

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Laura Lisiane Callai dos Santos**

**PROJEÇÃO DA DIFUSÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM  
CONSUMIDORES RESIDENCIAIS DE BAIXA TENSÃO**

**Santa Maria, RS, Brasil, 2018.**



**Laura Lisiane Callai dos Santos**

**PROJEÇÃO DA DIFUSÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM  
CONSUMIDORES RESIDENCIAIS DE BAIXA TENSÃO**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção de grau de **Doutora em Engenharia Elétrica**.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Luciane Neves Canha  
Coorientador: Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup>. Daniel Pinheiro Bernardon

**Santa Maria, RS, Brasil  
2018**



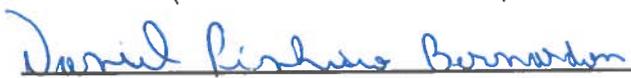
Laura Lisiane Callai dos Santos

**PROJEÇÃO DA DIFUSÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM  
CONSUMIDORES RESIDENCIAIS DE BAIXA TENSÃO**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado  
do Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica, da Universidade  
Federal de Santa Maria (UFSM, RS),  
como requisito parcial para obtenção de  
grau de **Doutora em Engenharia  
Elétrica.**

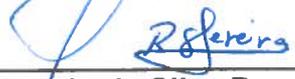
**Aprovado em 19 de março de 2018:**

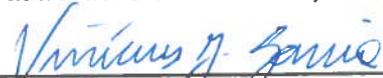
  
\_\_\_\_\_  
**Luciane Neves Canha, Dr<sup>a</sup>. (UFSM)**  
(Presidente/Orientadora)

  
\_\_\_\_\_  
**Daniel Pinheiro Bernardon, Dr. (UFSM)**  
(Coorientador)

  
\_\_\_\_\_  
**Gladis Bordin, Dr<sup>a</sup>. (UFRGS)**

  
\_\_\_\_\_  
**Maurício Sperandio, Dr. (UFSM)**

  
\_\_\_\_\_  
**Paulo Ricardo da Silva Pereira, Dr. (UNISINOS)**

  
\_\_\_\_\_  
**Vinícius Jacques Garcia, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2018



À minha família.



## AGRADECIMENTOS

A realização desse trabalho foi concretizada com o auxílio, compreensão e dedicação de diversas pessoas. Meu agradecimento a todos que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão desse estudo e, de uma maneira especial, agradeço:

Aos meus pais Roselaine e Joel, por sempre terem me incentivado a estudar e por terem acreditado no meu potencial.

Ao meu namorado Daniel, por ter tido muita paciência e compreensão no decorrer desse trabalho.

À professora Luciane Neves Canha, pela confiança em mim depositada e pelo incentivo durante esses anos.

Ao professor Daniel Pinheiro Bernardon, pela colaboração fundamental durante o andamento da tese.

Aos meus amigos, que souberam entender minha ausência e que sempre me deram incentivo;

Aos grandes amigos Dion Lenon Prediger Feil e Nelson Knak Neto, agradeço a amizade, a todas as ajudas no desenvolvimento do trabalho e que, mesmo distantes, estiveram próximos o bastante para me incentivar e apoiar.

À Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, pela infraestrutura oferecida para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFSM por contribuírem pela conquista desse título;

À Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ), aos professores e colegas do curso de engenharia elétrica, pelo apoio e incentivo.



## RESUMO

### PROJEÇÃO DA DIFUSÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM CONSUMIDORES RESIDENCIAIS DE BAIXA TENSÃO

AUTORA: Laura Lisiane Callai dos Santos

ORIENTADORA: Luciane Neves Canha, Dra. Eng.

COORIENTADOR: Daniel Pinheiro Bernardon, Dr. Eng.

Com o objetivo de potencializar o crescimento da Geração Distribuída (GD) no setor residencial brasileiro, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou Resoluções Normativas (RN), que estabelecem as condições gerais para o acesso da GD aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Através dessas RN, o consumidor pode investir em um sistema próprio de geração, sendo a energia solar a fonte mais promissora para GD em Baixa Tensão (BT), principalmente para os consumidores residenciais. Para os estudos de planejamento do sistema, a adoção da GD pelos consumidores residenciais introduz um fator de incerteza no planejamento, pois a decisão em adquirir GD passa pelo juízo de subjetividade de cada indivíduo. Nesse contexto, esta tese propõe uma nova metodologia para projeção da difusão de sistemas fotovoltaicos em consumidores residenciais de BT em duas dimensões: ao longo do tempo e ao longo do espaço, levando em conta que a decisão do consumidor em adquirir aos sistemas fotovoltaicos depende de diversos fatores, dentre os quais se propõe a divisão em cinco aspectos: econômico, gestão, político, social e técnico. A partir da determinação das barreiras, a técnica de dinâmica de sistemas, em conjunto com o modelo de Bass, é utilizada para realizar a projeção dos sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo. Desse modo, após a distribuição ao longo do tempo, é modelada a propagação dos sistemas fotovoltaicos ao longo do espaço. A metodologia desenvolvida pode ser usada no planejamento estratégico e em políticas energéticas. Para avaliar o desempenho e a eficiência da metodologia, foram testados diferentes cenários de projeção da difusão de sistemas fotovoltaicos. Os resultados demonstram que a difusão dos sistemas fotovoltaicos depende de diversos fatores, por exemplo, o preço dos sistemas fotovoltaicos, a tarifa de energia elétrica, incentivos para adoção de sistemas fotovoltaicos (financiamento, programas de incentivo, taxa de serviço, microcrédito, imposto de importação, política de juros baixos e subsídio, tarifas *feed-in*, *net metering* e campanhas de educação) e adoção por outros consumidores.

Palavras chave: Difusão; Dinâmica de Sistemas; Método de Monte Carlo; Modelo de Bass; Projeção; Sistemas Fotovoltaicos.



## **ABSTRACT**

### **PROJECTION OF THE DIFFUSION OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN RESIDENTIAL LOW VOLTAGE CONSUMERS**

**AUTHOR:** Laura Lisiane Callai dos Santos  
**ADVISOR:** Luciane Neves Canha, Dra. Eng.  
**CO ADVISOR:** Daniel Pinheiro Bernardon, Dr. Eng.

Aiming at maximizing the potential growth of Distributed Generation for the residential market, the National Agency of Electrical Energy published the normative resolutions that establishes the general terms for connection of DG systems in distribution systems. Based on that, the consumers are allowed to play an active role in the power system by generating their own energy. On this matter, the solar photovoltaic generation (PV) is the most promising generation system for the low voltage consumers, especially for the residential sector, due to its easy installation. However, despite its potential benefits, photovoltaic generation may introduce uncertainties on distribution system planning studies, since the decision about connecting a PV system to the grid relies on the subjective judgement of each individual. Regarding that, this thesis presents a new methodology for projection of the diffusion of PV Systems in low voltage residential consumers considering two dimensions: throughout time and throughout space. It is considered that consumer's decision in connecting a PV System to the grid is based on several aspects, which were classified in five groups: economical, management, political, social and technical. From that, there is the determination of barriers. From that, the system dynamics technique, combined with the Bass model, is applied to perform the projection of the diffusion of PV Systems throughout time. Then the projection throughout space is modeled. This methodology may be applied to strategic planning and to energy policies. In order to evaluate the performance and efficiency of the methodology, different scenarios of diffusion of PV systems are tested. Results demonstrate that the diffusion of PV systems depends on several factors such as the costs of PV panels, the energy tariff, incentives for adoption of PV systems (funding streams, incentive programs, service charges, microcredit, import taxes, interest rate policies and subsidies, feed-in tariffs, net metering and education campaigns) and the adoption by other consumers.

