technology. The results presented, in a baseline scenario, solar generation reaches 558 thousand Brazilian households in 2030, with an installed capacity of 2.23 GWp, supplying 2.3% of the electricity demand of the current residential sector. In more favorable scenarios the number of adopters rises to 787 thousand, being able to reach an installed power of 2.57GWp and generating sufficient electrical energy to supply 3.2% of the current residences.

Keywords: Solar-photovoltaic energy. Residential sector. Bass Model. Diffusion of innovations. Systems Dynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Os cinco estágios do processo de Difusão da Inovação.....	43
Figura 2 - Classificação dos adotantes	46
Figura 3 - Canais interpessoais no processo de difusão	46
Figura 4 – “Curva S” de um processo de difusão genérico	48
Figura 5 - Representação da solução genérica da equação (2.3)	51
Figura 6 - Representação da solução genérica da equação (10)	52
Figura 7 - Representação da solução genérica do modelo de Blackman (B) e Floyd (F).....	53
Figura 8 - Estrutura da Pesquisa.....	61
Figura 9 - Estruturação da análise e resolução de um problema pela Dinâmica de Sistemas	63
Figura 10 - Representação gráfica da malha de realimentação	66
Figura 11 - Representação gráfica da malha balanço	66
Figura 12 - Representação básica diagrama estoque e fluxo	68
Figura 13 – Cadeia produtiva da indústria fotovoltaica	78
Figura 14 – Diagrama do levantamento do mercado potencial fotovoltaico residencial	85
Figura 15 – Curva de crescimento da fração máxima do mercado residencial brasileiro fotovoltaico	87
Figura 16 – Malha de Balanço B1	90
Figura 17 – Malhas de realimentação B1 e B2.....	90
Figura 18 – Malhas de realimentação B1, B2 e R1	91
Figura 19 – Malhas de realimentação B1, B2, R1 e R2	91
Figura 20 – Malhas de realimentação B1, B2, R1, R2 e R3	92
Figura 21 – Malhas de realimentação B1, B2, R1, R2, R3 e R4	93
Figura 22 – Malhas de realimentação B1, B2, B3, R1, R2, R3 e R4.....	94
Figura 23 – Diagrama de causalidade (descrição do sistema).....	95
Figura 24 – Diagrama de estoque-fluxo proposto	97
Figura 25 – Sub-modelo do mercado consumidor.....	98
Figura 26 – Sub-modelo difusão dos equipamentos.....	99
Figura 27 - Algoritmo para implementação do método dos mínimos quadrados ordinários no ambiente RStudio.....	100
Figura 28 - Resultado dos Parâmetros “p” e “q” através do método os mínimos quadrados ordinários no ambiente RStudio.....	101
Figura 29 – Sub-modelo da tarifa da rede	102
Figura 30 – Sub-modelo da capacidade de aprendizado	103
Figura 31 – Sub-modelo do custo da energia solar	104
Figura 32 – Sub-modelo do mercado dos equipamentos importados..	105
Figura 33 – Sub-modelo do mercado dos equipamentos nacionais.....	106

Figura 34 – Sub-modelo da participação da energia solar na demanda de energia elétrica	107
Figura 35 – Adoção dos Equipamentos fotovoltaicos influenciada apenas pelos canais interpessoais	113
Figura 36 – Adoção dos Equipamentos fotovoltaicos influenciada apenas pelos canais de comunicação dirigida	114
Figura 37 – Adoção dos Equipamentos fotovoltaicos caso a energia da rede elétrica fosse gratuita.....	115
Figura 38 – Adoção dos Equipamentos fotovoltaicos caso os mesmo fossem gratuitos	116
Figura 39 – Análise de sensibilidade avaliando a variação das residências adotantes de energia solar.....	122
Figura 40 - Análise de sensibilidade avaliando a variação no preço do equipamento solar de potência 4kWp	122
Figura 41 - Análise de sensibilidade avaliando a variação no preço da tarifa de energia elétrica	123
Figura 42 - Residências adotantes da energia solar no cenário base...	125
Figura 43 – Adotantes com equipamentos importados e nacionais no cenário base.....	125
Figura 44 – Adoção por contato social ou propaganda no cenário base	126
Figura 45 – Parcela de produção de energia solar em relação à demanda de energia elétrica residencial no cenário base	127
Figura 46 – Relação entre o custo nivelado da energia solar e tarifa média das distribuidoras no cenário base.....	127
Figura 47 – Evolução da capacidade instalada da energia solar residencial no cenário base.....	128
Figura 48 – Evolução da geração residencial de energia fotovoltaica ao ano no cenário base	129
Figura 49 – Cenários propostos na análise de sensibilidade	130
Figura 50 – Os resultados do número de adotantes dos cenários propostos	132
Figura 51 – Os resultados da energia gerada pelos sistemas fotovoltaicos nos cenários propostos	133
Figura 52 – Os resultados da capacidade instalada da energia solar residencial nos cenários propostos	134
Figura 53 - Etapas do processo de revisão bibliográfica com seus respectivos resultados.	155
Figura 54 - Grau de relevância dos periódicos do portfólio bibliográfico	158

Figura 55 - Reconhecimento científico dos artigos integrantes do portfólio bibliográfico 159

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Testes para validação da estrutura do modelo de Dinâmica de Sistemas	69
Quadro 2 – Testes para a validação dos resultados do modelo de Dinâmica de Sistemas	70
Quadro 3 – Políticas de Incentivo que beneficiam a geração de energia solar residencial.....	75
Quadro 4 – Parâmetros verificados e justificados	109
Quadro 5 – Principais dados sobre o cenário base	124
Quadro 6 – Termos da Pesquisa	153
Quadro 7 – Base de dados utilizada para o banco de artigos brutos....	154
Quadro 8 – Portfólio bibliográfico de base para elaboração do modelo e suas contribuições	155

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Preços dos equipamentos fotovoltaicos importados	77
Tabela 2 – Preços dos equipamentos fotovoltaicos nacionais	77
Tabela 3 – Histórico da taxa de câmbio do Euro para o Real.....	79
Tabela 4 – Previsão da taxa de câmbio do Euro para o Real.....	79
Tabela 5 – Custos de instalação dos equipamentos	79
Tabela 6 – Tarifas finais de energia elétrica por distribuidora	82
Tabela 7 – Histórico do Índice de Preço ao Consumidor Amplo (IPCA)	83
Tabela 8 – Previsão do Índice de Preço ao Consumidor Amplo (IPCA)	83
Tabela 9 – Parâmetros considerados para a determinação do Mercado Potencial.....	85
Tabela 10 – Comparativo entre dados reais dos adotantes de energia fotovoltaica residencial e dados gerados pelo modelo	117
Tabela 11 – Comparativo entre dados reais do custo médio de aquisição de um sistema fotovoltaico de 4kWp e os dados gerados pelo modelo	118
Tabela 12 – Comparativo entre dados reais da tarifa média de energia elétrica residencial brasileira e os dados gerados pelo modelo	118
Tabela 13 – Período em que custo nivelado da energia solar se igual à média da tarifa das distribuidoras.....	135
Tabela 14 – Custos dos subsídios e descontos fiscais dos cenários propostos	136
Tabela 15– Custos por domicílio dos subsídios e descontos fiscais dos cenários propostos	136

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEPRO – Associação Brasileira de Engenharia de Produção
ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
ABRADEE – Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica
AME – Amazonas Distribuidora de Energia
BU – Biblioteca Universitária
CAIUA-D – Caiuá Distribuição de Energia
CEA – Companhia de Eletricidade do Amapá
CEAL – Companhia Energética de Alagoas
CEB-DIS – Companhia Energética de Brasília Distribuição
CEEE-D – Companhia Estadual de Energia Elétrica Distribuição
CELESC – Centrais Elétricas de Santa Catarina
CELG-D – Companhia de Energia e Luz de Goiás Distribuição
CELPA – Central Elétrica do Pará
CELPE – Companhia Energética de Pernambuco
CELTINS – Companhia de Energia Elétrica do Estado do Tocantins
CEMAR – Companhia Energética do Maranhão
CEMAT – Centrais Elétricas Matogrossenses
CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais
CEPISA – Centrais Elétricas do Piauí S.A
CERON – Centrais Elétricas de Rondônia
CERR – Companhia Energética de Roraima
CFLO – Companhia Força e Luz do Oeste
CHESP – Companhia Hidrelétrica de São Patrício
CNEE – Companhia Nacional de Energia Elétrica
COCEL – Companhia Campolarguense de Energia Elétrica
COELBA – Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia
COELCE – Companhia de Eletricidade do Ceará
COFINS – Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
CONFAZ – Conselho Nacional de Política Fazendária
COSERN – Companhia Energética do Rio Grande do Norte
CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz
DEMEI – Departamento Municipal de Energia de Ijuí
DMEPC – Departamento Municipal de Energia de Poços de Caldas
EBO – Energisa de Borborema
EDEVF – Empresa de Distribuição de Energia de Paranapanema
EEB – Empresa Elétrica de Bragantina
EFLJC – Empresa de Força e Luz João Cesa
EFLUL – Empresa de Força e Luz de Urussanga

ELFSM – Empresa de Luz e Força de Santa Maria
EMG – Energisa Minas Gerais
EPB – Energisa Paraíba
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
EPIA – European Photovoltaic Industry Association
ESCELSA – Espírito Santo Centrais Elétricas S.A
ESE – Empresa Sergipana de Energia
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMS – Imposto sobre a Circulação de Mercadoria e Serviços
IEA – International Energy Agency
II – Imposto de Importação
IPCA – Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
ISI – Institute for Scientific Information
LCOE – Levelized Cost of Energy
MIT – Massachusetts Institute of Technology
MME – Ministério de Minas e Energia
PADIS – Programa de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Indústria de Semicondutores
PIS – Programa de Integração Social
PPGEP – Programa de Pós-graduação de Engenharia de Produção
RGE – Rio Grande Energia
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
UHENPAL – Usina Hidrelétrica de Nova Palma

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	33
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	33
1.2	JUSTIFICATIVA.....	35
1.3	OBJETIVOS	37
1.3.1	Objetivo geral	37
1.3.2	Objetivos específicos	38
1.4	ADERÊNCIA DO TRABALHO COM O PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO.....	38
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	39
2	REFÊRENCIAL TEÓRICO.....	41
2.1	DIFUSÃO DE INOVAÇÕES	41
2.1.1	Etapas do processo de difusão.....	42
2.1.2	Classificação dos adotantes	44
2.1.3	Curva “S”.....	47
2.1.4	Medidas de incentivos à difusão.....	48
2.2	MODELOS DE DIFUSÃO	49
2.2.1	Modelo de Fourt e Woodlock.....	50
2.2.2	Modelo de Chow.....	50
2.2.3	Modelo de Floyd.....	51
2.2.4	Modelo de Fisher-Pry.....	52
2.2.5	Modelo de Blackman.....	53
2.2.6	Modelo de Bass.....	54
2.3	DINÂMICA DE SISTEMAS	55
3	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO.....	59
3.1	ENQUADRAMENTO DA METODOLOGIA	59
3.2	ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	60
3.2.1	Dinâmica de Sistemas.....	61
3.2.1.1	Etapa 1 – Reconhecimento do problema	64
3.2.1.2	Etapa 2 – Compreensão do problema e descrição do sistema.....	64

3.2.1.3	Etapa 3 – Análise qualitativa	67
3.2.1.4	Etapa 4 – Modelagem para simulação e teste do modelo	67
3.2.1.4.1	<i>Testes e validação do modelo</i>	68
3.2.1.5	Etapa 5 – Desenvolvimento de novas políticas.....	71
4	DIFUSÃO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA	
	RESIDENCIAL NO BRASIL	73
4.1	ORIGEM DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA RESIDENCIAL CONECTADA A REDE ELÉTRICA	73
4.2	INCENTIVOS AO SETOR	74
4.3	CUSTO DA ENERGIA SOLAR	76
4.4	TARIFA ENERGÉTICA	81
4.5	MERCADO CONSUMIDOR.....	83
4.5.1	Mercado potencial limite (L).....	86
5	ELABORAÇÃO DO MODELO DE DINÂMICA DE	
	SISTEMAS	89
5.1	MODELAGEM CONCEITUAL	89
5.2	MODELAGEM ESTRUTURAL E MATEMÁTICA	96
5.2.1	Sub-modelo do mercado consumidor	98
5.2.2	Sub-modelo da difusão dos equipamentos	99
5.2.3	Sub-modelo da tarifa da rede.....	101
5.2.4	Sub-modelo capacidade de aprendizado	103
5.2.5	Sub-modelo custo de energia solar	104
5.2.6	Sub-modelo mercado dos equipamentos importados	105
5.2.7	Sub-modelo mercado dos equipamentos nacionais	106
5.2.8	Sub-modelo participação da energia solar na demanda de energia elétrica	107
5.3	VALIDAÇÃO DO MODELO	107
5.3.1	Testes de validação estrutural.....	108
5.3.1.1	Adequação dos limites	108
5.3.1.2	Verificação da estrutura	109
5.3.1.3	Verificação dos parâmetros.....	109

5.3.1.4	Consistência das dimensões	112
5.3.1.5	Condições extremas.....	112
5.3.2	Teste de validação dos resultados	116
5.3.2.1	Erro de integração	116
5.3.2.2	Reprodução de comportamento.....	117
5.3.2.3	Anomalia no comportamento	119
5.3.2.4	Membro da família	119
5.3.2.5	Comportamento surpresa.....	119
5.3.2.6	Análise de sensibilidade	119
5.3.2.7	Melhoramento do sistema	119
6	ANÁLISE E RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	121
6.1	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS “p” E “q”	121
6.2	CENÁRIO BASE.....	123
6.3	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DAS POLITICAS	129
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	138
7.1	CONCLUSÃO	138
7.2	LIMITAÇÕES.....	140
7.3	SUGESTÕES PARA OS TRABALHOS FUTUROS	140
	REFERÊNCIAS	143
	APÊNDICE A – Procedimento de Revisão de Literatura e Bibliometria	153
	APÊNDICE B – Equações do Modelo	160
	APÊNDICE C – Tabela de Resultados da Simulação	164

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo contém uma breve contextualização do tema e a justificativa que motivou a pesquisa, bem como seus objetivos e procedimentos metodológicos. Além disso, são apresentados a aderência da pesquisa com o programa de pós-graduação e por fim, a estrutura da dissertação com uma visão geral de cada capítulo.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O setor energético possui uma relação de interdependência com crescimento socioeconômico de uma nação, existindo evidências de que há uma correlação entre o consumo de energia elétrica alguns indicadores de desenvolvimento sociais, tais como analfabetismo, mortalidade infantil e expectativa de vida (GOLDEMBERG; LUCON, 2008). Desta maneira, o setor de energia passa ser uma preocupação não apenas das empresas do ramo, mas também dos governos de modo geral, que constantemente buscam por novas fontes energéticas para suprir a necessidade de sua população.

Neste cenário as energias renováveis se destacam por apresentarem um menor custo e impacto ambiental se comparadas a fontes não-renováveis com o petróleo e o gás natural, as quais a cada dia se tornam mais escassas e com maior valor agregado no mercado (DENHOLM, 2014).

Dentro das energias renováveis fontes com a energia solar fotovoltaica ganham reconhecimento pelo mundo, tanto pela sua simplicidade no funcionamento, quanto pela capacidade modular de seus equipamentos. Esta tecnologia tem seu funcionamento baseado no efeito fotovoltaico, que de maneira simplificada pode ser explicado como a conversão direta de luz solar em eletricidade. Dentre as vantagens que pode se destacar sobre esta fonte é: o fato de utilizar uma fonte abundante e praticamente inesgotável de energia, não emitir poluentes durante sua operação e funcionar de forma silenciosa.

Sua origem é datada de 1954 quando Gerald Pearson, Daryl Chapin, Calvin Fuller realizavam experimentos com cristais de silício, e acabaram descobrindo que este material quando dopado, mergulhado em um banho quente de lítio e exposto a luz, o mesmo produzia corrente elétrica, assim foi descoberta a primeira célula fotovoltaica. Nas décadas posteriores novos materiais foram descobertos e consequentemente a eficiência destas células aumentaram, porém suas aplicações se limitaram no campo espacial e de sistemas isolados. Somente a partir

do final da década de 1990 é que a conexão de sistemas fotovoltaicos com a rede elétrica de energia passa a ocupar um lugar expressivo entre suas aplicações, resultado, principalmente, de políticas de incentivo de países como Alemanha, Espanha, China, EUA, Japão, entre outros. O aumento da capacidade instalada, juntamente ao desenvolvimento tecnológico, fez com que os custos desta tecnologia caíssem abruptamente nos últimos períodos, impulsionando ainda mais o mercado fotovoltaico. Dessa forma, em 2015 o mundo atingiu a marca de 256 GWp instalados (EPIA, 2015).

Dadas as características dos sistemas fotovoltaicos, estes por sua vez se apresentam como uma boa alternativa para aplicações de geração distribuída, além disso, possibilitando uma geração no próprio local de consumo. Desta forma, um sistema fotovoltaico pode ser instalado em telhados, coberturas, lages, e etc., tanto nos centros urbanos, quanto nas regiões rurais ou regiões isoladas onde não há distribuição de energia, não havendo necessidade de ocupar um espaço no terreno .

No Brasil, a localização geográfica privilegiada propicia ter níveis de incidência de irradiação solar superiores à maioria das nações desenvolvidas. Isso se torna uma vantagem competitiva na geração e utilização de energia fotovoltaica, que ainda é muito pouco explorada tendo em vista, que a capacidade instalada fotovoltaica ainda é muito pequena, totalizando cerca de 75 MWp até o final de 2017, em sua maioria em sistemas isolados (ANEEL, 2017d). No caso da geração distribuída de pequeno porte, em 2012 foi publicada pela ANEEL a Resolução Normativa nº 482 que regulamentou o acesso da micro e mini-geração distribuída (energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou co-geração qualificada) aos sistemas de distribuição de energia elétrica, e o sistema de compensação de energia elétrica, entre outras coisas. Este foi um marco regulatório para a geração descentralizada no país, e abriu legalmente a possibilidade do consumidor gerar sua própria energia e o excedente produzido podendo gerar créditos junto às distribuidoras de energia (ANEEL, 2012).

Com a redução nos custos de aquisição dos sistemas fotovoltaicos e a possibilidade de geração própria, espera-se uma mudança no modelo de geração de energia elétrica. Além das mudanças ocasionadas no setor elétrico em virtude desta descentralização da geração, com o desenvolvimento deste mercado altera-se também a dinâmica do planejamento energético, uma vez que a potência instalada e distribuída no sistema, não passa mais por decisões diretas do governo, como no caso da deliberação da realização de novos leilões de energia, para construção de novas usinas.

Portanto, faz-se necessário que os modelos de planejamento energético estimem a parcela do consumo que futuramente será suprida pelos próprios usuários e como se altera o perfil de carga do consumidor, de forma a abater parte da demanda que deveria ser suprida exclusivamente por grandes projetos de geração, e avaliar os novos investimentos centralizados. No entanto, o trabalho de planejar este mercado não é tão fácil, pois há a necessidade de prever a decisão dos consumidores, que não agem apenas de forma objetiva e racional.

Neste contexto, o presente trabalho propõe um modelo de entendimento da difusão dos sistemas fotovoltaicos residenciais no Brasil, através da metodologia de modelagem de Dinâmica de Sistemas.

1.2 JUSTIFICATIVA

Ainda que, áreas com eficiência energética e consumo eficiente, as quais buscam uma utilização da energia elétrica de forma mais racional, tenham se desenvolvido nos últimos anos, principalmente no Brasil, é evidente que a demanda residencial por este insumo irá crescer no decorrer de um futuro próximo, basicamente, por uma combinação de dois fatores: o crescimento do número de domicílios e o aumento da posse e uso dos equipamentos eletrodomésticos (EPE, 2013). Além disso, as construções de usinas hidrelétricas no país se tornam cada vez mais inviáveis devido a questões sócio-ambientais, e a ativação das usinas termelétricas se tornam menos frequentes devido as questões de emissões de gases de efeito estufa (GOLDEMBERG, 2006).

Em 2014, o país ainda passou por uma crise no setor energético, devido a um período de estiagem prolongado, tendo em vista a imprescindibilidade das fontes hídricas na matriz energética brasileira. Como consequência, neste ano as tarifas médias residenciais sofreram um reajuste próximo de 20%. Em fevereiro do ano seguinte a ANEEL deliberou uma Revisão Tarifária Extraordinária e como resultado, as tarifas de energia de todas as concessionárias sofreram um novo reajuste médio de 23,4%. Também há de se considerar o efeito das bandeiras tarifárias, que em sua pior condição (vermelha) acrescenta-se na fatura mensal de energia elétrica para um consumidor residencial o valor de R\$ 5,50 a cada 100kWh consumidos (ANEEL, 2017d). Além desses efeitos já citados, de 2015 até presente ano reajustes anuais ocorrerão sobre tarifa, variando seu valor de concessionária para concessionária. Nestas circunstâncias, a geração solar distribuída surge como uma alternativa, tendo em vista a vantagem do consumidor poder gerar sua

própria energia elétrica e não depender única e exclusivamente dos preços ofertados pelas concessionárias no mercado.

Ademais, historicamente, os custos dos sistemas fotovoltaicos caíram mais de 100 vezes desde 1954, mais do que qualquer tecnologia neste período (NEMET, 2006), sendo que entre 1980 a 2013 a curva de aprendizagem dos módulos fotovoltaicos foi de 21,5% (FRAUNHOFER, 2015). Os painéis solares representaram por anos a parcela mais significativa nos custos totais (67% na média, em 2008) (RESEARCH, 2013). No entanto a produção deste componente barateou bastante nos últimos anos, de forma que a parcela dos painéis no custo total dos sistemas atualmente esteja abaixo de 50%. Nos EUA, por exemplo, este valor pode variar entre 20% e 35%, dependendo da escala do sistema a ser instalado (FELDMAN, 2015). Pesquisadores ainda avaliam que para os próximos anos a tendência de queda nos preços seria nos custos de instalação destes sistemas (BARBOSE, 2013). Consequentemente espera-se que esta tecnologia atinja paridade de custo energético com os preços ofertados pelas concessionárias de energia, nas próximas décadas.

Em busca de se entender melhor quais os fatores que afetam o processo de difusão destes equipamentos e se estimar o período de paridade tarifária entre a energia gerada e as tarifas praticadas pelas concessionárias, torna-se necessário a realização de um trabalho que ilustre este processo de difusão, avaliando como seria o comportamento do consumidor residencial frente a esta inovação e mais importante ainda, servindo de base para um planejamento do setor elétrico brasileiro.

Para realização deste trabalho é ainda preciso à utilização de uma metodologia que represente a relação, tanto conceitual, quanto matemática de cada elemento que compõe este processo de difusão tecnológica, para isso a utilização de uma metodologia de modelagem e simulação é fundamental.

Basicamente as metodologias de modelagem e simulação podem ser divididas em três grandes áreas, sendo: a simulação de eventos discretos, a simulação baseada em agentes e a Dinâmica de Sistemas. (BORSHCHEV; FILIPPOV, 2004; PIDD, 2004).

A simulação de eventos discretos se aplica a problemas com baixo nível de abstração, ou seja, a um nível mais operacional onde o foco é determinar os eventos que ocorrem com cada um dos elementos que compõe o modelo (PIDD, 2004). Além disso, nesse tipo de simulação não é possível visualizar as estruturas de realimentação de

suas variáveis e nem a falta de linearidade dos eventos que ocorrem (MORECROFT; ROBINSON, 2005).

Já a simulação baseada em agentes pode ser aplicada a problemas com níveis de abstração intermediários, onde o foco é obtenção de um planejamento tático para resolução de um problema. Esta simulação analisa o comportamento individual de cada agente e suas interações com os demais em um grupo. Desta forma, o comportamento do modelo durante a simulação é a soma do conjunto de atitudes individuais de cada agente que o compõe (BORSHCHEV; FILIPPOV, 2004).

Por último, a Dinâmica de Sistemas se diferencia das demais metodologias de simulação por ter um nível de abstração superior, focado em um planejamento estratégico para a resolução de um problema. Além disso, essa metodologia foi criada com intenção de resolver problemas sociais, onde a relação de suas variáveis necessita de um nível bastante elevado de intangibilidade. Para isso, ela trabalha com os métodos de modelagem *hard* e *soft* (STERMAN, 2000).

O método *soft* é um método de modelagem que visa gerar discussões e ideais sobre problemas reais, sua estrutura é baseada em dados qualitativos e tem como finalidade fornecer um aprendizado ao modelador. Já o método *hard* é um método de modelagem que visa representar a realidade através de dados quantitativos com a finalidade de fornecer soluções otimizadas (STERMAN, 2000).

Desta forma, a Dinâmica de Sistemas pode ser empregada a qualquer tipo de sistema quando o interesse é o seu comportamento ao longo do tempo (COYLE, 1996). Consequentemente opta-se pela utilização da mesma. Uma vez que a tarefa de projetar este mercado vai além de estimar a simples decisão de aquisição ou não dos consumidores, envolvem questões de incentivos e de economia de mercado, sendo necessário o apoio de um modelo a nível estratégico.

1.3 OBJETIVOS

Tendo como base para o presente trabalho de pesquisa os sistemas fotovoltaicos residenciais, são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos.

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo do trabalho é representar o processo de difusão dos sistemas de geração de energia fotovoltaicos conectados à rede elétrica em residências brasileiras com o maior nível de detalhamento possível

através da metodologia de simulação de Dinâmica de Sistemas sob diferentes cenários de incentivo.

1.3.2 Objetivos específicos

Formular um modelo causal e matemático da difusão de sistemas fotovoltaicos distribuídos residenciais com base no modelo de difusão de Bass adaptado à realidade brasileira.

Avaliar os efeitos e os impactos dos cenários de incentivo na difusão dos sistemas fotovoltaicos residenciais.

Comparar os resultados de capacidade suprida, energia gerada e período de paridade tarifaria com previsões já pelo governo para o planejamento energético nacional.

Comparar o custo por cada beneficiado dos incentivos propostos com programas de subsídio de energia elétrica já existentes.

1.4 ADERÊNCIA DO TRABALHO COM O PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

O Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) está dividido em 4 áreas de concentração (Engenharia de Produto e Processo, Ergonomia, Gestão de Operações e Logística e Transporte), sendo uma delas, e a escolhida para este projeto, a de Gestão de Operações (PPGEP, 2016). O tema Gestão de Operações está ligado aos mecanismos de gestão da produção e da difusão de bens, serviços, da gestão dos meios e sistemas de transformação.

Quanto à ligação entre a Gestão de Operações e a metodologia de simulação de Dinâmica de Sistemas, por gerir o modo de como um bem ou serviço é produzido ou se difunde em um mercado, muitas vezes é preciso à elaboração de um planejamento para gerir este processo (no caso em questão o processo de difusão de uma inovação no mercado), e consequentemente a utilização de ferramentas computacionais e modelos matemáticos para simular este processo de difusão próximo da situação real se torna indispensável na intenção de se obter de resultados com certo nível de confiança.

Além do já supracitado, é importante ressaltar que a Associação Brasileira de Engenharia de Produção (ABEPRO), considera como

subárea do conhecimento tipicamente ligada à Engenharia de Produção a **Gestão de Processos** (ABEPRO, 2017). A ABEPRO ainda liga a Gestão de Processos com a subárea de conhecimento de engenharia de operações e processos da produção e engenharia da qualidade (ABEPRO, 2017). Quanto a metodologia de simulação de Dinâmica de Sistemas, ela está inserida na subárea de modelagem, simulação e otimização, a qual é ligada a área de pesquisa operacional (ABEPRO, 2017).

Assim sendo, o tema abordado neste trabalho adere com o Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção e com a área de concentração de Gestão de Operações.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Essa dissertação é composta por essa introdução que concentra a contextualização e as informações referentes à condução da pesquisa. O referencial teórico onde é abordada a teoria de difusão de inovações, dos modelos matemáticos que representam este processo de difusão e da metodologia de simulação de Dinâmica de Sistemas é exposto no Capítulo 2. O Capítulo 3 consiste em relatar os procedimentos metodológicos adotados para a revisão da literatura e para análise e resolução de um problema através de Dinâmica de Sistemas, além de trazer uma justificativa da abordagem utilizada. No Capítulo 4 é feita uma contextualização da utilização da energia solar fotovoltaica em residências no Brasil com base na literatura encontrada, servindo como ponto de partida para construção do modelo de simulação. Logo em sequência o Capítulo 5, trata da construção do modelo de simulação utilizando a Dinâmica de Sistemas e são expostos os testes realizados para a validação do modelo. No Capítulo 6 é realizada a projeção de cenários e análise desses dados. Por fim, as conclusões e recomendações a trabalhos futuros constituem o Capítulo 7.

2 REFÊRENCIAL TEÓRICO

Considerar como inovações descontínuas, tecnologias de geração de energia residencial solar é possível, pois se trata da introdução de um produto novo no mercado, alterando drasticamente o comportamento do consumidor. Envolve a criação, aplicação de tecnologia ou idéias notadamente novas. Esta classificação permite encaixar a geração distribuída fotovoltaica dentro da estrutura das Teorias de Difusão de Inovações (CHOWDHURY *et al.*, 2014). Logo este capítulo visa trazer os principais conceitos teóricos necessários para o entendimento não apenas do modelo a ser desenvolvido, mas do trabalho como um todo. Sendo assim, será revisado a teoria geral de difusão de inovações, para, posteriormente, detalhar como se desenvolveram os modelos matemáticos de difusão de inovações e justificar a escolha do modelo de Bass para a elaboração do modelo deste estudo, e, além disso, no fim do capítulo há uma apresentação dos principais conceitos da metodologia de simulação de Dinâmica de Sistemas, metodologia está a ser utilizada para a resolução da problemática deste trabalho.

2.1 DIFUSÃO DE INOVAÇÕES

Esta seção buscará explicar a teoria da difusão de inovações com base no livro de Rogers (2003). Outros autores são também inclusos nesta revisão e são citados quando devidamente necessário.

Segundo Singhal (2002) a obra: *Diffusion of Innovations* (Difusão de Inovações), escrita originalmente em 1962 pelo professor de sociologia rural da *Ohio State University* Everett Mitchell Rogers, na época sua obra tinha a motivação de descrever um modelo genérico de difusão aplicável a todas as áreas, porém com o passar do tempo seu trabalho foi ganhando notoriedade e se tornou uma referencia no campo de difusão, sendo o segundo livro mais citado no campo das ciências sociais até o início dos anos de 1990, estando este atualmente em sua quinta publicada em 2003.

A teoria da difusão de inovações busca esclarecer como inovações são adotadas numa determinada população. A palavra “inovação” ela pode ser entendida como uma idéia, um comportamento, ou um produto novo em um mercado.

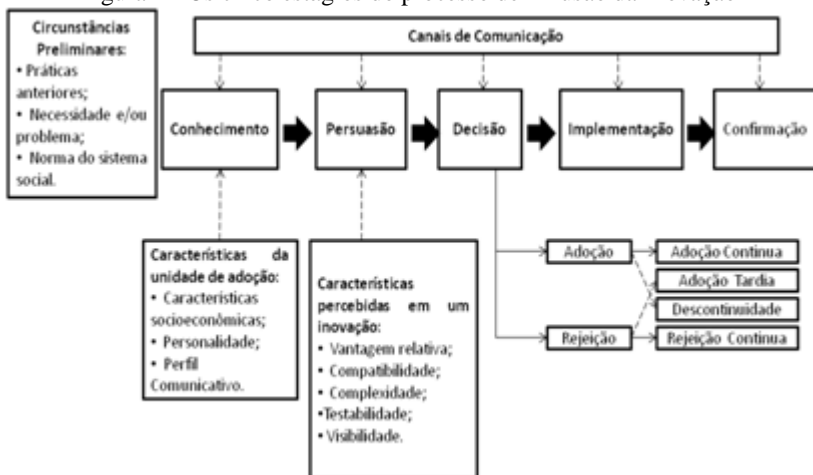
2.1.1 Etapas do processo de difusão

Rogers (2003) identifica que a decisão individual sobre uma inovação não é uma ação momentânea. Pelo contrario, é um processo que ocorre durante um período e consiste numa série de diferentes atos. Sendo assim, existem cinco estágios durante o processo de adoção de uma inovação.

- (1) **Conhecimento:** ocorre quando se inicia o entendimento da inovação em si, onde se tem o primeiro contato com a inovação, podendo estar atrelado a uma necessidade pré-existente da provável unidade adotante ou a uma necessidade gerada justamente a partir deste primeiro contato;
- (2) **Persuasão:** acontece após o primeiro contato com a inovação a provável unidade adotante tem acesso às informações relevantes, vantagens e desvantagens desta e em consequência gera uma atitude favorável ou não com a inovação;
- (3) **Decisão:** nesta fase ocorre a escolha em adotar ou rejeitar a inovação após a unidade de adoção estar ciente da inovação e de seu funcionamento;
- (4) **Implementação:** acontece quando a inovação passa a funcionar e seu uso é efetivado. É a partir desta etapa que ocorre mudanças comportamentais nas unidades de adoção;
- (5) **Confirmação:** ocorre quando a decisão em adotar é reforçada. Ainda que a inovação tenha sido adotada anteriormente, nesta fase algumas alterações podem interferir na decisão anterior da adoção.

Esse processo pode ser ilustrado, com os detalhes de cada etapa, na Figura 1.

Figura 1 - Os cinco estágios do processo de Difusão da Inovação



Fonte: Adaptado Rogers (2003)

Para tentar explicar o porquê de algumas inovações se difundirem mais rapidamente do que outras, ou por que algumas falham, a Teoria de Difusão exposta no trabalho de Rogers reconhece cinco características que determinam o sucesso de uma inovação.

- (1) **Vantagem Relativa:** é o quanto em que uma inovação é percebida como melhor em relação a anterior por um grupo particular de usuários, medido em termos que são de interesse desses usuários, como vantagem econômica, prestígio social, satisfação ou conveniência.
- (2) **Compatibilidade:** é o grau em que uma inovação é percebida em relação a experiências passadas e necessidades dos adotantes potenciais.
- (3) **Complexidade:** é o nível de dificuldade de uso e entendimento de uma inovação.
- (4) **Testabilidade:** é o quanto uma inovação pode ser testada antes de sua aquisição.
- (5) **Visibilidade:** é o grau de reconhecimento dos resultados da inovação, para com os usuários.

Como visto, essas características tentam nortear o êxito de uma difusão. Porém, muitas inovações requerem muitos anos do instante de seu lançamento até o momento em que são adotadas em larga escala.

Uma inovação quando é bem sucedida tende a se disseminar pela população sendo comprada e utilizada inicialmente por algumas pessoas que se sentem instigadas a experimentar algo novo (SOLOMON, 2012). Logo depois novos consumidores procuram adotá-la até que quase todo o sistema social tenha a mesma atitude.

Com essa percepção, fica claro (como mostra a Figura1) que os canais de comunicação fazem parte de todas as etapas do processo de difusão, embora existam diferenças de abordagem entre eles, assim como diferentes atribuições em cada etapa e para cada tipo de usuários. Fundamentalmente, se dividem em canais de mídia dirigida e canais interpessoais. Rogers aponta os canais de mídia dirigida como os mais efetivos na criação de conhecimento da inovação enquanto que os canais interpessoais são mais efetivos na formação e mudança de atitudes em relação à inovação e na influencia frente a decisão de um indivíduo ou unidade adotante em rejeitar ou adotar a inovação. A mídia dirigida é considerada o canal mais relevante na difusão inicial em busca de fazer chegar a informação ao público-alvo enquanto que a comunicação interpessoal tem maior relevância na fase de avaliação da inovação.

2.1.2 Classificação dos adotantes

Para detalhar mais os papéis de cada canal de comunicação, é preciso entender outro ponto da Teoria de Difusão de Inovações, que diz respeito as classificação dos adotantes.

As inovações com baixo grau de complexidade são facilmente percebidas e adotadas por um individuo ou unidade de adoção, mas não se difundem de modo linear pelos segmentos de uma sociedade. Foi baseado nesta observação que se identificou cinco categorias de adotantes, que correspondem ao perfil de reação intrapessoal frente a uma inovação em busca da adoção. Cada grupo tem suas características peculiares durante o processo de adoção de inovações. É importante ressaltar que, ao pensar nestes grupos, não há uma tentativa de mudar os membros de um grupo para outro no intuito de atingir a difusão. Imagina-se que os indivíduos são estáticos, sendo que uma inovação se propaga quando evolui o suficiente para atender as necessidades de cada parcela de adotantes.

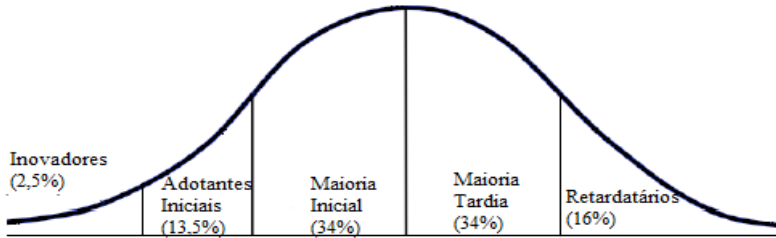
- (1) Inovadores: É considerado como um pequeno e seletivo grupo de pessoas que tendem a adotar novas tecnologias e comportamentos em seus primeiros estágios de desenvolvimento ainda que isto implique em riscos maiores.

São vistos como aventureiros e tem uma disposição a preferir redes de relacionamento mais cosmopolitas que locais. Um inovador tem características específicas como a disponibilização de recursos financeiros, que possam prevenir possíveis perdas com a adoção de uma inovação. Tem facilidade para entender temas complexos e habilidade para lidar com um alto grau de incerteza. Pode não ser respeitado pelos membros do sistema social devido ao seu desempenho ousado e arriscado, mas tem importante papel no processo de difusão, que é o de lançar a nova idéia.

- (2) Adotantes Iniciais: Constituem um grupo maior que os inovadores e são respeitados pelo sistema social por suas opiniões. Compartilham de algumas características dos inovadores, mas com uma relevante diferença relacionada ao grau de interesse por aceitação social (SOLOMON, 2012). Os potenciais adotantes baseiam-se nesta categoria em busca de referência quanto a inovação, pois este exercem um alto grau de liderança, são mais integrados ao sistema social local (SCHIFFMAN; KANUK, 2009).
- (3) Maioria inicial: Grupo grande de adotantes que revelam que um determinado produto, tecnologia ou serviço entrou em fase de difusão. Adotam uma inovação logo após a média de membros de um sistema terem adotado. Não exerce liderança sobre os demais e é formado, basicamente, por seguidores. A interrupção de um processo de difusão neste estágio tem custo similar ao início do processo de difusão.
- (4) Maioria tardia: São considerados céticos possuem recursos escassos e não desejam expor-se a qualquer risco. A adoção por este grupo pode ocorrer devido a uma necessidade econômica ou por uma reação à pressão do sistema social ao qual está inserido.
- (5) Retardatários: Considerados muitas vezes, isolados dentro do seu grupo social, são tradicionais, e é o último segmento a adotar uma inovação. Isto ocorre quando ela já está em fase madura de implantação e quando os riscos em adotá-la são menores. Quando isto ocorre normalmente outra inovação ou aperfeiçoamento tecnológico já esteja sendo introduzido. Suspeitam de inovações e de agentes de mudanças, sendo o seu processo de inovação / decisão extremamente lento. Possuem recursos limitados, o que os torna extremamente cautelosos na adoção de uma inovação.

Segundo a Teoria da Difusão, estes diferentes grupos são classificados dentro de uma curva de distribuição Gaussiana conforme pode ser visto na Figura 2.

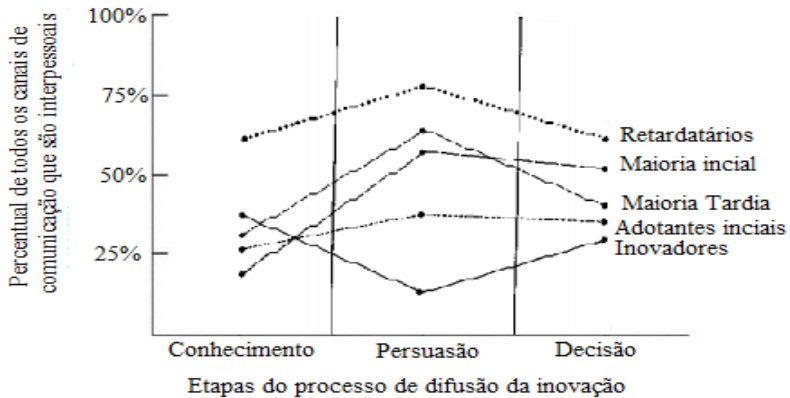
Figura 2 - Classificação dos adotantes



Fonte: Adaptado Rogers (2003)

Compreende-se ainda, que a mídia dirigida tem o importante papel de divulgar a informação de uma determinada inovação, enquanto a troca de informações entre pessoas seja fundamental para propagação do processo de adoção. Geralmente somente pessoas confiáveis é que podem passar segurança a outros indivíduos para que suas escolhas não resultem em prejuízos ou perda de tempo. A importância dos canais interpessoais em cada etapa do processo de difusão, para cada grupo de adotantes é apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Canais interpessoais no processo de difusão



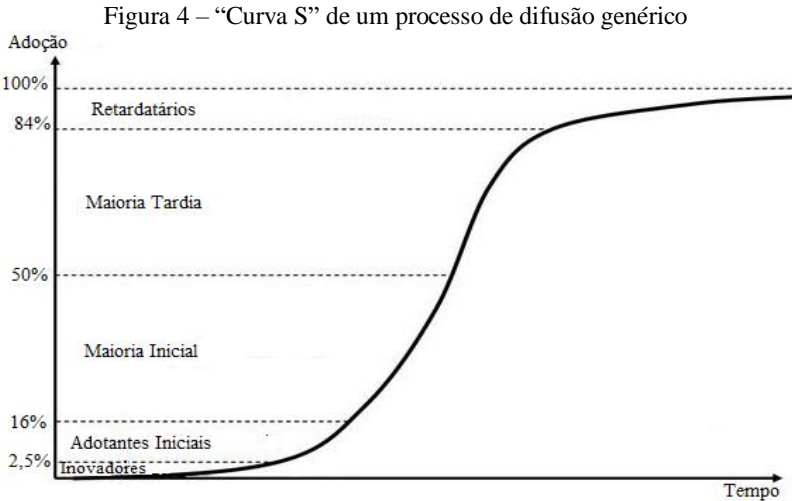
Fonte: Adaptado Rogers (2003)

Ao final, pode-se concluir que os adotantes iniciais e os inovadores são pouco dependentes das relações interpessoais. Isto porque são financeiramente mais seguros, mais confiantes de suas decisões e melhor informados. Por isso, a mídia dirigida é o principal canal de persuasão para esses dois grupos. Para os demais grupos de adotantes, afirmativa anterior pode ser feita de forma contrária. São grupos altamente dependentes das relações interpessoais e sendo assim o principal canal de persuasão para esses é a comunicação entre indivíduos. Uma vez que não são financeiramente tão seguros, confiantes e bem informados quanto os adotantes iniciais e inovadores.

Sultan (1993) contesta este perfil de adotantes, argumentando que existe uma divergência no comportamento em relação a cada produto, de forma que um “inovador” para um produto possa ser um “retardatário” para outro, sugerindo que o perfil inovador é um fenômeno relativo. Sendo assim, fica claro a importância de realizar pesquisas sobre o mercado de cada inovação para poder levantar o perfil dos adotantes da mesma.

2.1.3 Curva “S

Já se sabe que o sucesso da difusão de uma inovação está relacionada com os canais de comunicações em especial as redes interpessoais. Se o primeiro adotante de uma determinada inovação relata suas experiências com outros quatro membros de um sistema, e cada um desses passa a informação adiante para cada quatro indivíduos, e assim por diante, tem-se um crescimento exponencial. Ao representar graficamente o número de indivíduos que adotam a inovação numa base acumulativa sobre o tempo, obtém-se a distribuição sigmóide ou “curva S”, ilustrada na Figura 4.



Fonte: Adaptado Rogers (2003)

No início poucos adotantes aderem à nova idéia. Mas logo que a inovação começa a revelar seus benefícios, passa a ser adotada pelo segundo grupo, composto por formadores de opinião. Neste momento, a inovação passa a ser adotada por 15% a 20%, é quando a mídia dirigida é mais influente no processo de difusão, sendo este momento descrito pela literatura como *Take-off* (SULTAN, 1993).

De forma natural, a “curva S” começa atenuar a partir do momento que metade dos indivíduos do sistema social já adotaram a inovação e conseqüentemente cada novo adotante começa a ter dificuldade de encontrar um indivíduo não adotante, por estarem cada vez mais e menor número.

De maneira geral, o processo de difusão de qualquer inovação é representado por um gráfico sigmóide, variando apenas a inclinação da curva. Para inovações que se difundem de maneira mais rápida a curva se apresenta mais inclinada e para inovações com lentas taxas de adoção a curva se apresenta mais espalhada.

2.1.4 Medidas de incentivos à difusão

É comum se utilizar de táticas e estratégias para acelerar o processo de difusão, tendo em vista que os canais de comunicação fazem parte de todas as etapas do processo. Esses por sua vez têm o papel importante de repassar aos indivíduos do sistema as informações

necessárias para que os mesmos percebam as características intrínsecas da inovação e decidam se adotam ou não.

Ao se destacar as características percebidas pelos indivíduos (compatibilidade, complexidade, possibilidade de teste, vantagem relativa e visibilidade) é possível obter um crescimento mais rápido da taxa de adoção, porém muitas vezes este crescimento está atrelado a decisão de autoridades políticas, as quais podem desencadear uma adoção massiva de um produto. Como por exemplo, até o ano passado a obrigatoriedade da posse nos veículos automotivos do extintor de incêndio. Entre tanto, algumas decisões tomadas por esses agentes referentes a incentivos, visam acelerar esse processo, focados nos benefícios econômicos que a inovação pode trazer.

Basicamente, as políticas de incentivo têm a função de impulsionar a adoção junto aos adotantes iniciais. Já que um nível de adoção acima de 20% sendo atingido num sistema social, o incentivo econômico é interrompido, visto que a partir deste ponto estima-se que a difusão ocorra de maneira natural.

2.2 MODELOS DE DIFUSÃO

Após a explicação da Teoria de Difusão de Inovações é necessário se compreender os modelos matemáticos que foram desenvolvidos para representar o processo de difusão. Para isso, esta seção tratará de apresentar um histórico e algumas particularidades de alguns dos principais modelos matemáticos para representação da difusão de inovações seguindo o trabalho de Sobral (1977).

Um dos primeiros modelos matemáticos para a representação do processo de difusão de inovações foi o modelo exponencial proposto por Fourt & Woodlook (1960). A sua observação retrospectiva de várias curvas de penetração de mercado mostrou que a curva cumulativa aproxima-se de um nível de penetração inferior a 100%.

Algum tempo depois, Chow (1967) construiu um modelo descrito pela curva de Gompertz, sendo este utilizado para explicar o crescimento do uso de computadores pessoais nos Estados Unidos.

No ano seguinte, Floyd (1968) apresentou seu modelo, o qual na época foi considerado com um desenvolvimento teórico artificial, pois ele acreditava que o crescimento de uma nova tecnologia se daria em forma de uma curva com formato de um “S”.

Logo na sequência, Bass (1969) modelou o crescimento de uma inovação em um mercado, baseando-se no comportamento inovativo e

imitativo de consumidores, e testou seu modelo no setor de bens duráveis.

Fisher & Pry e Blackman (1971) dão continuidade as pesquisas de modelos de difusão de inovação. O primeiro, com um modelo semi-empírico; e o segundo particularizou o modelo para o caso de uma inovação em uma indústria, estipulando o índice de substituição em termos da fração de mercado atingida pela inovação, aplicando o modelo no mercado de turbinas de jatos comerciais.

Entre 1960 até a atualidade, várias outras publicações surgiram e trabalhos importantes foram realizados nesta área de modelos matemáticos de difusão de inovações, porém não são mencionados nesta dissertação, pois a intenção neste momento é trazer uma idéia de como se deu a evolução desses modelos e justificar a escolha do modelo de Bass para elaboração deste trabalho.

2.2.1 Modelo de Fourt e Woodlock

O modelo de Fourt & Woodlock (1960) descreve o volume total de aquisição de uma inovação em um determinado período de tempo com base nos consumidores que inicialmente fazem uma aquisição teste e os consumidores que fazem aquisições repetidas dentro deste intervalo de tempo.

Como vantagens este modelo apresenta a sua simplicidade na estrutura, sendo necessário o levantamento de poucos parâmetros para o cálculo do incremento nas vendas acumuladas, em contra partida, não é possível se obter a “curva S” que representa o processo de difusão com confiabilidade.

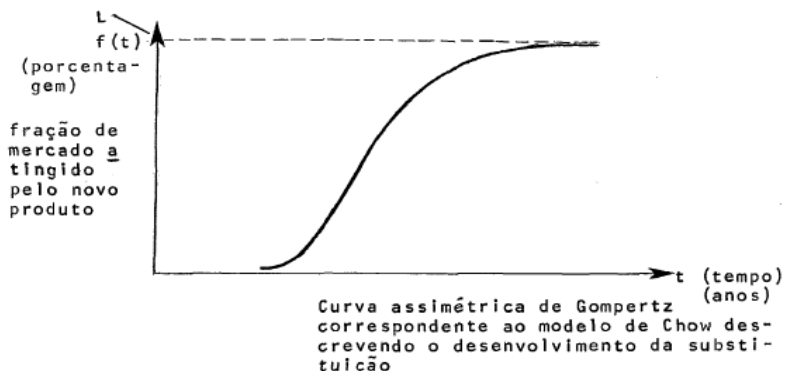
2.2.2 Modelo de Chow

O modelo de Chow (1967) assume que a taxa de crescimento da difusão de uma inovação depende de dois fatores. O primeiro sendo o efeito positivo que adotantes da inovação têm sobre a taxa de crescimento de adesão, ou seja, quanto maior o número de adotantes maior o efeito da comunicação interpessoal e conseqüentemente maior será a provável aceitação desta inovação.

O segundo fator é a razão entre a fração de adotantes de uma inovação e o limite de saturação do mercado. Chow (1967) assume que quanto mais o número de adotantes da inovação se aproxima do número total de adotantes, menor será o número de futuros adotantes. Como resultado, o modelo ilustra o processo de difusão de uma inovação

seguindo uma curva Gompertz cuja representação genérica é apresentada na Figura 5.

Figura 5 - Representação da solução genérica da equação (2.3)



Fonte: Sobral (1977)

Além disso, o modelo de Chow (1967) é o primeiro modelo matemático a apresentar o processo de difusão como uma “curva S” com certo nível de confiabilidade.

Como desvantagem este modelo não leva em consideração as influencias que a mídia dirigida exerce sobre o processo de difusão.

2.2.3 Modelo de Floyd

Neste modelo criado por Floyd (1968), a difusão de uma inovação é explicada a partir das tentativas de melhoria na capacidade funcional da inovação, além disso, existe um total de “M” técnicas possíveis para se tentar aumentar a capacidade funcional, das quais “X” serão bem sucedidas.

O modelo de Floyd (1968) é representado graficamente por uma curva de crescimento em forma de “S”, considerando a capacidade funcional da inovação em função do tempo. É uma curva não-logística, assimétrica e, portanto mais geral que os demais modelos aqui apresentados.

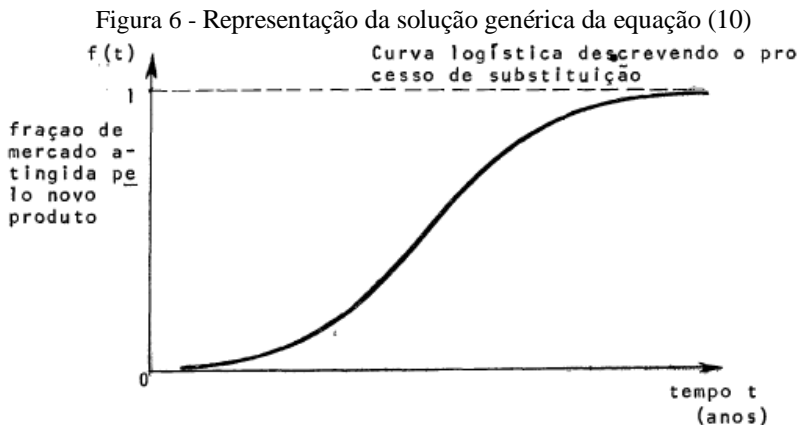
A desvantagem deste modelo, igualmente ao modelo de modelo de Chow (1967), não analisa as influencias que os canais de comunicação de massa possuem no inicio do processo de difusão.

2.2.4 Modelo de Fisher-Pry

O modelo de Fisher & Pry (1971) se baseia em três preceitos básicos:

- i- A maior parte dos processos de inovação tecnológica pode ser considerada como substituições de um produto por outro para o suprimento de necessidades.
- ii- Uma vez que o processo de difusão tenha se iniciado, continuará até a conclusão seguindo uma conduta pré-determinada.
- iii- A equação básica do modelo vem da hipótese de que a taxa instantânea relativa ao crescimento de uma inovação é uma função linear da fração de mercado a ser alcançada.

Portanto, o modelo de Fisher & Pry (1971) apresenta o processo de difusão de uma inovação seguindo uma curva logística, cuja representação genérica é apresentada na Figura 6.



Fonte: Sobral (1977)

Igualmente aos modelos anteriores apresentados, a desvantagem deste modelo continua sendo a não consideração da mídia dirigida no processo de difusão.

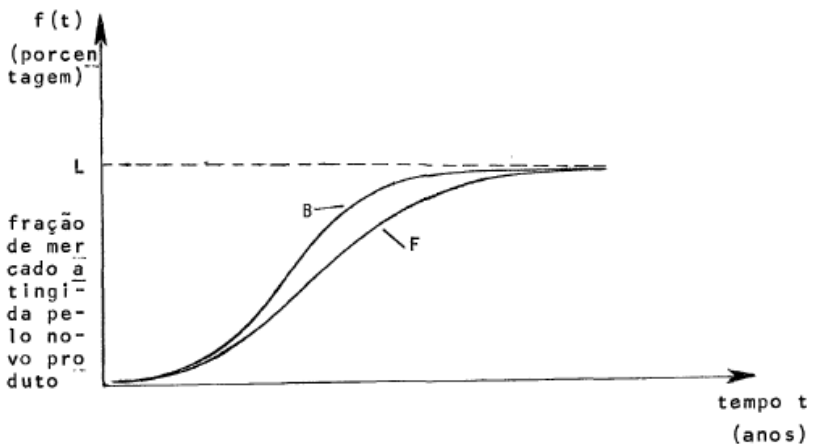
2.2.5 Modelo de Blackman

Blackman (1971) havia percebido que o modelo de Fisher & Pry possuía uma limitação quanto o limite de saturação do mercado, este fato pode ser melhor compreendido, retomando o preceito básico ii do modelo anterior.

A grande contribuição do modelo Blackman (1971) neste momento é que, diferente de Fisher & Pry (1971), afirma que uma vez iniciado processo de difusão de uma inovação, não necessariamente, todos aqueles indivíduos que compõe o mercado adotarão a mesma, tendo em vista que uma inovação substitutiva poderá surgir neste intervalo de tempo.

Vale destacar também, que comparando este modelo com o modelo de Floyd (1968), o crescimento da “curva S” é mais rápido pela dedução de Blackman (1971), por se tratar de uma representação da curva com crescimento no padrão logístico, a Figura 7 traz um representação desta afirmativa.

Figura 7 - Representação da solução genérica do modelo de Blackman (B) e Floyd (F).



Fonte: Sobral (1977)

A desvantagem deste modelo continua sendo a mesma apresentada pelos modelos anteriores.

2.2.6 Modelo de Bass

Segundo Figueiredo (2009) o modelo de Bass se baseia no comportamento de dois tipos de adotantes, para explicar o processo de difusão de uma determinada inovação. O primeiro, sendo o adotante “inovador”, que adquire a inovação de forma autônoma, sem ser motivado pelos demais integrantes do meio social, porém podendo ser influenciado pelos demais canais de comunicação. E o segundo tipo sendo denominado adotante “imitador”, este por sua vez, de forma contrária, realiza aquisição influenciado apenas pelos meios sociais.

$$\frac{f(t)}{1-F(t)} = p + \frac{q}{L} N(t) \quad (2.1)$$

Onde:

$f(t)$ = probabilidade de aquisição no instante t ;

$F(t)$ = distribuição acumulada;

p = coeficiente de inovação;

q = coeficiente de contato social;

$N(t)$ = número acumulado de adotantes;

L = limite do mercado potencial.

Para a formulação da taxa de adoção de Bass (equação 2.1) dois parâmetros principais são usados, parâmetros estes que buscam representar a hipótese comportamental dos adotantes durante o processo de difusão. O primeiro deles é o parâmetro “ p ” que representa a parcela inovadora de adotantes. O segundo é o parâmetro “ q ” que retrata a parcela imitante dos adotantes. Para a definição destes parâmetros, segundo Lilien, Rangaswan e Bruyn (2007), os mesmos, podem ser obtidos através dos dados de histórico de vendas com uso de regressão linear ou não, através de comparações com outras inovações similares já difundidas, ou até mesmo através de uma pesquisa de mercado junto aos possíveis adotantes. Dada a notoriedade desta estimativa, estudos de caso foram conduzidos para estimá-los em diversas inovações. Nesta pesquisa, a seção 6.1 será responsável por aprofundar a discussão do levantamento dos parâmetros “ p ” e “ q ”.

O modelo assume que a possibilidade de adoção de uma determinada inovação aumenta quanto maior for à adoção previa da mesma e sua vantagem chave frente aos demais modelos de difusão é a simplicidade da sua estrutura, composta de poucos parâmetros, fato este

que se reflete na menor necessidade de dados de entrada para o modelo. Em contra partida suas limitações são a respeito das incertezas quanto à definição dos parâmetros “p” e “q” e a condição em que o processo de difusão ocorra com êxito, ou seja, que a inovação irá se difundir em todo o mercado no futuro, dado tempo necessário, o que pode não ocorrer na realidade. Para contornar este empecilho, é possível estimar uma probabilidade do processo de difusão falhar, além de estipular limitações do percentual de mercado que a tecnologia pode atingir. Apesar disto, o modelo vem se mostrando razoavelmente aferido para prever a difusão de bens duráveis (MAHAJAN, 1990).

2.3 DINÂMICA DE SISTEMAS

A Dinâmica de Sistemas (conhecido também pelo termo em Inglês: System Dynamics) é uma metodologia de simulação utilizada para testar a estrutura de sistemas complexos frente a estímulos externos e internos (exógenos e endógenos). Foi proposta e desenvolvida na década de 50 pelo engenheiro eletricista Jay Forrester na escola de administração *Sloan School of Management* do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*). Forrester que trabalhou, durante a Segunda Guerra Mundial no Laboratório de Servomecanismo do MIT, para as forças armadas americanas, desenvolvendo controles automáticos para armamentos militares, percebeu que poderia dar uma grande contribuição às ciências administrativas, econômicas e sociais, usando os mesmos conceitos da teoria de controle e servomecanismos, bastante desenvolvida na engenharia elétrica.

A metodologia tem como base a construção de sistemas de equações diferenciais que, através de softwares como Stella® e IThink® da Isee Sistemas, Powersim® da Powersim Software AS Company e Vensim® da Ventana Systems, desenvolvem soluções para problemas dinâmicos e não-lineares. Os sistemas de equações são compostos por variáveis de estado (estoques), taxas (fluxos) e variáveis temporais (FORRESTER, 1971).

O conceito central para metodologia de Dinâmica de Sistemas está em entender como as variáveis de um sistema interagem entre si, pois ao se provocar uma alteração em uma variável inicial, ocorrerá um efeito em cadeia, onde outras variáveis serão afetadas, até que o ciclo se conclua, quando está perturbação voltar a afetar o comportamento da primeira variável. Esta propriedade é conhecida como retroalimentação (STERMAN, 2000).

Vários autores têm afirmado que essa propriedade da retroalimentação é um dos motivos da metodologia conseguir apresentar resultados que se aproximam da realidade, uma vez que a mesma consegue representar com fidedignidade os processos cíclicos presentes na humanidade (FORRESTER., 1971; COYLE, 1996; STERMAN, 2000).

O processo de análise através da metodologia sugerido por Coyle (1996) compõe-se das seguintes etapas: reconhecimento do problema, compreensão do problema e descrição do sistema, análise qualitativa, modelagem para simulação e testes do modelo, desenvolvimento e implantação de novas políticas no modelo.

Para o desenvolvimento da etapa “compreensão do problema e descrição do sistema” são elaborados os diagramas de laços causais ou diagramas de causalidade, os quais têm a função de ilustrar a relação entre as variáveis e identificar as malhas, ciclos, laços ou *loops* que se destacam sobre os demais. Além disso, de forma complementar o diagrama de laços causais e auxiliar em uma análise qualitativa das variáveis que o compõem, o diagrama de estoque fluxo tem o objetivo de representar as malhas de realimentação no formato de equações matemáticas as quais por sua vez, tem a função de ser objeto de experiência de simulação sobre o comportamento que o próprio sistema desempenha frente aos estímulos externos. Ainda vale ressaltar, que dentro dos diagramas de estoque fluxos, os estoques são ilustrados através dos retângulos que tem a função de acumular as informações numéricas, fruto das relações entre as variáveis de fluxo de entrada e saída de cada estoque, as quais são representadas pelas setas largas. Além das variáveis de estoque e fluxo, existem as variáveis exógenas, as quais são representadas pelas setas finas, possuem valores constantes e não depende das relações endógenas do sistema.

Neste contexto ainda, grupos de pesquisadores afirmam que o uso da metodologia de Dinâmica de Sistemas tem a possibilidade de amparar o entendimento, mensuração e o gerenciamento dos sistemas de difusão de energias renováveis que são tidos como sistemas complexos. Desta forma, autores como Jimenez, Franco e Dyner (2016), Ahmad e Tahar (2014), Guo (2015), Guo, Niu e Xiao (2016), Hsu (2012), Jeon, lee e Shin (2015) e Movilla, Miguel e Blazquez (2013) dentre outros têm se fundamentado nas ferramentas da metodologia para simular algumas particularidades referentes aos impactos das políticas sobre o desenvolvimento destas fontes de energias.

Sendo assim, o Capítulo 3 da continuidade a este assunto, relatando em detalhes a base metodológica da Dinâmica de Sistemas,

bem como as notações necessárias para modelar e simular sistemas complexos.

3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Neste capítulo é exposto o enquadramento da metodologia desta pesquisa, posteriormente, são relatados os métodos usados para a realização de suas diferentes etapas. Além disso, são apresentados os procedimentos para análise e resolução de um problema através de Dinâmica de Sistemas.

3.1 ENQUADRAMENTO DA METODOLOGIA

O enquadramento metodológico da investigação teórica proposta neste trabalho é apresentado a seguir. São abordadas a (i) natureza do objeto desta pesquisa, (ii) natureza da pesquisa, (iii) coleta de dados, (iv) abordagem problema, (v) instrumento de intervenção e (vi) os resultados, sendo:

- i- A natureza do objeto desta pesquisa é sua maioria descritiva quando relata os fatores de maior destaque do sistema delimitado, podendo apresentar também característica exploratória quando trata o fenômeno;
- ii- A natureza da pesquisa é predominantemente indutiva em sua estruturação. Na sua interpretação, entretanto, também apresenta característica dedutiva;
- iii- A fonte de coleta de dados é de natureza secundária devido a utilização de pesquisa bibliográfica para fundamentar o estudo;
- iv- A abordagem do problema é preponderantemente qualitativa na estruturação ao determinar e relacionar os fatores mais importantes do sistema. Mas, também é caracterizada como quantitativa ao tratar do problema proposto;
- v- O instrumento de intervenção escolhido nesta pesquisa foi a metodologia de Dinâmica de Sistemas, por ser uma metodologia voltada a analisar e resolver problemas em sistemas complexos;
- vi- Quanto aos resultados, a pesquisa se caracteriza como aplicada, pois abrangem questões a cerca do comportamento e relações no campo organizacional relevante ao contexto social.

Para a fundamentação teórica e coleta de dados do trabalho utilizou-se o acesso as base de dados científica *Web of Science* (ISI),

Scopus, *Science Direct*, *Ebsco* e *Emerald* disponibilizadas pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), sendo estas bases assinadas pelo portal de Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Também foi utilizado o acervo físico e digital da Biblioteca Universitária (BU) desta instituição, além de relatórios e documentos de domínio públicos oriundos de pesquisa junto a órgãos governamentais e agências internacionais das áreas de energia e controle estatístico, como por exemplo: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Empresa de Pesquisa Energética (EPE), *European Photovoltaic Industry Association* (EPIA) entre outros. O instrumento utilizado para reunir as informações consiste no processo estruturado *Knowledge Development Process – Constructivist* (ENSSLIN *et al.*, 2010).

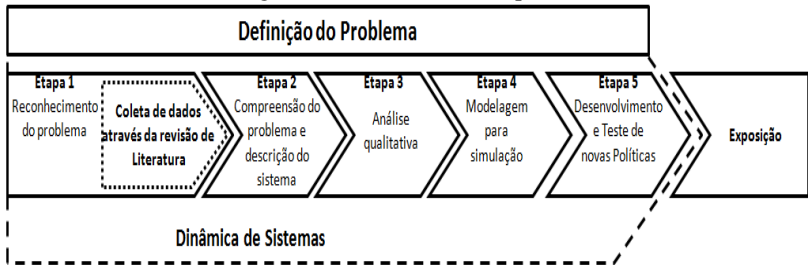
Para se dar continuidade ao entendimento das etapas de desenvolvimento desta pesquisa de forma objetiva, as demais informações referentes à fundamentação teórica e o processo utilizado de coleta de dados são expostas no Apêndice A – Procedimento de Revisão de Literatura e Bibliometria.

3.2 ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Posterior ao enquadramento da metodologia e a escolha do instrumento de intervenção deste trabalho chega o momento de se discutir as etapas de evolução do mesmo.

O desenvolvimento desta dissertação tem início com a “definição do problema” (sintetizada na problemática), a qual impõe os limites do estudo. A “definição do problema”, entretanto, tem seu início com o “reconhecimento do problema”, etapa essa, onde busca-se entender os motivos da realização de tal estudo, e se desenvolve até a etapa de “modelagem para simulação”, sendo está o resultado de todo o processo de construção do conhecimento estimulado pelo próprio desenvolvimento da pesquisa. A “coleta de dados” integra a etapa inicial deste estudo e é realizada pela revisão da literatura orientada por um processo *Knowledge Development Process – Constructivist* (conforme Apêndice A). Já as etapas de “reconhecimento do problema”, “compreensão do problema”, “análise qualitativa”, “modelagem para simulação” e “desenvolvimento de novas políticas” são realizadas conforme a metodologia de Dinâmica de Sistemas. Ao final os dados obtidos são discutidos e se obtêm a “exposição” dos resultados desta pesquisa conforme a ilustração na Figura 8.

Figura 8 - Estrutura da Pesquisa



Fonte: Autor

Já apresentação da estrutura da metodologia da Dinâmica de Sistemas, descrevendo seus fundamentos e suas etapas, retratadas aqui de forma introdutória, é feita na seção 3.2.1.

3.2.1 Dinâmica de Sistemas

A metodologia de Dinâmica de Sistemas tem seu início com um problema a ser resolvido ou uma anormalidade de comportamento de um sistema o qual se deseja corrigir (FORRESTER, , 1992). Parte do processo de pesquisar soluções está na capacidade de interpretar a situação considerada como uma anomalia.

O sistema de difusão de um bem de consumo, no caso em questão da difusão dos sistemas de geração de energia fotovoltaica residencial, pode ser interpretado como complexos conjuntos de laços de retroalimentação com interações entre si, o qual sua representação com todas as interações reais vai além da capacidade cognitiva humana. Visto que reproduzir a real estrutura do sistema é impossível, sendo preciso coletar os elementos necessários e suficientes para representar o comportamento a ser analisado (KURTZ DOS SANTOS *et al.*, 2002). Desta forma são estipulados os limites do sistema, os elementos que compõem e a forma que se relacionam. Caso a estrutura do sistema não consiga gerar de forma endógena o problema a ser analisado, então se torna inevitável expandir os limites do sistema e a busca por novos elementos para compor-lo.

Posterior a representação da estrutura do sistema, as variáveis que o integram e o relacionamento entre elas, a dinâmica da simulação acontece através das equações diferenciais, as quais variam ao longo do tempo em intervalos fixos até que se complete o horizonte temporal da

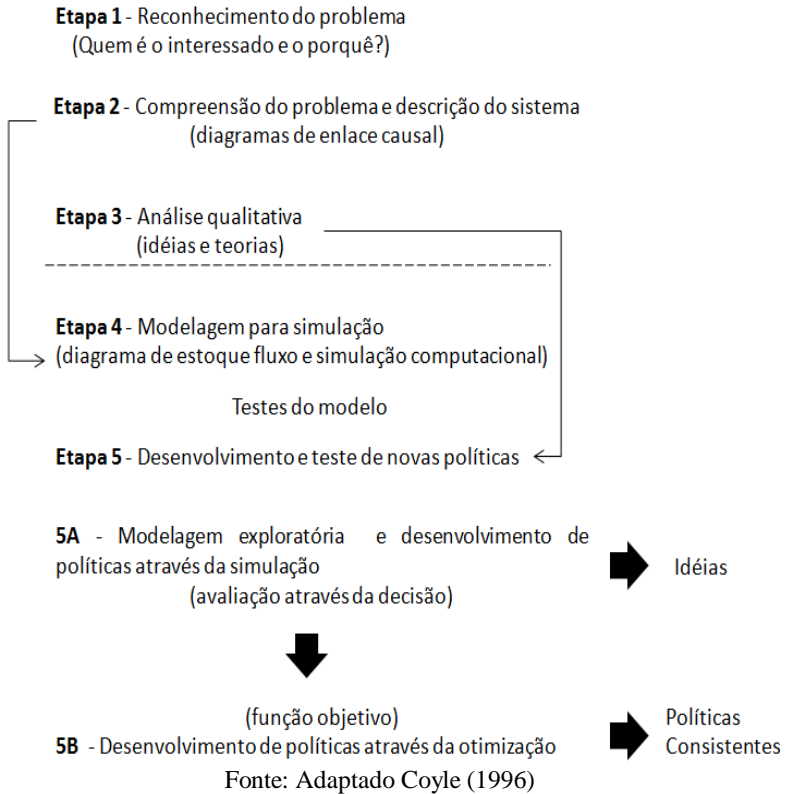
análise. Ao final da simulação, os resultados obtidos são apresentados em gráficos e tabelas, os quais demonstram o comportamento do sistema durante o tempo estipulado.

Mesmo com todo embasamento matemático que compõe a Dinâmica de Sistemas, existe um vasto campo para criatividade e intuição no que diz respeito à modelagem e a criação de possíveis cenários. Não se tem um regulamento definido no que diz respeito a quanto tempo deve levar ou quais os métodos devem ser utilizados e as pessoas envolvidas na coleta de dados. Já a busca por políticas alternativas para a realização de testes no modelo, pode ter origem de diversas formas como: idéias intuitivas, experiência do modelador, propostas de agentes que compõe o sistema que está sendo modelado ou simplesmente teste a partir de alterações de alguns parâmetros do modelo. Segundo Coyle (1996), as opções de maior destaque são aquelas que buscam uma mudança na estrutura do sistema.

Para a elaboração do modelo deste trabalho será seguido às cinco etapas elaboradas por Coyle (1996) em seu livro *System Dynamics Modeling a practical approach*, as quais são apresentadas na Figura 9. A primeira etapa baseia-se no reconhecimento do problema, identificado para quem este problema é significativo e o motivo pelo qual. Na sequência, a etapa 2, o sistema, em que o problema está inserido, é descrito qualitativamente através dos diagramas de causalidades (já apresentados na seção 2.3). Estes diagramas são modelos interpretativos ou conceituais que ajudam no entendimento não somente do problema, mas também das diferentes visões sobre este, advindas das diferentes funções dos autores no sistema. A etapa 3 é caracterizada por uma análise qualitativa da descrição conceitual, criando novas idéias sobre o fenômeno, estimulado a indagação e, desta forma, refinando o modelo já elaborado. Nesta etapa, conforme exposto por Coyle (1996), se o problema for compreendido de forma estabelecer condições para sua resolução, atingindo o objetivo da metodologia, não sendo necessário continuar o processo. Este fato é representado na Figura 9 pela linha tracejada entre as etapas 3 e 4. Caso contrário, continua-se o processo de análise prosseguindo a etapa 4 que corresponde à conversão do modelo qualitativo em modelo quantitativo em uma linguagem de estoques e fluxos para atender a simulação (ligação entre as etapas 2 e 4 na Figura 16). Esse modelo busca expressar a relação entre os fatores analisados em termos matemáticos. Por fim, a etapa 5 surge do início da análise qualitativa. Inicialmente são investigadas as idéias e teorias postas sobre o sistema (ligação entre as etapas 3 e 5 representada na Figura 9). Esta etapa por sua vez se divide 5A e 5B representando as alterações e

implementação idealizadas para resolver o problema levantado. Correspondendo a testes realizados no ambiente virtual antes da implantação destas medidas/políticas no sistema real.

Figura 9 - Estruturação da análise e resolução de um problema pela Dinâmica de Sistemas



Na sequência são detalhados as etapas desta estruturação de Dinâmica de Sistemas utilizado neste trabalho (etapas 1,2,3, 4 e 5) por serem necessário e suficientes para a realização desta pesquisa. Uma vez que o desenvolvimento de novas políticas não é um dos objetivos deste trabalho, mas sim a análise dos impactos das políticas de incentivos já existentes para o mercado de energia fotovoltaica residencial. Dessa forma, são apresentados os termos da abordagem e apresentadas às

representações referentes às ferramentas empregadas pela Dinâmica de Sistemas na descrição dos sistemas. Essas representações possuem algumas diferenças entre o exposto por diferentes autores que trabalham com o tema, mas que não são significativas, de forma que a linguagem da metodologia pode ser entendida com pequenas variações.

3.2.1.1 Etapa 1 – Reconhecimento do problema

O relato do problema deve ser completo, porém não demasiadamente extenso, de forma que seja possível ter uma visão global do sistema a ser abordado (SENGE *et al.*, 1995). Precisa deter caráter dinâmico para que seja possível visualizar o comportamento do sistema. Em conjunto deve ser expressa a relação temporal desta adversidade. Desta maneira, o problema é abordado e compreendido de acordo com o modelo proposto por esta metodologia (Figura 16).

O questionamento do propósito do problema, passa pela análise de para quem a resolução desta situação teria interesse e a perspectiva que o mesmo deve ser analisado. Diante dos interessados envolvidos no problema surgem diferentes aspectos, os quais servirão de base para se delimitar os limites do sistema e as variáveis que irão o compor e as relações elas deverão possuir.

Segundo Coyle (1996) dificilmente as questões levantadas nesta etapa são respondidas por completo. Sendo assim, a Dinâmica de Sistemas visa o entendimento e a resolução do problema ao logo do processo.

3.2.1.2 Etapa 2 – Compreensão do problema e descrição do sistema

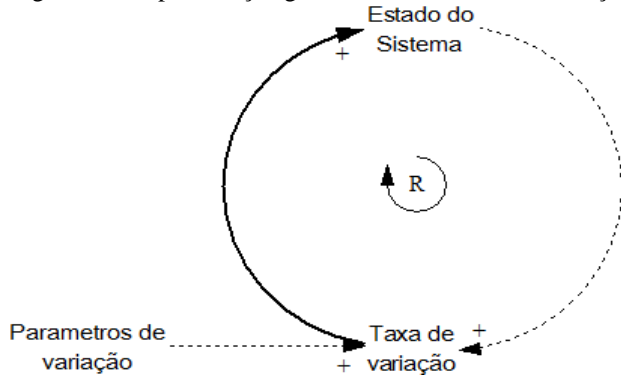
Nesta etapa de entendimento do problema e descrição do sistema, o diagrama de causalidade (seção 2.3) é a ferramenta utilizada pela metodologia de Dinâmica de Sistema. Apoia-se em uma série de razões de um problema, sendo que cada uma destas razões representa uma variável no modelo, as quais se relacionam através de setas e sinais (STERMAN, 2000). A representação da estrutura do sistema pelo diagrama de laço causal estabelece o modelo conceitual, representando o conjunto de relações entre as variáveis que compõe o sistema. Os termos necessários para a compreensão dos diagramas de laços causais são:

- Variáveis ou fatores: os fatores ou variáveis são a representação da interpretação dos componentes que fazem parte da estrutura do sistema a ser desenvolvido. Esses por sua vez podem ser divididos em fatores

exógenos (fatores externos ao sistema, mas que influenciam em seu comportamento) e os fatores endógenos (são integrantes internos do sistema).

- **Relações de Causalidade:** As relações de causalidades ou relações de causa e efeito fazem parte da representação da relação entre duas variáveis, a causa e seu efeito. São representadas graficamente por uma seta e um sinal. Essas relações podem ainda ser divididas em dois tipos: as positivas e as negativas. A relação positiva é identificada por uma seta com um sinal de adição. Esta indica que se acontece um acréscimo na causa o efeito também aumentará acima do que aumentaria caso tal acréscimo não ocorresse e vice-versa (STERMAN, 2000). Já a relação de causa negativa é reconhecida por uma seta e um sinal de subtração. Por sua vez, mostra que se acontece um aumento na causa o efeito reduzirá abaixo do que diminuiria caso tal aumento não acontecesse e vice-versa (STERMAN, 2000).
- **Ciclos de realimentação ou Malha de realimentação:** São os elementos primordiais dos diagramas de causalidade. Esses podem ser divididos em ciclo de realimentação positivo ou malha de reforço e ciclo de realimentação negativo ou malha de balanço. A malha de realimentação é identificada pelo fato que quando uma variável qualquer desta malha tem uma variação, seja de aumento ou redução, as relações causais envolvidas no ciclo fazem com que esta mesma variável seja realimentada com uma variação no mesmo sentido, reduzindo ou aumentando seu valor inicial. Um exemplo de sua representação gráfica é exposto na Figura 10.

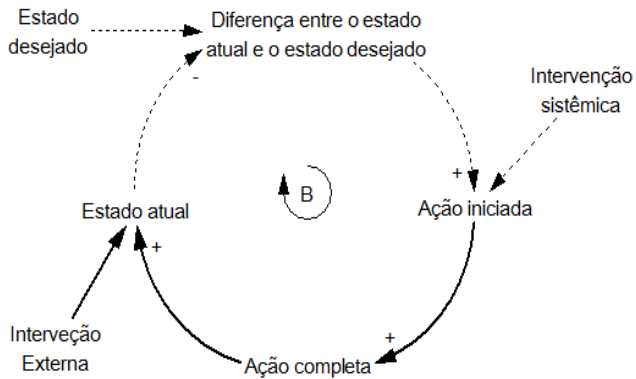
Figura 10 - Representação gráfica da malha de realimentação



Fonte: Adaptado Coyle (1996)

Já a malha de balanço representa ações que levam à estabilização do sistema. Neste ciclo, quando uma variável qualquer tem uma variação, as relações causais envolvidas fazem com que essa mesma variável seja realimentada com uma variação no sentido oposto. A Figura 11 trata de ilustrar um exemplo deste fenômeno de acordo com as notações da metodologia.

Figura 11 - Representação gráfica da malha balanço



Fonte: Adaptado Coyle (1996)

Assim através destas representações a metodologia tem a capacidade de representar os mais diversos fenômenos cíclicos presente no cotidiano.