**Key-words:** Diffusion; Systems Dynamics; Monte Carlo Method; Bass Model; Projection; Photovoltaic Systems.



## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Barreiras associadas a difusão dos sistemas fotovoltaicos .....	61
Tabela 5.1 – Energia anual disponível para geração solar no RS.....	94
Tabela 5.2 – Quantidade de módulos e energia gerada .....	97
Tabela 5.3 – Estimação dos valores dos parâmetros.....	99
Tabela 5.4 – Análise de sensibilidade .....	101
Tabela 5.5 – Cidades pertencentes a mesorregião 7.....	104
Tabela 5.6 – Determinação das variáveis para cada cidade pertencente a mesorregião 7 .....	105
Tabela 5.7 – Cenários analisados .....	107
Tabela 5.8 – Comparação dos cenários ao longo do tempo .....	118



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 – Modelo de estágio no processo de uma inovação .....	24
Figura 2-2 – Curva de adoção de inovações de Rogers em forma de sino.....	25
Figura 2-3 – Curva de adoção de inovações cumulativo em formato de S. ....	25
Figura 3-1 – Processo de modelagem utilizando a DS .....	44
Figura 3-2 – Representação dos indicadores de laços: .....	46
Figura 3-3 – Exemplo de uma conexão causal e de polaridade.....	46
Figura 3-4 – Exemplo de um diagrama de laço causal .....	47
Figura 3-5 – Simbologia utilizada no diagrama de estoque e fluxo .....	48
Figura 3-6 – Padrões de comportamento em sistemas dinâmicos.....	51
Figura 3-7 – Adoção devido a influências externas e internas - Modelo de Bass .....	53
Figura 3-8 - Modelo de Bass a partir da perspectiva de dinâmica de sistemas .....	54
Figura 3-9 – O processo de modelagem .....	57
Figura 4-1 – Estrutura global da metodologia proposta para difusão de sistemas fotovoltaicos .....	60
Figura 4-2 – Etapas para elaboração do modelo proposto de DS com modelo de Bass .....	63
Figura 4-3 – Curva em crescimento em S .....	64
Figura 4-4 – Macro diagrama com os cinco aspectos .....	65
Figura 4-5 – Diagrama de laço causal do modelo completo .....	66
Figura 4-6 – Estrutura global do diagrama de estoque e fluxo do modelo proposto ..	67
Figura 4-7 – Diagrama de estoque e fluxo do submodelo do aspecto econômico ....	69
Figura 4-8 – Exemplo de aplicação do aspecto econômico .....	73
Figura 4-9 – Diagrama de estoque e fluxo do submodelo do aspecto de gestão.....	74
Figura 4-10 – Exemplo de aplicação do aspecto de gestão .....	76
Figura 4-11 – Diagrama de estoque e fluxo do submodelo do aspecto político .....	76
Figura 4-12 – Exemplo de aplicação do aspecto político .....	78
Figura 4-13 – Diagrama de estoque e fluxo do submodelo do aspecto social .....	79
Figura 4-14 – Exemplo de aplicação aspecto social .....	81
Figura 4-15 – Diagrama de estoque e fluxo do submodelo do aspecto técnico .....	82
Figura 4-16 – Exemplo de aplicação aspecto técnico .....	84
Figura 4-17 – Diagrama de Estoque e Fluxo do Modelo completo.....	85



Figura 4-18 – Etapas para elaboração do modelo do MMC.....	89
Figura 4-19 – Frequência de ocorrência exemplo de aplicação.....	90
Figura 4-20 – Adotantes de sistemas fotovoltaicos exemplo de aplicação .....	91
Figura 5-1 – Mapa do Rio Grande do Sul dividido nas 7 mesorregiões .....	93
Figura 5-2 – Radiação solar global diária na mesorregião 7 .....	95
Figura 5-3 – Consumo diário do domicílio.....	96
Figura 5-4 – Número real de adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo .....	100
Figura 5-5 – Número real de adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do espaço .....	100
Figura 5-6 – Frequência de ocorrência para cada cidade .....	106
Figura 5-7 – Adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo – Cenário 1.	108
Figura 5-8 – Adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do espaço – Cenário 1	108
Figura 5-9 - Porcentagem de adotantes de sistemas fotovoltaicos no espaço - Cenário 1.....	109
Figura 5-10 – Adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo – Cenário 2 .....	110
Figura 5-11 - Adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do espaço – Cenário 2 .....	111
Figura 5-12 - Porcentagem de adotantes de sistemas fotovoltaicos no espaço – Cenário 2.....	111
Figura 5-13 - Adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo – Cenário 3	112
Figura 5-14 - Adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do espaço – Cenário 3 .....	113
Figura 5-15 - Porcentagem de adotantes de sistemas fotovoltaicos no espaço – Cenário 3.....	113
Figura 5-16 - Adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo – Cenário 4	114
Figura 5-17 - Adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do espaço – Cenário 4 .....	115
Figura 5-18 - Porcentagem de adotantes de sistemas fotovoltaicos no espaço - Cenário 4.....	116
Figura 5-19 – Comparação dos cenários analisados ao longo do tempo.....	117
Figura 5-20 – Porcentagem de adotantes de sistemas fotovoltaicos ao final de 20 anos. ....	117



Figura 5-21 – Comparação dos adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do espaço.....	119
Figura 5-22 – Comparação da porcentagem de adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do espaço .....	120



## LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BT – Baixa Tensão

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito

DEF – Diagrama de Estoque e Fluxo

DLC – Diagrama de Laço Causal

DS – Dinâmica de Sistemas

FEE – Fundação de Economia e Estatística

GD – Geração Distribuída

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDH – Índice de Desenvolvimento Humano

MMC – Método de Monte Carlo

MME – Ministério de Minas e Energia

NASA - National Aeronautics and Space Administration

ONS – Operador Nacional do Sistema

pu – Por unidade

RN – Resolução Normativa

SEs - Subestações

SMC – Simulação de Monte Carlo

VPL – Valor Presente Líquido

W – Watts



## LISTA DE VARIÁVEIS

- $a$  – Contribuição na Tomada de Decisão do Aspecto Econômico
- $A$  – Domicílios com renda de 5 a 10 salários mínimos
- $A_d$  – Adoção de Sistemas Fotovoltaicos por outros Consumidores
- $AE$  – Aspecto Econômico
- $AEs$  – Área de Estudo
- $AG$  – Aspecto Gestão
- $A_m$  – Questões ambientais
- $AP$  – Aspecto Político
- $AS$  – Aspecto Social
- $ASF$  – Adotantes de Sistemas Fotovoltaicos
- $AT$  – Aspecto Técnico
- $A_{ut}$  – Autonomia em relação a Energia da Distribuidora
- $b$  – Contribuição na Tomada de Decisão do Aspecto Gestão
- $B$  – Domicílios com renda de 10 a 20 salários mínimos
- $c$  – Contribuição na Tomada de Decisão do Aspecto Político
- $C$  – Domicílios com renda maior que 20 salários mínimos
- $C_a$  – Campanhas de educação
- $C_l$  – Clientes satisfeitos
- $C_o$  – Comparação entre VPL da rede e VPL do sistema
- $C_{om}$  – Complexidade do Sistema
- $C_{on}$  – Consumidores
- $C_s$  – Consciência ecológica da população
- $CT$  – Consumidores Totais
- $d$  – Contribuição na Tomada de Decisão do Aspecto Social
- $D$  – Domicílios urbanos
- $D_a$  – Dias do ano
- $D_{ano}$  – Demanda ano
- $D_b$  – Durabilidade
- $D_{dia}$  – Demanda do dia
- $D_i$  – Dificuldade de instalação



$e$  – Contribuição na Tomada de Decisão do Aspecto Técnico

$E$  – Domicílios rurais

$EA$  – Energia Anual

$E_f$  – Eficiência dos sistemas

$E_g$  – Energia gerada pelos sistemas fotovoltaicos

$E_m$  – Energia do sistema fotovoltaicos

$E_{mt}$  – Empresas que trabalham com sistemas fotovoltaicos

$E_n$  – Entradas

$E_r$  – Energia da rede

$E_s$  – Estratégias de Negócios

$E_t$  – Estoques

$E_x$  – Excesso

$F$  – Domicílios próprios

$F_c$  – Fator de conversão para TW

$FC$  – Fator de conversão da energia irradiada para energia elétrica

$F_i$  – Financiamento para Compra de Sistemas Fotovoltaicos

$F_l$  – Fluxo de caixa

$F_N$  – Fraco Serviço de Pós Venda dos Sistemas Fotovoltaicos

$F_{oc}$  – Frequência de ocorrência

$F_t$  – Falta de Conhecimento

$FU$  – Fator de utilização da área com coletores solares

$G$  – Domicílios do tipo apartamento

$H$  – Domicílios do tipo casa

$H_s$  – Horas de pico de sol ao dia

$I$  – Radiação local

$I_m$  – Imposto de Importação

$J_B$  – Juros Baixos para compra de Sistemas Fotovoltaicos

$M_k$  – Marketing

$M_t$  – Manutenção

$N_e$  – Nível de escolaridade

$N_{et}$  – Sistema *Net Metering*



$O_p$  – Operação do sistema fotovoltaico  
 $p$  – Coeficiente de Inovação  
 $PA$  – Potenciais Adotantes  
 $PA_i$  – Potenciais Adotantes Inicial  
 $P_{am}$  – Preocupação Ambiental  
 $P_{In}$  – Programas de Incentivos  
 $P_k$  – Payback  
 $P_s$  – Preço do sistema fotovoltaico  
 $P_t$  – Potência dos módulos  
 $q$  – coeficiente de imitação  
 $Q_l$  – Qualidade dos Sistemas Fotovoltaicos  
 $Q_u$  – Quantidade de módulos fotovoltaicos  
 $R$  – Radiação solar diária  
 $R_e$  – Recursos solares  
 $S_a$  – Salvage  
 $S_b$  – Políticas de Subsídio  
 $S_d$  – Saídas  
 $S_e$  – Situação econômica  
 $S_{mi}$  – Menos de 10 salários mínimos  
 $S_{ma}$  – Mais de 10 salários mínimos  
 $S_p$  – Situação política  
 $T$  – Tarifa de energia elétrica  
 $TA$  – Taxa de Adoção  
 $T_{ax}$  – Taxas de Serviço e Microcrédito  
 $T_f$  – Tarifas *feed-in*  
 $VPL_R$  – VPL anual rede  
 $VPL_S$  – VPL anual do sistema fotovoltaico  
 $VPL S$  – VLP do sistema fotovoltaico