3.2.1.3 Etapa 3 – Análise qualitativa

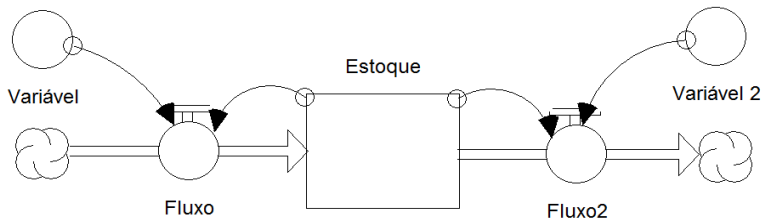
A análise qualitativa do modelo abrange a análise das malhas de realimentação e análise das teorias sobre o sistema. Ao analisar as malhas de realimentação busca-se identificar, caso tratem-se de malhas de balanço, se estas deixam claros os estados planejados para o sistema, se representam realmente o objetivo esperado para a malha (por exemplo, se as variáveis refletem os esforços da malha para manter um determinado estoque de um produto caso o sistema se proponha a isso) (COYLE, 1996). Da mesma maneira, caso haja malhas de reforço, essas são estudadas de forma a identificar pela mesma lógica se elas produzem o comportamento esperado (o crescimento ou redução exponencial). Vale lembrar, o conjunto de malhas de reforço deve apresentar junto a estes as malhas de balanço que limitarão o crescimento exponencial.

3.2.1.4 Etapa 4 – Modelagem para simulação e teste do modelo

Nesta etapa de modelagem e testes, o diagrama de estoque e fluxo é a ferramenta da metodologia de Dinâmica de Sistemas empregada. Por sua vez, esta ferramenta utiliza uma linguagem específica e comum para todos os *softwares* que operam modelos na abordagem da metodologia.

A representação básica de um diagrama de estoque e fluxo é ilustrada na Figura 12. Em uma analogia com um circuito formado por tubos conectados a um taque de forma que um líquido possa fluir pelos tubos enchendo o tanque, como também vazando e fazendo com o tanque esvaziar, o estoque representa a quantidade do líquido no tanque. Já o fluxo representa a taxa de alteração do estoque. Logo, em qualquer momento a quantidade de líquido no tanque reflete o acumulado do fluxo de entrada menos o fluxo de saída. Os conectores consistem em segmentos de curva com indicação de seta em uma das pontas e sevem para transmitir informação entre as variáveis. As entradas e saídas são representadas por “nuvens” e delimitam os limites do modelo. Assim, considera-se a origem e o destino do fluxo não são pertinentes ao propósito de estudo deste modelo.

Figura 12 - Representação básica diagrama estoque e fluxo



Fonte: Autor

Logo, os estoques expõem níveis, assim como os fluxos estão relacionados a taxas. Estes, níveis e taxas, são a base para a estrutura cíclica (malhas de realimentação) e são os componentes fundamentais para representação da estrutura do sistema. Isto atribui a Dinâmica de Sistemas a flexibilidade na abordagem dos problemas.

3.2.1.4.1 Testes e validação do modelo

Terminado o processo de modelagem é necessário se ter certeza que o modelo elaborado possui solidez em sua estrutura e reproduz um comportamento próximo do real (FORRESTER; SENGE, 1980). Entretanto, esta validação foge do formato tradicional das técnicas estatísticas, devido à quantidade de variáveis e inter-relações que dificultam as análises estatísticas ou de regressões tradicionais (SENGE, 1978).

Desta forma, existem dois grupos de testes de validação: o primeiro é caracterizado por comparar os resultados obtidos através do modelo com dados reais, como ocorrem em problemas do tipo operacional, e desta forma as soluções propostas podem ser aplicadas diretamente no modelo para a comprovação e possíveis ajustes. O segundo grupo de testes é utilizado em problemas estratégicos, como os abordados pela metodologia de Dinâmica de Sistemas, onde a comparação dos resultados com a realidade é difícil e muitas vezes inviável (QUADRAT-ULLAH, 2005). Nesta segunda categoria que o modelo do presente trabalho se enquadra.

Diferentes autores apresentaram testes de validação específicos para os modelos de Dinâmica de Sistemas, estes por sua vez, podem ser divididos em testes de validação estrutural e testes de validação de comportamento (FORRESTER; SENGE, 1980).

Segundo Qudrat-Ullah (2005) os testes de validação estrutural são voltados à confiabilidade da estrutura do modelo, já que eles confirmam ou não se a estrutura foi corretamente representada. Os testes propostos por Forrester e Senge (1980), Coyle (1996) e Sterman (2000) são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Testes para validação da estrutura do modelo de Dinâmica de Sistemas

Testes	Descrição
Adequação dos limites	Avalia as relações estruturais necessárias para cumprir o propósito do modelo, averiguando se a escolha das variáveis endógenas e exógenas faz sentido.
Condições extremas	Verifica se o modelo se comporta de maneira incoerente quando são definidos valores extremos para variáveis e parâmetros.
Consistência das unidades	Analisa se as unidades utilizadas nas variáveis, parâmetros e constantes do modelo estão de acordo.
Verificação da estrutura	Compara a estrutura do modelo com a estrutura do sistema real. Desta forma, a estrutura do modelo não poderá divergir da idealização que se tem do sistema real.
Verificação dos parâmetros	Verifica a validade dos parâmetros ou constantes utilizados no modelo e os compara com o conhecimento real sobre eles, na intenção de determinar se eles correspondem numericamente e conceitualmente à realidade, além de avaliar se foram apropriadamente estimados.

Fonte: Adaptado de Forrester e Senge (1980), Coyle (1996) e Sterman (2000)

Porém a confiabilidade da estrutura não tem possibilidade de determinar sozinha a validade do modelo, além destes testes, o comportamento precisa ser avaliado. Segundo os testes de validação de comportamento, analisam se o comportamento gerado é próximo ao comportamento observado ou esperado do sistema real. Os testes propostos por Forrester e Senge (1980), Coyle (1996) e Sterman (2000) são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Testes para a validação dos resultados do modelo de Dinâmica de Sistemas

Testes	Descrição
Análise de sensibilidade	Avalia há existência de comportamentos incoerentes quando os valores dos parâmetros e variáveis são alterados para valores dentro de uma faixa de análise. Normalmente, o comportamento dos modelos de Dinâmica de Sistema não demonstra sensibilidade à alteração nos valores das variáveis.
Anomalia no comportamento	Busca identificar a existência de comportamentos anômalos que sejam resultados de suposições erradas na estrutura do modelo.
Comportamento surpresa	Avalia se o comportamento do modelo são frutos de falhas durante a construção ou se realmente representam comportamentos de acordo com a realidade e que foram despercebidos no sistema real.
Erro de integração	Verifica se há mudança no comportamento do sistema quando o <i>step</i> ou método de integração são alterados.
Melhoramento do sistema	Verifica se a utilização do modelo auxiliou a encontrar novas políticas que melhorariam o desempenho do sistema real.
Membro da família	Avalia a capacidade de escalabilidade do modelo para sistemas reais similares.
Reprodução de comportamento	Analisa de o comportamento alcançado através do modelo é próximo ao comportamento real observado.

Fonte: Adaptado de Forrester e Senge (1980), Coyle (1996) e Sterman (2000)

Cabe enfatizar que, mesmo diante da diversidade e da quantidade de testes propostos por esses autores aqui relatados, a utilização deles depende do contexto e do ambiente em que o modelo foi elaborado, desta forma pode ficar de fora alguns testes que não venham a contribuir

de maneira significativa para a verificação da validade do modelo (STERMAN, 1984).

Os testes aplicados ao modelo desta pesquisa são detalhados nas seções específicas a sua realização. Estes são dispostos no Capítulo 5.

3.2.1.5 Etapa 5 – Desenvolvimento de novas políticas

Nessa etapa os resultados com base na análise quantitativa começam a surgir. O mesmo ainda pode ser dividido em dois estágios.

O primeiro deles utiliza as idéias e as teorias advindas da etapa anterior para elaborar uma modelagem exploratória. Está por sua vez, é focada no projeto de políticas e seus testes no sistema simulado, avaliando quais são as possíveis mudanças para entender os efeitos no sistema ao se pensar nos loops do mesmo. Este estágio tem como objetivos melhorar a compreensão do modelador sobre o modelo como um todo.

A segunda etapa é focada em buscar a solução ótima da função objetivo do sistema. Tem como sua característica a utilização de *softwares* de otimização para se buscar a resposta do problema identificado na etapa 1. A mesma ainda pode ser aplicável em sistemas onde se tem a necessidade de gerenciamento constante.

Assim, como o objetivo desta pesquisa é representar o processo de difusão dos sistemas de geração de energia fotovoltaicos, apenas os estágio 1 da etapa 5 será realizado.

3.2.2 Exposição dos Resultados

Uma vez que a metodologia de Dinâmica de Sistemas foi empregada para o entendimento e a solução do problema de pesquisa, é preciso expor os resultados simulados. Estes por sua vez, são apresentados de forma gráfica no capítulo 6 e comparados a previsões já realizadas por organizações governamentais, tais como Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e o Ministério de Minas e Energia (MME). Estas comparações são feitas, para se constatar que os resultados apresentados se aproximam de informações oficiais e desta forma reforçar, além dos testes de validação, que o comportamento do modelo é próximo do real.

4 DIFUSÃO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA RESIDENCIAL NO BRASIL

Este capítulo procura trazer uma visão geral sobre a geração de energia fotovoltaica por residências no Brasil, esclarecendo alguns pontos principais como: o surgimento da geração fotovoltaica residencial conectada a rede, os incentivos identificados para este mercado, os fatores que são considerados para o cálculo do custo de produção desta energia, a evolução no preço das tarifas das concessionárias e o mercado consumidor potencial a esta tecnologia. Estes pontos são importantes de serem explicados neste momento, pois serviram de base para a elaboração dos modelos deste trabalho, junto com os trabalhos analisados na revisão de literatura feita na seção 3.3.

4.1 ORIGEM DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA RESIDENCIAL CONECTADA A REDE ELÉTRICA

A geração fotovoltaica residencial conectada a rede tem início no ano de 2013, posterior a promulgação da Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que regulamentou a micro e minigeração distribuída no país.

A micro e minigeração distribuída, de modo geral, pode ser caracterizada como geração de energia em pequena escala próxima aos centros de consumo. Segundo Ackermann, Andersson e Soder (2001) embora seja defendida a ideia de que este tipo de geração deva ser propriedade de produtores independentes de energia ou dos próprios consumidores, o conceito também pode ser aberto às empresas, o que não é o foco desta pesquisa.

De maneira geral, essa resolução garantiu que os consumidores de energia interessados em fornecer energia para a rede da distribuidora na qual estão conectados poderão fazê-lo, desde que obedecidos os procedimentos técnicos estabelecidos pela agência, além estabelecer as regras da compensação de energia, ou também como conhecido em algumas literaturas o sistema de compensação *net metering* (ANEEL, 2012).

A conexão destes sistemas a rede de energia só teve início no ano seguinte, pois segundo a ANEEL (2014) foi concedido um prazo de 240 dias para as distribuidoras adequarem seus sistemas comerciais e elaborar ou revisar normas técnicas para tratar da geração distribuída.

Em 2015 a Resolução Normativa nº 482 foi revisada e alterada através da Resolução Normativa nº687, sendo está a resolução em vigor atualmente que regulamenta a mini e microgeração distribuída no país.

Para efeitos de diferenciação segundo a Resolução Normativa nº687, a microgeração distribuída se refere a uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 quilowatts (kW), sendo enquadradas nesta classe as unidades de consumo residenciais, comerciais e pequenas indústrias. Já a minigeração diz respeito às centrais geradoras com potência instalada superior a 75kW e menos ou igual 3MW, para fontes hídricas,ou 5MW para as demais fontes (ANEEL, 2015).

4.2 INCENTIVOS AO SETOR

Desde 1970, após a crise do petróleo diversos países buscaram incentivar através de políticas públicas fontes alternativas de energia, entre esses incentivos uma política que veio apresentando bons resultados com o passar do tempo foram os incentivos a geração energia elétrica por parte dos consumidores residenciais (EPE, 2012). Os programas de incentivo geralmente são justificados por questões ambientais, segurança energética, geração de empregos, desenvolvimento de tecnologia e de uma cadeia produtiva. Estes programas variam de acordo com o país e com a fonte de energia.

No caso do Brasil, em especial a fonte de energia solar, não se têm programas de incentivo específico ao setor residencial, mas devido à interdisciplinaridade desta tecnologia, políticas destinadas a incentivar outros setores, principalmente o de bens de informática, acabam beneficiando-a (SILVA, 2015). Este incentivos por sua vez estas são apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Políticas de Incentivo que beneficiam a geração de energia solar residencial

<p>Convênio nº 101, de 1997, do Conselho Nacional de Política Fazendária (CONFAZ)</p>	<p>Isentam do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) as operações envolvendo vários equipamentos destinados à geração de energia elétrica por células fotovoltaicas e geração eólica, em contra partida não abrange inversores e medidores utilizados pela geração solar.</p>
<p>Programa de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Indústria de Semicondutores (PADIS)</p>	<p>Redução a zero das alíquotas de PIS/PASEP e COFINS incidentes na venda no mercado interno ou de importação de máquinas, aparelhos, instrumentos e equipamentos, para incorporação ao ativo imobilizado da pessoa jurídica adquirente no mercado interno ou de importadora, e da contribuição de intervenção no domínio econômico incidente nas remessas destinadas ao exterior para pagamento de contratos relativos à exploração de patentes ou de uso de marcas e os de fornecimento de tecnologia e prestação de assistência técnica. Por alcançar os semicondutores e a produção de células de filme fino, a geração de energia elétrica por fonte solar é beneficiada.</p>
<p>Lei da Informática</p>	<p>Instituído pela Lei nº 8.248, de 23 de outubro de 1991, modificada pela Lei nº 11.077, de 30 de dezembro de 2004 concede isenção tributária para bens de informática e de automação produzidos no país, sendo assim a produção de equipamentos destinados à geração de energia elétrica por fonte solar é beneficiada.</p>

Fonte: Adaptado Silva (2015)

Silva (2015) ainda relata que embora a regulamentação da microgeração seja um marco recente na história da energia fotovoltaica brasileira, o país tem potencial para desenvolvimento desta tecnológica acima de outras nações que já utilizam esta fonte em larga escala. Porém para que este fato ocorra é preciso que os incentivos existentes sejam melhorados, tendo em vista, que a principal barreira para difusão desta energia, continua sendo o investimento inicial nos equipamentos, projetos e instalação.

4.3 CUSTO DA ENERGIA SOLAR

A presente pesquisa busca trabalhar com o conceito de paridade tarifaria este por sua vez pode ser definido com o momento em que o custo da energia produzida passa a ser mais barata que a tarifa de energia elétrica cobrada pela distribuidora. Para fazer tal comparação é necessário se calcular o custo nivelado da energia fotovoltaica produzida ou LCOE (*Levelized Cost of Electricity*) (OLIVEIRA, 2010). O LCOE relaciona os custos envolvidos e a energia gerada pelo sistema, durante sua vida útil. Este indicador representa o quanto um produtor de energia elétrica deveria obter de receita por kWh, de modo que seja suficiente para cobrir suas despesas operacionais, os investimentos e remunerar adequadamente o investidor. Desta forma Zilles (2012) desenvolveu um modelo próprio para o cálculo do LCOE em sistemas fotovoltaicos (equação 4.1).

$$C = \left[\frac{r \times (1+r)^n}{(1+r)^n - 1} + OM \right] \times \frac{Inv}{8760 \times FC} \quad (4.1)$$

Onde:

C = custo da energia produzida pelo sistema (R\$/kWh);

r = taxa de desconto anual (em% ; valor adimensional);

n = tempo de vida útil do equipamento (em anos);

OM = gastos com manutenção e operações (na expressão entra com um valor adimensional de: 1%=0,01);

FC = fator de capacidade esperado para sistema (valor adimensional);

Inv = investimento no sistema (R\$/kWp).

Para definição e estimativa dos investimentos necessários, são tomados como base os preços dos equipamentos (placas e inversores) nacionais e importados, adicionados os custos com frete, taxas, tributos e importação (esses dois últimos incidentes apenas nos equipamentos importados), de onde são obtidos os preços finais dos equipamentos. Ainda são considerados os custos de cabos, materiais adicionais, projeto e instalação resultando no preço do Quilowatt-pico (kWp) instalado. As premissas adotadas para o cálculo dos custos são as seguintes:

- Incidência de Imposto de Importação (II) sobre os módulos e inversores importados de 14%;

- Equipamentos nacionais foram considerados isentos de tributação;
- Considera-se a alíquota do Imposto sobre Produto Industrializados (IPI), incidente nos módulos importados de 0% e incidente nos inversores importados de 15%;
- Incidência de ICMS para inversores importados em 12% (embora a alíquota varie por estado);
- Incidência de PIS (1,65%) e COFINS (8,6%) sobre módulos e inversores importados;

O método de cálculo seguido está exposto no documento “Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira”, elaborado pela ABINEE (2012).

Na Tabela 1 são apresentados os preços finais ao público das placas e inversores de origem importada, considerando as premissas expostas anteriormente.

Tabela 1 – Preços dos equipamentos fotovoltaicos importados

Equipamentos	Módulos/Placas	Inversores
Preço dos equipamentos (€/kWp)	1220	420
Frete (€/kWp)	40	40
Impostos+Taxas+Importação (€/kWp)	360	210
Preço Final (€/kWp)	1620	670

Fonte: ABINEE (2012)

Já Tabela 2 apresenta os preços finais ao consumidor dos módulos e inversores de fabricação, nacional.

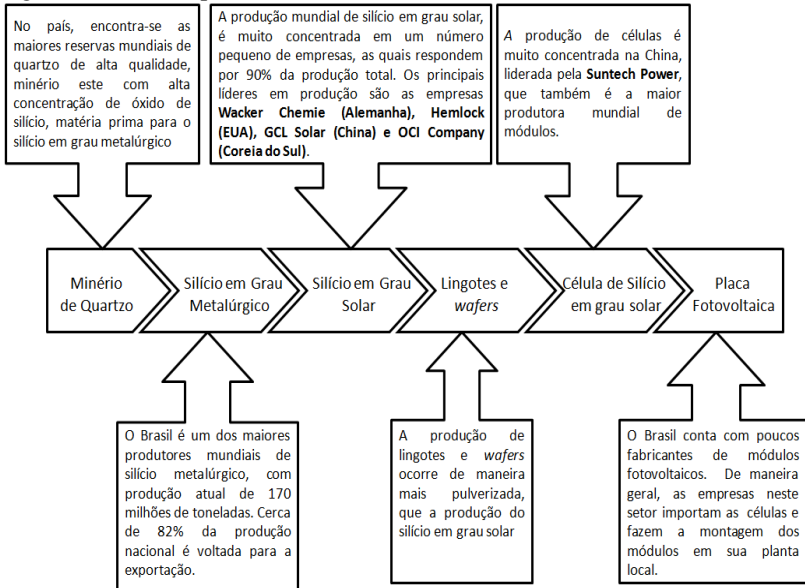
Tabela 2 – Preços dos equipamentos fotovoltaicos nacionais

Equipamentos	Módulos/Placas	Inversores
Preço dos equipamentos (€/kWp)	1200	630
Frete (€/kWp)	40	40
Preço Final (€/kWp)	1240	670

Fonte: ABINEE (2012)

Segundo ABINEE (2012), mesmo os equipamentos nacionais são influenciados pela cotação da moeda Euro (moeda europeia) em relação ao Real (moeda brasileira). Esta dependência em relação à moeda estrangeira pode ser explicado em uma breve análise da cadeia produtiva da indústria fotovoltaica nacional representada na Figura 13.

Figura 13 – Cadeia produtiva da indústria fotovoltaica



Fonte: Adaptado ABINEE (2012)

Segundo Carvalho, Mesquita e Rocio (2014), o setor fotovoltaico brasileiro pode ser caracterizado pela presença de empresas atuantes apenas nas extremidades da cadeia: estação do minério quartzo, produção de silício metalúrgico e montagem de módulos. Revelando desta maneira que a preço dos módulos nacionais é dependente não apenas da variação cambial em relação à moeda estrangeira, mas também da tecnologia externa, uma vez que a purificação do silício em grau solar é feita no país apenas em pequena escala e para fins de teste laboratoriais e a montagem destes módulos é feita com células oriundas de importação (ABINEE, 2012).

Desta forma, para se obter o custo nacionalizado destes equipamentos no decorrer da simulação do modelo é importante se ter um histórico (partindo de 2013) e uma previsão da taxa cambial (até o ano de 2030), conforme apresentado nas Tabelas 3 e 4 seguindo dados do Banco Central (2017).

Tabela 3 – Histórico da taxa de câmbio do Euro para o Real

Ano	Cotação (BRL/EUR)
2013	2,70
2014	3,22
2015	4,24
2016	3,43

Fonte: Banco Central (2017)

Tabela 4 – Previsão da taxa de câmbio do Euro para o Real

Ano	Projeção (BRL/EUR)	Ano	Projeção (BRL/EUR)
2017	3,72	2024	3,25
2018	3,85	2025	3,22
2019	3,77	2026	3,15
2020	3,43	2027	3,30
2021	3,28	2028	2,83
2022	3,32	2029	2,90
2023	3,37	2030	2,72

Fonte: Banco Central (2017)

Além dos custos com os equipamentos são somados também os custos com instalação, conforme apresentado na Tabela 5, para obtenção do investimento total no sistema (em R\$/kWp).

Tabela 5 – Custos de instalação dos equipamentos

Instalação	Custos
Cabos e proteções	350
Sistema de fixação	450
Custos com conexão e projeto	600
Total (R\$/kWp)	1400

Fonte: ABINEE (2012)

Outra abordagem importante para se determinar o custo da energia fotovoltaica nos próximos anos, é a curva de aprendizado, a qual consiste em verificar a correlação entre os preços da tecnologia e a produção acumulada. As curvas de aprendizado são baseadas na teoria *learning by doing* e *Learning by searching*, a partir das quais se afirma que ao longo prazo, a experiência acumulada, em pesquisa ou aquisição

da tecnologia, pode trazer maior eficiência nos processos produtivos e uma redução de custos (ARGOTE; EPPLE, 1990).

Na indústria solar fotovoltaica mundial, a experiência mostra que a cada vez que se dobra a capacidade instalada dos módulos, seu preço sofre uma redução de aproximadamente 20% (DE LA TOUR; GLACHANT; MÉNIÈRE, 2013). Embora uma parte considerável do preço do sistema fotovoltaico esteja vinculado aos módulos (aproximadamente de 20% a 35%), a fim de se prever os preços do Quilowatt-pico instalado do sistema completo, deve-se também considerar a redução dos custos relacionados aos outros componentes e serviços (FELDMAN, 2015).

Barbose (2013) demonstra que entre os anos de 1998 a 2013, a queda nos custos não relacionados às placas ou módulos representam 38% do total da redução do preço do Quilowatt-pico instalado dos sistemas fotovoltaicos, o que revela um impacto expressivo dos demais componentes na redução dos preços dos sistemas fotovoltaicos. Além disso, diferentemente dos custos relacionados às placas solares, que seguem a tendência do mercado internacional, os custos extra-módulo consistem de uma variedade de componentes que podem ser afetados de forma direta por condições locais de mercado, como por exemplo, políticas de incentivos ao setor.

De maneira geral, pode-se dizer que na medida em que o mercado fotovoltaico nacional se desenvolve, reduções de custos acontecem. Segundo Candelise, Winskel e Gross (2013), com a evolução do mercado fotovoltaico nacional os seguintes fatores ocorrerão:

- Desenvolvimento dos prestadores de serviço relacionados ao mercado, trazendo economia de escala à cadeia de suprimentos;
- Maior competitividade de instaladores de sistemas e projetistas;
- Regras mais transparentes, que promovem maior eficiência no processo de conexão dos sistemas à rede.

Os fatores supracitados agregam para a redução dos custos relacionados a instalação dos sistemas fotovoltaicos e, portanto, à uma realimentação ao desenvolvimento do mercado.

4.4 TARIFA ENERGÉTICA

Para avaliação da paridade tarifaria (conforme exposto na seção 4.3) são necessárias as informações relacionadas às tarifas de energia vigentes, bem como suas projeções para os próximos anos. Esta seção contribui para pesquisa com os dados e as premissas utilizadas em relação às tarifas das 51 concessionárias existentes no país.

Os dados relacionados às tarifas médias para a classe residencial foram obtidos por meio de consulta ao site da (ANEEL, 2017c). Foram tomados os dados das tarifas referentes ao mês de janeiro de 2013. Sob estas tarifas incidem para efeitos de cálculo nesta pesquisa, o imposto estadual ICMS e as contribuições PIS e CONFINS. O cálculo destes tributos é feito “por dentro”, ou seja, fazem parte da base de cálculo, incidindo sobre o valor pago. A equação para se calcular a tarifa final é apresentada a seguir:

$$Tarifa_{Final} = \frac{Tarifa_{Base}}{1-(ICMS+PIS+CONFINS)} \quad (4.2)$$

Os valores de ICMS para cada estado foram obtidos através de consulta ao site da ABRADÉE (2017). Alguns estados têm uma alíquota fixa para qualquer faixa de consumo, enquanto outros possuem alíquotas crescentes de acordo com o consumo mensal. Nesta dissertação foram utilizadas as alíquotas referentes a um consumo mensal médio de 300 a 500 kWh/mês, que representam o máximo para 23 unidades federativas, enquanto em quatro estados é praticada uma alíquota para o consumo superior a 500 kWh/mês.

Os valores de PIS e CONFINS variam mês a mês para cada estado, sendo dificilmente apresentados estes valores nos sites das distribuidoras. Como esta pesquisa irá trabalhar com uma média aritmética da tarifa final das concessionárias, foi considerado um valor médio da alíquota 6,5% de PIS e CONFINS para todas as distribuidoras, tendo como base os trabalhos de Montenegro (2013) e EPE (2012). As tarifas finais, juntamente com alíquotas de ICMS são apresentadas na tabela 6.

Tabela 6 – Tarifas finais de energia elétrica por distribuidora

Distribuidora	Tarifa Final (R\$/kWh)	ICMS	Distribuidora	Tarifa Final (R\$/kWh)	ICMS
AES-Sul	0,38	25%	CPFL Leste Paulista	0,44	25%
AmE	0,40	25%	CPFL Mococa	0,52	25%
Ampla	0,61	29%	CPFL Sul Paulista	0,44	25%
Bandeirantes	0,45	25%	CPFL-Paulista	0,40	25%
Boa Vista	0,32	17%	CPFL-Piratininga	0,41	25%
CAIUÁ-D	0,43	25%	CPFL-Santa Cruz	0,38	25%
CEA	0,24	12%	DEMEI	0,51	25%
CEAL	0,45	25%	DMEPC	0,48	30%
CEB-DIS	0,35	21%	EBO	0,41	27%
CEEE-D	0,46	25%	EDEVP	0,44	25%
CELESC	0,42	25%	EEB	0,48	25%
CELG-D	0,46	29%	EFLJC	0,47	25%
CELPA	0,52	25%	EFLUL	0,47	25%
CELPE	0,44	25%	ELEKTRO	0,46	25%
CELTINS	0,55	25%	ELETROACRE	0,54	25%
CEMAR	0,50	25%	ELETROCAR	0,50	25%
CEMAT	0,50	25%	ELETROPAULO	0,35	25%
CEMIG-D	0,55	30%	ELFSM	0,47	25%
CEPISA	0,48	25%	EMG	0,59	30%
CERON	0,44	17%	ENERSUL	0,44	20%
CERR	0,30	17%	EPB	0,46	27%
CFLO	0,46	29%	ESCELSA	0,44	25%
CHESP	0,55	25%	ESE	0,46	27%
CNEE	0,41	25%	HIDROPAN	0,52	25%
COCEL	0,43	29%	IENERGIA	0,45	25%
COELBA	0,44	27%	LIGHT	0,51	29%
COELCE	0,46	27%	MUX Energia	0,46	25%
Cooperaliança	0,51	25%	RGE	0,42	25%
COPEL-DIS	0,41	29%	SULGIPE	0,51	27%
COSERN	0,46	27%	UHENPAL	0,51	25%
CPFL Jaguarí	0,30	25%	Média Aritmética	0,45	25%

Fonte: ANEEL (2017c) e ABRADÉE (2017)

O modo como estas tarifas se comportam no futuro é um tanto incerto. Entende-se que os custos marginais de expansão e operação do sistema elétrico brasileiro são crescentes, embora seja difícil fazer uma projeção da evolução das tarifas com base nestes indicadores.

Segundo Nakabayashi (2014), no período de 2005 a 2014 as tarifas cresceram seguindo a tendência do IPCA (Índice Preços ao Consumidor Amplo), sendo este o indicador escolhido neste trabalho para se fazer uma projeção da evolução da tarifa no modelo. O histórico e a projeção do índice IPCA são elaborados com base Banco Central (2017), e são apresentados respectivamente na tabela 7 e 8.

Tabela 7 – Histórico do Índice de Preço ao Consumidor Amplo (IPCA)

Ano	Índice
2013	5,91%
2014	6,40%
2015	10,67%
2016	6,28%

Fonte: Banco Central (2017)

Tabela 8 – Previsão do Índice de Preço ao Consumidor Amplo (IPCA)

Ano	Projeção	Ano	Projeção
2017	5,39%	2024	6,78%
2018	5,28%	2025	9,33%
2019	5,23%	2026	7,26%
2020	5,63%	2027	8,15%
2021	7,88%	2028	7,97%
2022	6,99%	2029	7,42%
2023	6,84%	2030	7,90%

Fonte: Banco Central (2017)

De posse desses dados apresentados nas seções 4.3 e 4.4 é possível se fazer um comparativo entre o custo de geração da energia fotovoltaica residencial e o custo da energia da rede elétrica com o passar dos anos, e assim se obter o ponto de paridade tarifaria de acordo os incentivos e cenários propostos ao modelo. Porém ainda é necessário se estipular o mercado potencial desta tecnologia, para que este tome a decisão de adotar ou não a tecnologia, com base nestas informações.

4.5MERCADO CONSUMIDOR

Ao analisar a difusão de um produto no mercado deve-se definir qual é o mercado potencial para tal, ou seja, quem tem condições iniciais de adquiri-lo. No caso dos sistemas fotovoltaicos residenciais, dado o elevado custo inicial, primeiramente estima-se que apenas domicílios de alta renda tenham condições para investir em tal tecnologia.

Apesar de existir uma correlação entre a renda e consumo de eletricidade, compreende-se que adotar a renda mensal é mais apropriado que a classificação por faixa de consumo de eletricidade. Dada a evolução demográfica e do perfil socioeconômico brasileiro, prevê-se que ocorra uma redução do número de habitantes por domicílio, enquanto que o nível educacional, consciência ambiental e renda aumentem (KONZEN, 2014). Assim sendo, em um futuro

próximo serão mais comuns residências com consumo menor de energia, porém com habitantes com perfil inovador. Portanto, nesta pesquisa o mercado potencial será selecionado de acordo com um nível mínimo de renda, e não de consumo elétrico.

O mercado potencial foi levantado com base nos dados de renda do censo do IBGE (2010) e suas projeções de crescimento populacional. Foi decidido trabalhar com a soma das rendas dos domicílios, pois se julga que a decisão de adoção do equipamento é uma escolha coletiva em virtude do alto valor do mesmo. Desta forma, optou-se por utilizar o valor de 10 salários mínimos para selecionar o mercado potencial.

A discriminação das residências segundo a renda foi à primeira etapa de seleção do mercado potencial dos sistemas fotovoltaicos residenciais no Brasil, ou seja, o limite máximo. No entanto, sabe-se que nem todos os domicílios, independentes de renda dos ocupantes, são aptos à instalação por diversos fatores, como restrições técnicas, legais ou até mesmo pela condição de ocupação do imóvel.

Para o modelo em questão, considera-se viável a instalação dos sistemas fotovoltaicos somente em residências do tipo horizontal, ou seja, casa. No caso de apartamentos, a cobertura do edifício nem sempre é possível realizar as instalações, além de oferecer dificuldades técnicas e contratuais, pelo fato de muitas vezes a instalação destes equipamentos serem possíveis apenas em áreas comuns do edifício.

Além do tipo de domicílio, outra limitação tem origem na condição de ocupação do imóvel, isto é, se o mesmo é alugado, cedido ou próprio. Dentro da base de dados do Censo 2010, ainda é possível cruzar algumas informações, sendo possível levantar o número de domicílios de um determinado tipo (casa, apartamento, sobrado etc.) e que estejam numa condição específica (próprio ou alugado). Entre tanto não se tem a possibilidade de se relacionar estas informações de domicílios com a base de dados de renda. Logo, não se sabe exatamente quantos domicílios com renda acima de dez salários mínimos são do tipo casa que sejam próprias.

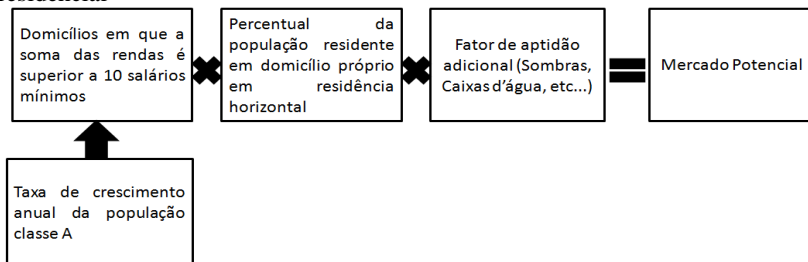
Devido à limitação apresentada, foi considerado um percentual geral que representa o tipo e a condição da residência, independente da renda. Por um lado, sabe-se que as classes sociais mais elevadas ocupam a maior parcela de moradias verticais (apartamentos), o que indica que o percentual considerado superestima o número de domicílios aptos na faixa de renda especificada. Por outro lado, que o percentual de imóveis próprios é maior nas classes sociais mais altas, estimando-se que o fator utilizado subestime o mercado. Logo, compreende-se que existe certa compensação nesta aproximação, sendo coerente o uso de dados gerais.

Sendo considerado o valor percentual de 57,4% da população residente em domicílio próprio e do tipo casa, segundo censo do IBGE (2010).

E por fim, foi adotado um fator adicional de aptidão referente aos limitantes técnico a instalação, como por exemplo, telhados muito inclinados, sombras, chaminés, antenas e outros, que podem inviabilizar a instalação das placas solares em algumas residências. O fator de aptidão técnica considerado foi de 85%, seguindo o relatório de “Inserção da geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil- Condicionantes e Impactos” elaborado pelo EPE (2014b).

Resumidamente, o mercado potencial foi levantado de acordo com o diagrama da Figura 21 com a utilização das informações apresentadas na Tabela 9.

Figura 14 – Diagrama do levantamento do mercado potencial fotovoltaico residencial



Fonte: Adaptado Kozen (2014)

Tabela 9 – Parâmetros considerados para a determinação do Mercado Potencial

Parâmetros	Valor	Referência
Domicílios em que a soma das rendas é superior a 10 salários mínimos	3.813.654	(IBGE, 2010)
Taxa de crescimento da população classe A	0,95% ao ano	(IBGE, 2010)
Percentual da população residente em domicílio próprio em residência horizontal	57,4%	(IBGE, 2010)
Fator de aptidão adicional	85%	(EPE, 2014b)

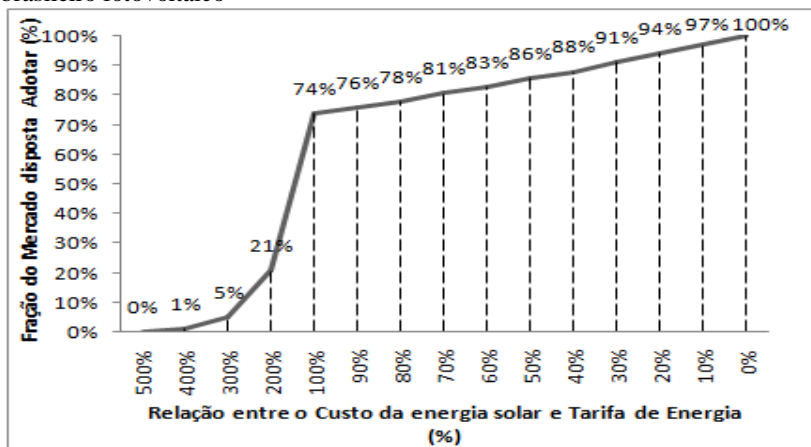
Fonte: IBGE (2010) e EPE (2014)

Porém, nem todos os indivíduos pertencentes ao mercado potencial levantado terão interesse em adotar os equipamentos fotovoltaicos. Alguns deles serão convencidos pelas características intrínsecas do produto e já outros levarão em consideração fatores econômicos, como a paridade tarifária da energia solar em relação à energia da rede, tendo em vista o conceito das classes de adotantes de uma inovação apresentado na seção 2.1. Consequentemente é preciso se determinar o limite real do mercado potencial, para que então seja possível se estimar o processo de difusão desta tecnologia.

4.5.1 Mercado potencial limite (L)

O mercado potencial anteriormente apresentado indica uma parcela da população brasileira que estaria qualificada técnica e financeiramente a adquirir um sistema fotovoltaico. Destes, praticamente se sabe que apenas uma parcela será estimulada em adquirir o produto de acordo com características percebidas ou por questões financeiras. Basicamente o estímulo varia individualmente, sendo que alguns consumidores mais racionais e outros mais intuitivos nesta escolha. Entre tanto, devido à dificuldade de se quantificar os parâmetros qualitativos vinculados as características dos sistemas fotovoltaicos, nesta pesquisa optou-se por utilizar uma curva de crescimento do mercado baseada no trabalho de Beck (2009) que representa a fração máxima do mercado residencial brasileiro disposto a adotar os equipamentos fotovoltaicos de acordo com o custo benefício que esta tecnologia apresenta frente à energia da rede.

Figura 15 – Curva de crescimento da fração máxima do mercado residencial brasileiro fotovoltaico



Fonte: Adaptado Beck (2009)

A Figura 15 apresenta a representação desta curva descrita por Beck (2009), porém sua utilização no modelo de simulação só foi possível, através de uma função não-linear conhecida como *lookup function*, está por sua vez, faz a leitura dos dados de entrada e os relaciona com os dados de saída, através de uma pesquisa nas informações gráficas alimentadas no modelo.

Ao multiplicar esta fração do mercado disposto a adotar (f_m), pela diferença entre as residências com condições de aquisição (Res_{Cond}) e as residências adotantes de energia solar (Res_{Adot}), se obtém como resultado o Mercado Potencial Limite (L) ou como descrito no modelo os potenciais adotantes da energia e a equação que os representa é ilustrada por:

$$L = f_m \times (Res_{Cond} - Res_{Adot}) \quad (4.3)$$

De posse desta informação, neste momento se torna possível a determinação do processo de difusão através da equação de Bass (1969), uma vez que os parâmetros “p” e “q” foram obtidos através da análise de sensibilidade apresentada na seção 6.1.

5 ELABORAÇÃO DO MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS

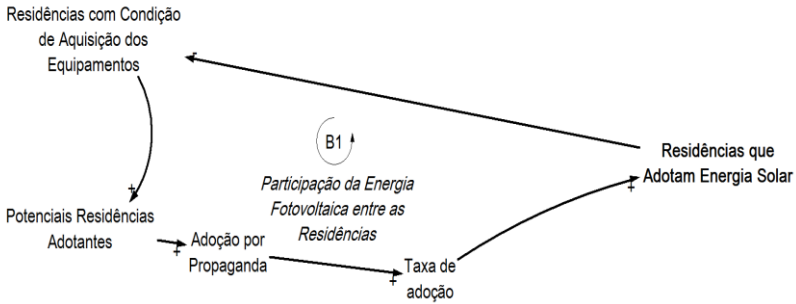
Este capítulo tem como objetivo desenvolver etapas 2,3 e 4 da metodologia de Dinâmica de Sistemas proposta por Coyle (1996), uma vez que a etapa 1 de reconhecimento do problema já foi realizada no capítulo 1, mas precisamente nas seções que relatam a problemática e os objetivos desta pesquisa. Ao final espera-se obter um modelo de simulação de um processo de difusão de sistemas fotovoltaicos residenciais, que apresente todos os elementos necessários para sua interpretação, produzindo assim um alto nível de complexidade que torna possível simular o comportamento deste processo próximo do real.