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	17
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	17
1.2	MOTIVAÇÕES E JUSTIFICATIVA.....	18
1.3	OBJETIVOS .....	19
1.3.1	Objetivo geral .....	19
1.3.2	Objetivos específicos.....	19
1.4	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO.....	20
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	23
2.1	DIFUSÃO DE INOVAÇÕES.....	23
2.2	APLICAÇÕES DA DINÂMICA DE SISTEMAS .....	26
2.3	DIFUSÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	28
2.4	BARREIRAS À DIFUSÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS .....	36
2.4.1	Barreiras associadas a alguns países.....	37
2.5	PROJEÇÕES DE CRESCIMENTO NO ESPAÇO VINCULADAS NO TEMPO.....	40
2.6	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO .....	42
3	DINÂMICA DE SISTEMAS .....	43
3.1	TÉCNICA DE DINÂMICA DE SISTEMAS .....	43
3.1.1	Diagramas de Laço Causal .....	45
3.1.2	Diagrama de Estoque e Fluxo .....	48
3.1.3	Modos fundamentais de comportamento dinâmico .....	50
3.2	DINÂMICA DE SISTEMAS COM MODELO DE BASS .....	51
3.2.1	Modelo de Bass.....	52
3.2.2	Aplicação da Dinâmica de Sistemas com Modelo de Bass.....	53
3.3	ETAPAS DA MODELAGEM DE DINÂMICA DE SISTEMAS .....	55
3.4	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO .....	58
4	METODOLOGIA PROPOSTA .....	59
4.1	METODOLOGIA PARA DIFUSÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	59
4.2	DETERMINAÇÃO DAS BARREIRAS ASSOCIADAS À DIFUSÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	61
4.3	DIFUSÃO AO LONGO DO TEMPO UTILIZANDO DINÂMICA DE SISTEMAS.....	62
4.3.1	Diagrama de laço causal .....	64
4.3.2	Diagrama de estoque e fluxo.....	67
4.4	DIFUSÃO AO LONGO DO ESPAÇO UTILIZANDO MMC.....	86
4.4.1	Método de Monte Carlo .....	87
4.4.2	Difusão ao longo do espaço aplicando MMC .....	88
4.5	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO .....	91
5	DESENVOLVIMENTO PRÁTICO E ANÁLISE DE RESULTADOS .....	93
5.1	ESTIMAÇÃO DOS VALORES DOS PARÂMETROS .....	94
5.2	DIFUSÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS – DADOS REAIS .....	99
5.3	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	101
5.4	ESTUDO DE CASO PARA DIFUSÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ...	102
5.4.1	Cenário 1.....	107
5.4.2	Cenário 2.....	109
5.4.3	Cenário 3.....	112
5.4.4	Cenário 4.....	114
5.5	ANÁLISE DE RESULTADOS AO LONGO DO TEMPO .....	116



5.6	ANÁLISE DE RESULTADOS AO LONGO DO ESPAÇO .....	119
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	123
6.1	CONCLUSÕES .....	123
6.2	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES.....	125
6.3	OPORTUNIDADES DE TRABALHOS FUTUROS .....	125
6.4	PRODUÇÃO CIENTÍFICA .....	126
6.4.1	Trabalhos publicados em anais de eventos (completo).....	126
6.4.2	Artigos completos publicados em periódicos.....	127
6.4.3	Registros de <i>Software</i> .....	127
	REFERÊNCIAS.....	129



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

As tecnologias para produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis tem recebido maior atenção nos últimos anos, devido à crescente demanda de energia elétrica, preocupações sobre segurança energética, preocupação ambiental, aumento do preço dos combustíveis fósseis, preocupação com as emissões dos gases que causam o efeito estufa e mudanças climáticas globais (ISLAM, 2013; BHANDARI; STADLER, 2009).

Com o atendimento à crescente demanda e a preocupação ambiental, a Geração Distribuída (GD), com base em sistemas fotovoltaicos, vem ganhando destaque nos últimos anos, tornando-se uma das fontes mais promissoras de energia renovável (CAMILO et al., 2017).

Essa fonte traz como benefícios a redução dos gases de efeito estufa, a criação de oportunidades de emprego, ecossistema de conservação (LI, YI, 2014), sendo os sistemas fotovoltaicos altamente adequados para geração de eletricidade em micro escala por parte de unidades consumidoras (PALM, 2016; KYRITSIS et al., 2017).

Desse modo, muitos países implementaram medidas para a redução do uso da geração de energia proveniente de combustíveis fósseis, incluindo várias políticas para estimular a implantação de tecnologias para geração de energia renovável (BERGEK, MIGNON, 2017; HAFEZNIA et al., 2017).

No Brasil, em 2012, a ANEEL publicou a Resolução Normativa (RN) nº 482 de 2012 (ANEEL, 2012a), que estabelece as condições gerais para o acesso à microgeração e a minigeração distribuída, ou seja, à pequenas centrais geradoras de energia elétrica, próximas aos centros consumidores, que visam incentivar a inserção de GD em consumidores de Baixa Tensão (BT).

A GD utiliza fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica ou cogeração qualificada, conectada na rede de distribuição por meio de instalações consumidoras. A microgeração distribuída se caracteriza por ter uma potência instalada menor ou igual a 100 kW, já a minigeração distribuída têm potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW (ANEEL, 2012a).

Em março de 2016, entrou em vigor a RN nº 687 que altera a RN nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST (ANEEL, 2015b). Essa resolução alterou a potência de geração, fazendo com que a microgeração distribuída passasse a ser uma central geradora de energia elétrica com potência instalada menor ou igual a 75 kW, e a minigeração distribuída uma central geradora de energia elétrica com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW, para fontes hídricas, ou menor ou igual a 5 MW, para cogeração qualificada ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectadas à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2015b).

Apesar das vantagens da utilização da energia fotovoltaica, existem algumas barreiras que afetam o processo de difusão dos sistemas fotovoltaicos em consumidores residenciais de BT, sendo que a questão econômica é apontada como maior influência na decisão do consumidor em adquirir a algum tipo de GD (ABOLHOSSEINI; HESMATI 2014; EPE, 2014).

Rai, Reeves e Margolis (2016) salientam que o custo do sistema fotovoltaico não é a única barreira enfrentada pelos potenciais adotantes, que também enfrentam barreiras de informação. Já Azadian e Radzi (2013) classificam as barreiras para difusão dos sistemas fotovoltaicos em: barreiras institucionais, aceitação pública, barreiras econômicas e barreiras técnicas.

## **1.2 MOTIVAÇÕES E JUSTIFICATIVA**

Com a inserção de sistemas fotovoltaicos pelos consumidores residenciais de baixa tensão, se introduz um fator de incerteza no planejamento dos sistemas de distribuição de energia elétrica, pois a decisão de adquirir um sistema fotovoltaico vai depender da deliberação de cada consumidor. Dessa forma é necessário que se investiguem quais as barreiras e quais os estímulos necessários para promover a utilização desse tipo de microgeração distribuída pelos consumidores.

O processo de difusão dos sistemas fotovoltaicos em consumidores residenciais de BT é de difícil definição, em função das incertezas inerentes a cada consumidor. Conseqüentemente devem ser considerados fatores como a aceitação desses consumidores e seu comportamento em relação à adoção da nova tecnologia.

Considerando estas premissas, neste trabalho é apresentada uma nova metodologia para previsão da difusão de sistemas fotovoltaicos em consumidores residenciais de BT, utilizando como ferramenta a Técnica de Dinâmica de Sistemas, em conjunto com o modelo de Bass, onde são considerados 5 aspectos (econômico, de gestão, social, político e técnico) para a difusão dos sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo. Em um segundo momento é utilizado o Método de Monte Carlo (MMC) para difusão dos sistemas fotovoltaicos ao longo do espaço.

A metodologia acima citada pode ser utilizada para formulação de políticas energéticas para fontes renováveis e também pode ser empregada pelas distribuidoras de energia elétrica nos estudos de planejamento dos sistemas de distribuição, considerando a inserção de sistemas fotovoltaicos por parte dos consumidores de BT. Portanto, tem o potencial de ser uma ferramenta inovadora no processo de implementação dos sistemas fotovoltaicos pelos consumidores.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 Objetivo geral**

Como objetivo geral deste trabalho tem-se o desenvolvimento de uma metodologia global para previsão da difusão de sistemas fotovoltaicos nos consumidores residenciais de BT para utilização das empresas de energia elétrica e formulação de políticas energéticas para fontes renováveis.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

1 – Modelar e avaliar a difusão de sistemas fotovoltaicos em duas dimensões: ao longo do tempo e ao longo do espaço.

2 – Modelar e avaliar o comportamento dos consumidores de baixa tensão, considerando os aspectos: econômicos, de gestão, políticos, sociais e técnicos.

3 – Modelar e avaliar a abrangência de inserção dos sistemas fotovoltaicos utilizando o Método de Monte Carlo.

4 – Avaliar diferentes cenários de previsão da difusão de sistemas fotovoltaicos no sul do Brasil para consumidores de BT, baseados na aplicação de diferentes políticas para difusão da microgeração.

## 1.4 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

A principal contribuição desse trabalho está na definição de um modelo para difusão de sistemas fotovoltaicos nos consumidores residenciais de baixa tensão em duas dimensões: ao longo do tempo e ao longo do espaço, onde são levadas em considerações as barreiras associadas à decisão do consumidor em adquirir um sistema fotovoltaico, bem como as características de cada uma das cidades pertencentes à região de estudo.

As principais contribuições desse trabalho são:

- Metodologia para analisar a difusão de sistemas fotovoltaicos em duas dimensões: ao longo do tempo e ao longo do espaço.
- Definição de modelos dinâmicos para a representação dos aspectos: econômico, de gestão, político, social e técnico.
- Método para definição do intervalo de inserção dos sistemas fotovoltaicos utilizando o Método de Monte Carlo.

## 1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para alcançar esses objetivos, o presente trabalho se divide em seis capítulos, incluindo este introdutório.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica que contextualiza a temática da difusão de inovações. É apresentada a difusão de sistemas fotovoltaicos nos consumidores residenciais de BT e as barreiras associadas à decisão do consumidor residencial em adquirir um sistema fotovoltaico.

O capítulo 3 apresenta os conceitos da técnica de dinâmica de sistemas, incluindo as etapas para a elaboração de um modelo. Também é apresentado o modelo de Bass e a aplicação da técnica de dinâmica de sistemas com o modelo de Bass.

No capítulo 4 são apresentadas as etapas para o desenvolvimento da metodologia proposta, a qual está dividida em três itens: determinação das barreiras associadas à difusão dos sistemas fotovoltaicos, difusão ao longo do tempo utilizando Dinâmica de Sistemas e modelo de Bass e difusão ao longo do espaço utilizando Método de Monte Carlo.

O capítulo 5 apresenta o desenvolvimento prático e a análise de resultados. Desse modo, é realizado um estudo de caso para difusão ao longo do tempo considerando a mesorregião 7 do estado do Rio Grande do Sul, considerando cenários de difusão. Após, é realizado um estudo de caso para difusão ao longo do espaço, considerando as 19 cidades pertencentes à mesorregião 7.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as considerações finais, sintetizando as contribuições da metodologia proposta bem como sugestões para trabalhos futuros. No mesmo capítulo são apresentadas as produções científicas realizadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda a difusão dos sistemas fotovoltaicos nos consumidores residenciais em BT. São discutidas as barreiras associadas à adesão dos sistemas fotovoltaicos pelos consumidores. Tem-se como principal finalidade contextualizar os objetivos propostos, destacando os métodos para projeção da difusão dos sistemas fotovoltaicos nos consumidores residenciais de BT.

### 2.1 DIFUSÃO DE INOVAÇÕES

A difusão dos sistemas fotovoltaicos nos consumidores residenciais de BT pode ser considerada um problema de difusão de inovações. Gabriel Tarde, psicólogo social, foi um pioneiro nos estudos sobre a difusão de inovações, publicando o livro "As Leis da Imitação". Tarde reconheceu o papel dos líderes de opinião na adoção (que ele denominava de imitação) ou na rejeição de uma inovação. Contudo, suas ideias não foram rapidamente aceitas (ROGERS, 1971).

Hall (2004) afirma que a difusão é comumente utilizada para descrever o processo pelo qual indivíduos e empresas em uma sociedade/economia adotam uma nova tecnologia ou repõem uma velha tecnologia por uma nova. Para (ROGERS, 1971), difusão é o processo pelo qual uma inovação é comunicada através de certos canais ao longo do tempo dentre os membros de um sistema social. É um tipo especial de comunicação, em que as mensagens são ligadas a novas ideias.

Já Peres, Muller e Mahajan (2010) definem a difusão da inovação como sendo um processo de penetração no mercado de novos produtos e serviços, sendo este processo impulsionado por influências sociais. Essas influências incluem todas as interdependências entre os consumidores que afetam diversos adotantes no mercado, com ou sem o seu conhecimento explícito.

Segundo Serman (2000), a literatura em difusão de novos produtos e de inovações sociais e técnicas é vasta. Um dos primeiros trabalhos foi proposto por Everett Rogers (1971), no livro Difusão de Inovações, que é considerada uma das grandes obras a tratar do assunto.

Para modelos de difusão aplicados à venda de novos produtos se tem Mahajan, Muller e Bass (1990). O ímpeto principal subjacente a estas contribuições é um novo modelo de crescimento do produto, sugerido por Bass (1969).

Com essas considerações, entende-se que o processo de difusão é a trajetória de adoção de uma inovação ao longo do tempo por indivíduos ou organizações que fazem parte de um sistema social. A Figura 2-1 apresenta um modelo de estágios no processo de decisão de uma inovação.

Figura 2-1 – Modelo de estágio no processo de uma inovação



Fonte: Adaptado de Rogers (1971).

De acordo com Rogers (1971), o modelo de estágios no processo de decisão de uma inovação, Figura 2-1, é composto por cinco passos. O primeiro é o conhecimento, que é quando o indivíduo está exposto à existência e os ganhos da inovação, compreensão de como ele funciona. O segundo passo é a persuasão, ela ocorre quando o indivíduo toma uma atitude favorável ou desfavorável diante a inovação. O terceiro passo é a decisão, quando o indivíduo se envolve em atividades que levam a uma escolha para aprovar ou rejeitar a inovação. A implementação ocorre quando o indivíduo coloca a inovação em uso. E por fim, a confirmação que é quando o indivíduo visa o reforço de uma inovação-decisão já feita, mas ele pode reverter essa decisão anterior se forem expostos a mensagens conflitantes sobre a inovação.

Rogers (1971) destaca que um dos mecanismos que auxilia no processo de difusão de uma inovação são as condições de identidade de valores e conhecimento, e entre os que dificultam o processo estão as diferenças de valores e conhecimento. As diversas condições que separam as pessoas nas diferentes classes de renda estão valores e nível de escolaridade. No Brasil, o nível de renda ainda está correlacionado ao nível de escolaridade.

Segundo Rogers (1971), nem todos os indivíduos em um sistema social adotam uma inovação ao mesmo tempo. Em vez disso, eles adotam em uma sequência de tempo, podendo ser classificados em categorias de adoção, levando em conta o período em que começam a usar uma nova ideia.

A Figura 2-2 mostra a distribuição de frequência normal dividida em cinco categorias de adoção: (1) inovadores, (2) adotadores, (3) maioria inicial, (4) maioria tardia e (5) retardatários.