5.1 MODELAGEM CONCEITUAL

A modelagem conceitual do sistema é formalizada pelo diagrama de causalidade. Esse digrama explicita o contexto em que a difusão dos equipamentos fotovoltaicos residenciais ocorre, organizando e apresentando as informações da fundamentação teórica e da revisão da literatura em uma visão dinâmica de atuação. Além disso, o digrama de causalidade também insere as teorias dinâmicas para a determinação da estrutura do sistema. Ou seja, esse diagrama associa os fatores de forma a representar a relação que caracterizam o modelo.

A primeira malha identificada é uma malha de Balanço, que será chamada de B1, (Figura 16). Nela, a partir das *residências com condição de aquisição dos equipamentos* incrementam *potenciais residências adotantes*, uma vez que as características inerentes ao produto começam a ser percebidas. Em seguida, essas *potenciais residências adotantes* iniciam o processo de adoção dos equipamentos fotovoltaicos através da *adoção por propaganda*, conforme exposto por Bass (1969). Essa *adoção por propaganda* incrementa a *taxa de adoção* e consequentemente aumentando variável de *residências que adotam a energia solar*, que por sua vez esta variável tem um impacto negativo nas *residências com condição de aquisição dos equipamentos*, desta forma concluindo o ciclo de realimentação.

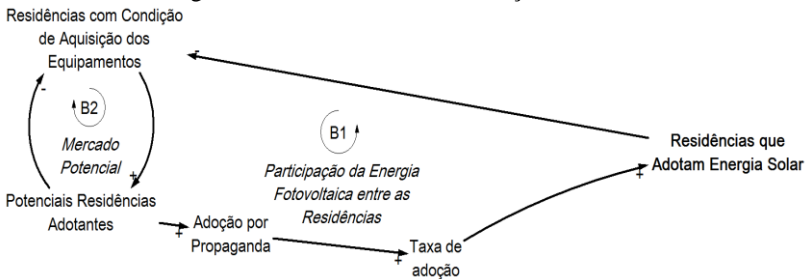
Figura 16 – Malha de Balanço B1



Fonte: Autor

A segunda malha encontrada foi o *loop* de balanço B2, que representa a dinâmica do mercado potencial, conforme a Figura 17. À medida que as *residências com condição de aquisição dos equipamentos* aumentam, as *potenciais residências adotantes* seguem esta tendência, porém a relação inversa dessas variáveis é contrária, ou seja, a medida *potenciais residências adotantes* crescem as *residências com condição de aquisição dos equipamentos* diminuem.

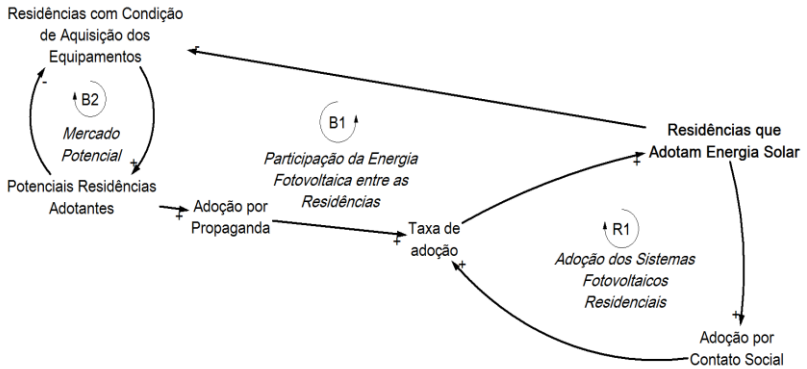
Figura 17 – Malhas de realimentação B1 e B2



Fonte: Autor

A terceira malha é uma malha de reforço R1, a qual representa a adoção através dos canais interpessoais de comunicação. À medida que as *residências que adotam a energia solar* crescem a *adoção por contato social* aumenta, tendo em vista o maior número de adotantes do produto capazes de influenciar os demais potenciais adotantes e assim vir a corroborar na *taxa de adoção*. Este fenômeno é representado no digrama da Figura 18.

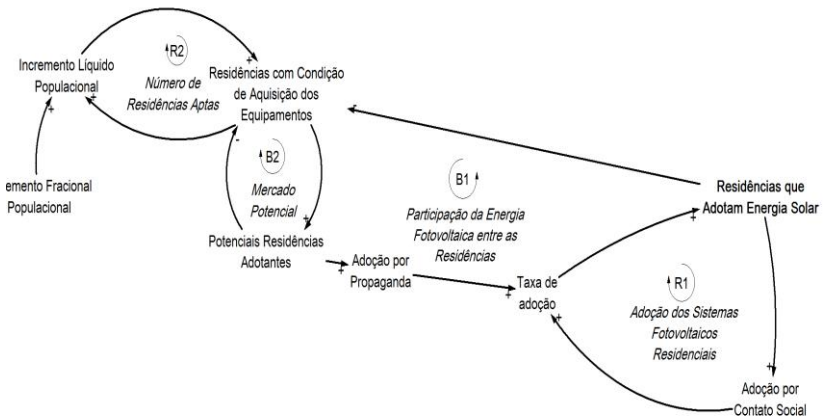
Figura 18 – Malhas de realimentação B1, B2 e R1



Fonte: Autor

A quarta malha encontrada diz respeito ao incremento das residências aptas a instalação destes equipamentos, esta por sua vez é uma malha de reforço, que será chamada de R2. Conforme o *incremento líquido populacional* cresce por meio da variável exógena *incremento fracionário populacional*, este influencia de maneira positiva as *residências com condição de aquisição dos equipamentos*, a qual retribui de maneira também positiva o *incremento líquido populacional*. Este ciclo é representado junto aos demais na Figura 19.

Figura 19 – Malhas de realimentação B1, B2, R1 e R2

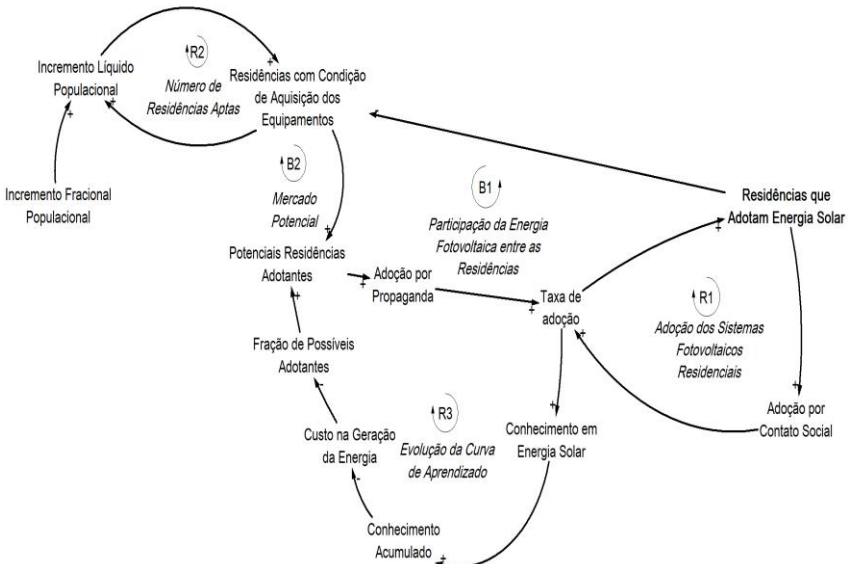


Fonte: Autor

A quinta malha representa a capacidade de evolução da curva de aprendizado à medida que a taxa de adoção aumenta. Esta malha é de reforço, sendo identificada por R3.

Conforme a taxa de adoção cresce a variável *conhecimento em energia solar* sofre um aumento, também influenciando a variável *conhecimento acumulado*. Esta última possui um efeito contrário no *custo da geração da energia solar*, de forma a redução deste custo ajuda embasar o crescimento da variável *fração de possíveis adotantes* e assim tendo um efeito positivo nas *potenciais residências adotantes*. A Figura 20 traz a adição deste loop ao conjunto de malhas de realimentação identificadas até o momento.

Figura 20 – Malhas de realimentação B1, B2, R1, R2 e R3



Fonte: Autor

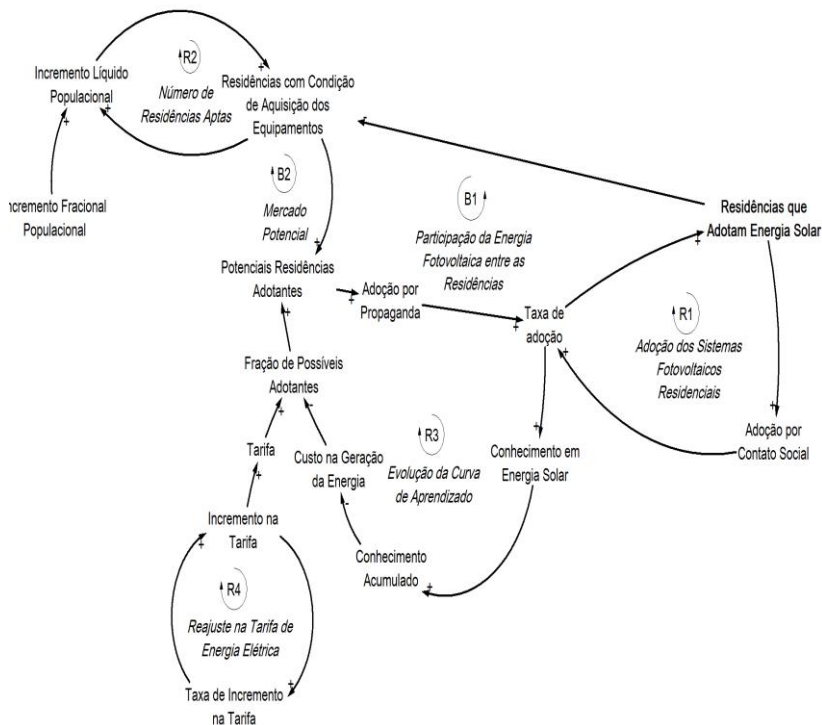
A sexta malha retrata a relação do reajuste da tarifa de energia elétrica com a adoção dos equipamentos fotovoltaicos.

Ao passo que a taxa de incremento na tarifa cresce em função da variável exógena IPCA, também é influenciada no crescimento da variável taxa de incremento a qual tem um efeito positivo tanto para taxa de incremento na tarifa quanto para a variável tarifa. Uma vez, que a

variável endógena *tarifa* sofre um acréscimo a variável *fração de possíveis adotantes* acompanha o seu comportamento.

Este ciclo é representado junto aos demais na Figura 21.

Figura 21 – Malhas de realimentação B1, B2, R1, R2, R3 e R4

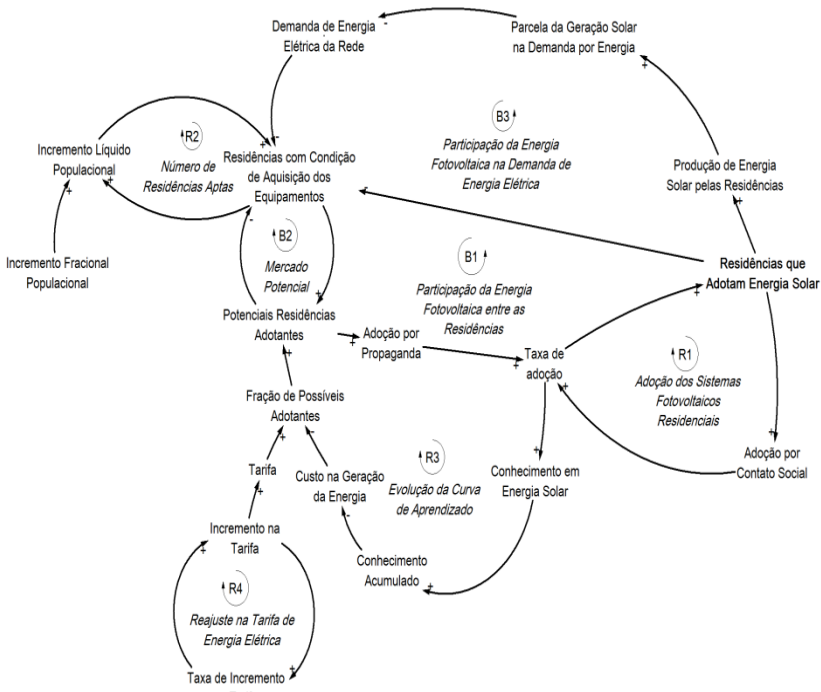


Fonte: Autor

A sétima malha representa a participação da energia fotovoltaica na demanda de energia elétrica residencial. Ao passo que as *residências adotantes de energia solar* crescem a *produção de energia solar por residência* acompanha seu crescimento, aumentando também a parcela da *geração solar na demanda por energia* e consequentemente reduzindo a *demanda de energia elétrica da rede* e as *residências com condição de aquisição dos equipamentos*, desta forma encerrando o loop de balanço B3.

A Figura 22 traz a ilustração do conjunto de ciclos e as interações entre todas as variáveis descritas até o momento.

Figura 22 – Malhas de realimentação B1, B2, B3, R1, R2, R3 e R4

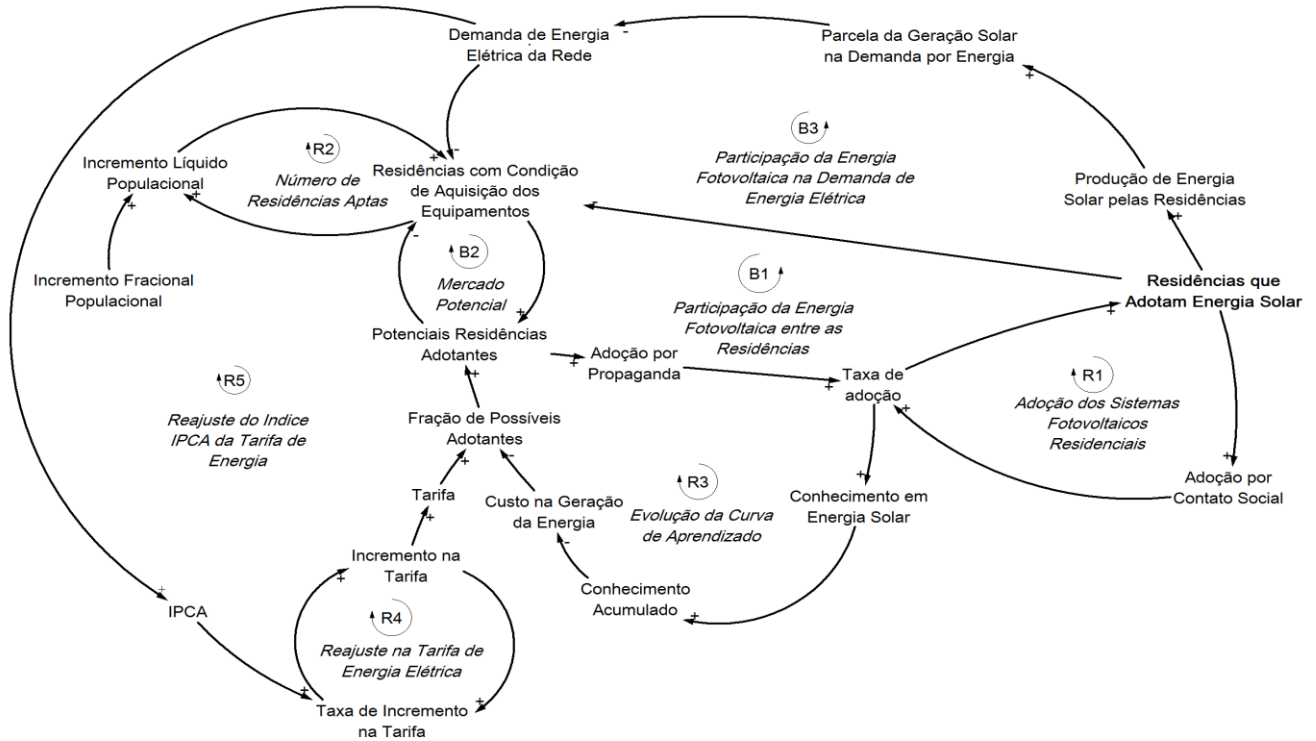


Fonte: Autor

Por fim, o oitavo ciclo representa o reajuste do índice IPCA da tarifa de energia, de forma que a maior *demandade energia elétrica da rede* tem um efeito positivo no *IPCA*, desta forma elevando o preço da tarifa de energia para o consumidor.

Finalmente o diagrama de causalidade é representado por completo na Figura 23, possuindo oito malhas de realimentação, sendo que destas, cinco são malhas de reforço e três são malhas de balanço para representação do sistema proposto. Obviamente é possível se criar novos ciclos para uma representação mais detalhada, porém o autor não julga necessário por assim fazer, tendo em vista que a complexidade atingida até o momento é suficiente para representar através do modelo o comportamento dos adotantes frente à realidade do mercado brasileiro, quando expostos aos mais diversos cenários de incentivo do setor.

Figura 23 – Diagrama de causalidade (descrição do sistema)



Fonte: Autor

5.2 MODELAGEM ESTRUTURAL E MATEMÁTICA

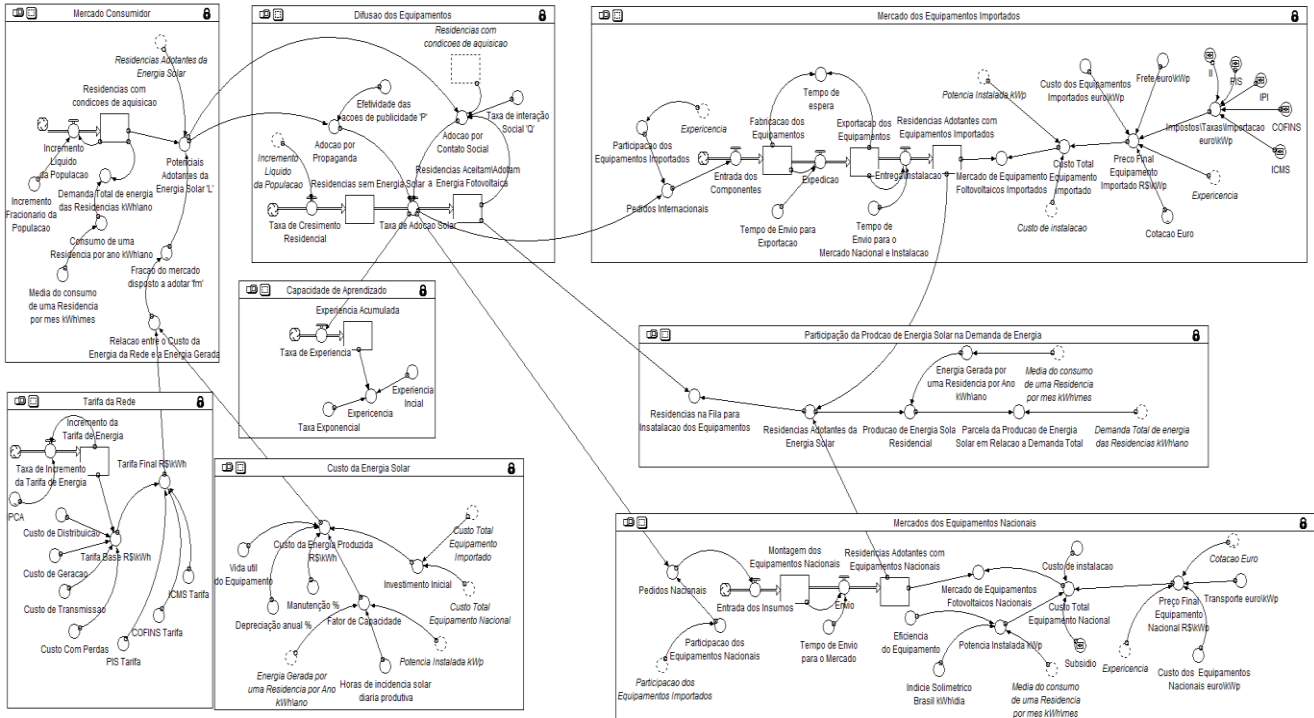
A estrutura do modelo é construída aplicando o diagrama de fluxos e estoques, pois este relaciona as diversas constantes e variáveis englobadas pelo estudo. A construção desse diagrama é orientada pelo próprio diagrama de causalidade de forma a manter os conceitos representados neste último. O modelo de fluxos e estoques possibilita a implementação matemática além de definir os principais indicadores que representam o estado do sistema.

O diagrama de fluxos e estoques completo do sistema em estudo nesta pesquisa (Figura 24) pode ser dividido em oito partes correspondentes as estruturas dos sub-modelos do mercado consumidor, difusão dos equipamentos, tarifa da rede, capacidade de aprendizado, custo da energia solar, mercado dos equipamentos importados, mercados dos equipamentos nacionais e a participação da energia solar na demanda de energia elétrica. Cada uma destas partes apresenta seus estoques e taxas de fluxos nomeadas de forma a melhor definir sua representação para o modelo. Da mesma maneira as constantes e variáveis são nomeadas buscando o melhor entendimento de sua função no sistema.

Para uma melhor compreensão do modelo as principais equações são descritas no decorrer do texto desta seção e uma visão global de todas equações e suas relações é apresentada no Apêndice B.

Além disso, vale destacar que o modelo de simulação foi elaborado no *software* Stella® e possui o intervalo de interação anual, ou seja, cada período de um ano o modelo realiza as interações as quais ele foi programado, durante o intervalo de tempo entre o ano de 2013 a 2030.

Figura 24 – Diagrama de estoque-fluxo proposto

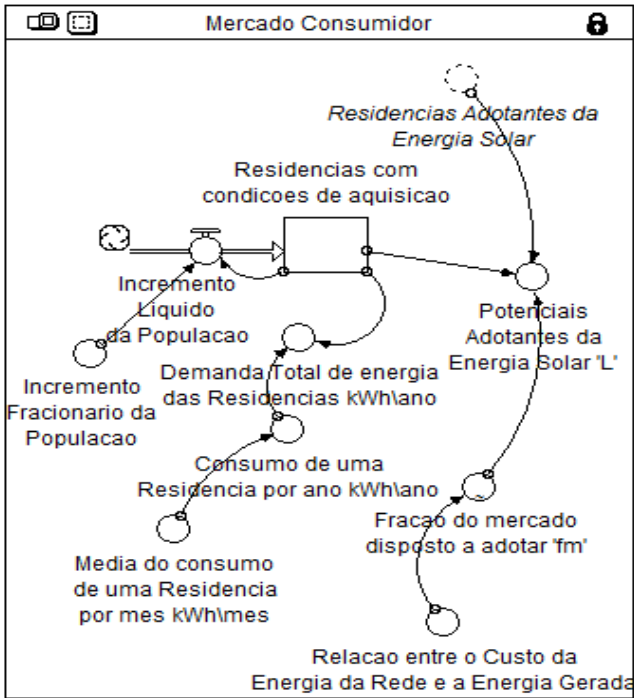


Fonte: Autor

5.2.1 Sub-modelo do mercado consumidor

A Figura 25 apresenta o sub-modelo do mercado consumidor. Este modelo visa representar a evolução dos domicílios com possibilidade técnica e econômica a adoção da energia fotovoltaica, suas características de consumo de energia elétrica e a decisão individual de cada residência em avaliar o custo benefício entre o custo da potencia instantânea da energia elétrica da rede ou a gerada pelos equipamentos fotovoltaicos (R\$/kWh).

Figura 25 – Sub-modelo do mercado consumidor



Fonte: Autor

Considera-se, inicialmente, que o estoque de *residências em condição de aquisição* (mercado potencial) assume o valor inicial de 3.815.115 domicílios e o *incremento fracionário da população* é de 9,47% a.a conforme os cálculos expostos na seção 4.3, assim este

estoque sofre um crescimento de acordo com esta taxa sobre influencia da variável fluxo *incremento liquido populacional*.

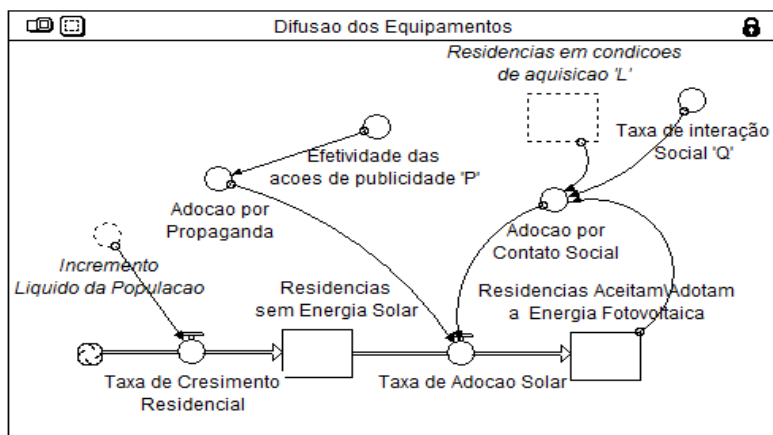
Além disso, considera-se que as residências de forma individual possuem um consumo médio mensal de 550kWh e que *o consumo de uma residência por ano* é a multiplicação deste valor pelo número de meses de um ano (EPE, 2013). Já *demand total de energia das residências* é calculada multiplicando as variáveis *residências em condições de aquisição* pelo *consumo de uma residência*.

A *relação entre o custo da energia da rede e a energia gerada* é obtida através da divisão das variáveis, *custo da energia produzida e tarifa final*, sendo esta primeira variável pertencente ao sub-modelo *custo da energia solar* e a segunda pertencente à *tarifa da rede*. De posse deste valor, a *fração do mercado disposto a adotar* é calculada através da função não linear *lookup fuction* e a curva de crescimento da fração máxima do mercado residencial brasileiro fotovoltaico, conforme exposto na Figura 15 e os *potenciais adotantes da energia solar* são encontrados através da equação 4.3, ambas as informações, expostas na seção anterior.

5.2.2 Sub-modelo da difusão dos equipamentos

O sub-modelo da difusão dos equipamentos representa o processo de difusão de uma inovação segundo modelo matemático de Bass (1969). Sua representação é exposta na Figura 26.

Figura 26 – Sub-modelo difusão dos equipamentos



Fonte: Autor

Primeiramente, considera-se, que a variável estoque *residências sem energia solar* crescem de acordo a variável fluxo de *incremento líquido populacional*. Porém, para que essas residências aceitem adotar a tecnologia, *taxa de adoção solar* é influenciada por dois canais de comunicação, os canais de comunicação dirigida e os canais de comunicação sociais. Estes canais por sua vez, influenciam respectivamente, as *adoções por propaganda* e por *contato social* e sua efetividade é representada pelos parâmetros “p” e “q” no modelo. Esses parâmetros por sua vez, são obtidos através do método dos mínimos quadrados ordinários. Sua utilização ocorre através da implementação do algoritmo da Figura 27, juntamente com os dados históricos de adoção de energia solar disponíveis pela ANEEL (2017b) no ambiente do programa RStudio (software livre para cálculos estatísticos).

Figura 27 - Algoritmo para implementação do método dos mínimos quadrados ordinários no ambiente RStudio

```

adoption=ts(DADOS)
Y=cumsum(adoption)
Y=ts(Y)
Y=c(0,Y[1:(length(Y)-1)])
Ysq=Y**2
out=lm(adoption~Y+Ysq)
summary(out)
a=out$coef[1]
b=out$coef[2]
c=out$coef[3]
mplus=(-b+sqrt(b**2-4*a*c))/(2*c)
mminus=(-b-sqrt(b**2-4*a*c))/(2*c)
m=mminus
p=a/m
q=b+p

```

Fonte: Autor

Figura 28 - Resultado dos Parâmetros “p” e “q” através do método os mínimos quadrados ordinários no ambiente RStudio

Data	
DADOS	5 obs. of 1 variable
out	List of 12
Values	
a	Named num 11290
adoption	Time-Series [1: , 1] from 1 to 5 : 1432 5419 10301...
b	Named num 0.322
Bass.Model	adoption ~ m * ((p + q)^2/p) * (exp(-(p + q) * time...
c	Named num -1.84e-08
m	Named num 17518582
mminus	Named num 17518582
mplus	Named num -34939
n	5L
num.DADOS	num [1:5] 1432 5419 10301 ...
p	Named num 0.0015
q	Named num 0.303
time	int [1:5] 1 2 3 ...
Y	num [1:5] 0 1432 6851 17152 33212 ...
Ysq	num [1:5] 0.00 2.05e+06 4.69e+07 2.94e+08 1.10e+09...

Fonte: Autor

Através da implementação deste algoritmo os valores obtidos para os parâmetros foram de 0,0015 para “p” e 0,3 para “q”, conforme exposto na Figura 28.

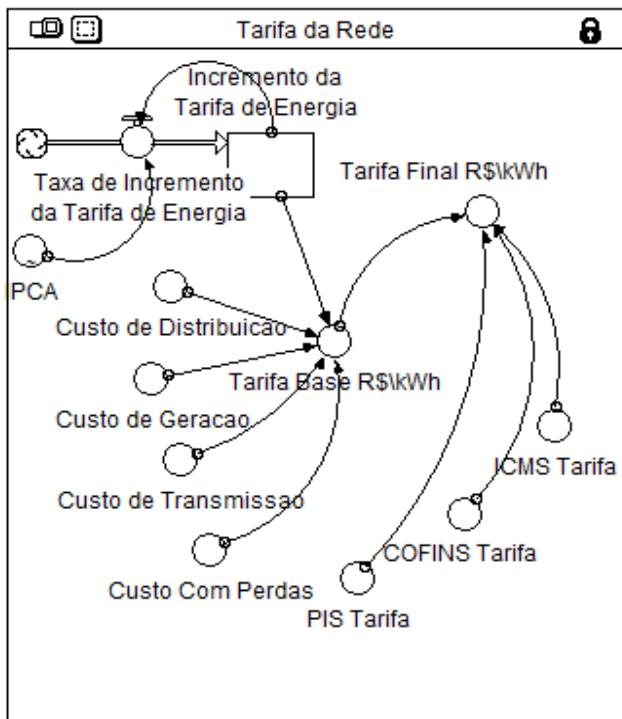
Outra forma de obtenção dos parâmetros é por meio do método dos mínimos quadrados não-lineares, este por sua vez, se distingue do método mínimos quadrados ordinários por utilizar uma regressão múltipla, ou seja, considera diversas variáveis expectativas influenciando no resultado, enquanto o método utilizado considera que apenas uma variável minimize a soma dos quadrados das diferenças entre os valores estimados e os dados históricos (HELENE, 2006). Porém, como o objetivo do trabalho não é uma previsão exata do processo difusão dos equipamentos de energia fotovoltaica residenciais, mas sim, um entendimento do sistema de difusão desta tecnologia como um todo, o método de otimização matemática dos mínimos quadrados ordinários foi adotado, devido a sua maior simplicidade na implementação de um algoritmo em linguagem de programação R.

5.2.3 Sub-modelo da tarifa da rede

A Figura 29 apresenta o sub-modelo tarifa da rede, nele é representado o cálculo da tarifa média ao consumidor de energia

residencial brasileiro, além de representar o acréscimo anual do índice IPCA na tarifa de energia

Figura 29 – Sub-modelo da tarifa da rede



Fonte: Autor

A princípio, considera-se que as variáveis *custo da distribuição*, *custo da geração*, *custo da transmissão*, *custo com perdas* assumem os respectivos valores R\$0,08, R\$0,18, R\$0,03 e R\$0,01 (ANEEL, 2017c). Desta forma a variável *tarifa de base* inicia a simulação com valor R\$0,30 sendo corrigido a cada período pelo índice IPCA de acordo com as taxas apresentadas nas Tabelas 7 e 8 na seção anterior.

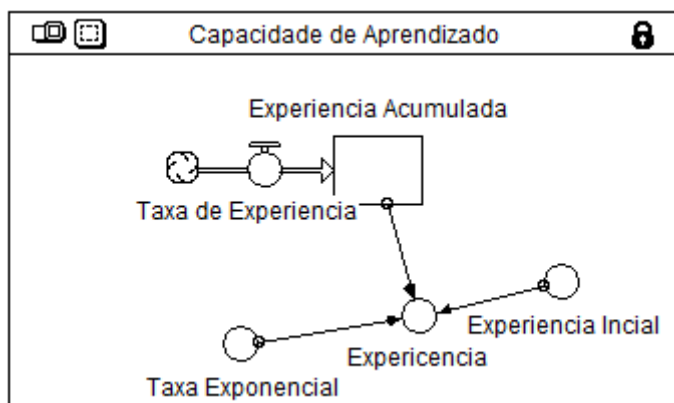
E por fim a variável *tarifa final* é calculada com base na *tarifa base* e os impostos PIS, COFINS e ICMS, seguindo a equação 4.2.

5.2.4 Sub-modelo capacidade de aprendizado

O sub-modelo da capacidade de aprendizado é a representação da evolução cognitiva do mercado sobre a tecnologia fotovoltaica. Este modelo é representado na Figura 30.

Segundo Salamoni, Ruther e Zilles(2009) a redução dos custos da geração de energia solar vem sendo impulsionado pela evolução da curva de aprendizado desta tecnologia. Visto que o estudo comprova que a cada vez que a produção acumulada desta tecnologia dobra, seu custo de produção tem uma redução cerca de 20%.

Figura 30 – Sub-modelo da capacidade de aprendizado



Fonte: Autor

Primeiramente, considera-se que a evolução da variável fluxo *taxa de experiência* cresça conforme a variável fluxo *taxa de adoção solar*, pertencente ao sub-modelo difusão dos equipamentos. Já a variável *experiência* assume os valores segundo a equação 5.1.

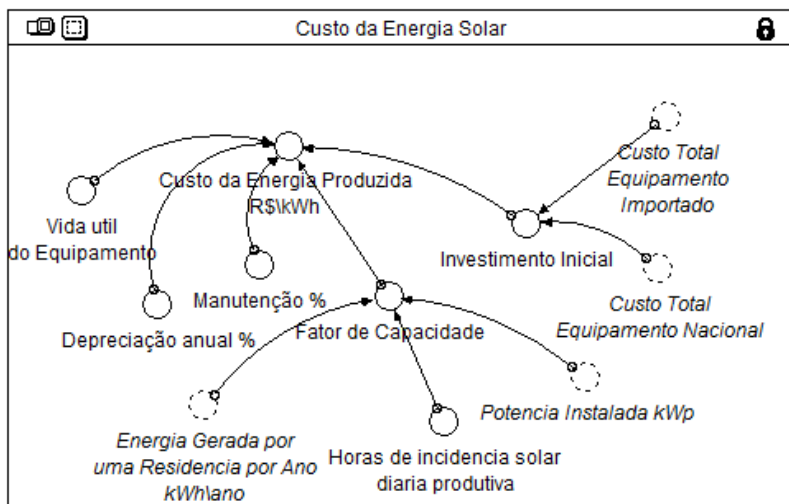
$$Experiência = \left(\frac{Experiência\ Acumulada}{Experiência\ Inicial} \right)^{Taxa\ Exponencial} \quad (5.1)$$

Além disso, as variáveis *taxa exponencial*, *experiência acumulada* e *experiência inicial* são variáveis adimensionais, onde a experiência acumulada e inicial assumem valor de 1 e *taxa exponencial* assume o valor de -0,03 (NEMET, 2006).

5.2.5 Sub-modelo custo de energia solar

A Figura 31 apresenta o sub-modelo custo da energia solar. Este modelo tem por função calcular o custo nivelado da energia fotovoltaica produzida pelos equipamentos durante sua vida útil.

Figura 31 – Sub-modelo do custo da energia solar



Fonte: Autor

Ao iniciar a análise do modelo observa-se que a variável *custo da energia produzida* assume valores no decorrer da simulação seguindo a equação 4.1, em quanto *fator de capacidade* é calculado segundo a equação 5.2.

$$\text{Fator de capacidade} = \frac{\text{Energia gerada por uma residência por ano}}{\text{Potencia Instalada} \times 365 \times \text{Horas de incidência solar diária}} \quad (5.2)$$

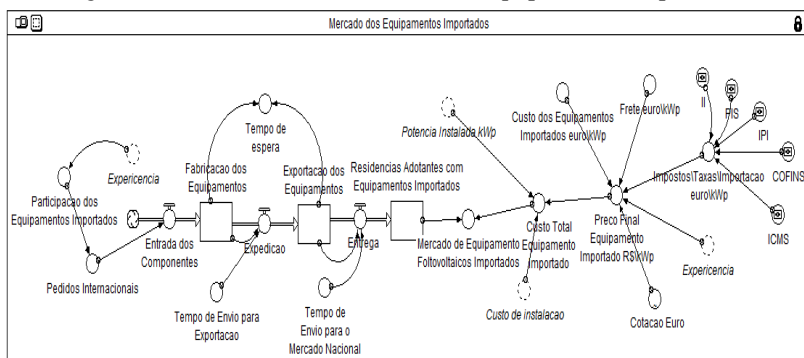
A variável *vida útil do equipamento* assume o valor de 25 anos, enquanto as variáveis *depreciação anual* e *manutenção* considera-se os seguintes respectivos valores 12% e 1% (ZILLES, 2012). Enquanto o valor do *investimento inicial* é a média dos custos totais dos equipamentos de origem importada e nacional, os quais variam no decorrer da simulação dependendo da cotação do euro e da aquisição dos equipamentos pelo mercado.

Já variável *horas de incidência solar diária produtiva* foi arbitrada 8 hora por dia seguindo o trabalho Colle e Pereira (1998).

5.2.6 Sub-modelo mercado dos equipamentos importados

A Figura 32 representa a dinâmica do mercado para equipamentos importados fotovoltaicos, onde o modelo representado busca simular o atraso na adoção dos equipamentos causados pelas atividades de pedido, fabricação e exportação dos equipamentos, além da variação dos preços desse produto em função cotação do euro, da difusão no mercado e da incidência dos impostos.

Figura 32 – Sub-modelo do mercado dos equipamentos importados



Fonte: Autor

A *fabricação dos equipamentos* ocorre em função da variável *entrada de componentes*, esta por sua vez, é a relação entre a *taxa de adoção solar* com o nível de experiência do mercado, ou seja, à medida que o nível de experiência aumenta, no decorrer do processo de difusão, a entrada de componentes reduz gradativamente.

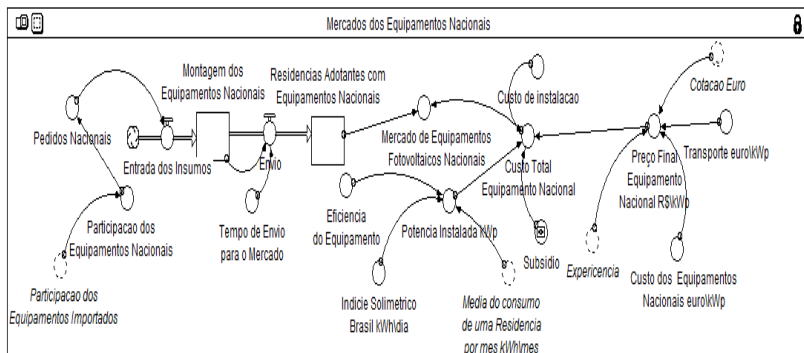
Posteriormente as atividades de fabricação e exportação são representadas por uma estrutura de *delay* de 2ª ordem (STERMAN, 2000). Esta estrutura representa os atrasos causados por essas duas atividades, onde o *tempo de envio para exportação* é de 1 mês e tempo de envio para o mercado nacional é de 6 meses, tempos estes estimados com base nos estudos de Erwes, Forli e Devienne Filho(2012).

Já as variáveis responsáveis pelos custos de instalação e aquisição foram ajustadas utilizando os valores expostos na seção 4.3 deste trabalho.

5.2.7 Sub-modelo mercado dos equipamentos nacionais

O sub-modelo mercado dos equipamentos nacionais busca representar o mercado para esses produtos de origem nacional, dando destaque as atividades de pedido e fabricação dos equipamentos, além da variação dos preços em função da dependência de tecnologia estrangeira e da curva de aprendizado. Na Figura 33 está representado o modelo com todas as suas variáveis.