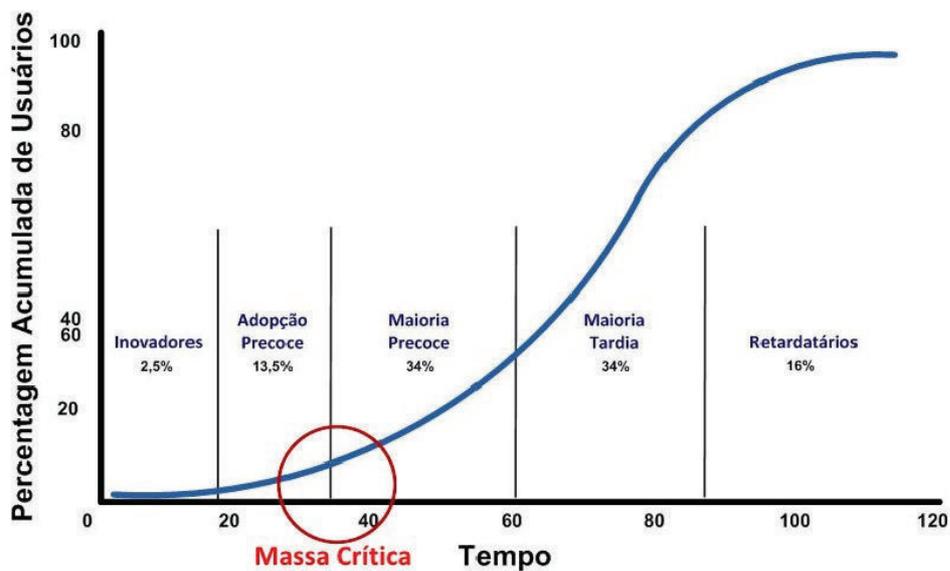
Figura 2-2 – Curva de adoção de inovações de Rogers em forma de sino.



Fonte: Adaptado de Rogers (1971).

Pesquisas anteriores geralmente mostraram que a adoção de uma inovação segue uma curva normal em forma de sino, conforme Figura 2-2, quando plotados ao longo do tempo em uma base de frequência. Se o número acumulado de adotantes são plotados, o resultado é uma curva em forma de S. A Figura 2-3 mostra os dados de ação representados por uma curva em forma de S (acumulável) (ROGERS, 1971).

Figura 2-3 – Curva de adoção de inovações cumulativo em formato de S.



Fonte: Adaptado de Rogers (1971).

Ambas as curvas, Figura 2-2 e Figura 2-3, são obtidas a partir dos mesmos dados: a adoção de uma inovação ao longo do tempo pelos membros de um sistema social. Entretanto, a curva em forma de sino mostra esses dados em termos de número de indivíduos adotando a cada ano, enquanto a curva em forma de S mostra esses dados em uma base cumulativa (ROGERS, 1971).

A adoção de inovações, tais como tecnologias de energia renovável, é um processo complexo com vários fatores ligados. Zhai e Williams (2012) discutem que mapear o processo de difusão das fontes renováveis não é uma tarefa trivial, pois envolve várias incertezas devido aos aspectos tecnológicos, econômicos e sociais. Pesquisas sobre a difusão de sistemas fotovoltaicos existem desde a década de 1980, sendo Katzman (1981) um dos precursores.

Sterman (2000) discute que a Dinâmica de Sistemas é uma metodologia que visa o estudo e à gestão de sistemas complexos com realimentação que permite conectar vários aspectos (técnicos, econômicos, sociais e de gestão) em um modelo conceitual coerente. Diante disso, para a resolução do problema de difusão de inovações, no contexto de sistemas fotovoltaicos, se utilizou, neste trabalho, a técnica de Dinâmica de Sistemas (DS) em conjunto com o modelo de Bass. Sendo a técnica de DS utilizada para diversas aplicações.

## **2.2 APLICAÇÕES DA DINÂMICA DE SISTEMAS**

A história da DS teve início em 1961 com Forrester, na tentativa de entender problemas estratégicos em sistemas dinâmicos complexos. A DS é fundamentada na teoria de controle e na moderna teoria de não linearidade. Inúmeros trabalhos vêm sendo desenvolvidos utilizando a DS, tendo destaque os produzidos por Coyle (2000), Ford, (1999) e Sterman (2000).

Segundo Sterman (2000), a DS tem sido aplicada a questões da física à fisiologia e psicologia, das corridas armadas à guerra contra as drogas, das mudanças climáticas à mudança organizacional. Sendo vastamente utilizada no estudo gerencial, fazendo análise de grandes empresas americanas, e buscando a solução de problemas relacionados à estrutura e aos processos de produção.

A Dinâmica de Sistemas tem sido extensivamente aplicada como ferramenta de análise, planejamento e de alocação de recursos em sistemas de energia elétrica. Uma das primeiras aplicações de DS em sistemas energéticos foi o modelo

desenvolvido por Naill, em 1973, para representar a exploração e produção de gás natural nos Estados Unidos (NAILL, 1977).

Nos anos 80, as distribuidoras de geração de energia elétrica nos Estados Unidos começaram a se interessar por programas de incentivos à conservação e ao uso racional de energia. Desse modo, Ford e Geinzer (1990) fizeram planejamento integrado de recursos utilizando a DS.

Bunn e Larsen (1992) desenvolveram uma pesquisa para fornecer informações de como o investimento em capacidade de geração pode evoluir de acordo com várias condições regulatórias, questões econômicas, graus de competição estratégica de comportamento de companhias separadas, usando uma abordagem de dinâmica de sistemas. Dessa maneira, um modelo de simulação de investimento é desenvolvido para gerar informações a respeito da volatilidade da margem de reserva, variações na probabilidade de perda de carga e vários cenários de mercado.

Ford (1995) utilizou a DS para simular o impacto de realimentações para incentivar a venda de veículos elétricos no sul da Califórnia. As simulações mostram que as realimentações podem ser controladas, apesar das muitas incertezas, na previsão das futuras vendas de veículos convencionais e elétricos.

No estudo de decisões estratégicas na cadeia de suprimentos (GEORGIADIS; VLACHOS; IAKOVOU, 2005), no gerenciamento ambiental (CAVANA; FORD, 2004; FORD, 1999), na importante avaliação da administração de capitais em países emergentes, a Dinâmica de Sistemas também tem sido amplamente utilizada (LEE; CHOI; PARK, 2005)

Dimitrovski et al. (2004) estudaram a modelagem de longo prazo das dinâmicas de investimento e planejamento do sistema elétrico de potência.

No Brasil, nos últimos anos alguns autores vêm trabalhando com a DS, Alves (1997) aplica a técnica de DS no planejamento de sistemas de energia elétrica, através do seu uso na previsão do consumo do mercado residencial.

Ortegosa (2006) propõe uma ferramenta de apoio aos consumidores residenciais no processo de análise da viabilidade econômico-financeira na utilização do gás natural em alternativa à energia elétrica, para o aquecimento de água, utilizando a técnica de DS.

Bourges (2009) utilizou a DS para apresentar um modelo matemático de uma pequena central hidrelétrica, adequado à melhoria da gestão operacional da unidade.

Souza (2012) utilizou a DS para criação de uma ferramenta computacional que permite ao consumidor avaliar a decisão econômica sobre sua migração entre os ambientes de mercado.

Ebert (2015) apresenta a modelagem de um sistema hidrotérmico levando em consideração as principais variáveis que compõem o sistema elétrico brasileiro como energia natural afluyente, geração termo, geração hidro, carga de energia, energia armazenada e o preço de liquidação das diferenças.

De modo semelhante, a DS também tem sido usada por alguns autores para previsão da difusão de sistemas fotovoltaicos em consumidores residenciais. Alguns autores associam a DS com o modelo de Bass, conforme apresentado no próximo item.

Sendo que a tese apresentada difere dos outros trabalhos em relação a utilização da DS em conjunto com o modelo de Bass, onde são considerados 5 aspectos (econômico, gestão, político, social e técnico) que afetam a decisão do consumidor em adquirir um sistema fotovoltaico ao longo do tempo, e após são feitas análises da abrangência desses consumidores pelo método de Monte Carlo, servindo deste modo para a formulação de políticas energéticas para fontes renováveis.

## **2.3 DIFUSÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

O conhecimento da abrangência da difusão de fontes de geração distribuída é de fundamental importância para operação e planejamento dos sistemas elétricos. O principal desafio é estimar o uso dessas tecnologias para os consumidores de BT em função dos diversos aspectos: sociotécnicos, econômicos, de gestão e políticos (KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015) que contribuem para a tomada de decisão do consumidor. Já Reddy e Painuly (2004) classificam as barreiras para adoção de tecnologias renováveis em econômicas, tecnológicas, de mercado e institucionais. Para Colmenar-Santos et al. (2016) são as barreiras técnicas, econômicas e regulamentares que limitam o impulso definitivo da geração distribuída. Os autores Rai, Reeves e Margolis (2016) consideram os principais aspectos da análise, os

fatores de motivação, processo de coleta de informações, efeitos dos pares e influência de outros adotantes.