Figura 33 – Sub-modelo do mercado dos equipamentos nacionais



Fonte: Autor

A montagem dos equipamentos acontece decorrente da variável entrada de insumos, sendo esta variável fluxo representada pela equação 5.3.

$$\text{Entrada de insumos} = \text{adoção solar} \times (1 - \text{part. Importados}) \quad (5.3)$$

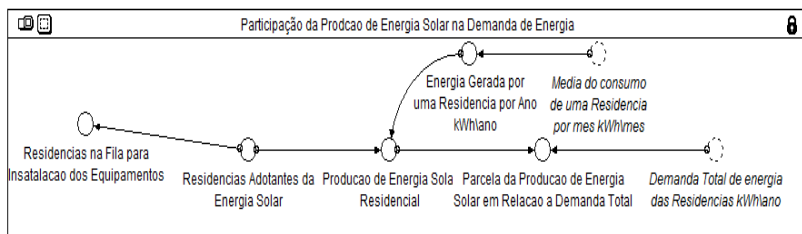
Já o envio para o mercado é representado no modelo por uma estrutura de *delay* de 1ª ordem (STERMAN, 2000). Esta estrutura representa os atrasos causados por esta atividade, onde o tempo de envio para o mercado considerado é de 2 meses segundo ABINEE (2012).

Igualmente como no sub-modelo do mercado de equipamentos importados, as variáveis utilizadas para representar os custos de instalação e aquisição foram ajustadas conforme as informações expostas na seção 4.3 do trabalho.

5.2.8 Sub-modelo participação da energia solar na demanda de energia elétrica

Por último, foi desenvolvida a estrutura do sub-modelo de participação da energia solar na demanda de energia. Estrutura esta que busca retratar a porcentagem da demanda de energia elétrica do mercado potencial (residências horizontais de classe A com condições técnicas para instalação) está sendo atendida pela energia fotovoltaica. Sendo este modelo representado pela Figura 34.

Figura 34 – Sub-modelo da participação da energia solar na demanda de energia elétrica



Fonte: Autor

A parcela da produção de energia solar em relação a demanda total é obtida pela relação da demanda total de energia das residências pela produção da energia residencial. Porém uma das limitações do modelo é a consideração que a energia elétrica gerada pelos sistemas fotovoltaicos é igual a demanda residencial, tendo em vista que o dimensionamento dos equipamentos é feito para suprir esta demanda média anual.

5.3 VALIDAÇÃO DO MODELO

Segundo Forrester e Senge (1980) é preciso se ter certo cuidado no que diz respeito à validade do modelo, pois esta muitas vezes é confundida como uma verdade absoluta. Nesta lógica, não existe um método para verificar se o modelo é “totalmente correto” e que o mesmo represente todos os fenômenos possíveis de acontecer com o sistema real analisado. Portanto, não se pode garantir que os modelos de Dinâmica de Sistemas sejam absolutamente fiéis aos sistemas reais, mas à medida que mais informações são obtidas sobre o sistema de estudo e

os testes de validação são realizados, estes se tornam cada vez mais “confiáveis” e “fidedignos” a realidade.

Os testes de validação foram reunidos de acordo com a natureza do que se pretende validar, ou seja, a estrutura e os resultados do modelo, sendo estes apresentados a seguir nas seções 5.1 e 5.2.

5.3.1 Testes de validação estrutural

5.3.1.1 Adequação dos limites

Este primeiro teste exige que as variáveis escolhidas como endógenas e exógenas, bem como as variáveis que não foram consideradas, sejam justificadas. Vale destacar, que durante a construção do modelo a escolha das variáveis deu-se em função dos artigos encontrados na revisão da literatura e da leitura dos documentos, já referenciados neste trabalho, sobre o mercado fotovoltaico residencial brasileiro.

As variáveis endógenas que formam o modelo correspondem a uma lógica de adoção dos equipamentos fotovoltaicos residenciais, sendo os elementos principais para este tipo de sistema: o mercado potencial, modelo de difusão, variação do preço do produto/serviço concorrente, custo da energia solar, o processo de fabricação/importação/entrega e aprendizado desta tecnologia.

As variáveis exógenas são consideradas como variáveis independentes, no presente trabalho sendo as variáveis relacionadas a demanda de energia elétrica, impostos, cotação do euro e os tempos de produção/envio/instalação. São consideradas exógenas por não dependerem das inter-relações do processo de adoção dos equipamentos.

As variáveis não consideradas são as variáveis que representam a estrutura dos impactos das sazonalidades das estações no custo da energia elétrica, bem como na geração de energia dos sistemas fotovoltaicos e também as variáveis pertinentes a estrutura do sistema crédito pela energia injetada na rede e não consumida pelas residências (*net-metering*). Justifica-se a não consideração destas variáveis em função do período de interação da simulação ser anual e esses acontecimentos serem de ordem mensal, sendo assim uma fragmentação das interações do modelo fariam com que os resultados da simulação se tornem demasiadamente longos.

5.3.1.2 Verificação da estrutura

A partir do conhecimento do modelo de difusão de inovações exposto por Bass (1969), o modelo desenvolvido focou nas inovações do tipo de bens tecnológicos, especificamente nos equipamentos de geração de energia fotovoltaicos de pequeno porte destinados a residências e o para o seu desenvolvimento foi utilizada literatura encontrada, exposta na Seção 3.3.

Desta forma, de acordo com a teoria de Bass e a revisão da literatura, a estrutura do modelo é comparável com o processo real e não contradiz o conhecimento que se tem sobre o sistema real.

5.3.1.3 Verificação dos parâmetros

A importância da verificação dos parâmetros está em determinar se eles foram estimados de maneira correta e se corresponde a realidade.

Alguns parâmetros de importância para o presente estudo são justificados os valores adotados a seguir no Quadro 4, os demais que não são apresentados neste quadro recebem o valor de zero ao iniciar o modelo.

Quadro 4 – Parâmetros verificados e justificados

Parâmetro	Valor Calibrado	Justificativa
Residências como condição de aquisição	3.815.115 Residências	A escolha do mercado potencial foi com base nos dados do censo 2010 dos domicílios com renda superior a 10 salários mínimos (Faixa de renda classe A), que habitam residências horizontais e próprias de acordo com IBGE (2010). Considerando também um fator de aptidão para a instalação dos equipamentos fotovoltaicos seguindo EPE (2014b).
Média de consumo por mês de uma residência	550 kWh/mês	Representa o consumo médio de energia elétrica de uma residência de alta renda segundo EPE (2013).
Incremento fracionário populacional	0,947%	Taxa de crescimento médio da população classe A brasileira segundo IBGE (2010).

IPCA	Valores apresentados na Tabela 7 e 8	Valores históricos e a projeção para os próximos anos do Índice de Preços ao Consumidor Amplo gerados pelo sistema de expectativas do mercado do Banco Central (2017).
Custo de distribuição	R\$0,08	Representa os 27% do custo de distribuição apontado pela ANEEL (2017c) para o cálculo da tarifa base.
Custo de geração	R\$0,18	Representa os 60% do custo de geração apontado pela ANEEL (2017c) para o cálculo da tarifa base.
Custo de transmissão	R\$0,03	Representa os 10% do custo de transmissão apontado pela ANEEL (2017c) para o cálculo da tarifa base.
Custo com perdas	R\$0,01	Representa os 3% do custo de perdas na linha apontado pela ANEEL (2017c) para o cálculo da tarifa base.
PIS tarifa	1,5%	Segue a porcentagem do PIS incidente no cálculo da tarifa final segundo ANEEL (2017c).
COFINS tarifa	5%	Segue a porcentagem do COFINS incidente no cálculo da tarifa final segundo ANEEL (2017c).
ICMS tarifa	25%	Segue a porcentagem do ICMS incidente no cálculo da tarifa final segundo ANEEL (2017c).
Vida útil do equipamento	25 anos	Segundo as recomendações de Zilles (2012) para o cálculo custo nivelado da energia fotovoltaica (LCOE).
Depreciação anual	12%	
Manutenção	1%	
Horas de incidência solar diária produtiva	8 horas	Segundo o atlas da irradiação solar brasileira de Colle e Pereira (1998).
Tempo de envio para o mercado	2 meses	Tempo médio de envio dos equipamentos fotovoltaicos para o mercado segundo ABINEE (2012).

Eficiência do equipamento	80%	Eficiência média dos equipamentos fotovoltaicos segundo Zilles (2012).
Indicie solimétrico Brasil	4,96kWh/m ² .dia	Média diária da irradiação global horizontal no Brasil segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar de Pereira <i>et al.</i> (2006)
Custo dos equipamentos nacionais	€1.830/kWp	O custo de aquisição por potência instalada do equipamento segundo ABINEE (2012).
Transporte	€80/kWp	O custo de transporte por potência instalada do equipamento segundo ABINEE (2012).
Custo de Instalação	€1.400/kWp	O custo de instalação por potência instalada do equipamento segundo ABINEE (2012).
Cotação Euro	Valores apresentados na Tabela 3 e 4.	Valores históricos e a projeção para os próximos anos da moeda estrangeira pelo sistema de expectativas do mercado Banco Central (2017).
COFINS	€140/kWp	Representa os 8,6% de incidência de COFINS sobre os módulos e inversores de origem importada segundo SILVA (2015).
IPI	€70/kWp	Representa os 15% de incidência de IPI sobre os inversores de origem importada segundo Silva (2015).
PIS	€10/kWp	Representa os 1,6% de incidência de PIS sobre os módulos e inversores de origem importada segundo Silva (2015).
II	€180/kWp	Representa os 14% de incidência de II sobre os módulos e inversores de origem importada segundo Silva (2015).
ICMS	€170/kWp	Representa os 12% de incidência de ICMS sobre os inversores de origem importada segundo Silva (2015).
Frete	€80/kWp	Custo relativo ao frete e seguros segundo ABINEE (2012).
Custo dos	€1.640/kWp	O custo de aquisição por potência

equipamentos importados		instalada do equipamento segundo ABINEE (2012).
Tempo de envio para o mercado nacional	6 meses	Tempo médio de envio dos equipamentos fotovoltaicos para o mercado nacional segundo Erwes, Forli e Devienne Filho(2012).
Tempo de envio para exportação	1 mês	Tempo médio de envio dos equipamentos fotovoltaicos para os terminais de cargas segundo Erwes, Forli e Devienne Filho(2012).
Efetividade das ações de publicidade “p”	0.0015	Parâmetro estipulado através da análise de sensibilidade feita na seção 6.1.
Taxa de interação social “Q”	0.3	Parâmetro estipulado através da análise de sensibilidade feita na seção 6.1.

Fonte: Autor

Considerando os parâmetros descritos, entende-se que os parâmetros do modelo estão coerentes com as unidades e proporções das variáveis do mesmo.

Além disso, para uma análise mais detalhada das interações entre estes parâmetros o Apêndice B apresenta todas as equações do modelo.

5.3.1.4 Consistência das dimensões

As estruturas de experiência são adimensionais. As unidades da estrutura das residências são residências, assim como as unidades de fabricação/exportação/montagem dos equipamentos são equipamentos e a unidade de incremento da tarifa de energia é em R\$/kWh.

Desta forma, considera-se que o modelo apresenta uma consistência adequada entre as dimensões das diferentes variáveis.

5.3.1.5 Condições extremas

Para este teste, foram feitas quatro baterias de simulação, inserindo valores extremos para avaliar se o modelo se comporta de maneira anormal. As variáveis em análise são *efetividade das ações de publicidade “p”*, *interação social “q”*, *tarifa final* e *o custo da energia produzida*.

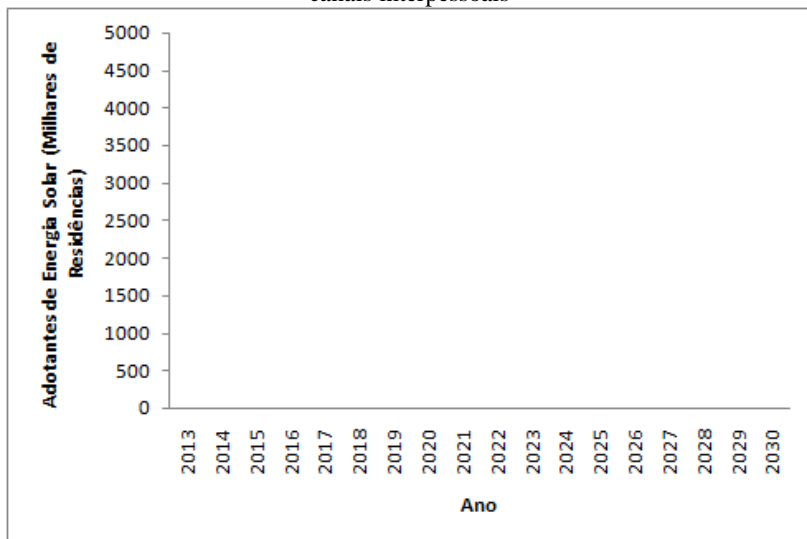
Teste 1: Ações de publicidade “p” =0

Neste primeiro teste é a avaliado a importância dos canais de comunicação dirigida para o início do processo de difusão relatado por Rogers (1962). Estes canais por sua vez, estimulam a tendência autônoma de aquisição por parte do adotante, que caso não ocorra entende-se que o processo de difusão falhe.

Um exemplo matemático deste acontecimento ocorre através da análise da Equação (2.1), sendo esta a equação da premissa fundamental do Bass. No caso do parâmetro coeficiente de inovação “p” assumir o valor de zero e total de consumidores que já adquiriram os equipamentos fotovoltaicos for zero no instante inicial, a probabilidade de adoção dos equipamentos em qualquer momento será nula, ou seja, o processo de difusão não ocorrerá.

A Figura 35 apresenta o resultado gerado pelo modelo computacional.

Figura 35 – Adoção dos Equipamentos fotovoltaicos influenciada apenas pelos canais interpessoais



Fonte: Autor

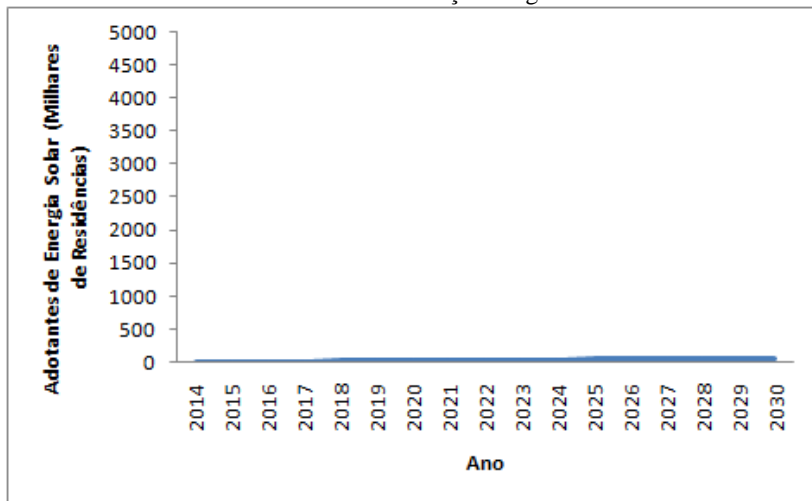
Conforme a teoria o resultado apresentando pelo modelo mostra que o processo de difusão não ocorre, enquanto a população residencial cresce, as adoções dos equipamentos permanecem estagnadas em zero.

Teste 2: Interação social “q”=0

Este teste avalia a importância dos canais interpessoais no processo de difusão descrito por Rogers (1962). Estes canais por sua vez, estimulam a adoção influenciada pelos relatos de outros adotantes que já adquiriram estes equipamentos.

Voltando analisar a Equação (2.1), no caso do parâmetro coeficiente de contato social “q” assumir o valor de zero, a probabilidade de adoção dos equipamentos em qualquer momento será igual ao coeficiente de inovação “p”. Desta forma, espera-se que o processo de difusão ocorra com uma taxa constante.

Figura 36 – Adoção dos Equipamentos fotovoltaicos influenciada apenas pelos canais de comunicação dirigida



Fonte: Autor

A Figura 36 apresenta o resultado gráfico deste testes, revelando que o modelo se comporta conforme o resultado matemático esperado.

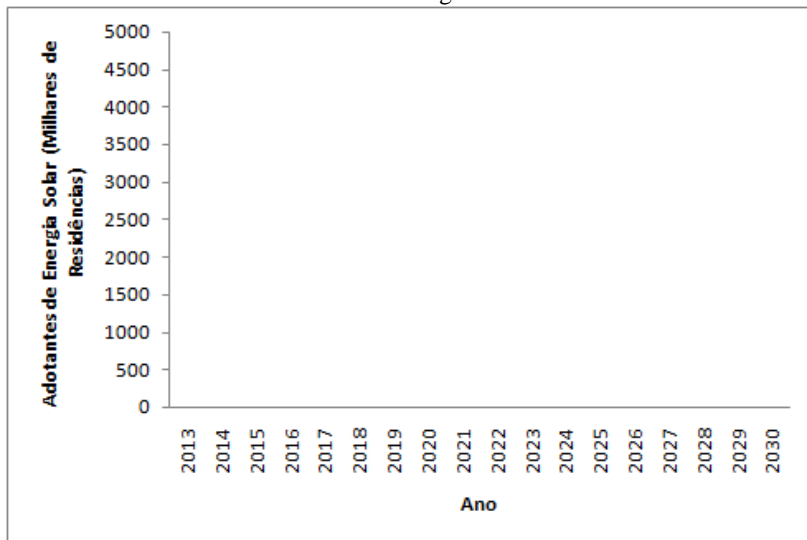
Teste 3: Energia da rede gratuita

Este teste avalia a situação extrema onde os serviços de geração transmissão e distribuição de energia elétrica fossem gratuitos,

analisando qual seria o comportamento dos adotantes frente à decisão de adesão da energia solar em suas residências, diante desta realidade.

De maneira geral, entende-se que o processo de difusão não ocorrerá, tendo em vista a Equação (4.3) e estimando que a tarifa média assuma o valor nulo, conseqüentemente a fração máxima do mercado com intenção de adotar o produto será uma indeterminação matemática.

Figura 37 – Adoção dos Equipamentos fotovoltaicos caso a energia da rede elétrica fosse gratuita



Fonte: Autor

A Figura 37 ilustra a falha no processo de difusão, igualmente ilustrados no Teste 1, ambos os resultados já eram matematicamente esperados.

Teste 4: Energia Solar gratuita

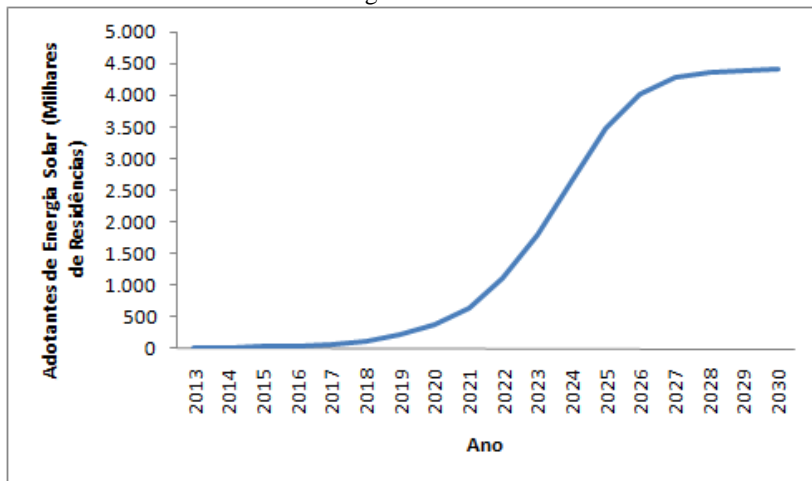
Este teste avalia a situação extrema onde os equipamentos fotovoltaicos fossem fornecidos as residências de forma gratuita e busca entender qual seria o comportamento dos adotantes frente a esta realidade.

Vide a Figura 15, quando o custo da energia fotovoltaica assume o valor nulo, a fração máxima do mercado assume valor de 1, ou seja todo o mercado potencial possui intenção de adquirir o produto. Porém devido aos atrasos que ocorrem durante o processo de

fabricação/montagem/exportação espera-se que a difusão do produto não ocorra de forma repentina e leve algum tempo para que o mesmo atinja todo o mercado.

A Figura 38, mostra o resultado obtido através da simulação do Teste 4.

Figura 38 – Adoção dos Equipamentos fotovoltaicos caso os mesmo fossem gratuitos



Fonte: Autor

Conforme esperado o processo de difusão ocorre descrevendo uma curva S, ou seja, um crescimento gradativo inicial, a partir de um dado momento este crescimento se torna exponencial até o momento da saturação do mercado.

5.3.2 Teste de validação dos resultados

5.3.2.1 Erro de integração

Primeiramente foram testados os métodos de integração disponíveis no *software*: Euler, Ruge Kutta de segunda ordem e Runge Kutta de quarta ordem. Nos três testes verificou-se a igualdade nos resultados obtidos.

Em um segundo momento, foi testado o passo de integração, onde “dt” assumiu os valores de 0,25, 0,125 e 0,0625. Os resultados não apresentaram diferença no comportamento.

Também se verificou a influência do valor inicial dentro do processo de simulação, constatando-se a similaridade entre os resultados obtidos.

Desta forma se conclui que o modelo não sofre variações significativas quando o método de integração ou o passo de integração são alterados.

5.3.2.2 Reprodução de comportamento

O comportamento reproduzido no modelo foi comparado com a realidade do mercado de sistemas fotovoltaicos residenciais. Para isso as *variáveis residências adotantes de energia solar, investimento inicial e tarifa final* foram comparadas respectivamente, com dados reais de adotantes de energia fotovoltaica residencial, custo médio de aquisição de um sistema fotovoltaico de 4kWp e tarifa média residencial de energia elétrica brasileira. Para este teste os valores de “p” e “q” foram calibrados para 0,0015 e 0,3 respectivamente.

Neste comparativo entre os dados reais e os resultados obtidos, ainda foram calculados coeficiente de determinação (R^2), raiz do erro quadrado médio (*Root Mean Square Error – RMSE*) e erro médio da porcentagem absoluta (*Mean Absolute Percentage Error – MAPE*) na intenção de se avaliar a capacidade preditiva do modelo.

Tabela 10 – Comparativo entre dados reais dos adotantes de energia fotovoltaica residencial e dados gerados pelo modelo

Ano	Dados Reais	Resultados gerados pela simulação	R^2	RMSE	MAPE
2013	47	0			
2014	1489	1431	0,9985	0,0722	32,25%
2015	6467	5407			
2016	11235	10256			

Fonte: ANEEL (2017b)

Quanto os adotantes da energia fotovoltaica pode se afirma que o modelo apresentou valores bem próximos dos reais dos últimos anos, tendo em vista que o valor R^2 aproxima-se 1, RMSE apresenta um baixo valor de desvio padrão para amostra e MAPE mostra percentual razoável para desvio absoluto médio.

Tabela 11 – Comparativo entre dados reais do custo médio de aquisição de um sistema fotovoltaico de 4kWp e os dados gerados pelo modelo

Ano	Dados Reais	Resultados gerados pela simulação	R²	RMSE	MAPE
2013	R\$28000	R\$28425			
2014	R\$27200	R\$29034	0,9534	0,0263	7,69%
2015	R\$28520	R\$31539			
2016	R\$31920	R\$35722			

Fonte: ABINEE (2012)

Já o custo de aquisição do equipamento por se tratar de um valor médio, pode apresentar variações dependendo do local de compra ou do fabricante do produto. Segundo as informações da ABINEE (2012), os resultados simulados aproximam-se destes valores constatados, considerando que R² é valor próximo 1, RMSE apresenta um valor pequeno para o desvio padrão da amostra e MAPE mostra percentual baixo para desvio absoluto médio.

Tabela 12 – Comparativo entre dados reais da tarifa média de energia elétrica residencial brasileira e os dados gerados pelo modelo

Ano	Dados Reais	Resultados gerados pela simulação	R²	RMSE	MAPE
2013	R\$0,45	R\$0,45			
2014	R\$0,49	R\$0,48	0,9664	0,0295	4,04%
2015	R\$0,56	R\$0,51			
2016	R\$0,58	R\$0,55			

Fonte: ANEEL (2017c)

Por último, a tarifa de energia elétrica também por se tratar de um valor médio, tem suas variações dependendo dos custos de geração, transmissão, distribuição, perdas e impostos que variam de distribuidora para distribuidora de energia. Porém com o cálculo da média aritmética dessas tarifas destinadas ao setor residencial disponíveis pela ANEEL (2017c), verificou-se através das análises estatísticas do R², RMSE e MAPE que os resultados gerados pela simulação se aproximam deles, reforçando ainda mais a confiabilidade do modelo.

5.3.2.3 Anomalia no comportamento

Durante a construção do modelo foram feitas diversas iterações relativas a este teste. Conforme os comportamentos anômalos iam surgindo, as deduções e condições de construção do modelo eram revistas. Dessa maneira, e de acordo com os testes de condições extremas e validade estrutural, o modelo não apresenta comportamentos atípicos.

5.3.2.4 Membro da família

O modelo foi construído para representar a disseminação dos equipamentos fotovoltaicos no mercado residencial brasileiro.

Neste contexto, o mesmo tem capacidade de representar outros sistemas reais, desde que sejam similares a este e apresentem dados suficientes para sua reprodução.

5.3.2.5 Comportamento surpresa

Os testes no modelo indicam que o mesmo reproduz comportamentos importantes de serem analisados, principalmente no que diz respeito às políticas de incentivos ao setor e ao perfil dos adotantes. Porém estes comportamentos não são considerados pelo autor como “surpreendentes”, porém seriam dificilmente vistos em sistemas reais pela dificuldade de quantificação das variáveis intangíveis envolvidas.

5.3.2.6 Análise de sensibilidade

O teste de análise de sensibilidade será realizado no capítulo 6, com a avaliação dos cenários de incentivo ao mercado e de mudança no perfil de consumo energético das residências. Este teste tem sua importância relacionada à criação de cenários alternativos, na intenção de mostrar as diversas realidades futuras que podem ocorrer ou não e seus impactos no mercado.

5.3.2.7 Melhoramento do sistema

Este teste confere se as melhorias encontradas no modelo obtiveram resultados próximos do real. Na presente estudo, o modelo

limitou-se à análise da simulação e implantação. Desta maneira, este teste não foi realizado.

6 ANÁLISE E RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Nesse capítulo são expostos os resultados obtidos pela simulação computacional. Inicialmente, é realizado uma análise de sensibilidade dos parâmetros “p” e “q”, de forma que em um segundo momento possa ser relatado um cenário de referência para interpretação desta etapa da pesquisa correlacionada a uma situação real do mercado. O processo de simulação da sequência ao capítulo apresentando um conjunto de informações gráficas e as alternativas de cenários, baseadas nas políticas existentes no setor e das possíveis atitudes que os usuários possam vir a ter frente ao consumo de energia. Por fim, analisam-se essas informações gráficas e as alternativas propostas, de maneira a abrir um espaço para as considerações finais do trabalho.

6.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS “p” E “q”

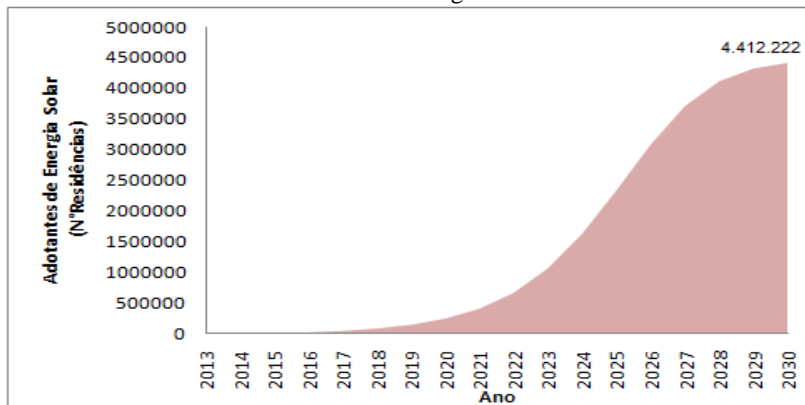
Segundo Drury, Denholm e Margolis (2010), a definição dos parâmetros “p” e “q” são importantes para simulações de curto prazo (menores que 20 anos), enquanto para projeções de longo prazo em mercado (acima de 20 anos) não sejam tão necessárias, tendo em vista a possibilidade do processo de difusão ter se concluído antes do término deste período. Os parâmetros variam de acordo com as características intrínsecas de cada produto e de cada mercado. Porém Jeuland (1994) afirma que os parâmetros “p” e “q” utilizados nos estudos de diversos bens duráveis são limitados a ocorrência em uma faixa de valores. Ainda segundo o autor, o parâmetro “p” normalmente é inferior a 0,03 e superior ao valor 0,001, já o parâmetro “q” raramente é maior que 0,5 e menor 0,3. Sultan, Farley e Lehmann (1990) complementa alegando que os valores médios para “p” e “q” são 0,03 a 0,38 respectivamente. Vale lembrar ainda que estes parâmetros são variáveis adimensionais do modelo de Bass.

Para a realização da análise de sensibilidade foi utilizado o método de simulação de sensibilidade multivariável no *software* Vensim®, ou também conhecido como método de Monte Carlo, onde foi variado de maneira aleatória durante 1.000 simulações automáticas os valores de “p” e “q” entre os intervalos de 0,001 à 0,03 e 0,3 à 0,5, respectivamente.

Além da variável *residenciais adotantes de energia solar*, são avaliados também os valores de “p” e “q” que aproximam as variáveis *investimento inicial* e *tarifa final R\$/kWh* dos valores históricos de adotantes residenciais de energia solar, custo de investimento do

equipamento solar e a tarifa rede elétrica (já apresentados na seção 5.3.2.2).

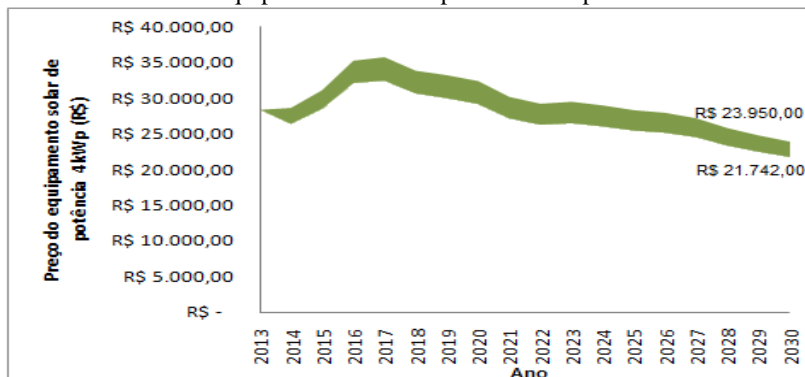
Figura 39 – Análise de sensibilidade avaliando a variação das residências adotantes de energia solar



Fonte: Autor

Com a calibração dos parâmetros “p” e “q” de 0,003 e 0,5 percebe-se que o processo de difusão dos equipamentos solares residenciais atinge sua maturidade até o ano de 2030, ou seja adoção dos equipamentos solares ocorrer em 100% das residências consideradas, e quando estes valores são ajustados para 0,001 a 0,3, o mesmo não se desenvolve.

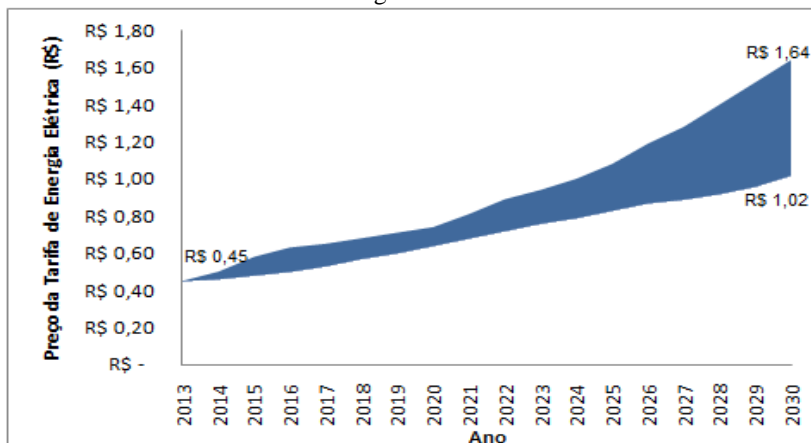
Figura 40 - Análise de sensibilidade avaliando a variação no preço do equipamento solar de potência 4kWp



Fonte: Autor

Quando se inicia uma análise do impacto que o ajuste destes parâmetros tem no preço do equipamento, entende-se que quando o processo de difusão atinge a sua fase de maturidade, o custo de aquisição do equipamento pode cair até 9,3% em relação ao cenário onde o processo de difusão não se desenvolve.

Figura 41 - Análise de sensibilidade avaliando a variação no preço da tarifa de energia elétrica



Fonte: Autor

Por último, a análise da influencia destes parâmetros no preço da tarifa de energia, identifica-se que quando o processo de difusão atinge seu estágio final o custo da tarifa reduz em torno 47,8% em relação ao cenário em que a difusão dos produtos não ocorre com êxito.

6.2 CENÁRIO BASE

Este cenário visa apresentar as informações obtidas pela simulação do modelo, em uma situação próxima do real, através dos parâmetros calibrados de acordo com as informações apresentadas nos capítulos 4 e 5.

Além disso, o mesmo serve de referencia na análise de sensibilidade entre as alternativas de novos cenários, na tentativa de se estimar possíveis situações futuras que possam ocorrer neste mercado de energia solar com foco no setor residencial.

Antes de apresentar os resultados deste cenário, julgou-se importante apresentar os principais dados considerados para a elaboração do mesmo, o Quadro 5 traz essas informações.

Quadro 5 – Principais dados sobre o cenário base

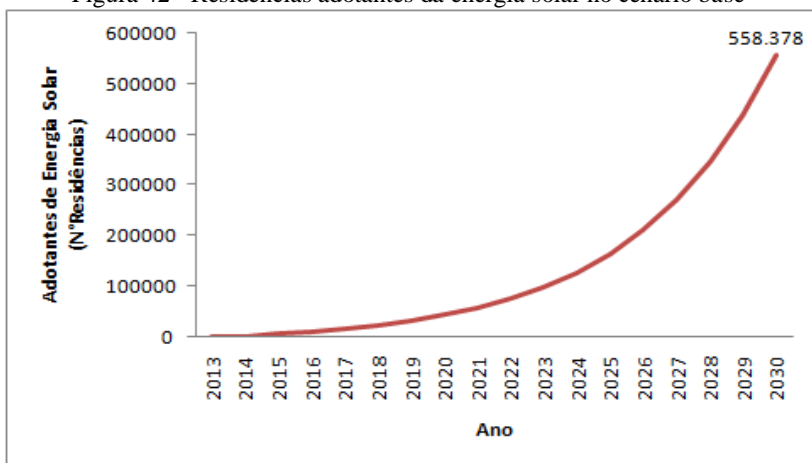
Modelo de Bass
<ul style="list-style-type: none"> • $p=0,0015$ e $q=0,3$; • $L=3815115$ Residências.
Perfil Residencial
<ul style="list-style-type: none"> • Potência Instalada dos equipamentos fotovoltaicos de 4kWp; • Consumo mensal de energia de 550kWh/mês .
Carga Tributaria nos Equipamento Solares
<ul style="list-style-type: none"> • Equipamentos nacionais foram considerados isentos de tributação; • Incidência de Imposto de Importação (II) sobre os módulos e inversores importados é de 14% sobre o valor final dos produtos; • Considera-se a alíquota do Imposto sobre Produto Industrializados (IPI), incidente nos módulos importados de 0% e incidente nos inversores importados de 15% sobre o valor final; • Incidência de ICMS para inversores importados em 12% (embora a alíquota varie por estado); • Incidência de PIS e COFINS sobre módulos e inversores importados é respectivamente de 1,65% e 8,6% sobre o valor final dos produtos.
Tarifa de Energia Elétrica
Média Aritmética das Tarifas de Energia das distribuidoras Brasileiras em 2013 corrigidas pelo índice IPCA.

Fonte: Autor

O modelo de difusão de Bass (1969) tem como principal resultado o número de adotantes ao longo do tempo. Nesta pesquisa, no entanto, mais do que o número de residências adotantes, interessa saber qual a evolução da capacidade instalada, qual a energia gerada pelos sistemas fotovoltaicos residenciais, como contribuem para o atendimento da demanda de energia elétrica do seu mercado consumidor e também, o comparativo entre o custo nivelado da energia solar produzida com a tarifa média das distribuidoras.

As Figuras 42 e 43, representam respectivamente o número de adotantes da energia fotovoltaica e os adotantes que adquirem equipamentos de origem importada ou nacional no decorrer da simulação.

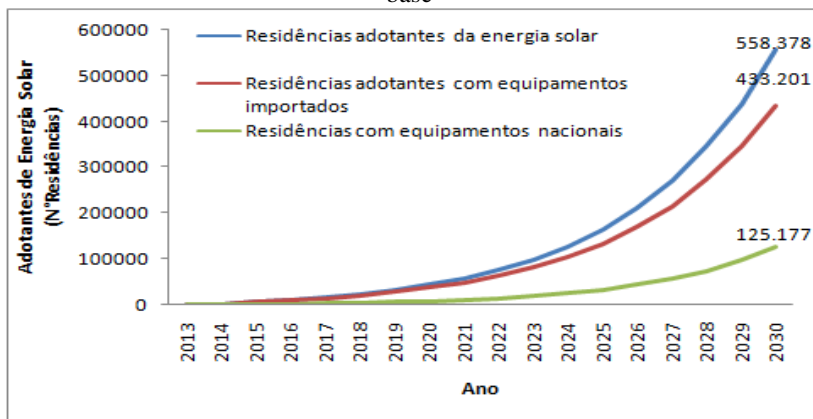
Figura 42 - Residências adotantes da energia solar no cenário base



Fonte: Autor

Ao analisar o número de adotantes, percebeu-se que o mesmo ao término da simulação atingiu a cifra 558.378 residências adotantes, representando 12,67% de adoção do mercado potencial considerado na simulação.

Figura 43 – Adotantes com equipamentos importados e nacionais no cenário base



Fonte: Autor

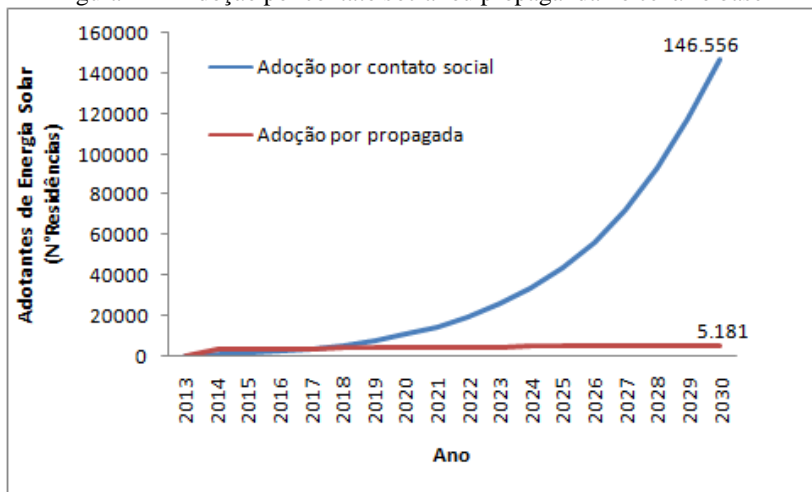
Ao verificar a origem dos equipamentos adotados, percebe-se que ainda há uma grande dependência, no período simulado, do produto de origem estrangeira, mesmo o modelo considerando o desenvolvimento

do mercado nacional de acordo com a evolução da curva de aprendizado desta tecnologia.

Em contrapartida, espera-se que o teste de políticas protecionistas na análise de sensibilidade possa fazer com que esta situação se inverta, ou pelo menos, reduza a disparidade entre a adoção dos equipamentos nacionais e importados.

Já o comparativo entre a adoção por contato social e por propaganda é feito na Figura 44.

Figura 44 – Adoção por contato social ou propaganda no cenário base

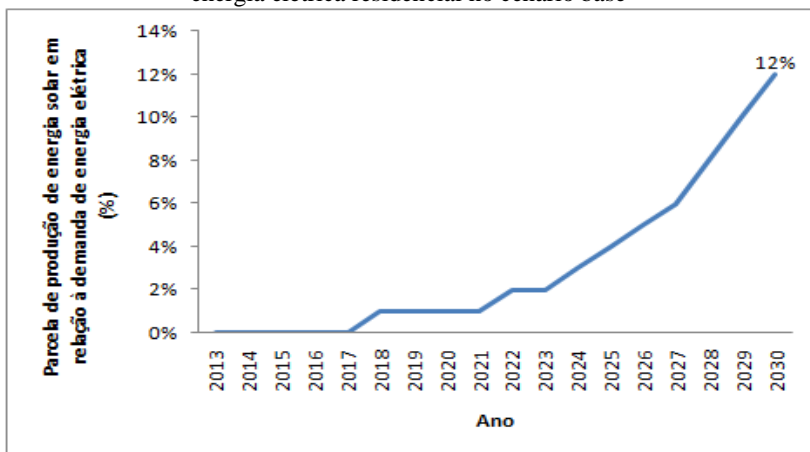


Fonte: Autor

A Figura 44 reforça a questão da importância dos canais de comunicação já discutida anteriormente. A princípio os canais de comunicação dirigida (televisão, rádio, jornal, internet e etc...) são fundamentais no início do processo de difusão, por serem os meios de comunicação responsáveis pelas primeiras adoções, e a partir de certo período, no caso em questão o ano 2018, os canais de comunicação interpessoais dão continuidade até o término do processo de difusão.

A Figura 45 apresenta a produção de energia solar em relação a demanda de energia elétrica do mercado consumidor.

Figura 45 – Parcela de produção de energia solar em relação à demanda de energia elétrica residencial no cenário base

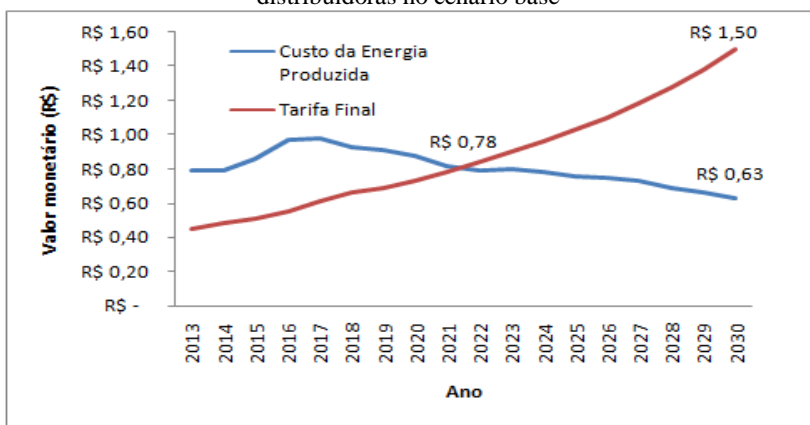


Fonte: Autor

Ao término da simulação percebe-se que 12% da demanda de energia elétrica do mercado consumidor, já será suprida por painéis solares.

A Figura 46 apresenta a evolução da tarifa média das distribuidoras de energia brasileiras e queda no custo nivelado da geração de energia fotovoltaica.

Figura 46 – Relação entre o custo nivelado da energia solar e tarifa média das distribuidoras no cenário base

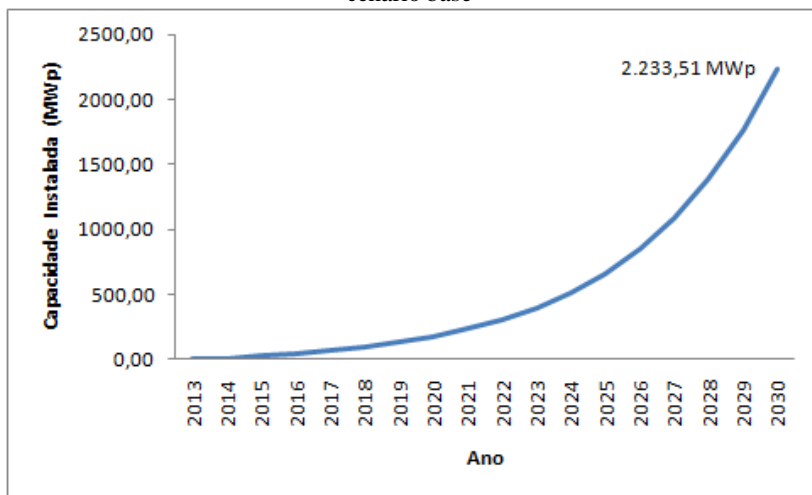


Fonte: Autor

Ao analisar esta relação entre o preço da tarifa de energia elétrica e o custo nivelado da energia solar percebe-se que no ano 2022, o custo da energia solar tornar-se menor inferior a tarifa média praticadas pelas distribuidoras de energia, desta forma, esta vantagem econômica acelera mais ainda o processo de difusão desta tecnologia, além disso, comparando este resultado com a projeção realizada pelo EPE (2014a), que projeta para o ano de 2018 a paridade entre a tarifa das concessionárias e o custo da energia solar, compreende-se que este cenário está dentro de um período aceitável de desenvolvimento, tendo em vista os acontecimentos político-financeiros posteriores a 2014.

Por fim, avalia-se a evolução da capacidade instalada da energia solar nas residências, essa informação é apresentada na Figura 47.

Figura 47 – Evolução da capacidade instalada da energia solar residencial no cenário base

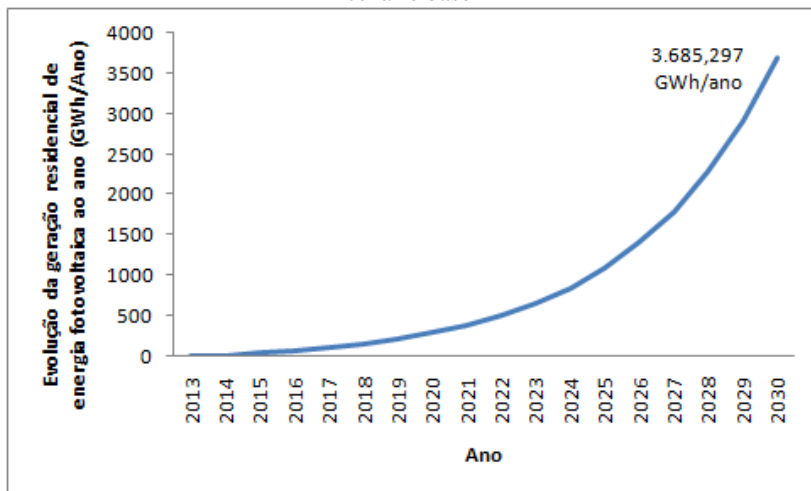


Fonte: Autor

Ao termino da simulação percebeu-se que a capacidade instalada prevista para o de 2030 é de 2,2335GWp abaixo da projeção feita pelo EPE (2014a) que projeta para o ano de 2030, 3,8 GWp de capacidade instalada de energia fotovoltaica no Brasil, para o setor residencial.

Já se tratando da energia gerada por esses equipamentos, a Figura 48 traz as informações referentes a evolução da geração de energia elétrica fonte solar anual.

Figura 48 – Evolução da geração residencial de energia fotovoltaica ao ano no cenário base



Fonte: Autor

Ao final da simulação, a produção de energia elétrica por fonte fotovoltaica de origem residencial, atinge no ano de 2030 a marca 3.685,3 GWh/ano. Com essa cifra, seria possível suprir atualmente 0,8% da demanda de energia elétrica brasileira ou 2,77% da demanda de energia do setor residencial, segundo EPE (2014a).

6.3ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DAS POLITICAS

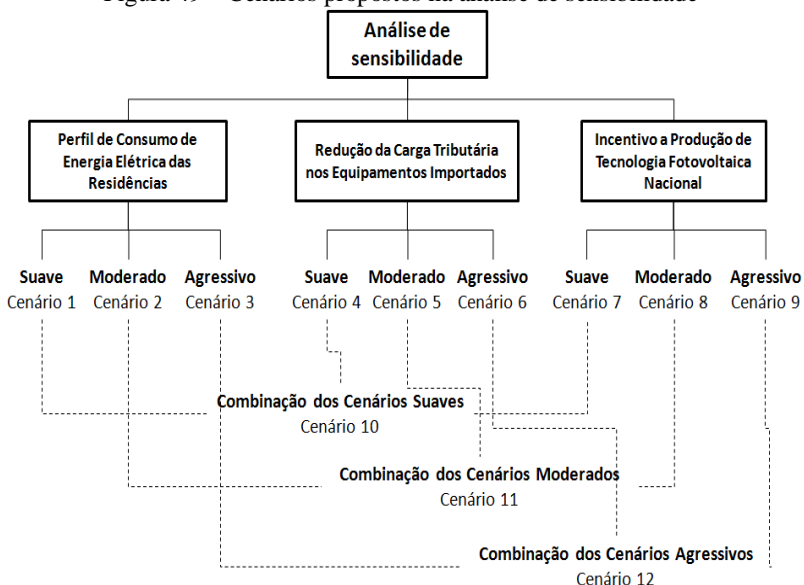
Após a análise do cenário de referencia, ou base, é interessante avaliar possíveis cenários futuros, na busca de se obter alternativas nos resultados simulados. Para isso, análise de sensibilidade das políticas é proposta busca avaliar quais são os impactos no modelo de difusão se ocorressem às seguintes situações:

- Uma mudança no consumo de energia elétrica por parte do mercado potencial;
- Redução na carga tributaria nos equipamentos importados;
- Subsídio nos equipamentos nacionais.

Para avaliar estas situações, são propostos 12 cenários, sendo os mesmos classificados quanto à intensidade de seus acontecimentos.

Estes por sua vez, são apresentados a seguir na Figura 49 e descritos na sequência.

Figura 49 – Cenários propostos na análise de sensibilidade



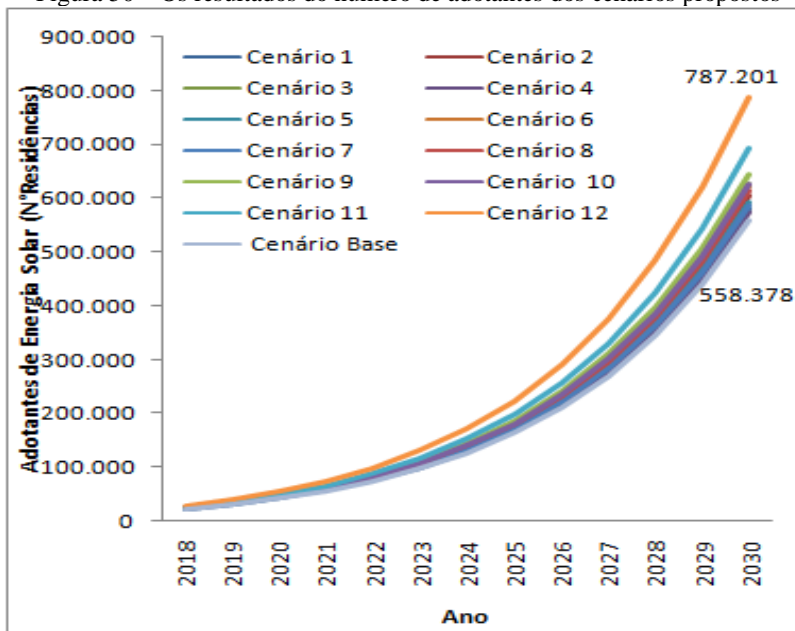
Fonte: Autor

- (i) Cenário 1: Busca simular uma redução de 1% ao ano no consumo médio de energia elétrica, para isso, no modelo computacional de Dinâmica de Sistemas, altera-se a variável *média de consumo de uma residência por mês*, que encontra-se mais precisamente no sub-modelo do mercado consumidor, para uma função gráfica e insere-se os valores partindo de 550Kwh/mês reduzindo 1% a cada período de um ano.
- (ii) Cenário 2: Análogo ao cenário 1, porém de modo moderado, busca simular a redução de 2% ao ano no consumo médio de energia elétrica. As alterações no modelo computacional são muito semelhantes às realizadas no cenário anterior, porém reduzindo o valor da variável 2% a cada período de um ano.
- (iii) Cenário 3: Equivalente a ambos os cenários anteriores, no entanto de modo agressivo, este cenário procura simular a redução 3% ao ano no consumo médio de energia elétrica. Quanto às alterações no modelo, idem aos anteriores, a variável é calibrada para uma redução de 3% a cada período anual.

- (iv) Cenário 4: Procura simular a redução de 25% da carga tributaria (COFINS, ICMS, II, IPI, PIS) incidente nos equipamentos fotovoltaicos de origem importada. Para isso, no modelo de Dinâmica de Sistemas, mas precisamente no sub-modelo do mercado dos equipamentos importados, as variáveis cujos nomes correspondem os próprios impostos incidentes nos equipamentos foram calibradas para 75% de seu valor no cenário base.
- (v) Cenário 5: De forma equivalente ao cenário 4, este cenário simula uma redução de 50% da carga tributaria sobre os equipamentos fotovoltaicos importados. Desta forma, as alterações feitas no modelo de simulação, são muito semelhantes ao cenário anterior, porém se diferenciam quando ao valor calibrado, neste caso, 50% de seu valor no cenário base.
- (vi) Cenário 6: De forma análoga aos dois cenários anteriores, este cenário representa uma medida agressiva de isenção fiscal sobre os equipamentos fotovoltaicos importados, desta maneira, as variáveis *COFINS, ICMS, II, IPI e PIS*, no modelo computacional, foram ajustadas para o valor zero.
- (vii) Cenário 7: Busca simular a existência de um subsídio de 10% no valor de mercado nos equipamentos de origem nacional, desta forma, no modelo de simulação, altera-se a variável *subsídio*, que encontra-se mais precisamente no sub-modelo do mercado dos equipamentos nacionais, para o valor de 0.10.
- (viii) Cenário 8: Análogo ao cenário 7, este cenário visa representar a existência de um subsídio a tecnologia nacional de maneira moderada, sendo custeado pelo governo 20% do valor de mercado dos equipamentos. Quanto as alterações no modelo, variou-se a mesma variável do cenário anterior, porém para o valor de 0.20.
- (ix) Cenário 9: Equivalente ambos os cenários anteriores, este cenário simula o subsídio de 30% do valor de mercado dos equipamentos nacionais. Neste momento, a variável *subsídio* no modelo de simulação assume o valor de 0.30.
- (x) Cenário 10: é a combinação de todos os cenários suaves, ou seja, os cenários 1, 4 e 7.
- (xi) Cenário 11: é a combinação de todos os cenários moderados, ou seja, os cenários 2, 5 e 8.
- (xii) Cenário 12: é a combinação de todos os cenários agressivos, ou seja, os cenários 3, 6 e 9.

Uma vez apresentados os cenários se inicia o processo de simulação e análise dos resultados obtidos. Devido o modelo computacional proposto nesta pesquisa, ser um modelo de Bass, alterado para a realidade do mercado brasileiro, a primeira análise a ser feita é o número de adotantes ao longo do tempo, em todos os cenários propostos. Este por sua vez, é apresentado na Figura 50.

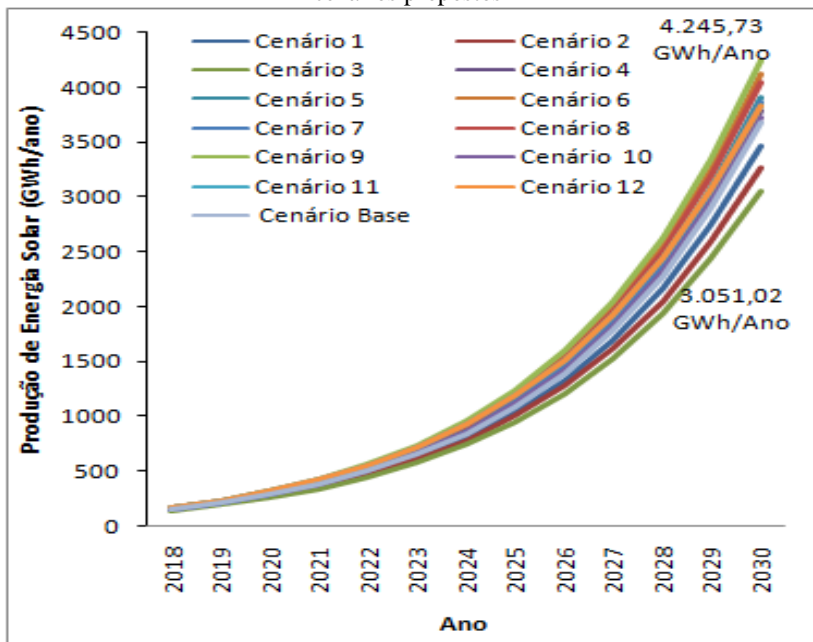
Figura 50 – Os resultados do número de adotantes dos cenários propostos



Fonte: Autor

Um dos primeiros pontos observados foi que o cenário, o qual apresenta os incentivos mais agressivos em conjunto e a maior redução no consumo de energia (Cenário 12) atinge o maior número de adotantes. O segundo ponto observado é que o subsídio nos equipamentos nacionais, por se tratar de um incentivo direto no preço final do produto, é percebido mais rapidamente pelos adotantes do que as outras políticas, e estes acabam optando pela aquisição do produto em menor tempo.

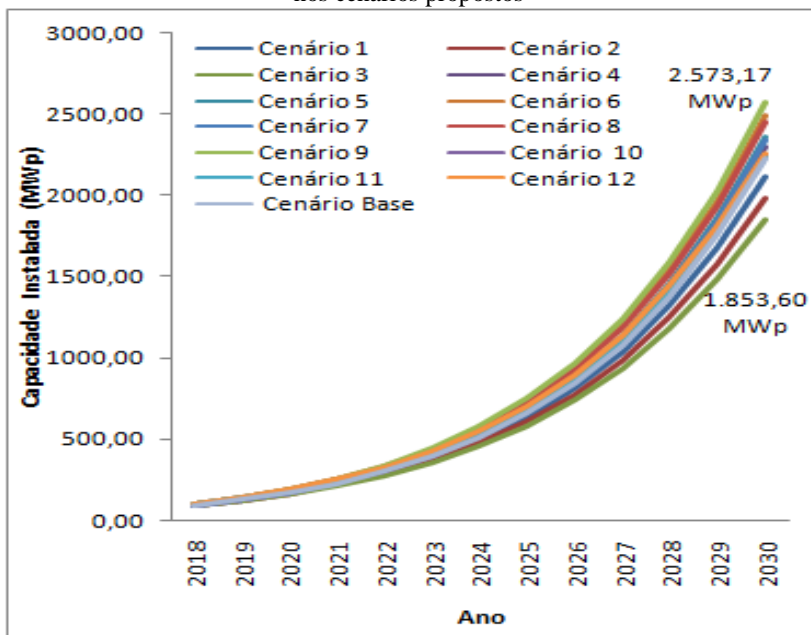
Figura 51 – Os resultados da energia gerada pelos sistemas fotovoltaicos nos cenários propostos



Fonte: Autor

Quanto os resultados da energia gerada pelos sistemas fotovoltaicos nos cenários propostos (Figura 51), os cenários subsídio e isenção fiscal apresentam melhores resultados quanto aos demais. Isto ocorre, pois a redução no consumo de energia faz com que os novos adotantes busquem equipamentos fotovoltaicos com menor capacidade de geração para suprir a necessidade de suas instalações residenciais, além disso, ainda analisando os cenários propostos percebe-se que ao fim da simulação nas melhores condições a energia gerada é capaz de suprir 1% da demanda energética atual brasileira e 3,2% da demanda energética residencial atual do país e nas piores condições esses valores caem para 0,67% e 2,3%, respectivamente, segundo EPE (2014a).

Figura 52 – Os resultados da capacidade instalada da energia solar residencial nos cenários propostos



Fonte: Autor

Já os resultados da capacidade instalada da energia fotovoltaica nos diferentes cenários (Figura 52) mostram que caso o público residencial venha adotar uma postura de redução no consumo de energia elétrica, seu valor irá reduzir, porém mesmo nos piores cenários o somatório das potências instaladas dos sistemas fotovoltaicos residenciais se aproxima da capacidade instalada de Usinas como Angra 1 e Angra 2 (1.990MW)(ANEEL, 2017a).

A Tabela 13 traz a informação do período para cada cenário, em que a média da tarifa das concessionárias atinge a igualdade de custo com a energia fotovoltaica residencial.

Tabela 13 – Período em que custo nivelado da energia solar se igual à média da tarifa das distribuidoras

Cenários	Ano
Cenário 1	2021
Cenário 2	2021
Cenário 3	2021
Cenário 4	2022
Cenário 5	2021
Cenário 6	2021
Cenário 7	2021
Cenário 8	2021
Cenário 9	2021
Cenário 10	2021
Cenário 11	2020
Cenário 12	2018
Cenário Base	2022

Fonte: Autor

Comparando os cenários com as projeções feitas pelo EPE (2014a), entende-se que todos os cenários se aproximam da previsão já feita pela empresa governamental, e alguns cenários com mais incentivos conseguem adiantar este período de paridade de custos, em um ou dois anos, em relação ao cenário base.

Por último, foram quantificados quais seriam os custos de subsídio e de isenção de impostos de cada cenário e seus impactos para o governo, caso algum destes cenários propostos se concretizasse, sendo estas informações apresentadas na Tabela 14. A intenção de apresentar estes dados é realizar um comparativo como os custos do programa Luz para Todos do Governo Federal, o qual subsidia linhas de transmissão, instalações e geração de energia isolada para comunidades carentes que não possuem acesso a energia elétrica, provando desta forma a viabilidade dos cenários propostos nesta pesquisa.

Tabela 14 – Custos dos subsídios e descontos fiscais dos cenários propostos

Cenários	Subsídio	Isenção Fiscal
Cenário 1	-	-
Cenário 2	-	-
Cenário 3	-	-
Cenário 5	-	R\$342.675.000,00
Cenário 6	-	R\$723.634.189,00
Cenário 7	R\$140.200.000,00	-
Cenário 8	R\$301.500.000,00	-
Cenário 9	R\$486.140.000,00	-
Cenário 10	R\$212.980.000,00	R\$180.993.894,00
Cenário 11	R\$445.610.000,00	R\$415.673.198,00
Cenário 12	R\$663.040.000,00	R\$905.562.801,00
Cenário Base	-	-

Fonte: Autor

De acordo com o governo federal, entre os anos 2003 e 2015, o programa Luz para Todos beneficiou 15,6 milhões de residências tendo um custo de 22,7 Bilhões de reais, aos governos federais e estaduais e distribuidoras de energia (MME, 2016).

A Tabela 15 traz as informações referentes aos custos por residência beneficiadas pelas políticas dos cenários propostos e pelo programa de desenvolvimento de infra-estrutura de energia a população carente.

Tabela 15– Custos por domicílio dos subsídios e descontos fiscais dos cenários propostos

Cenários	Subsídio	Isenção Fiscal
Cenário 1	-	-
Cenário 2	-	-
Cenário 3	-	-
Cenário 4	-	R\$290,50
Cenário 5	-	R\$579,35
Cenário 6	-	R\$1223,43
Cenário 7	R\$224,54	-
Cenário 8	R\$491,50	-
Cenário 9	R\$755,70	-
Cenário 10	R\$340,73	R\$289,56
Cenário 11	R\$641,72	R\$598,61
Cenário 12	R\$842,27	R\$1150,35
Cenário Base	-	-
Programa Luz para Todos	R\$1455,12	-

Fonte: Autor

Comparando os resultados percebe-se que os custos por domicílios nos cenários propostos (subsídios e isenções fiscais) são próximos dos valores reais de um programa com foco no setor energético residencial. Logicamente, que se sabe que o público alvo dos programas propostos e simulados é totalmente distinto do caso real, porém a intenção desta comparação é meramente provar que os custos dos cenários apresentados não são valores fantasiosos, mas sim valores próximos de uma realidade já existente.

Caso haja interesse em uma avaliação mais detalhada dos resultados da simulação, o Apêndice C expõe as tabelas com esses dados período a período dos cenários até aqui discutidos.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 CONCLUSÃO

A presente pesquisa teve como objetivo representar o processo de difusão dos sistemas de geração de energia fotovoltaicos conectados à rede elétrica em residências brasileiras com o passar dos anos sob diferentes cenários através da metodologia de simulação de Dinâmica de Sistemas. Dentre os modelos de difusão revisados no estudo, o modelo de Bass se mostrou mais adequado por sua simplicidade e proximidade com os conceitos dos estudos de disseminação de inovações feitos Rogers. Além disso, o modelo elaborado se baseou em características socioeconômicas do público alvo, do ponto de igualdade de valor entre a tarifa da rede e o custo da tecnologia, a evolução da curva de aprendizado e a dependência tecnológica estrangeira.

Diversos fatores influenciaram na decisão das residências pela aquisição dos sistemas fotovoltaicos. Estes podem ser divididos endógenos (conhecimento da tecnologia, consciência ambiental e etc.) e exógenos (custos, estrutura do mercado, regulamentação e etc.). Ainda, através dos resultados analisados pode-se concluir que, conforme esperado, o fator custo tem a maior importância na tomada de decisão pela grande parte dos consumidores. Entretanto, salienta-se que a difusão de inovações é acima de tudo um processo social, e que seu êxito não está simplesmente fundamentado em soluções técnica e racionais. No presente caso, a adoção em massa dos equipamentos não depende apenas, por exemplo, da redução do seu elevado preço, mas sim de uma mudança de paradigma. O consumidor deve passar por uma transição do seu papel passivo frente ao suprimento energético, em sentido ao uma posição ativa de produção de toda ou parte de sua energia consumida mensalmente e consequentemente contribuindo para a solução dos problemas energéticos do país. Simultaneamente, essa mudança de perfil deve ocorrer entre os agentes do setor elétrico e do planejamento energético nacional. Devido ao histórico brasileiro de grandes empreendimentos de geração elétrica, é natural que os agentes deste setor não tenham tanta confiança da importância da geração distribuída para o abastecimento energético nacional. Porém, é importante que estes tenham a consciência de que a geração distribuída, principalmente a fotovoltaica já é uma tendência mundial.

Dados os resultados do modelo, estima-se que em 2030 haja aproximadamente 558 mil residências brasileiras com sistemas fotovoltaicos conectados à rede no cenário base. Este número de

instalações resulta em uma potência instalada de aproximadamente 2,23GWp, com geração de 3.685GWh para o ano final da análise. Nos próximos anos o número de instalações ainda deve ser pequeno, oriundo basicamente da parcela inovadora da população. Porém, a partir da década de 2020 a geração distribuída fotovoltaica se consolida como uma opção de geração própria, ao se tornar mais barata que as tarifas médias das distribuidoras e além de ser mais conhecida pela a sociedade, a ponto de experimentar um número mais substancial de instalações anuais.

Complementarmente, o modelo buscou simular diversos cenários de incentivo fiscal e subsídio, além de uma mudança no padrão de consumo energético por parte do mercado consumidor residencial. O subsídio dos equipamentos fotovoltaicos de origem nacional apresentou-se como uma medida mais atrativa inicialmente, por ter influencia direta sobre o preço final do produto. Nesta condição o país possuiria entre 2,35 GWp a 2,57 GWp dependendo da intensidade do subsídio.

Destaca-se especialmente os cenários de redução do consumo energético do mercado residencial, no qual verifica-se os impactos de uma mudança na tendência de comportamento de consumo de energia elétrica teria na difusão dos sistemas fotovoltaicos. Essa mudança resultou em uma redução na capacidade instalada (1,85GWp a 2,11GWp dependendo do cenário) em relação ao cenário base, tendo em vista que os novos usuários iriam optar pela aquisição de equipamentos de menor potência para suprir sua nova necessidade de energia elétrica. Além disso, testou-se os impactos das isenções fiscais nos equipamentos de origens importadas, estes cenários por sua vez apresentaram em uma redução na aquisição dos equipamentos de origem nacional. Finalmente, nos cenários das medias conjuntas, simulado maior esforço para promover a geração descentralizada fotovoltaica, projetou-se uma potência 2,25GWp ao final do horizonte da análise.

Estes valores são inferiores às atuais capacidades instaladas em outros países líderes econômicos, no entanto, o processo de difusão nestes países já foi iniciado anteriormente através de grandes incentivos. O Brasil, por sua vez, possui uma condição menos propicia para o investimento e, dado o contexto mundial da indústria fotovoltaica, deve experimentar um crescimento gradual e sustentável através de um mercado mais autônomo.

7.2 LIMITAÇÕES

Conforme exposto na conclusão, a difusão é um processo social. Portanto, grande parte das limitações de um modelo de difusão, incluindo este, é proveniente da subjetividade presente no comportamento humano. Estudos vêm sendo feitos para mapear as decisões da população frente a um investimento em energia fotovoltaica (DENHOLM, PAUL; MARGOLIS; DRURY, 2009; DRURY; DENHOLM; MARGOLIS, 2010; KONZEN, 2014), mas, dada a relativa incipiência deste mercado, ainda se tem pouca informação. Independente disso, incertezas sempre existirá dada a natureza humana.

Tendo em vista o intervalo de integração do modelo ser anual, algumas circunstâncias como variação da irradiação solar durante o ano, as bandeiras tarifárias cobradas sobre tarifa de energia e o programa de crédito da energia excedente gerada, não conseguem ser representados neste modelo.

Adicionalmente, pela geração distribuída fotovoltaica conectada à rede ser recente no Brasil, com início em 2013, a calibração do modelo através de dados históricos é limitada, tendo em vista que como mais dados históricos os valores dos parâmetros “p” e “q” podem mudar em relação aos utilizados nesta pesquisa.

7.3 SUGESTÕES PARA OS TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista a melhoria nas projeções da difusão da geração fotovoltaica distribuída no país, outros estudos podem ser desenvolvidos, no que diz respeito aos incentivos ao setor, além de subsídios e isenções fiscais, como por exemplo, programas de financiamento, compra coletiva, *leasing*, programas de crédito na tarifa de energia entre outros.

Além disso, outra sugestão que pode ser feita, no âmbito de buscar melhores projeções, é de em um futuro próximo, quando houver mais dados históricos de adotantes de energia solar é possível se fazer a determinação dos parâmetros “p” e “q” através do método dos mínimos quadrados não lineares. Desta forma, sendo possível projetar o número de futuros adotantes desta tecnologia com maior confiabilidade.

Ademais, a presente pesquisa se limitou à análise ao setor de residências próprias. Porém, para o futuro as instalações no setor comercial e industrial devem ser investigadas. Tendo em vista, que estes setores seguem uma lógica de investimento mais racional, baseada na taxa de retorno, fatores como propaganda e publicidade também tendem

a nortear os investimentos em energia renovável. Logo, avaliar a inserção nestes setores também seria adequado.

REFERÊNCIAS

ABEPRO. Referências de conteúdos da Engenharia de Produção. 2017. Disponível em: <
<http://www.abepro.org.br/arquivos/websites/1/Áreas%20da%20Engenharia%20de%20Produção.pdf>>. Acesso em: 18 setembro 2017.

ABINEE. Propostas para inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira. 1510344518, 2012. Disponível em: <
<http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/profotov.pdf>>.

ABRADEE. Banco de dados do setor de distribuição de energia. 2017. Disponível em: <
<http://www.abradee.com.br/setor-de-distribuicao/banco-de-dados/financeiro>>. Acesso em: 27 de junho.

ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. Distributed generation: a definition. *Electric power systems research*, 1510344516, v. 57, n. 3, p. 195-204, 2001. ISSN 0378-7796.

AHMAD, S.; TAHAR, R. B. Using system dynamics to evaluate renewable electricity development in Malaysia. *Kybernetes*, 1493911144, v. 43, n. 1, p. 24-39, 2014. ISSN 0368-492X. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000330599400003 >.

ANEEL. *RESOLUÇÃO NORMATIVA N°482*. Brasília (Brasil) 2012.

_____. *Cadernos Temáticos Micro e Minigeração Distribuída. Sistema de Compensação de Energia Elétrica*. Brasília, DF, Brasil: Centro de Documentação–Cedoc 2014.

_____. *RESOLUÇÃO NORMATIVA N°687*. Brasília (Brasil) 2015.

_____. Banco de Dados da Geração Distribuída 2017a. Disponível em: <
<http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/VerGD.asp>>. Acesso em: 10 de janeiro

_____. Banco de Informação de Geração. *Agência Nacional Energia Elétrica–ANEEL*. Disponível em:<
<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil>. cfm.> Acesso em 10/11/2017, 1510344555, 2017b.

_____. *Entendendo a Tarifa* 2017c.

_____. *Relatórios de Consumo e Receita de Distribuição Elétrica*. Brasília (Brasil) 2017d.

ARGOTE, L.; EPPLÉ, D. Learning curves in manufacturing. *Science*, 1519697967, v. 247, n. 4945, p. 920-924, 1990. ISSN 0036-8075.

BANCOCENTRAL. *Sistema de Expectativas de Mercado*. 2017 2017.

BARBOSE, G. *Tracking the Sun VI: An Historical Summary of the Installed Price of Photovoltaics in the United States from 1998 to 2012*. LABORATORY, B. L. B. N. 2013.

BARBOSE, G. et al. Tracking US photovoltaic system prices 1998-2012: a rapidly changing market. *Progress in Photovoltaics*, 1502158838, v. 23, n. 6, p. 692-704, Jun 2015. ISSN 1062-7995. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000353388800003
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pip.2482/abstract> >.

BASS, F. A new product growth for model consumer durables. *Management Science*, 1510344487, v. v. 15, n. n. 5, p. p. 215-227, 1969.

BECK, R. Distributed renewable energy operating impacts and valuation study. *Prepared for Arizona Public Service*. Seattle, WA, 1510344530, 2009.

BLACKMAN, A. W. The rate of innovation in the commercial aircraft jet engine market. *Technological Forecasting and Social Change*, 1510344488, v. 2, n. 3-4, p. 269-276, 1971. ISSN 0040-1625.

BORSHCHEV, A.; FILIPPOV, A. From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: reasons, techniques, tools. Proceedings of the 22nd international conference of the system dynamics society, 2004.

CANDELISE, C.; WINSKEL, M.; GROSS, R. The dynamics of solar PV costs and prices as a challenge for technology forecasting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1510344524, v. 26, p. 96-107, 2013. ISSN 1364-0321.

CARVALHO, P.; MESQUITA, P.; ROCIO, M. A rota metalúrgica de produção de silício grau solar: uma oportunidade para a indústria brasileira? *BNDES Setorial, Rio de Janeiro*, 1510344520, n. 40, 2014.

CHEN, Z. S.; SU, S. L. I. The joint bargaining coordination in a photovoltaic supply chain. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 1502158838, v. 8, n. 3, p. 14, May 2016. ISSN 1941-7012. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000379170900030 <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4950990> >.

CHOW, G. Technological change and the demand for computers. *The American Economic Review*, 1510344486, v. 57, n. 5, p. 1117-1130, 1967. ISSN 0002-8282.

CHOWDHURY, S. et al. Importance of policy for energy system transformation: Diffusion of PV technology in Japan and Germany. *Energy Policy*, 1493911144, v. 68, p. 285-293, May 2014. ISSN 0301-4215. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000334130900027 >.

COLLE, S.; PEREIRA, E. B. *Atlas de irradiação solar do Brasil*. Brasília: INMET 1998.

COYLE, R. *System dynamics modelling: a practical approach*. CRC Press, 1996. ISBN 0412617102.

CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I. Residential photovoltaic plant: environmental and economical implications from renewable support policies. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 1502158838, v. 17, n. 7, p. 1929-1944, Oct 2015. ISSN 1618-954X. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000361392800018 <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10098-015-0913-1> >.

DAVIDSON, C.; STEINBERG, D.; MARGOLIS, R. Exploring the market for third-party-owned residential photovoltaic systems: insights from lease and power-purchase agreement contract structures and costs in California. *Environmental Research Letters*, 1502158838, v. 10, n. 2, p. 12, Feb 2015. ISSN 1748-9326. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000350573500008 <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/10/2/024006/pdf> >.

DAVIES, J.; JOGLEKAR, N. Supply Chain Integration, Product Modularity, and Market Valuation: Evidence from the Solar Energy Industry. *Production and Operations Management*, 1502158838, v. 22, n. 6, p. 1494-1508, Nov 2013. ISSN 1059-1478. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000327302200014 <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/poms.12052/abstract> >.

DE LA TOUR, A.; GLACHANT, M.; MÉNIÈRE, Y. Predicting the costs of photovoltaic solar modules in 2020 using experience curve models. *Energy*, 1510344523, v. 62, p. 341-348, 2013. ISSN 0360-5442.

DENHOLM, P. Grid Energy Storage: Benefits and Challenges to Modernizing the Electric Grid. In: (Orgs.). *Energy storage technologies.*, 2014. p.p.71-120. .

DENHOLM, P.; DRURY, E.; MARGOLIS, R. *Solar Deployment System (SolarDS) Model: Documentation and Sample Results*. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO. 2009

DRURY, E.; DENHOLM, P.; MARGOLIS, R. *Modeling the US rooftop photovoltaics market*. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO. 2010

ENSSLIN, L. et al. ProKnow-C, knowledge development process-constructivist. *Processo técnico com patente de registro pendente junto ao INPI. Brasil*, 1510344502, v. 10, n. 4, p. 2015, 2010.

EPE. Análise da inserção da geração solar na matriz elétrica brasileira. *Nota Técnica da EPE*, 1510344517, 2012.

_____. *Anuário estatístico de energia elétrica 2013*. Rio de Janeiro (Brasil) 2013.

_____. Estudos de Demanda de Energia Empresa de Pesquisa Energética-Ministério de Minas e Energia. 1510344554, 2014a.

_____. *Inserção da geração fotovoltaica distribuída no Brasil-condicionantes e impactos*. Nota Técnica. Rio de Janeiro 2014b.

EPIA. *Global Market Outlook 2015-2020*. Bruxelas (Bélgica) 2015.

ERWES, H.; FORLI, C.; DEVIENNE FILHO, R. Condições de Importação de Equipamentos de Mini & Micro-Geração Distribuída Fotovoltaica no Brasil. 1510344535, 2012.

FELDMAN, D. E. A. Photovoltaic System Pricing Trends - Historical, Recent, and Near-Term Projections 1510344480, 2015. Disponível em: < https://emp.lbl.gov/sites/all/files/pv_system_pricing_trends_presentation_0.pdf >.

FIGUEIREDO, J. C. B. Estudo da difusão da tecnologia móvel celular no Brasil: uma abordagem com o uso de Dinâmica de Sistemas. *Production*, 1515508402, v. 19, n. 1, p. 230-245, 2009. ISSN 0103-6513.

FISHER, J. C.; PRY, R. H. A simple substitution model of technological change. *Technological forecasting and social change*, 1510344488, v. 3, p. 75-88, 1971. ISSN 0040-1625.

FLOYD, A. Trend forecasting: A methodology for figure of merit. *Technological forecasting for industry and government*, 1510344486, p. 95-105, 1968.

FORRESTER, J. Counterintuitive behavior of social systems. *Technology Review*, 1510344497, v. v. 73, p. p. 53-68, 1971.

_____. System dynamics and learner-centered-learning in kindergarten through 12th grade education. *Text of remarks delivered December*, 1510344506, v. 12, p. 1992, 1992.

FORRESTER, J.; SENGE, P. Tests for building confidence in system dynamics models. *System dynamics, TIMS studies in management sciences*, 1510344510, v. 14, p. 209-228, 1980.

FOURT, L.; WOODLOCK, J. Early prediction of market success for new grocery products. *The Journal of Marketing*, 1510344485, p. 31-38, 1960. ISSN 0022-2429.

FRAUNHOFER, I.-. *Electricity production from solar and wind in Germany in 2014* ENERGIESYSTEME, I. F. S. Berlin (Germany) 2015.

GOLDEMBERG, J. The promise of clean energy. *Energy Policy*, 1510344479, v. v.34, n. n. 15, p. p. 2185-2190, 2006.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. *Energia, meio ambiente e desenvolvimento*. 2008.