Em relação a inserção da GD nos sistemas elétricos de distribuição em BT, à maioria dos autores utiliza a GD fotovoltaica, por ser uma tecnologia com maior praticidade de instalação e uma maior disponibilidade dos seus recursos.

Uma das alternativas para se estimar a difusão de sistemas fotovoltaicos é por meio de pesquisas junto aos consumidores. Diversos países vêm adotando esta estratégia, com a utilização de questionários. São exemplos de nações que utilizaram essa prática: Países Baixos (JAGER, 2006), Reino Unido (FAIERS; NEAME, 2006), Austrália (SIMPSON; CLIFTON, 2015), Índia (REDDY; PAINULY, 2004), Japão (YAMAMOTO, 2015), Malásia (JAYARAMAN; PARAMASIVAN; KIUMARSIC, 2017) e Suécia (PALM, 2016).

De maneira semelhante, Sommerfeld e Vine (2017) apresentam um relatório de análise de 22 pessoas que adquiriram um sistema fotovoltaico. As respostas dos participantes, neste estudo, indicam que os fatores sociais e econômicos foram mais importantes que os ambientais na decisão dos indivíduos em adquirir ao sistema. Os autores têm como objetivo fornecer uma visão que auxilie no desenvolvimento de políticas para energia solar.

Bauner e Crago (2015) e Zhai e Williams (2012) exploram a aceitação do consumidor em aderir aos sistemas fotovoltaicos. Bauner e Crago (2015) apresentam um modelo teórico de decisão do consumidor, Zhai e Williams (2012) exploram o papel da aceitação do consumidor e modelam o seu efeito, por meio da lógica *fuzzy*, considerando três parâmetros: preocupação ambiental, custo dos sistemas fotovoltaicos e sua manutenção.

Faiers e Neame (2006) utilizam a difusão de inovações para determinar atitudes do consumidor em relação aos sistemas domésticos de energia solar. De maneira semelhante, Islam (2014) utiliza difusão de inovação em conjunto com o modelo de Bass para prever a difusão de sistemas fotovoltaicos a nível doméstico, onde o autor não utiliza as cinco barreiras propostas nesta tese e não faz a difusão dos sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo.

Alguns autores têm uma preocupação maior com as questões econômicas. Ayompe, Duffy, McCormack e Conlon (2010) fazem uma análise sobre um sistema fotovoltaico conectado à rede utilizando o modelo de paridade tarifária. Com viés semelhante, Lund (2011) faz um estudo para impulsionar as novas tecnologias

renováveis considerando a paridade da rede, sob aspectos políticos e econômicos. Também de modo similar Lang, Ammann e Girod (2016) avaliam o desempenho econômico de sistemas solares na cobertura de edifícios residenciais e comerciais, sob aspectos tecnológicos, econômicos e fatores geográficos.

Entretanto, (YANG, 2010) questiona a utilização apenas da paridade tarifária. Para o autor, atingir um nível de custo-efetividade não é o bastante para garantir a inserção de uma tecnologia. Como exemplo, o autor cita que os sistemas de aquecimento solar d'água já atingiram a paridade tarifária em muitos lugares e nem por isso se espalharam massivamente ao redor do mundo.

De maneira mais abrangente, Campoccia et al. (2014) apresentam uma análise comparativa dos principais mecanismos de apoio para a promoção de sistemas fotovoltaicos em seis países da União Europeia (França, Alemanha, Grécia, Itália, Espanha e no Reino Unido), utilizando como fatores: o fluxo de caixa descontado (DCF), o Pay-Back-período (PBP), o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR). Já Yamamoto (2015) examina as diferenças entre tarifas *feed-in*<sup>1</sup> (*FIT*), *net metering*<sup>2</sup> e compra e venda de energia elétrica, utilizando um modelo microeconômico simples.

Um dos trabalhos recentes, que faz a modelagem da difusão de sistemas fotovoltaicos, é dos autores Jimenez, Franco e Dyner (2016), utilizam a técnica de DS em conjunto com o modelo de Bass, onde a difusão do consumidor é modelada apenas em função do tempo do retorno do investimento e os autores têm uma visão menos abrangente das barreiras que afetam a adoção de sistemas fotovoltaicos pelos consumidores residenciais.

Hsu (2012) também utiliza a abordagem da dinâmica de sistemas, mas o autor avalia as tarifas *feed-in* e subsídios que ajudem na adoção de sistemas fotovoltaicos. Os resultados mostraram que o objetivo da instalação de sistemas fotovoltaicos pode ser alcançado através da adoção de medidas políticas adequadas, tais como preços *FIT* ou subsídios.

---

<sup>1</sup> O sistema *Feed-in* consiste no pagamento de uma tarifa mais vantajosa para as centrais geradoras que utilizam fontes renováveis de energia, quando comparada com as fontes convencionais. O objetivo é viabilizar a implantação de tais empreendimentos, que possuem custos mais elevados de produção (ANEEL, 2010).

<sup>2</sup> *Net metering*: consiste na medição do fluxo de energia em uma unidade consumidora dotada de pequena geração, por meio de medidores bi-direcionais. Dessa forma, registra-se o valor líquido da energia no ponto de conexão, ou seja, se a geração for maior que a carga, o consumidor recebe um crédito em energia ou em dinheiro na próxima fatura. Caso contrário, o consumidor pagará apenas a diferença entre a energia consumida e a gerada (ANEEL, 2010).

Nos últimos anos, a energia solar fotovoltaica mostrou um aumento significativo em termos de instalação mundial. Um dos principais motivos é a introdução da política de pagamento de tarifa (*FIT*) pelos governos. Dentro deste panorama, Ahmad et al. (2015) avaliam a política de *FIT* na promoção de investimentos em energia solar fotovoltaica na Malásia, usando uma abordagem de sistemas dinâmicos.

De maneira semelhante, Guo e Guo (2015) fazem uso da metodologia de DS, considerando fatores econômicos e técnicos, para a previsão do desenvolvimento de energia fotovoltaica da China. Os autores realizaram análises de sensibilidade para analisar as variáveis e a eficácia de políticas públicas.

Em uma abordagem dos riscos que envolvem a adoção de energias renováveis, Liu e Zeng (2017) utilizam a técnica de dinâmica de sistemas para criação de um modelo de avaliação de risco de investimento desta espécie, considerando três fatores primordiais: técnico, mercado e político.

Os autores Movilla, Miguel e Blázquez (2013) criam um modelo computacional utilizando a metodologia de dinâmica do sistema. O modelo permite uma compreensão do comportamento do setor nas últimas políticas do Governo espanhol, ajudando assim, a conceber futuras políticas públicas para projeção dos sistemas fotovoltaicos.

Radomes e Arango (2015) analisam a difusão de um sistema fotovoltaico na Colômbia. Um modelo de difusão é construído utilizando a técnica de dinâmica de sistemas, com base na clássica teoria da difusão de Bass, onde a taxa de adoção se dá em função de uma campanha de conscientização e interação social. O modelo incorpora políticas de subsídio e tarifas *FIT*.

Hafeznia et al. (2017) fazem uma análise e avaliação da efetividade da igualdade política nacional de energia renovável nas diferentes regiões de um país. Esta pesquisa vislumbra a ideia de que as políticas energéticas devem se dar de acordo com as circunstâncias locais de cada região, o que resultaria em uma maior eficiência dessas políticas. Assim, um quadro inovador é apresentado para categorizar as políticas governamentais com base nos indicadores geográficos, técnicos e socioeconômicos.

Outro bom exemplo a ser utilizado é a Alemanha, onde em 2014 mais de 1,5 milhão de sistemas fotovoltaicos foram instalados, o que equivale a uma capacidade instalada cumulativa total de 38,2 GW. O crescimento do mercado de sistemas

fotovoltaicos alemão não tem sido conduzido apenas por sistemas de escala de utilidade, mas também por instalações de sistemas fotovoltaicos residenciais de pequena escala, que representam cerca de 39% da capacidade total instalada naquele país (DHARSHING, 2017).