GUIDOLIN, M.; MORTARINO, C. Cross-country diffusion of photovoltaic systems: modelling choices and forecasts for national adoption patterns. *Technological forecasting and social change*, 1508356046, v. 77, n. 2, p. 279-296, 2010. ISSN 0040-1625.

GUO, X. D.; GUO, X. P. China's photovoltaic power development under policy incentives: A system dynamics analysis. *Energy*, 1493911145, v. 93,

p. 589-598, Dec 2015. ISSN 0360-5442. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000367630200054 >.

GUO, X. D.; NIU, D. X.; XIAO, B. W. Assessment of Air-Pollution Control Policy's Impact on China's PV Power: A System Dynamics Analysis. *Energies*, 1493911145, v. 9, n. 5, p. 23, May 2016. ISSN 1996-1073. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000377263400028 >.

HELENE, O. *Metodos dos Minimos Quadrados*. Editora Livraria da Física, 2006. ISBN 8588325543.

HSU, C. W. Using a system dynamics model to assess the effects of capital subsidies and feed-in tariffs on solar PV installations. *Applied Energy*, 1493911145, v. 100, p. 205-217, 2012. Disponível em: < <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84867713486&doi=10.1016%2fj.apenergy.2012.02.039&partnerID=40&md5=24a35f3084ed9bfafbe4377a32704e18> >.

HSUEH, J. T.; LIN, C. Y. Constructing a network model to rank the optimal strategy for implementing the sorting process in reverse logistics: case study of photovoltaic industry. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 1502158838, v. 17, n. 1, p. 155-174, Jan 2015. ISSN 1618-954X. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000347287400015 <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10098-014-0770-3> >.

IBGE. *Censo demográfico do Brasil 2010* 2010.

JANG, S. L. et al. Innovation and production in the global solar photovoltaic industry. *Scientometrics*, 1502158838, v. 94, n. 3, p. 1021-1036, Mar 2013. ISSN 0138-9130. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000314753500015 <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11192-012-0907-2> >.

JANNUZZI, G. D. M.; DE MELO, C. A. Grid-connected photovoltaic in Brazil: Policies and potential impacts for 2030. *Energy for Sustainable Development*, 1502158838, v. 17, n. 1, p. 40-46, 2013. Disponível em: < <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84871955112&doi=10.1016%2fj.esd.2012.10.010&partnerID=40&md5=1c0700e23856e0902e7fa878023c156a> >.

JEON, C.; LEE, J.; SHIN, J. Optimal subsidy estimation method using system dynamics and the real option model: Photovoltaic technology case.

Applied Energy, 1493911145, v. 142, p. 33-43, Mar 2015. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000350935100004 >.

JEULAND, A. P. The Bass model as a tool to uncover empirical generalizations in diffusion of innovation. Empirical Generalizations Conference, Wharton School, February, 1994.

JIMENEZ, M.; FRANCO, C. J.; DYNER, I. Diffusion of renewable energy technologies: The need for policy in Colombia. *Energy*, 1493911145, v. 111, p. 818-829, 2016. ISSN 0360-5442.

KONZEN, G. *Difusão de sistemas fotovoltaicos residenciais conectados à rede no Brasil: uma simulação via modelo de BASS*. 2014. Universidade de São Paulo

KURTZ DOS SANTOS, A. et al. Modelagem Computacional Utilizando STELLA—considerações teóricas e aplicações em gerenciamento, física e ecologia de sistemas. *da Furg*, 1510344507, 2002.

LILIE, G. L.; RANGASWAMY, A.; BRUYN, A. D. The Bass model: marketing engineering technical note. *Principles of Marketing Engineering*, 1515528067, 2007.

MAHAJAN, V. E. A. Determination of Adopter Categories by Using Innovation Diffusion Models. *Journal of Marketing Research*, 1510344497, v. 27, p. 37-50, 1990.

MME. *Relatório Estatístico Programa Luz Para Todos 2015*. Brasília Ministério de Minas e Energia 2016.

MONTENEGRO, A. Avaliação do retorno do investimento em sistemas fotovoltaicos integrados a residências unifamiliares urbanas no Brasil. 1510344526, 2013.

MORECROFT, J.; ROBINSON, S. Explaining puzzling dynamics: comparing the use of system dynamics and discrete-event simulation. Proceedings of the 23rd International Conference of the System Dynamics Society, 2005. p.17-21.

MOVILLA, S.; MIGUEL, L. J.; BLAZQUEZ, L. F. A system dynamics approach for the photovoltaic energy market in Spain. *Energy Policy*, 1493911145, v. 60, p. 142-154, Sep 2013. ISSN 0301-4215. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000323530900015 >.

NAKABAYASHI, R. *Microgeração fotovoltaica no Brasil: condições atuais e perspectivas futuras*. 2014. Universidade de São Paulo

NEMET, G. F. Beyond the learning curve: factors influencing cost reductions in photovoltaics. *Energy Policy*, 1493911145, v. 34, n. 17, p. 3218-3232, Nov 2006. ISSN 0301-4215. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000241644200053 >.

OLIVEIRA, W. *Avaliação e gestão de projectos de energia eólica onshore*. 2010. Universidade de Aveiro

PEREIRA, E. B. et al. *Atlas brasileiro de energia solar*. INPE, 2006.

PIDD, M. Contemporary OR/MS in strategy development and policy-making: Some reflections. *Journal of the Operational Research Society*, 1510344504, v. 55, n. 8, p. 791-800, 2004. ISSN 0160-5682.

PPGEP. Referências de conteúdos da Engenharia de Produção. 2016. Disponível em: < <http://ppgep.ufsc.br/inteligencia-organizacional/> >. Acesso em: 28 janeiro 2016.

QUDRAT-ULLAH, H. Structural validation of system dynamics and agent-based simulation models. 19th European Conference on Modelling and Simulation, Riga, Latvia, 2005.

RAI, V.; BECK, A. L. Public perceptions and information gaps in solar energy in Texas. *Environmental Research Letters*, 1502158838, v. 10, n. 7, p. 9, Jul 2015. ISSN 1748-9326. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000366759200014 <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/10/7/074011/pdf> >.

RAI, V.; ROBINSON, S. A. Effective information channels for reducing costs of environmentally-friendly technologies: evidence from residential PV markets. *Environmental Research Letters*, 1502158838, v. 8, n. 1, p. 8, Jan-Mar 2013. ISSN 1748-9326. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000316998300052 <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/1/014044/pdf> >.

RAI, V.; SIGRIN, B. Diffusion of environmentally-friendly energy technologies: buy versus lease differences in residential PV markets. *Environmental Research Letters*, 1502158838, v. 8, n. 1, p. 8, Jan-Mar

2013. ISSN 1748-9326. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000316998300030 <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/1/014022/pdf> >.

RESEARCH, G. *Solar PV Balance of System (BOS) Markets: Technologies, Costs and Leading Companies, 2013-2016*. 2013.

ROGERS, E. Diffusion and Innovation. Glencoe. *The Free Press*.(1976), " *New Product Adoption and Diffusion*," *The Journal of Consumer Research*, 1510344494, 1962.

_____. *The Diffusion of Innovations*. 5th edition. New York (USA): The Free Press, 2003.

SALAMONI, I. T.; RUTHER, R.; ZILLES, R. Uma oportunidade para o desenvolvimento da indústria fotovoltaica no Brasil: eletricidade solar para os telhados. *Parcerias Estratégicas*, 1510344534, v. 14, n. 28, 2009. ISSN 1413-9375.

SCHIFFMAN, L.; KANUK, L. *Consumer Behaviour (ed.)*. Englewood: New Jersey: Prentice Hall 2009.

SENGE, P. M. *The system dynamics national model investment function: a comparison to the neoclassical investment function*. 1978. Massachusetts Institute of Technology

SENGE, P. M. et al. *A quinta disciplina: caderno de campo: estratégias e ferramentas para construir uma organização que aprende*. 1995. ISBN 8573030453.

SILVA, R. M. D. Energia solar no Brasil: dos incentivos ao desafios. 1510344517, 2015.

SINGHAL, A. *Introducing Professor Everett M. Rogers*. 47th Annual Research Lecturer. University of New Mexico 2002.

SOBRAL, J. *Modelos de substituição tecnológica e suas aplicações ao setor de fibras têxteis no Brasil*. 1977. (Mestre). Pós-graduação em Engenharia de Produção, UFRJ, Rio de Janeiro.

SOLOMON, M. E. A. *Consumer behaviour*. Pearson Higher Education AU, 2012. ISBN 1442564997.

STERMAN, J. Appropriate summary statistics for evaluating the historical fit of system dynamics models. *Dynamica*, 1510344515, v. 10, n. 2, p. 51-66, 1984.

_____. *Business dynamics. Systems thinking and modeling for a complex world*. Boston: Mc Graw Hill Higher Education, 2000.

SU, Y. S. Competing in the Global Solar Photovoltaic Industry: The Case of Taiwan. *International Journal of Photoenergy*, 1502158838, p. 11, 2013. ISSN 1110-662X. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000316129300001 <http://downloads.hindawi.com/journals/ijp/2013/794367.pdf> >.

SULTAN, F.; FARLEY, J.; LEHMANN, D. R. A meta-analysis of applications of diffusion models. *Journal of marketing research*, 1515590703, p. 70-77, 1990. ISSN 0022-2437.

SULTAN, F. W., R. . Time preferences for products and attributes and the adoption of technologydriven consumer durable innovations. *Journal of Economic Psychology*, 1510344485, v. v. 14, n. n. 4, p. p. 587-613, 1993.

ZILLES, R. E. A. *Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica*. São Paulo: 2012.

APÊNDICE A – Procedimento de Revisão de Literatura e Bibliometria

A utilização de método estruturado para revisão da literatura busca garantir um alinhamento dos trabalhos selecionados com o modelo que pretende-se desenvolver, também, oferecer um relato do processo realizado.

Conforme o processo *Knowledge Development Process – Constructivist*, adotado nessa pesquisa, primeiramente são definidas as palavras-chave a serem utilizadas no levantamento junto a base de dados, para posteriormente serem escolhidas as bases de dados e como última etapa deste processo é feita a seleção dos artigos resultando na definição do portfólio bibliográfico utilizado neste trabalho (ENSSLIN *et al.*, 2010).

Para a definição das palavras-chave primeiramente foi definido o eixo da pesquisa, no presente trabalho sendo a energia solar fotovoltaica.

Posteriormente escolhidos os termos que representam o eixo. Estes termos em conjunto formam as palavras-chave da pesquisa. Todavia, para que os termos estejam de acordo com o eixo da pesquisa foi conduzido um processo de seleção.

Neste processo de seleção foram coletadas literaturas físicas e digitais junto a Biblioteca Universitária (BU) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) na intenção de se identificar os principais termos utilizados em trabalhos com eixos de pesquisa próximo ao presente trabalho. Uma leitura não estruturada foi realizada nestes trabalhos. Sendo que desta resultou a seleção dos principais termos. Vale destacar que uma análise qualitativa e outra quantitativa, foram conduzidas nestes trabalhos. A análise qualitativa buscou verificar se o termo refere-se somente ao que o eixo de pesquisa representa. Já a análise quantitativa selecionou os termos que apresentaram maior número de resultados e, assim sendo, refletindo uma maior aderência ao eixo de energia solar fotovoltaica. O Quadro 1 apresenta os termos adotados.

Quadro 6 – Termos da Pesquisa

Eixo	Termos	Palavras-chave
Energia solar fotovoltaica	<i>solar energy, fotovoltaic e solar PV</i>	“ <i>solar energy</i> ” AND “ <i>fotovoltaic</i> ” AND “ <i>solar PV</i> ”

Fonte: Autor

As bases de dados consideradas mais alinhadas ao tema abordado forneceram o banco de artigos brutos para a filtragem no processo de seleção dos trabalhos. Essas bases dados são expostas no Quadro 7 que mostra a contribuição de cada base para este banco de artigos, durante a pesquisa em 16 janeiro de 2017. A quantidade total de artigos foi considerável, porém o processo de seleção reduziu este montante ao portfólio final.

Quadro 7 – Base de dados utilizada para o banco de artigos brutos

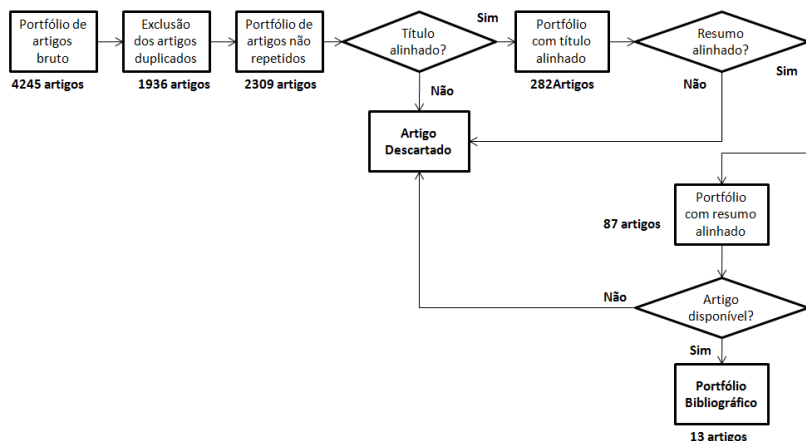
Base de dados	Número de Artigos
Scopus	328
<i>Web of Science</i>	1645
<i>Science Direct</i>	1735
Ebsco	367
Emerald	170
Total	4245

Fonte: Autor.

Posteriormente foi utilizado *software* EndNote® versão X7 para gerenciar e tratar as referências coletadas. A ferramenta Endnote é um gestor de referências bibliográficas produzido pela Thomson Scientific que trabalha de forma integrada às bases de dados. Facilitando a investigação e a escrita científica, permite reunir referências bibliográficas de bases de dados *online*, importar os metadados e agrupá-los de diversas formas.

A seleção dos artigos inicia pela filtragem quanto à redundância. Nessa etapa o *software* EndNote® localiza e exclui os artigos replicados. Os artigos ainda são filtrados quanto o alinhamento do título e quanto o alinhamento do resumo. Ambas as etapas são conduzidas de maneira subjetiva, porém com vista aos objetivos do trabalho. Na sequência é verificada a disponibilidade de acesso a leitura destes artigos. Esse processo e o resultado de cada etapa são ilustrados na Figura 13.

Figura 53 - Etapas do processo de revisão bibliográfica com seus respectivos resultados.



Fonte: Autor

O portfólio bibliográfico resultante foi o único em que todos os trabalhos contidos foram lidos na íntegra na intenção de se ter um ponto de partida para a elaboração do modelo de Dinâmica de Sistemas. Desta forma o Quadro 8 relata as principais contribuições destes artigos para o desenvolvimento da pesquisa.

Quadro 8 – Portfólio bibliográfico de base para elaboração do modelo e suas contribuições

Referência	Contribuições à pesquisa
(BARBOSE <i>et al.</i> , 2015)	Mostra a tendência de queda nos preços dos equipamentos fotovoltaicos. O trabalho foi conduzido nos EUA entre os anos de 1998 e 2012 através de uma análise de 200mil projetos de instalações fotovoltaicas residenciais e comerciais.
(CHEN; SU, 2016)	Contribui para o entendimento da cadeia produtiva das placas fotovoltaicas e com elas podem influenciar na variação do preço final ao consumidor.

(CUCCHIELLA; D'ADAMO, 2015)	Auxilia no entendimento de algumas medidas de incentivo voltadas a redução de custos dos sistemas de geração de energia fotovoltaicos. O artigo análise uma série de políticas publicas de incentivo a entrada desta tecnologia na Itália.
(DAVIDSON; STEINBERG; MARGOLIS, 2015)	Mostra os fatores de sucesso de crescimento da energia solar fotovoltaica residencial com base em um estudo de caso na Califórnia.
(DAVIES; JOGLEKAR, 2013)	Auxilia no entendimento dos impactos positivos que a modularidade dos equipamentos fotovoltaicos e da globalização da cadeia de suprimentos possui no valor final do produto.
(DENHOLM, P.; DRURY; MARGOLIS, 2009)	Contribui no entendimento da difusão da energia solar fotovoltaica no mercado residencial. O estudo faz uma análise da adoção dos sistemas fotovoltaicos residenciais nos Estados Unidos, através de um modelo de difusão de Bass.
(HSUEH; LIN, 2015)	Mostra quais são as principais empresas que fazem parte da cadeia produtiva das placas fotovoltaicas. Além disso, o trabalho propõe um modelo de logística reversa para este produto.
(JANG <i>et al.</i> , 2013)	Mostra a evolução da energia fotovoltaica entre 1996 a 2006 nas 6 principais regiões produtoras desta energia (China, EUA, Coreia do Sul, Alemanha, Japão e Taiwan). E os impactos que as políticas públicas desenvolvidas nestas regiões tiveram nesta evolução.
(JANNUZZI; DE MELO, 2013)	Mostra os impactos na tarifa de energia com a entrada da geração da energia fotovoltaica no setor residencial no Brasil. O artigo apresenta uma análise prospectiva deste setor até o ano 2030.

(RAI; BECK, 2015)	Ajuda a entender natureza do processo decisório do consumidor residencial na adoção de sistemas fotovoltaicos. O artigo faz uma análise nos adotantes do estado do Texas nos EUA e avalia as barreiras para o crescimento deste setor.
(RAI; ROBINSON, 2013)	Contribui para a compreensão dos efeitos dos diferentes canais de informação na decisão de adoção da energia fotovoltaica pelo público residencial. O trabalho analisa um grupo de adotantes no estado do Texas nos EUA.
(RAI; SIGRIN, 2013)	Ajuda compreender a natureza do processo decisório do consumidor residencial na adoção de sistemas fotovoltaicos. O artigo tem foco nas métricas financeiras e seus impactos no processo decisório.
(SU, 2013)	Ajuda a entender as tendências de desenvolvimento da indústria de energia solar fotovoltaica, com base em um estudo de caso com as principais empresas produtoras de células fotovoltaicas de Taiwan.

Fonte: Autor

Com isto está formada a portfólio bibliográfico base para elaboração do modelo de simulação proposto nesta dissertação.

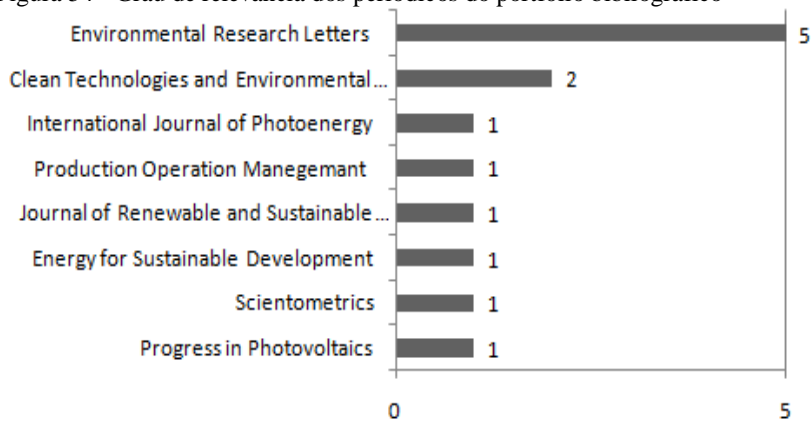
A análise bibliométrica do portfólio de artigos auxilia na construção de uma visão geral dos trabalhos utilizados como referência para a elaboração do modelo desta pesquisa. Por meio da contagem de documentos, evidencias os dados estatísticos do conjunto de artigos para a gestão da informação e conhecimento científico do assunto abordado (ENSSLIN *et al.*, 2010)

Dois aspectos quantitativos foram observados nesta análise. O grau de relevância dos periódicos, com base no número de artigos que pertences ao periódico e o reconhecimento científico dos artigos, com base no número de citações do artigo na data de pesquisa, determinado com auxílio do Google Acadêmico®.

O grau de relevância dos periódicos do portfólio bibliográfico é obtido utilizando o número de artigos (integrantes do portfólio)

publicados no periódico. A Figura 14 mostra o periódico “*Environmental Research Letters*” em destaque com cinco artigos integrando o portfólio.

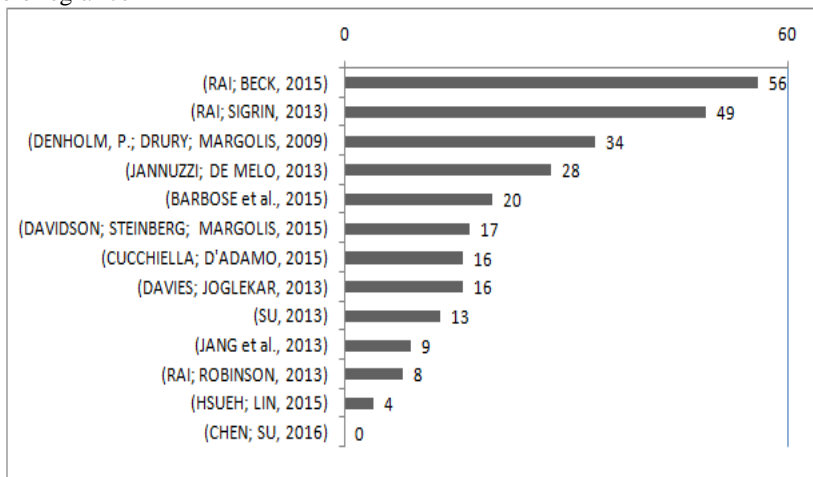
Figura 54 - Grau de relevância dos periódicos do portfólio bibliográfico



Fonte: Autor

O reconhecimento científico dos artigos integrantes do portfólio foi analisado através do número de citações que o artigo recebeu, determinado com auxílio do Google Acadêmico em janeiro 2017. Pela Figura 15 é possível constatar que os artigos (RAI; BECK, 2015) e (RAI; SIGRIN, 2013) possui 42% do total de citações dos artigos do portfólio bibliográfico. De maneira geral os artigos mais antigos possuem um número de citações maior em relação aos publicados posteriormente. Apenas um artigo não apresenta citações, porém esta não é especificamente uma condição para a sua exclusão do portfólio. O processo de seleção dos artigos do portfólio visa ajudar na análise de trabalhos alinhados ao estudo específico, visto que artigos mais recentes podem ainda não apresentar um grande reconhecimento científico.

Figura 55 - Reconhecimento científico dos artigos integrantes do portfólio bibliográfico



Fonte: Autor

Ainda se ressalta que participaram para a elaboração dos trabalhos que integram o portfólio um total de 30 autores. Destes, “Rai, V.” participou de três artigos do portfólio e os autores “Sigrin, B” e “Su, Y. S.” participaram da autoria de dois artigos. Enquanto, os demais autores participaram apenas da elaboração de um artigo do portfólio.

APÊNDICE B – Equações do Modelo

Capacidade de Aprendizado

- $Experiencia_Acumulada(t) = Experiencia_Acumulada(t - dt) + (Taxa_de_Experiencia) * dt$
INIT $Experiencia_Acumulada = 100$
INFLOWS:
 $\rightarrow Taxa_de_Experiencia = Taxa_de_Adocao_Solar$
- $Experiencia = (Experiencia_Acumulada/Experiencia_Incial)^{Taxa_Exponencial}$
- $Experiencia_Incial = 100$
- $Taxa_Exponencial = -0.03$

Custo da Energia Solar

- $Custo_da_Energia_Produzida_R\$/kWh = ((Depreciacao_anual_*\%*((1+Depreciacao_anual_*\%)*Vida_util_do_Equipamento)/((1+Depreciacao_anual_*\%)*Vida_util_do_Equipamento)-1)+Manutencao_*\%*(Investimento_Incial/(8.76*Fator_de_C_apacidade))/1000)$
- $Depreciacao_anual_*\% = 0.12$
- $Fator_de_Capacidade = Energia_Gerada_por_uma_Residencia_por_Ano_kWh/ano/(Potencia_Instalada_kWp*365*Horas_de_incidencia_solar_diaria_produtiva)$
- $Horas_de_incidencia_solar_diaria_produtiva = 8$
- $Investimento_Incial = (Custo_Total_Equipamento_Importado+Custo_Total_Equipamento_Nacional)/2$
- $Manutencao_*\% = 0.01$
- $Vida_util_do_Equipamento = 25$

Difusao dos Equipamentos


- $Residencias_Aceitam_Adotam_a_Energia_Fotovoltaica(t) = Residencias_Aceitam_Adotam_a_Energia_Fotovoltaica(t - dt) + (Taxa_de_Adocao_Solar) * dt$
INIT $Residencias_Aceitam_Adotam_a_Energia_Fotovoltaica = 0.0000000001$
INFLOWS:
 $\rightarrow Taxa_de_Adocao_Solar = Adocao_por_Propaganda+Adocao_por_Contato_Social$
- $Residencias_sem_Energia_Solar(t) = Residencias_sem_Energia_Solar(t - dt) + (Taxa_de_Cresimento_Residencial - Taxa_de_Adocao_Solar) * dt$
INIT $Residencias_sem_Energia_Solar = Residencias_com_condicoes_de_aquisicao-Residencias_Aceitam_Adotam_a_Energia_Fotovoltaica$
INFLOWS:
 $\rightarrow Taxa_de_Cresimento_Residencial = Incremento_Liquido_da_Populacao$
OUTFLOWS:
 $\rightarrow Taxa_de_Adocao_Solar = Adocao_por_Propaganda+Adocao_por_Contato_Social$
- $Adocao_por_Contato_Social = Taxa_de_interacao_Social_Q'*Potenciais_Adotantes_da_Energia_Solar*(Residencias_Aceitam_Adotam_a_Energia_Fotovoltaica/Residencias_com_condicoes_de_aquisicao)$
- $Adocao_por_Propaganda = Potenciais_Adotantes_da_Energia_Solar*Efetividade_das_acoes_de_publicidade_P'$
- $Efetividade_das_acoes_de_publicidade_P' = .0015$
- $Taxa_de_interacao_Social_Q' = 0.3$

Mercado Consumidor

- $Residencias_com_condicoes_de_aquisicao(t) = Residencias_com_condicoes_de_aquisicao(t - dt) + (Incremento_Liquido_da_Populacao) * dt$
INIT $Residencias_com_condicoes_de_aquisicao = 3815115$
INFLOWS:
 - ☞ $Incremento_Liquido_da_Populacao = Residencias_com_condicoes_de_aquisicao * Incremento_Fracionario_da_Populacao$
- $Consumo_de_uma_Residencia_por_ano_kWhlano = 12 * Media_do_consumo_de_uma_Residencia_por_mes_kWhlmes$
- $Demanda_Total_de_energia_das_Residencias_kWhlano = Residencias_com_condicoes_de_aquisicao * Consumo_de_uma_Residencia_por_ano_kWhlano$
- $Fracao_do_mercado_disposto_a_adotar = EXP(-0.3 * Relacao_entre_o_Custo_da_Energia_da_Rede_e_a_Energia_Gerada)$
- $Incremento_Fracionario_da_Populacao = 0.00947$
- $Media_do_consumo_de_uma_Residencia_por_mes_kWhlmes = 550$
- $Potenciais_Adotantes_da_Energia_Solar = Fracao_do_mercado_disposto_a_adotar * (Residencias_com_condicoes_de_aquisicao - Residencias_Adotantes_com_Equipamentos_Nacionais - Residencias_Adotantes_com_Equipamentos_Importados)$
- $Relacao_entre_o_Custo_da_Energia_da_Rede_e_a_Energia_Gerada = Custo_da_Energia_Produzida_R\$/kWh / Tarifa_Final_R\$/kWh$

Mercado dos Equipamentos Importados

- $Exportacao_dos_Equipamentos(t) = Exportacao_dos_Equipamentos(t - dt) + (Expedicao - Entrega\Instalacao) * dt$
INIT $Exportacao_dos_Equipamentos = 0.00001$
INFLOWS:
 - ☞ $Expedicao = Fabricacao_dos_Equipamentos / Tempo_de_Envio_para_Exportacao$OUTFLOWS:
 - ☞ $Entrega\Instalacao = Exportacao_dos_Equipamentos / Tempo_de_Envio_para_o_Mercado_Nacional_e_Instalacao$
- $Fabricacao_dos_Equipamentos(t) = Fabricacao_dos_Equipamentos(t - dt) + (Entrada_dos_Componentes - Expedicao) * dt$
INIT $Fabricacao_dos_Equipamentos = 0.0001$
INFLOWS:
 - ☞ $Entrada_dos_Componentes = Pedidos_Internacionais$OUTFLOWS:
 - ☞ $Expedicao = Fabricacao_dos_Equipamentos / Tempo_de_Envio_para_Exportacao$
- $Residencias_Adotantes_com_Equipamentos_Importados(t) = Residencias_Adotantes_com_Equipamentos_Importados(t - dt) + (Entrega\Instalacao) * dt$
INIT $Residencias_Adotantes_com_Equipamentos_Importados = 0.0001$
INFLOWS:
 - ☞ $Entrega\Instalacao = Exportacao_dos_Equipamentos / Tempo_de_Envio_para_o_Mercado_Nacional_e_Instalacao$
- COFINS = 140
- $Custo_dos_Equipamentos_Importados_euro/kWp = 1640$
- $Custo_Total_Equipamento_Importado = (Preco_Final_Equipamento_Importado_R\$/kWp + Custo_de_instalacao) * Potencia_Instalada_kWp$
- $Frete_euro/kWp = 80$
- ICMS = 170
- II = 180
- $Impostos\Taxas\Importacao_euro/kWp = COFINS + II + IPI + PIS + ICMS$
- IPI = 70
- $Mercado_de_Equipamento_Foltovoltaicos_Importados = Residencias_Adotantes_com_Equipamentos_Importados * Custo_Total_Equipamento_Importado$
- $Participacao_dos_Equipamentos_Importados = Experiencia$
- $Pedidos_Internacionais = Taxa_de_Adocao_Solar * Participacao_dos_Equipamentos_Importados$
- PIS = 10

- $\text{Preço_Final_Equipamento_Importado_R}\$k\text{Wp} = \text{Cotacao_Euro} * (\text{Custo_dos_Equipamentos_Importados_euro}\$k\text{Wp} + \text{Impostos}\$ \text{Taxas}\$ \text{Importacao_euro}\$k\text{Wp} + \text{Frete_euro}\$k\text{Wp}) * \text{Experiencia}$
- $\text{Tempo_de_espera} = \text{Fabricacao_dos_Equipamentos} + \text{Exportacao_dos_Equipamentos}$
- $\text{Tempo_de_Envio_para_Exportacao} = 1/12$
- $\text{Tempo_de_Envio_para_o_Mercado_Nacional_e_Instalacao} = 0.5$
- $\text{Cotacao_Euro} = \text{GRAPH}(\text{TIME})$
-  $(2013, 2.70), (2015, 3.22), (2016, 4.24), (2018, 3.85), (2020, 3.78), (2022, 3.28), (2023, 3.37), (2025, 3.22), (2027, 3.15), (2028, 2.83), (2030, 2.63)$

Mercados dos Equipamentos Nacionais

- $\text{Montagem_dos_Equipamentos_Nacionais}(t) = \text{Montagem_dos_Equipamentos_Nacionais}(t - dt) + (\text{Entrada_dos_Insumos} - \text{Envio}) * dt$
INIT $\text{Montagem_dos_Equipamentos_Nacionais} = 0.0000001$
INFLOWS:
 $\text{Entrada_dos_Insumos} = \text{Pedidos_Nacionais}$
OUTFLOWS:
 $\text{Envio} = \text{Montagem_dos_Equipamentos_Nacionais} / \text{Tempo_de_Envio_para_o_Mercado}$
- $\text{Residencias_Adotantes_com_Equipamentos_Nacionais}(t) = \text{Residencias_Adotantes_com_Equipamentos_Nacionais}(t - dt) + (\text{Envio}) * dt$
INIT $\text{Residencias_Adotantes_com_Equipamentos_Nacionais} = 0.0001$
INFLOWS:
 $\text{Envio} = \text{Montagem_dos_Equipamentos_Nacionais} / \text{Tempo_de_Envio_para_o_Mercado}$
- $\text{Custo_de_instalacao} = 1400$
- $\text{Custo_dos_Equipamentos_Nacionais_euro}\$k\text{Wp} = 1830$
- $\text{Custo_Total_Equipamento_Nacional} = (\text{Preço_Final_Equipamento_Nacional_R}\$k\text{Wp} + \text{Custo_de_instalacao}) * \text{Potencia_Instalada_kWp} * (1 - \text{Subsidio})$
- $\text{Eficiencia_do_Equipamento} = 0.8$
- $\text{Indicie_Solimetrico_Brasil_kWh}\$dia = 5.7$
- $\text{Mercado_de_Equipamentos_Fotovoltaicos_Nacionais} = \text{Residencias_Adotantes_com_Equipamentos_Nacionais} * \text{Custo_Total_Equipamento_Nacional}$
- $\text{Participacao_dos_Equipamentos_Nacionais} = 1 - \text{Participacao_dos_Equipamentos_Importados}$
- $\text{Pedidos_Nacionais} = \text{Taxa_de_Adocao_Solar} * \text{Participacao_dos_Equipamentos_Nacionais}$
- $\text{Potencia_Instalada_kWp} = ((\text{Media_do_consumo_de_uma_Residencia_por_mes_kWh}\$mes / 30) / \text{Indicie_Solimetrico_Brasil_kWh}\$dia) / \text{Eficiencia_do_Equipamento}$
- $\text{Preço_Final_Equipamento_Nacional_R}\$k\text{Wp} = \text{Cotacao_Euro} * (\text{Custo_dos_Equipamentos_Nacionais_euro}\$k\text{Wp} + \text{Transporte_euro}\$k\text{Wp}) * \text{Experiencia}$
- $\text{Subsidio} = 0$
- $\text{Tempo_de_Envio_para_o_Mercado} = 1/6$
- $\text{Transporte_euro}\$k\text{Wp} = 80$

Participação da Produção de Energia Solar na Demanda de Energia

- $\text{Energia_Gerada_por_uma_Residencia_por_Ano_kWh}\$ano = 12 * \text{Media_do_consumo_de_uma_Residencia_por_mes_kWh}\mes
- $\text{Parcela_da_Producao_de_Energia_Solar_em_Relacao_a_Demanda_Total} = \text{Producao_de_Energia_Solar}__\text{Residencial} / \text{Demanda_Total_de_energia_das_Residencias_kWh}\ano
- $\text{Producao_de_Energia_Solar}__\text{Residencial} = \text{Residencias_Adotantes_da_Energia_Solar} * \text{Energia_Gerada_por_uma_Residencia_por_Ano_kWh}\ano
- $\text{Residencias_Adotantes_da_Energia_Solar} = \text{Residencias_Adotantes_com_Equipamentos_Nacionais} + \text{Residencias_Adotantes_com_Equipamentos_Importados}$
- $\text{Residencias_na_Fila_para_Instalacao_dos_Equipamentos} = \text{Residencias_Aceitam_Adotam_a_Energia_Fotovoltaica} - \text{Residencias_Adotantes_da_Energia_Solar}$

Tarifa da Rede

$\text{Incremento_da_Tarifa_de_Energia}(t) = \text{Incremento_da_Tarifa_de_Energia}(t - dt) + (\text{Taxa_de_Incremento_da_Tarifa_de_Energia}) * dt$

INIT $\text{Incremento_da_Tarifa_de_Energia} = 1$

INFLOWS:

↳ $\text{Taxa_de_Incremento_da_Tarifa_de_Energia} = \text{IPCA} * \text{Incremento_da_Tarifa_de_Energia}$

$\text{COFINS_Tarifa} = 0.07$

$\text{Custo_Com_Perdas} = 0.01$

$\text{Custo_de_Distribuicao} = 0.08$

$\text{Custo_de_Geracao} = 0.18$

$\text{Custo_de_Transmissao} = 0.03$

$\text{ICMS_Tarifa} = 0.25$


$\text{PIS_Tarifa} = 0.015$

$\text{Tarifa_Base_R}\$/\text{kWh} =$

$(\text{Custo_Com_Perdas} + \text{Custo_de_Distribuicao} + \text{Custo_de_Geracao} + \text{Custo_de_Transmissao}) * \text{Incremento_da_Tarifa_de_Energia}$

$\text{Tarifa_Final_R}\$/\text{kWh} = (\text{Tarifa_Base_R}\$/\text{kWh}) / (1 - \text{COFINS_Tarifa} - \text{ICMS_Tarifa} - \text{PIS_Tarifa})$

$\text{IPCA} = \text{GRAPH}(\text{TIME})$

 $(2013, 0.0591), (2015, 0.064), (2016, 0.107), (2018, 0.053), (2020, 0.052), (2022, 0.0788), (2023, 0.068), (2025, 0.068), (2027, 0.073), (2028, 0.08), (2030, 0.08)$

APÊNDICE C – Tabela de Resultados da Simulação

CENÁRIO BASE

	Residência sem energia solar	Residências adotantes da energia solar	Residências adotantes com equipamentos importados	Residências com equipamentos nacionais	Adoção por contato social	Adoção por propaganda	Residências na fila para instalação dos equipamentos	Demanda Total de Energia Elétrica das Residências (GWh/Ano)	Produção de Energia Solar Residencial (GWh/ano)	Parcela da Produção da Energia Solar em Relação a Demanda de Energia elétrica Total	Custo da Energia Produzida	Tarifa Final	Capacidade Instalada (MWp)
2013	3815115	0	0	0	0	0	0	25179	0	0%	R\$ 0,79	R\$ 0,45	0,00
2014	3847673	1431	1267	164	675	3515	2269	25419	9,445	0%	R\$ 0,79	R\$ 0,48	5,72
2015	3879777	5407	4766	641	1482	3513	2791	25660	35,684	0%	R\$ 0,86	R\$ 0,51	21,63
2016	3911428	10257	8959	1298	2384	3466	3240	25904	67,693	0%	R\$ 0,97	R\$ 0,55	41,03
2017	3942423	15952	13807	2145	3650	3651	3850	26150	105,288	0%	R\$ 0,98	R\$ 0,61	63,81
2018	3972044	22959	19666	3293	5437	3906	4879	26399	151,527	1%	R\$ 0,93	R\$ 0,66	91,84
2019	3999868	31902	27067	4835	7640	4056	6126	26650	210,551	1%	R\$ 0,91	R\$ 0,69	127,61
2020	4025500	43154	36295	6859	10483	4208	7616	26903	284,818	1%	R\$ 0,88	R\$ 0,73	172,62
2021	4048084	57297	47772	9525	14413	4431	9629	27159	378,161	1%	R\$ 0,82	R\$ 0,78	229,19
2022	4066446	75384	62298	13086	19430	4603	12288	27417	497,534	2%	R\$ 0,79	R\$ 0,84	301,54
2023	4079663	98492	80723	17769	25574	4707	15442	27677	650,049	2%	R\$ 0,80	R\$ 0,90	393,97
2024	4086385	127671	103795	23876	33533	4826	19396	27940	842,629	3%	R\$ 0,78	R\$ 0,96	510,68
2025	4084606	164615	132750	31865	43684	4937	24464	28206	1086,458	4%	R\$ 0,76	R\$ 1,03	658,46
2026	4072060	211460	169172	42287	56364	5019	30781	28474	1395,633	5%	R\$ 0,75	R\$ 1,10	845,84
2027	4045999	270672	214855	55817	72400	5097	38632	28745	1786,433	6%	R\$ 0,73	R\$ 1,18	1082,69
2028	4002651	345463	272085	73378	92679	5171	48580	29018	2280,054	8%	R\$ 0,69	R\$ 1,28	1381,85
2029	3937759	439932	343836	96096	117302	5199	60788	29293	2903,552	10%	R\$ 0,66	R\$ 1,38	1759,73
2030	3846978	558378	433201	125177	146556	5181	75304	29572	3685,297	12%	R\$ 0,63	R\$ 1,50	2233,51