Strupeit e Palm (2016) apresentam um estudo de caso onde as empresas de energia solar nos EUA, Japão e Alemanha, empregam modelos comerciais distintos, para a implantação efetiva de sistemas fotovoltaicos com sede no cliente. Em todos os três países as empresas criaram ofertas abrangentes de serviços de produtos, superando as barreiras típicas à adoção de sistemas fotovoltaicos de clientes. Os resultados mostram que os modelos de negócios fotovoltaicos dependem fundamentalmente do ambiente contextual nacional distinto, como a estrutura política, os custos de importação, o mercado da eletricidade, o setor de construção e os fatores relacionados ao consumidor. Os decisores políticos e os gerentes de negócios que desejam acelerar a difusão da tecnologia de sistemas fotovoltaicos, entre os grupos de consumidores mais amplos, são aconselhados a analisar o ambiente contextual, a fim de identificar modelos empresariais bem adaptados e aperfeiçoar seu design.

Outro estudo na área foi realizado por Heras-Saizarbitoria, Cilleruelo e Zamanillo (2011), que abordam a questão da aceitação pública na difusão da energia fotovoltaica. O trabalho analisa a cobertura da mídia que influencia a aceitação do consumidor em adquirir sistemas fotovoltaicos.

Palmer, Sorda e Madlener (2015) propuseram um modelo baseado em agente para simular como mudanças no esquema de apoio italiano afetam a difusão de sistemas fotovoltaicos nos domicílios. A decisão de adoção é assumida como sendo influenciada pelo período de retorno do investimento, o benefício ambiental, o rendimento do domicílio, e a comunicação com outros agentes.

Yamaguchi et al. (2013) desenvolveram um modelo que estima a difusão de sistemas fotovoltaicos e aquecedores de água no setor residencial do Japão até 2025, bem como a redução das emissões de CO<sub>2</sub> em função deste cenário. Os autores utilizaram o modelo de difusão de Bass por descrever de forma muito adequada a curva de adoção empírica. O trabalho é dividido em três etapas: (1) Investigação das preferências dos consumidores, (2) Previsão de difusão de tecnologia levando em consideração preferências dos consumidores, (3) Estimativa da redução das emissões de CO<sub>2</sub>, causada pela difusão da tecnologia examinada.

Strazzera e Statzu (2017) fazem uma análise de seis países do Mediterrâneo, no que diz respeito à aceitação pública da tecnologia fotovoltaica e tecnologias de construção integrada de energia fotovoltaica (BIPV). A análise considera tanto a dimensão privada, ou seja, a vontade de instalar um sistema fotovoltaico específico, quanto a dimensão pública, representada pela aceitabilidade das aplicações BIPV no contexto urbano, onde o indivíduo reside.

Bashiri e Alizadeh (2017) utilizam um modelo de regressão logístico binário para analisar a probabilidade de adoção de sistemas fotovoltaicos no Teerã. Os resultados deste estudo ajudam os formuladores de políticas e os comerciantes de energia renovável a tomar decisões relacionadas à energia.

Vasseur e Kemp (2015) têm como objetivo compreender a adoção de sistemas fotovoltaicos na Holanda a partir de uma perspectiva de usuário, onde foram estudadas a influência dos seguintes fatores: a vantagem relativa percebida da tecnologia, a complexidade da inovação, a influência social e o conhecimento de bolsas e custos. Para cada um dos fatores, proxies diferentes estão sendo usados, na tentativa de estudar componentes individuais. A influência dos quatro fatores de adoção é estudada para 4 grupos: adotantes voluntários, adotantes involuntários (pessoas que compraram uma casa equipada com sistemas fotovoltaico), possíveis adotantes e rejeitadores. Os resultados mostram que a adoção depende de percepções de atributos.

Segundo Franceschinis et al. (2017), a teoria sugere que crenças e atitudes dos consumidores individuais desempenham um papel crucial na difusão de produtos. Embora a preocupação ambiental, interesse pela tecnologia, acesso a um recurso de tecnologia renovável e perspectivas para gerar receitas econômicas são motivos importantes, em geral.

A difusão das tecnologias de geração de energia elétrica renovável deve acelerar para que os países atinjam suas metas para geração de energia renovável. Para isto, serão necessárias políticas para induzir a adoção desses sistemas pelos consumidores (BERGEK; MIGNON, 2017).

A implantação de sistemas fotovoltaicos no Brasil é uma alternativa importante no contexto da crise energética brasileira. Neste cenário Pinto, Amaral e Janissek (2016) realizaram uma análise de cenários, perspectivas e políticas na implantação em consumidores de baixa renda. Além disso, Holdermann, Kissel e Beige (2014) concluíram que, sem a viabilidade econômica dos sistemas

fotovoltaicos no Brasil, apenas um pequeno número de empresas comerciais e casas particulares vão investir nestes sistemas, devido à falta de lucratividade.

Os sistemas fotovoltaicos no Brasil tornam-se uma opção interessante devido à combinação de: a) as tarifas residenciais elevadas, que variam de 17 a 39 centavos de dólar por kWh; b) a grande disponibilidade de recursos de radiação solar, variando de mais de 1500 a cerca de 2200 kWh/m<sup>2</sup>/ano (MARTINS et al., 2008); e c) a redução internacional dos preços dos módulos solares, que reduziu de cerca de 23 US\$/Wp em 1980 para 1 US\$/ Wp em 2012 (JANNUZZI; MELO, 2013).

Baumgarten (2016) apresenta um modelo com uso da dinâmica de sistemas para análise do comportamento dinâmico da inserção da micro e da minigeração fotovoltaica em redes de distribuição de energia elétrica no Brasil. O modelo testa as políticas, através da construção de cenários na tomada de decisão do consumidor em investir na microgeração, utilizando fatores técnicos, econômicos, sociais e ambientais. Sendo considerado um trabalho pioneiro no Seminário de DS em 2016 por Andy Ford.

Nesse mesmo contexto, Konzen (2014) projeta a difusão de sistemas fotovoltaicos conectados à rede em residências brasileiras, em um horizonte decenal sob diferentes cenários. O autor utiliza um modelo de difusão de Bass, que consiste no levantamento do mercado potencial, de acordo com características socioeconômicas da população e do retorno do investimento.

Diferentemente, Salamoni (2009) desenvolveu ferramentas que auxiliam na criação de uma legislação do setor elétrico e no desenvolvimento de políticas públicas, no que diz respeito à implantação de um programa brasileiro de telhados solares, e apresenta um estudo de paridade tarifária entre a geração convencional e a geração fotovoltaica. Apresenta também os benefícios da utilização dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição e as barreiras que freiam a inserção da energia fotovoltaica na matriz brasileira.

Miranda, Szklo e Schaeffer (2015) analisam o potencial técnico-econômico para instalação de fontes fotovoltaicas no setor residencial brasileiro, considerando características socioeconômicas, como: rendimento domiciliar, consumo de energia, disponibilidade de telhados, curva de carga, custo de capital e financiamento. Os autores trazem como resultado que apenas 0,1% das residências brasileiras estavam prontas para instalar sistemas fotovoltaicos em 2016. A estimativa dos estudiosos é de em 2026 este número deva atingir o valor de 55%.

Kagan et al. (2013) realizaram uma projeção dos sistemas fotovoltaicos no Brasil até 2030, com base na distribuição estatística de Weibull, fornecendo a penetração de mercado em função do período de *payback* de parâmetros de ajuste. Para isso, os autores usaram como referência o trabalho de Macauley e Shih (2003).

Jannuzzi e Melo (2013) apresentam uma análise prospectiva de sistemas fotovoltaicos conectados em consumidores residenciais no Brasil, com o objetivo de avaliar cenários de difusão desta tecnologia até 2030, considerando mecanismos de políticas para promover o desenvolvimento da geração fotovoltaica conectada na rede. Os três mecanismos avaliados são: o esquema de compensação líquida de medição, tarifas *feed-in* e subsídios diretos para instalações dos sistemas fotovoltaicos. Os resultados da investigação mostram que a GD fotovoltaica tem boas oportunidades para o Brasil diversificar sua matriz energética, com potenciais benefícios econômicos e ambientais. No entanto, é claro que a ausência de objetivos de política energética, em longo prazo, para sistemas fotovoltaicos e a falta de mecanismos de suporte adicionais poderiam refletir em uma adoção ineficiente e incipiente desta tecnologia e a perda de seus benefícios potenciais.

De acordo com ANEEL (2017), após a publicação da REN 482/12, iniciou-se no país um lento processo de difusão de micro e minigeradores distribuídos, o qual começou a acelerar a partir de 2016, sendo que a fonte solar fotovoltaica representa 99% do número total de instalações.