CENÁRIO 1

Residência sem energia solar	Residências adotantes da energia solar	Residências adotantes com equipamentos importados	Residências com equipamentos nacionais	Adoção por contato social	Adoção por propaganda	Residências na fila para instalação dos equipamentos	Demanda Total de Energia Elétrica das Residências (GWh/Ano)	Produção de Energia Solar Residencial (GWh/ano)	Parcela da Produção da Energia Solar em Relação a Denanda de Energia elétrica Total	Custo da Energia Produzida	Tarifa Final	Capacidade Instalada (MWp)
3.815.115	0	0	0	0	0	0	25.179	0	0%	R\$ 0,79	R\$ 0,45	0,0
3.847.668	1.432	1.268	164	678	3.526	2.273	25.255	9,389	0%	R\$ 0,79	R\$ 0,48	5,7
3.879.750	5.419	4.776	643	1.496	3.536	2.806	25.339	35,316	0%	R\$ 0,85	R\$ 0,51	21,5
3.911.353	10.301	8.995	1306	2.420	3.499	3.271	25.441	66,771	0%	R\$ 0,95	R\$ 0,55	40,7
3.942.263	16.060	13.894	2166	3.722	3.694	3.903	25.526	103,465	0%	R\$ 0,96	R\$ 0,61	63,0
3.971.747	23.172	19.838	3334	5.566	3.957	4.963	25.600	148,304	1%	R\$ 0,90	R\$ 0,66	90,3
3.999.360	32.282	27.373	4909	7.852	4.114	6.254	25.698	205,452	1%	R\$ 0,88	R\$ 0,69	125,2
4.024.679	43.788	36.801	6987	10.812	4.271	7.804	25.798	277,129	1%	R\$ 0,85	R\$ 0,73	168,8
4.046.813	58.301	48.568	9733	14.903	4.496	9.896	25.898	366,923	1%	R\$ 0,78	R\$ 0,78	223,5
4.064.542	76.914	63.504	13410	20.145	4.671	12.662	25.983	481,083	2%	R\$ 0,75	R\$ 0,84	293,1
4.076.865	100.765	82.502	18263	26.605	4.779	15.967	26.052	626	2%	R\$ 0,75	R\$ 0,90	381,3
4.082.335	130.992	106.374	24618	34.984	4.900	20.125	26.120	808,233	3%	R\$ 0,73	R\$ 0,96	492,8
4.078.835	169.390	136.433	32957	45.690	5.011	25.460	26.191	1.038,10	4%	R\$ 0,71	R\$ 1,03	633,6
4.063.959	218.223	174.352	43871	59.079	5.091	32.119	26.287	1.329,67	5%	R\$ 0,69	R\$ 1,10	811,5
4.034.797	280.107	222.032	58075	75.999	5.164	40.399	26.383	1.696,86	6%	R\$ 0,67	R\$ 1,18	1.035,5
3.987.409	358.422	281.879	76543	97.334	5.228	50.862	26.479	2.158,63	8%	R\$ 0,63	R\$ 1,28	1.317,2
3.917.371	457.437	356.983	100454	123.182	5.246	63.672	26.574	2.738,81	10%	R\$ 0,60	R\$ 1,38	1.671,1
3.820.186	581.615	450.552	131063	153.770	5.216	78.859	26.668	3.461,78	13%	R\$ 0,57	R\$ 1,50	2.112,2

CENÁRIO 2

	Residência sem energia solar	Residências adotantes da energia solar	Residências adotantes com equipamentos importados	Residências com equipamentos nacionais	Adoção por contato social	Adoção por propaganda	Residências na fila para instalação dos equipamentos	Demanda Total de Energia Elétrica das Residências (GWh/Ano)	Produção de Energia Solar Residencial (GWh/ano)	Parcela da Produção da Energia Solar em Relação a Demanda de Energia elétrica Total	Custo da Energia Produzida	Tarifa Final	Capacidade Instalada (MWp)
2013	3.815.115	0	0	0	0	0	0	25.179	0	0%	R\$ 0,79	R\$ 0,45	0,0
2014	3.847.664	1.433	1.268	165	681	3.536	2.276	25.120	9,343	0%	R\$ 0,78	R\$ 0,48	5,7
2015	3.879.727	5.429	4.784	645	1.508	3.556	2.819	25.056	34,988	0%	R\$ 0,84	R\$ 0,51	21,3
2016	3.911.286	10.339	9.026	1313	2.455	3.532	3.299	24.990	65,83	0%	R\$ 0,94	R\$ 0,55	40,1
2017	3.942.113	16.158	13.973	2185	3.793	3.736	3.956	24.920	101,623	0%	R\$ 0,94	R\$ 0,61	61,9
2018	3.971.463	23.374	20.001	3373	5.691	4.005	5.045	24.846	145,193	1%	R\$ 0,87	R\$ 0,66	88,4
2019	3.998.872	32.646	27.665	4981	8.058	4.169	6.377	24.794	200,464	1%	R\$ 0,84	R\$ 0,69	122,1
2020	4.023.886	44.397	37.287	7110	11.135	4.332	7.987	24.742	269,484	1%	R\$ 0,81	R\$ 0,73	164,2
2021	4.045.579	59.272	49.338	9934	15.387	4.560	10.159	24.687	355,59	1%	R\$ 0,75	R\$ 0,78	216,6
2022	4.062.683	78.404	64.678	13726	20.849	4.736	13.030	24.628	464,836	2%	R\$ 0,71	R\$ 0,84	283,2
2023	4.074.131	102.986	84.238	18748	27.608	4.846	16.480	24.566	603,305	2%	R\$ 0,71	R\$ 0,90	367,5
2024	4.078.391	134.232	108.889	25343	36.384	4.967	20.829	24.501	776,869	3%	R\$ 0,68	R\$ 0,96	473,2
2025	4.073.243	174.030	140.009	34021	47.608	5.075	26.412	24.432	994,921	4%	R\$ 0,66	R\$ 1,03	606,1
2026	4.056.145	224.762	179.356	45406	61.678	5.154	33.394	24.360	1.269,08	5%	R\$ 0,64	R\$ 1,10	774,1
2027	4.024.019	289.198	228.940	60258	79.443	5.222	42.086	24.296	1.613,31	7%	R\$ 0,61	R\$ 1,18	984,3
2028	3.972.778	370.880	291.285	79595	101.769	5.278	53.036	24.248	2.045,42	8%	R\$ 0,57	R\$ 1,28	1246,3
2029	3.897.855	474.221	369.578	104643	128.739	5.285	66.402	24.218	2.587,57	11%	R\$ 0,54	R\$ 1,38	1574,6
2030	3.794.649	603.818	467.118	136700	160.516	5.242	82.194	24.195	3.260,62	13%	R\$ 0,52	R\$ 1,50	1981,6

CENÁRIO 3

	Residência sem energia solar	Residências adotantes da energia solar	Residências adotantes com equipamentos importados	Residências com equipamentos nacionais	Adoção por contato social	Adoção por propagada	Residências na fila para instalação dos equipamentos	Demanda Total de Energia Elétrica das Residências (GWh/Ano)	Produção de Energia Solar Residencial (GWh/ano)	Parcela da Produção da Energia Solar em Relação a Demanda de Energia elétrica Total	Custo da Energia Produzida	Tarifa Final	Capacidade Instalada (MWP)
2013	3.815.115	0	0	0	0	0	0	25.179	0	0%	R\$ 0,79	R\$ 0,45	0,0
2014	3.847.659	1.433	1.269	164	684	3.547	2.280	24.956	9,287	0%	R\$ 0,78	R\$ 0,48	5,7
2015	3.879.700	5.441	4.793	648	1.523	3.578	2.833	24.735	34,617	0%	R\$ 0,83	R\$ 0,51	21,1
2016	3.911.210	10.384	9.062	1322	2.492	3.565	3.331	24.527	64,891	0%	R\$ 0,92	R\$ 0,55	39,5
2017	3.941.950	16.267	14.061	2206	3.867	3.778	4.010	24.313	99,817	0%	R\$ 0,91	R\$ 0,61	60,8
2018	3.971.161	23.591	20.176	3415	5.822	4.054	5.130	24.092	142,093	1%	R\$ 0,85	R\$ 0,66	86,7
2019	3.998.361	33.031	27.974	5057	8.270	4.223	6.504	23.916	195,642	1%	R\$ 0,81	R\$ 0,69	119,3
2020	4.023.066	45.032	37.794	7238	11.464	4.392	8.172	23.735	262,211	1%	R\$ 0,78	R\$ 0,73	159,7
2021	4.044.313	60.272	50.131	10141	15.879	4.621	10.424	23.525	344,573	1%	R\$ 0,71	R\$ 0,78	209,8
2022	4.060.784	79.930	65.879	14051	21.566	4.799	13.404	23.323	448,772	2%	R\$ 0,67	R\$ 0,84	273,3
2023	4.071.344	105.253	86.010	19243	28.632	4.911	17.000	23.130	580,551	3%	R\$ 0,67	R\$ 0,90	353,5
2024	4.074.370	137.535	111.452	26083	37.815	5.032	21.546	22.932	745,021	3%	R\$ 0,64	R\$ 0,96	453,7
2025	4.067.539	178.763	143.654	35109	49.570	5.138	27.383	22.730	950,807	4%	R\$ 0,61	R\$ 1,03	579,0
2026	4.048.179	231.432	184.457	46975	64.311	5.213	34.689	22.551	1.209,71	5%	R\$ 0,59	R\$ 1,10	736,7
2027	4.013.067	298.452	235.969	62483	82.908	5.275	43.783	22.365	1.532,64	7%	R\$ 0,56	R\$ 1,18	933,4
2028	3.957.958	383.520	300.821	82699	106.223	5.322	55.216	22.174	1.934,30	9%	R\$ 0,52	R\$ 1,28	1.178,0
2029	3.878.136	491.204	382.311	108893	134.319	5.320	69.139	22.000	2.434,75	11%	R\$ 0,49	R\$ 1,38	1.481,3
2030	3.768.889	626.236	483.827	142409	167.282	5.265	85.536	21.829	3.051,02	14%	R\$ 0,47	R\$ 1,50	1.853,6

CENÁRIO 4

	Residência sem energia solar	Residências adotantes da energia solar	Residências adotantes com equipamentos importados	Residências com equipamentos nacionais	Adoção por contato social	Adoção por propaganda	Residências na fila para instalação dos equipamentos	Demanda Total de Energia Elétrica das Residências (GWh/Ano)	Produção de Energia Solar Residencial (GWh/ano)	Parcela da Produção da Energia Solar em Relação a Demanda de Energia elétrica Total	Custo da Energia Produzida	Tarifa Final	Capacidade Instalada (MWp)
2013	3.815.115	0	0	0	0	0	0	25.179	0	0%	R\$ 0,77	R\$ 0,45	0,0
2014	3.847.618	1.452	1.285	167	695	3.564	2.302	25.419	9,585	0%	R\$ 0,77	R\$ 0,48	5,8
2015	3.879.644	5.491	4.838	653	1.527	3.563	2.839	25.660	36,242	0%	R\$ 0,83	R\$ 0,51	22,0
2016	3.911.187	10.431	9.105	1.326	2.464	3.519	3.307	25.904	68,846	0%	R\$ 0,94	R\$ 0,55	41,7
2017	3.942.033	16.253	14.057	2.196	3.774	3.703	3.940	26.150	107,27	0%	R\$ 0,95	R\$ 0,61	65,0
2018	3.971.460	23.427	20.052	3.375	5.618	3.953	4.995	26.399	154,616	1%	R\$ 0,90	R\$ 0,66	93,7
2019	3.999.030	32.589	27.628	4.961	7.895	4.101	6.276	26.650	215,085	1%	R\$ 0,88	R\$ 0,69	130,4
2020	4.024.329	44.129	37.084	7.045	10.833	4.251	7.813	26.903	291,249	1%	R\$ 0,86	R\$ 0,73	176,5
2021	4.046.478	58.648	48.857	9.791	14.885	4.469	9.884	27.159	387,078	1%	R\$ 0,80	R\$ 0,78	234,6
2022	4.064.275	77.225	63.765	13.460	20.060	4.638	12.617	27.417	509,688	2%	R\$ 0,77	R\$ 0,84	308,9
2023	4.076.758	100.972	82.682	18.290	26.406	4.739	15.867	27.677	666,414	2%	R\$ 0,78	R\$ 0,90	403,9
2024	4.082.527	130.981	106.389	24.592	34.617	4.855	19.945	27.940	864,471	3%	R\$ 0,76	R\$ 0,96	523,9
2025	4.079.524	168.997	136.158	32.839	45.085	4.962	25.165	28.206	1.115,38	4%	R\$ 0,74	R\$ 1,03	676,0
2026	4.065.415	217.217	173.615	43.602	58.153	5.040	31.669	28.474	1.433,63	5%	R\$ 0,73	R\$ 1,10	868,9
2027	4.037.379	278.177	220.605	57.572	74.654	5.113	39.747	28.744	1.835,97	6%	R\$ 0,71	R\$ 1,18	1112,7
2028	3.991.570	355.165	279.466	75.699	95.470	5.181	49.959	29.018	2.344,09	8%	R\$ 0,67	R\$ 1,28	1420,7
2029	3.923.666	452.351	353.220	99.131	120.684	5.202	62.461	29.293	2.985,52	10%	R\$ 0,64	R\$ 1,38	1809,4
2030	3.829.283	574.090	444.998	129.092	150.544	5.178	77.288	29.572	3.788,99	13%	R\$ 0,62	R\$ 1,50	2296,4

CENÁRIO 5

	Residência sem energia solar	Residências adotantes da energia solar	Residências adotantes com equipamentos importados	Residências com equipamentos nacionais	Adoção por contato social	Adoção por propaganda	Residências na fila para instalação dos equipamentos	Demanda Total de Energia Elétrica das Residências (GWh/Ano)	Produção de Energia Solar Residencial (GWh/ano)	Parcela da Produção da Energia Solar em Relação a Demanda de Energia elétrica Total	Custo da Energia Produzida	Tarifa Final	Capacidade Instalada (MWp)
2013	3.815.115	0	0	0	0	0	0	25.179	0	0%	R\$ 0,75	R\$ 0,45	0,0
2014	3.847.558	1.476	1.305	171	716	3.616	2.339	25.419	9.738	0%	R\$ 0,75	R\$ 0,48	5,9
2015	3.879.500	5.583	4.915	668	1.577	3.618	2.892	25.660	36,849	0%	R\$ 0,81	R\$ 0,51	22,3
2016	3.910.923	10.622	9.265	1357	2.552	3.577	3.380	25.904	70,105	0%	R\$ 0,91	R\$ 0,55	42,5
2017	3.941.606	16.582	14.329	2253	3.912	3.758	4.039	26.150	109,439	0%	R\$ 0,92	R\$ 0,61	66,3
2018	3.970.819	23.940	20.474	3466	5.819	4.005	5.123	26.399	158,003	1%	R\$ 0,87	R\$ 0,66	95,8
2019	3.998.109	33.344	28.244	5100	8.178	4.150	6.443	26.650	220,068	1%	R\$ 0,85	R\$ 0,69	133,4
2020	4.023.038	45.201	37.952	7249	11.222	4.297	8.031	26.903	298,329	1%	R\$ 0,83	R\$ 0,73	180,8
2021	4.044.706	60.138	50.052	10086	15.410	4.510	10.166	27.159	396,911	1%	R\$ 0,77	R\$ 0,78	240,6
2022	4.061.878	79.259	65.383	13876	20.760	4.675	12.981	27.417	523,108	2%	R\$ 0,75	R\$ 0,84	317,0
2023	4.073.545	103.713	84.845	18868	27.329	4.773	16.339	27.677	684,503	2%	R\$ 0,75	R\$ 0,90	414,9
2024	4.078.258	134.642	109.255	25387	35.823	4.886	20.552	27.940	888,638	3%	R\$ 0,74	R\$ 0,96	538,6
2025	4.073.895	173.849	139.927	33922	46.640	4.988	25.942	28.206	1.147,40	4%	R\$ 0,72	R\$ 1,03	695,4
2026	4.058.052	223.595	178.533	45062	60.139	5.063	32.654	28.474	1.475,72	5%	R\$ 0,71	R\$ 1,10	894,4
2027	4.027.826	286.495	226.971	59524	77.152	5.130	40.982	28.744	1.890,87	7%	R\$ 0,69	R\$ 1,18	1146,0
2028	3.979.294	365.917	287.638	78279	98.556	5.191	51.483	29.018	2.415,05	8%	R\$ 0,65	R\$ 1,28	1463,7
2029	3.908.064	466.107	363.605	102502	124.414	5.205	64.308	29.293	3.076,30	11%	R\$ 0,62	R\$ 1,38	1864,4
2030	3.809.713	591.477	458.043	133434	154.925	5.173	79.471	29.572	3.903,75	13%	R\$ 0,60	R\$ 1,50	2365,9

CENÁRIO 6

	Residência sem energia solar	Residências adotantes da energia solar	Residências adotantes com equipamentos importados	Residências com equipamentos nacionais	Adoção por contato social	Adoção por propagada	Residências na fila para instalação dos equipamentos	Demanda Total de Energia Elétrica das Residências (GWh/Ano)	Produção de Energia Solar Residencial (GWh/ano)	Parcela da Produção da Energia Solar em Relação a Demanda de Energia elétrica Total	Custo da Energia Produzida	Tarifa Final	Capacidade Instalada (MWp)
2013	3.815.115	0	0	0	0	0	0	25.179	0	0%	R\$ 0,71	R\$ 0,45	0,0
2014	3.847.447	1.518	1.341	177	757	3.712	2.407	25.419	10,02	0%	R\$ 0,71	R\$ 0,48	6,1
2015	3.879.233	5.753	5.059	694	1.672	3.718	2.989	25.660	37,972	0%	R\$ 0,76	R\$ 0,51	23,0
2016	3.910.433	10.976	9.560	1416	2.720	3.683	3.517	25.904	72,439	0%	R\$ 0,86	R\$ 0,55	43,9
2017	3.940.809	17.194	14.836	2358	4.173	3.860	4.224	26.150	113,478	0%	R\$ 0,87	R\$ 0,61	68,8
2018	3.969.619	24.900	21.263	3637	6.201	4.098	5.364	26.399	164,337	1%	R\$ 0,82	R\$ 0,66	99,6
2019	3.996.379	34.759	29.397	5362	8.717	4.239	6.757	26.650	229,41	1%	R\$ 0,80	R\$ 0,69	139,0
2020	4.020.610	47.218	39.581	7637	11.964	4.381	8.442	26.903	311,637	1%	R\$ 0,78	R\$ 0,73	188,9
2021	4.041.365	62.945	52.301	10644	16.409	4.585	10.700	27.159	415,437	2%	R\$ 0,73	R\$ 0,78	251,8
2022	4.057.349	83.097	68.433	14664	22.092	4.742	13.672	27.417	548,441	2%	R\$ 0,71	R\$ 0,84	332,4
2023	4.067.467	108.895	88.929	19966	29.088	4.836	17.235	27.677	718,705	3%	R\$ 0,71	R\$ 0,90	435,6
2024	4.070.170	141.575	114.676	26899	38.118	4.941	21.707	27.940	934,395	3%	R\$ 0,70	R\$ 0,96	566,3
2025	4.063.223	183.045	147.062	35983	49.601	5.036	27.418	28.206	1.208,10	4%	R\$ 0,68	R\$ 1,03	732,2
2026	4.044.084	235.693	187.848	47845	63.913	5.102	34.524	28.474	1.555,57	5%	R\$ 0,67	R\$ 1,10	942,8
2027	4.009.702	302.278	239.035	63243	81.891	5.160	43.323	28.744	1.995,03	7%	R\$ 0,65	R\$ 1,18	1209,1
2028	3.956.011	386.316	303.121	83195	104.391	5.208	54.367	29.018	2.549,69	9%	R\$ 0,61	R\$ 1,28	1545,3
2029	3.878.505	492.187	383.269	108918	131.437	5.209	67.787	29.293	3.248,43	11%	R\$ 0,59	R\$ 1,38	1968,7
2030	3.772.702	624.396	482.712	141684	163.125	5.162	83.562	29.572	4.121,02	14%	R\$ 0,57	R\$ 1,50	2497,6

CENÁRIO 7

	Residência sem energia solar	Residências adotantes da energia solar	Residências adotantes com equipamentos importados	Residências com equipamentos nacionais	Adoção por contato social	Adoção por propagação	Residências na fila para instalação dos equipamentos	Demanda Total de Energia Elétrica das Residências (GWh/Ano)	Produção de Energia Solar Residencial (GWh/ano)	Parcela da Produção da Energia Solar em Relação a Demanda de Energia elétrica Total	Costo da Energia Produzida	Tarifa Final	Capacidade Instalada (MWp)
2013	3.815.115	0	0	0	0	0	0	25.179	0	0%	R\$ 0,76	R\$ 0,45	0,00
2014	3.847.578	1.468	1.298	170	709	3.598	2.327	25.419	9.687	0%	R\$ 0,76	R\$ 0,48	5,87
2015	3.879.550	5.552	4.889	663	1.559	3.597	2.873	25.660	36.643	0%	R\$ 0,82	R\$ 0,51	22,21
2016	3.911.018	10.555	9.209	1346	2.518	3.553	3.352	25.904	69.662	0%	R\$ 0,93	R\$ 0,55	42,22
2017	3.941.767	16.460	14.229	2231	3.857	3.735	3.998	26.150	108.637	0%	R\$ 0,94	R\$ 0,61	65,84
2018	3.971.066	23.744	20.313	3431	5.740	3.984	5.072	26.399	156.708	1%	R\$ 0,88	R\$ 0,66	94,98
2019	3.998.467	33.051	28.006	5045	8.067	4.131	6.377	26.650	218.139	1%	R\$ 0,87	R\$ 0,69	132,20
2020	4.023.541	44.784	37.614	7170	11.071	4.279	7.945	26.903	295.575	1%	R\$ 0,84	R\$ 0,73	179,14
2021	4.045.394	59.558	49.587	9971	15.210	4.495	10.057	27.159	393.084	1%	R\$ 0,78	R\$ 0,78	238,23
2022	4.062.801	78.472	64.756	13716	20.496	4.662	12.844	27.417	517.915	2%	R\$ 0,76	R\$ 0,84	313,89
2023	4.074.774	102.661	84.014	18647	26.983	4.761	16.163	27.677	677.559	2%	R\$ 0,76	R\$ 0,90	410,64
2024	4.079.880	133.246	108.162	25084	35.374	4.876	20.325	27.940	879.422	3%	R\$ 0,75	R\$ 0,96	532,98
2025	4.076.020	172.010	138.498	33512	46.067	4.980	25.655	28.206	1.135,27	4%	R\$ 0,73	R\$ 1,03	688,04
2026	4.060.812	221.195	176.682	44513	59.413	5.056	32.294	28.474	1.459,88	5%	R\$ 0,71	R\$ 1,10	884,78
2027	4.031.383	283.387	224.591	58796	76.249	5.126	40.533	28.744	1.870,35	7%	R\$ 0,69	R\$ 1,18	1133,55
2028	3.983.827	361.929	284.605	77324	97.457	5.189	50.938	29.018	2.388,73	8%	R\$ 0,66	R\$ 1,28	1447,72
2029	3.913.772	461.049	359.784	101265	123.107	5.207	63.658	29.293	3.042,93	10%	R\$ 0,63	R\$ 1,38	1844,20
2030	3.816.800	585.146	453.290	131856	153.413	5.177	78.714	29.572	3.861,97	13%	R\$ 0,60	R\$ 1,50	2340,58

CENÁRIO 8

	Residência sem energia solar	Residências adotantes da energia solar	Residências adotantes com equipamentos importados	Residências com equipamentos nacionais	Adoção por contato social	Adoção por propagada	Residências na fila para instalação dos equipamentos	Demanda Total de Energia Elétrica das Residências (GWh/Ano)	Produção de Energia Solar Residencial (GWh/ano)	Parcela da Produção da Denanda de Energia elétrica Total	Custo da Energia Produzida	Tarifa Final	Capacidade Instalada (MWp)
2013	3.815.115	0	0	0	0	0	0	25.179	0	0%	R\$ 0,72	R\$ 0,45	0,0
2014	3.847.480	1.505	1.330	175	744	3.683	2.387	25.419	9.935	0%	R\$ 0,72	R\$ 0,48	6,0
2015	3.879.316	5.702	5.015	687	1.641	3.684	2.958	25.660	37,63	0%	R\$ 0,78	R\$ 0,51	22,8
2016	3.910.594	10.863	9.467	1396	2.659	3.641	3.468	25.904	71,695	0%	R\$ 0,88	R\$ 0,55	43,5
2017	3.941.086	16.986	14.665	2321	4.076	3.820	4.153	26.150	112,109	0%	R\$ 0,89	R\$ 0,61	67,9
2018	3.970.047	24.561	20.985	3576	6.061	4.063	5.274	26.399	162,101	1%	R\$ 0,84	R\$ 0,66	98,2
2019	3.997.001	34.252	28.984	5268	8.520	4.207	6.642	26.650	226,061	1%	R\$ 0,82	R\$ 0,69	137,0
2020	4.021.487	46.491	38.994	7497	11.695	4.351	8.292	26.903	306,838	1%	R\$ 0,80	R\$ 0,73	186,0
2021	4.042.568	61.932	51.489	10443	16.057	4.560	10.510	27.159	408,749	2%	R\$ 0,74	R\$ 0,78	247,7
2022	4.058.964	81.720	67.339	14381	21.629	4.721	13.433	27.417	539,355	2%	R\$ 0,72	R\$ 0,84	326,9
2023	4.069.617	107.054	87.478	19576	28.480	4.817	16.926	27.677	706,554	3%	R\$ 0,72	R\$ 0,90	428,2
2024	4.073.010	139.131	112.764	26367	37.332	4.925	21.311	27.940	918,262	3%	R\$ 0,71	R\$ 0,96	556,5
2025	4.066.941	179.827	144.565	35262	48.599	5.023	26.917	28.206	1.186,86	4%	R\$ 0,69	R\$ 1,03	719,3
2026	4.048.910	231.494	184.614	46880	62.648	5.092	33.897	28.474	1.527,86	5%	R\$ 0,68	R\$ 1,10	926,0
2027	4.015.911	296.846	234.882	61964	80.324	5.154	42.546	28.744	1.959,18	7%	R\$ 0,66	R\$ 1,18	1187,4
2028	3.963.909	379.359	297.837	81522	102.500	5.207	53.426	29.018	2.503,77	9%	R\$ 0,62	R\$ 1,28	1517,4
2029	3.888.416	483.388	376.630	106758	129.205	5.213	66.675	29.293	3.190,36	11%	R\$ 0,60	R\$ 1,38	1933,6
2030	3.784.959	613.422	474.482	138940	160.570	5.171	82.280	29.572	4.048,59	14%	R\$ 0,57	R\$ 1,50	2453,7

CENÁRIO 9

	Residência sem energia solar	Residências adotantes da energia solar	Residências adotantes com equipamentos importados	Residências com equipamentos nacionais	Adoção por contato social	Adoção por propagação	Residências na fila para instalação dos equipamentos	Demanda Total de Energia Elétrica das Residências (GWh/Ano)	Produção de Energia Solar Residencial (GWh/ano)	Parcela da Produção da Energia Solar em Relação a Demanda de Energia elétrica Total	Custo da Energia Produzida	Tarifa Final	Capacidade Instalada (MWp)
2013	3.815.115	0	0	0	0	0	0	25.179	0	0%	R\$ 0,68	R\$ 0,45	0,0
2014	3.847.381	1.544	1.363	181	781	3.769	2.448	25.419	10,19	0%	R\$ 0,68	R\$ 0,48	6,2
2015	3.879.075	5.855	5.145	710	1.727	3.772	3.045	25.660	38,645	0%	R\$ 0,74	R\$ 0,51	23,4
2016	3.910.155	11.181	9.733	1.448	2.809	3.732	3.589	25.904	73,794	0%	R\$ 0,83	R\$ 0,55	44,7
2017	3.940.379	17.532	15.117	2.415	4.308	3.907	4.315	26.150	115,711	0%	R\$ 0,84	R\$ 0,61	70,1
2018	3.968.984	25.412	21.684	3.728	6.402	4.144	5.486	26.399	167,716	1%	R\$ 0,80	R\$ 0,66	101,6
2019	3.995.469	35.505	30.005	5.500	9.002	4.284	6.921	26.650	234,335	1%	R\$ 0,78	R\$ 0,69	142,0
2020	4.019.333	48.278	40.436	7.842	12.359	4.424	8.659	26.903	318,635	1%	R\$ 0,76	R\$ 0,73	193,1
2021	4.039.597	64.424	53.484	10.940	16.957	4.626	10.989	27.159	425,201	2%	R\$ 0,71	R\$ 0,78	257,7
2022	4.054.922	85.140	70.052	15.088	22.833	4.781	14.056	27.417	561,921	2%	R\$ 0,68	R\$ 0,84	340,6
2023	4.064.175	111.686	91.124	20.562	30.071	4.872	17.736	27.677	737,128	3%	R\$ 0,69	R\$ 0,90	446,7
2024	4.065.749	145.346	117.618	27.728	39.413	4.975	22.356	27.940	959,285	3%	R\$ 0,67	R\$ 0,96	581,4
2025	4.057.335	188.094	150.970	37.124	51.290	5.066	28.256	28.206	1.241,42	4%	R\$ 0,65	R\$ 1,03	752,4
2026	4.036.309	242.396	192.998	49.398	66.081	5.128	35.596	28.474	1.599,81	6%	R\$ 0,64	R\$ 1,10	969,6
2027	3.999.529	311.098	245.762	65.336	84.639	5.181	44.675	28.744	2.053,25	7%	R\$ 0,62	R\$ 1,18	1.244,4
2028	3.942.827	397.815	311.828	85.987	107.821	5.222	56.052	29.018	2.625,58	9%	R\$ 0,59	R\$ 1,28	1.591,3
2029	3.861.611	507.022	394.428	112.594	135.607	5.217	69.846	29.293	3.346,35	11%	R\$ 0,56	R\$ 1,38	2.028,1
2030	3.751.364	643.292	496.839	146.453	168.034	5.162	86.005	29.572	4.245,73	14%	R\$ 0,54	R\$ 1,50	2.573,2

CENÁRIO 10

	Residência sem energia solar	Residências adotantes da energia solar	Residências adotantes com equipamentos importados	Residências com equipamentos nacionais	Adoção por contato social	Adoção por propaganda	Residências na fila para instalação dos equipamentos	Demanda Total de Energia Elétrica das Residências (GWh/Ano)	Produção de Energia Solar Residencial (GWh/ano)	Parcela da Produção da Energia Solar em Relação a Demanda de Energia elétrica Total	Custo da Energia Produzida	Tarifa Final	Capacidade Instalada (MWp)
2013	3.815.115	0	0	0	0	0	0	25.179	0	0%	R\$ 0,74	R\$ 0,45	0
2014	3.847.517	1.490	1.317	173	732	3.658	2.366	25.255	9.773	0%	R\$ 0,73	R\$ 0,48	6
2015	3.879.387	5.651,00	4.972	679	1.621	3.670	2.937	25.339	36,828	0%	R\$ 0,78	R\$ 0,51	22
2016	3.910.695	10.779	9.395	1384	2.638	3.639	3.451	25.441	69,867	0%	R\$ 0,88	R\$ 0,55	42
2017	3.941.205	16.876	14.572	2304	4.062	3.828	4.145	25.526	108,728	0%	R\$ 0,89	R\$ 0,61	66
2018	3.970.164	24.441	20.883	3558	6.063	4.080	5.277	25.600	156,427	1%	R\$ 0,83	R\$ 0,66	94,72
2019	3.997.087	34.145	28.892	5253	8.553	4.231	6.663	25.698	217,31	1%	R\$ 0,81	R\$ 0,69	131,542
2020	4.021.496	46.434	38.941	7493	11.777	4.382	8.341	25.798	293,877	1%	R\$ 0,78	R\$ 0,73	177,837
2021	4.042.438	61.977	51.517	10460	16.209	4.595	10.595	25.898	390,064	2%	R\$ 0,72	R\$ 0,78	235,976
2022	4.058.610	81.940	67.501	14439	21.890	4.761	13.568	25.983	512,519	2%	R\$ 0,69	R\$ 0,84	309,984
2023	4.068.902	107.553	87.855	19698	28.911	4.861	17.142	26.052	668,169	3%	R\$ 0,69	R\$ 0,90	404,041
2024	4.071.734	140.076	113.480	26596	37.999	4.974	21.642	26.120	864,284	3%	R\$ 0,68	R\$ 0,96	523,002
2025	4.064.836	181.448	145.791	35657	49.587	5.074	27.402	26.191	1.112,00	4%	R\$ 0,65	R\$ 1,03	673,449
2026	4.045.619	234.099	186.580	47519	64.056	5.143	34.583	26.287	1.426,41	5%	R\$ 0,64	R\$ 1,10	863,669
2027	4.010.972	300.841	237.884	62957	82.262	5.203	43.490	26.383	1.822,46	7%	R\$ 0,62	R\$ 1,18	1.103,26
2028	3.956.759	385.255	302.250	83005	105.070	5.250	54.680	26.479	2.320,23	9%	R\$ 0,58	R\$ 1,28	1.404,41
2029	3.878.391	491.797	382.894	108903	132.516	5.251	68.291	26.574	2.944,53	11%	R\$ 0,55	R\$ 1,38	1.782,19
2030	3.771.293	625.063	483.112	141951	164.695	5.201	84.305	26.668	3.720,37	14%	R\$ 0,53	R\$ 1,50	2.251,83

CENÁRIO 11

	Residência sem energia solar	Residências adotantes da energia solar	Residências adotantes com equipamentos importados	Residências com equipamentos nacionais	Adoção por contato social	Adoção por propaganda	Residências na fila para instalação dos equipamentos	Demanda Total de Energia Elétrica das Residências (GWh/Ano)	Produção de Energia Solar Residencial (GWh/ano)	Parcela da Produção da Energia Solar em Relação a Demanda de Energia elétrica Total	Custo da Energia Produzida	Tarifa Final	Capacidade Instalada (MWp)
2013	3.815.115	0	0	0	0	0	0	25.179	0	0%	R\$ 0,68	R\$ 0,45	0,0
2014	3.847.356	1.552	1.369	183	793	3.803	2.465	25.120	10,121	0%	R\$ 0,67	R\$ 0,48	6,1
2015	3.878.986	5.903	5.184	719	1.770	3.828	3.087	25.056	38,041	0%	R\$ 0,71	R\$ 0,51	23,0
2016	3.909.937	11.317	9.844	1473	2.912	3.813	3.671	24.990	72,056	0%	R\$ 0,79	R\$ 0,55	43,5
2017	3.939.936	17.836	15.364	2472	4.505	4.004	4.454	24.920	112,176	0%	R\$ 0,79	R\$ 0,61	67,6
2018	3.968.197	25.989	22.150	3839	6.734	4.251	5.696	24.846	161,437	1%	R\$ 0,74	R\$ 0,66	97,2
2019	3.994.171	36.495	30.799	5696	9.532	4.401	7.230	24.794	224,099	1%	R\$ 0,72	R\$ 0,69	134,8
2020	4.017.286	49.878	41.711	8167	13.167	4.550	9.107	24.742	302,752	1%	R\$ 0,69	R\$ 0,73	182,0
2021	4.036.484	66.907	55.449	11458	18.138	4.752	11.619	24.687	401,395	2%	R\$ 0,63	R\$ 0,78	241,2
2022	4.050.326	88.864	72.979	15885	24.525	4.908	14.927	24.628	526,849	2%	R\$ 0,61	R\$ 0,84	316,4
2023	4.057.512	117.141	95.378	21763	32.469	5.003	18.944	24.566	686,227	3%	R\$ 0,60	R\$ 0,90	412,0
2024	4.056.232	153.209	123.704	29505	42.735	5.104	24.011	24.501	886,703	4%	R\$ 0,58	R\$ 0,96	532,1
2025	4.043.945	199.256	159.546	39710	55.809	5.191	30.484	24.432	1.139,13	5%	R\$ 0,56	R\$ 1,03	683,4
2026	4.017.735	258.008	204.907	53101	72.129	5.247	38.557	24.360	1.456,81	6%	R\$ 0,54	R\$ 1,10	874,9
2027	3.974.124	332.632	262.074	70558	92.545	5.287	48.547	24.296	1.855,62	8%	R\$ 0,52	R\$ 1,18	1.114,4
2028	3.908.653	427.065	333.845	93220	117.856	5.309	60.976	24.248	2.355,29	10%	R\$ 0,49	R\$ 1,28	1.412,5
2029	3.816.479	546.057	423.635	122422	147.985	5.280	75.943	24.218	2.979,54	12%	R\$ 0,46	R\$ 1,38	1.784,6
2030	3.692.941	694.394	534.865	159529	182.771	5.198	93.326	24.195	3.749,73	15%	R\$ 0,44	R\$ 1,50	2.243,4

CENÁRIO 12

	Residência sem energia solar	Residências adotantes da energia solar	Residências adotantes com equipamentos importados	Residências com equipamentos nacionais	Adoção por contato social	Adoção por propaganda	Residências na fila para instalação dos equipamentos	Demanda Total de Energia Elétrica das Residências (GWh/Ano)	Produção de Energia Solar Residencial (GWh/ano)	Parcela da Produção da Energia Solar em Relação a Demanda de Energia elétrica Total	Custo da Energia Produzida	Tarifa Final	Capacidade Instalada (MWp)
2013	3.815.115	0	0	0	0	0	0	25.179	0	0%	R\$ 0,60	R\$ 0,45	0,0
2014	3.847.125	1.640	1444	196	884	4.007	2.608	24.956	10,626	0%	R\$ 0,58	R\$ 0,48	6,4
2015	3.878.412	6.263	5487	776	1.990	4.045	3.300	24.735	39,844	0%	R\$ 0,62	R\$ 0,51	23,8
2016	3.908.856	12.087	10484	1.603	3.315	4.048	3.983	24.527	75,531	0%	R\$ 0,68	R\$ 0,55	45,1
2017	3.938.129	19.204	16491	2.713	5.151	4.235	4.893	24.313	117,841	0%	R\$ 0,68	R\$ 0,61	70,3
2018	3.965.406	28.191	23949	4.242	7.702	4.468	6.285	24.092	169,803	1%	R\$ 0,63	R\$ 0,66	101,2
2019	3.990.046	39.827	33497	6.330	10.929	4.612	8.022	23.916	235,898	1%	R\$ 0,61	R\$ 0,69	140,2
2020	4.011.355	54.742	45615	9.127	15.134	4.752	10.173	23.735	318,755	1%	R\$ 0,58	R\$ 0,73	189,0
2021	4.028.129	73.843	60968	12.875	20.845	4.937	13.039	23.525	422,153	2%	R\$ 0,53	R\$ 0,78	250,1
2022	4.038.747	98.568	80636	17.932	28.200	5.077	16.803	23.323	553,419	2%	R\$ 0,50	R\$ 0,84	327,6
2023	4.041.647	130.528	105852	24.676	37.403	5.161	21.422	23.130	719,961	3%	R\$ 0,50	R\$ 0,90	425,8
2024	4.034.713	171.481	137883	33.598	49.263	5.247	27.257	22.932	928,904	4%	R\$ 0,48	R\$ 0,96	549,0
2025	4.015.058	223.941	178552	45.389	64.320	5.314	34.686	22.730	1.191,10	5%	R\$ 0,46	R\$ 1,03	703,6
2026	3.979.364	291.012	230126	60.886	83.044	5.348	43.925	22.551	1.521,14	7%	R\$ 0,44	R\$ 1,10	898,1
2027	3.923.738	376.271	295180	81.091	106.264	5.362	55.293	22.365	1.932,26	9%	R\$ 0,42	R\$ 1,18	1.140,5
2028	3.843.371	484.057	376789	107.268	134.660	5.350	69.266	22.174	2.441,35	11%	R\$ 0,39	R\$ 1,28	1.440,9
2029	3.733.218	619.407	478559	140.848	167.945	5.285	85.854	22.000	3.070,22	14%	R\$ 0,37	R\$ 1,38	1.810,7
2030	3.588.690	787.201	603968	183.233	205.545	5.163	104.770	21.829	3.835,24	18%	R\$ 0,35	R\$ 1,50	2.260,0