Nessa nota técnica (ANEEL, 2017), são feitas projeções para a difusão de micro e minigeração distribuída, no horizonte 2017-2024, utilizando a teoria da difusão de inovações de Rogers (1971) e também a metodologia empregada por Konzen (2014), com algumas adaptações.

Diferentemente da nota técnica, a metodologia proposta na tese utiliza a DS em conjunto com o modelo de Bass com uma grande abrangência das barreiras e estímulos que influenciam a decisão do consumidor em adotar um sistema fotovoltaico, bem como a difusão desses consumidores ao longo do espaço.

Conforme os trabalhos citados, embora existam estudos que lidam com a difusão de sistemas fotovoltaicos em consumidores residenciais, a maioria deles é limitado na análise das barreiras para a difusão, o que indica a necessidade de um refinamento sobre o modelo utilizado, bem como os parâmetros considerados.

## 2.4 BARREIRAS À DIFUSÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

A utilização de sistemas fotovoltaicos em muitos países vem se tornando uma solução promissora para atender às necessidades energéticas (QURESHI; ULLAH; ARENTSEN, 2017) e para alcançar o desenvolvimento sustentável com a redução das emissões de carbono geradas pelos combustíveis fósseis (SARDIANOU; GENOUDI, 2013).

O setor residencial tem uma parcela significativa na demanda de energia elétrica, possuindo assim, grande importância na adoção dos sistemas fotovoltaicos. Porém, a implantação de energia renovável no setor residencial depende da intenção dos consumidores em adotar uma tecnologia de inovação (SARDIANOU; GENOUDI, 2013).

Como esta decisão depende dos consumidores, existem algumas barreiras associadas à difusão dos sistemas fotovoltaicos, pois as barreiras são de difícil definição em função das incertezas inerentes a cada consumidor. Na literatura brasileira, este é um assunto pouco debatido. A maior parte dos estudos se dá em países onde existem fortes políticas de incentivo a esta modalidade de geração de energia elétrica. Governos que procuram difundir sistemas fotovoltaicos amplamente em toda a sociedade, geralmente oferecem incentivos como subsídios, créditos fiscais e tarifas de *feed-in*, para promover a disseminação de adoção. Esses incentivos, juntamente com as reduções de custo dos sistemas fotovoltaicos que acompanharam o desenvolvimento da tecnologia, aumentam as vantagens para os potenciais adotantes de inserir os sistemas fotovoltaicos em suas residências (YAMAMOTO, 2015).

Para compreender melhor a decisão do consumidor residencial em aderir aos sistemas fotovoltaicos, alguns autores realizaram pesquisas e determinaram algumas destas barreiras, como: a conveniência em usar a eletricidade da rede de alimentação, a qual é fornecida diretamente pela concessionária (FAIERS; NEAME, 2006; ZHAI; WILLIAMS, 2012), a falta de familiaridade com os sistemas fotovoltaicos e seus benefícios (ZHAI; WILLIAMS, 2012; JAGER, 2006), falta de informação em relação aos sistemas fotovoltaicos (RAI; REEVES; MARGOLIS, 2016; JAGER, 2006), a necessidade de manutenção (ZHAI; WILLIAMS, 2012; RAI; REEVES; MARGOLIS, 2016), alto custo do sistema fotovoltaico (QURESHI; ULLAH; ARENTSEN, 2017; ZHANG; SHEN; CHAN, 2012; BALCOME; ADISA; AZAPAGIC,

2013; ZHANG; SHEN; CHAN, 2012), a ausência de apoio financeiro adequado pelo governo para a instalação de pequenos sistemas fotovoltaicos (QURESHI; ULLAH; ARENTSEN, 2017), a falta de fornecedores e técnicos adequados (QURESHI; ULLAH; ARENTSEN, 2017), e espaço de instalação inadequado (ZHANG; SHEN; CHAN, 2012).

Do mesmo modo que se têm as barreiras, existem alguns estímulos para a adoção dos sistemas fotovoltaicos, como a independência da distribuidora de energia, campanhas de educação (BORGHESI; MILANO, 2014; ISLAM, 2013; PALM, 2016), discussão com outros adotantes (JAGER, 2006; PALM, 2016), o aumento das tarifas de energia elétrica (SIMPSON; CLIFTON, 2015), avanços tecnológicos (PILLAI et al., 2017), redução de custos dos sistemas fotovoltaicos (BORGHESI; MILANO, 2014), incentivos financeiros (PILLAI et al., 2017; SARDIANOU; GENOUDI, 2013), interação social (BORGHESI; MILANO, 2014; YAMAMOTO, 2015), e a preocupação ambiental (ZHAI; WILLIAMS, 2012; ISLAM, 2014; JAGER, 2006; QURESHI; ULLAH; ARENTSEN, 2017; PILLAI et al., 2017; BASHIRI; ALIZADEH, 2017).

A maioria dos indivíduos que, de acordo com as pesquisa, pretendem comprar um sistema fotovoltaico, são influenciados por seus amigos, parentes ou colegas próximos (JAYARAMAN; PARAMASIVAN; KIUMARSIC, 2017). Desse modo, Rai e Reeves (2016) citam, que a compra de um sistema fotovoltaico por outros indivíduos, é um fator motivador, pois ajuda a superar incertezas associadas à adoção desses.

Jager (2006), Sardinanou e Genoudi (2013) discutem que o público adotante de sistemas fotovoltaicos consiste majoritariamente de homens de idade média, com renda e níveis educacionais acima da média. Além disso, Klingler (2017) complementa que os consumidores que provavelmente adotarão uma tecnologia de autoconsumo são, em média, caracterizados por um maior consumo anual de eletricidade. As famílias de pessoas mais velhas estão menos inclinadas a adotar tecnologias de microgeração (WILLIS et al, 2011).

#### 2.4.1 Barreiras associadas a alguns países

A Alemanha e outros países europeus desenvolveram mecanismos regulatórios específicos para incentivar a utilização de sistemas fotovoltaicos, seja

por programas governamentais, seja por incentivos financeiros e/ou fiscais (FERREIRA et al., 2018). Isso se deve ao fato de que, para superar barreiras institucionais, desenvolver a tecnologia e criar um mercado inicial, são necessárias políticas que permitam que a tecnologia amadureça e crie um mercado inicial (CHOWDHURY et al, 2014).

Na Itália, a penetração da geração fotovoltaica (PV) na rede de distribuição e transmissão aumentou significativamente nos últimos anos, sendo esse crescimento impulsionado principalmente por meio de incentivos de tarifas de energia elétrica utilizado no passado. O principal papel desses incentivos foi fomentar o mercado fotovoltaico no nível inicial, quando a instalação de usinas fotovoltaicas foi pouco lucrativa devido ao alto custo de capital (LAZZERONI; OLIVERO; REPETTO, 2017).

A Austrália possui uma das maiores taxas de adoção de sistemas de energia renovável, em pequena escala, no mundo. Uma confluência de fatores levou a um aumento na adoção de sistemas de microgeração solar naquele país, incluindo o aumento de tarifas de eletricidade doméstica, redução do preço dos sistemas fotovoltaicos, aceitação do público em relação a microgeração e, em particular, a disponibilidade de vários subsídios econômicos (SIMPSON; CLIFTON, 2015).

No Brasil, apesar do grande potencial solar existente, o incentivo à tecnologia ainda é incipiente (FERREIRA et al., 2018). Neste contexto, pode ser citada como exemplo a Alemanha, que era o país com a maior capacidade instalada de energia fotovoltaica no Mundo em 2013. No entanto, sua região com a melhor incidência média anual de luz solar recebe cerca de 1300 kWh/m<sup>2</sup> por ano, enquanto a região brasileira com a pior incidência solar recebe 1500 kWh/m<sup>2</sup> por ano (MIRANDA; SZKLO; SCHAEFFER, 2015).

O território brasileiro é irradiado com energia solar variando de 1500 a 2300 kWh/m<sup>2</sup>/ano, em comparação com 900 a 1850 kWh/m<sup>2</sup>/ano na Alemanha, França, Itália e Espanha. Apesar disso, a tecnologia fotovoltaica está apenas começando a penetrar na matriz elétrica brasileira. Até recentemente, os altos custos da geração fotovoltaica impediam que esta tecnologia competisse no Brasil. No entanto, a redução dos preços do sistema fotovoltaicos em escala mundial, trouxe atenção para os planejadores brasileiros e as ações foram tomadas recentemente no Brasil para impulsionar o progresso dos sistemas fotovoltaicos (LACCHINI; RÜTHER, 2015).

Brehm (2014) afirma que a microgeração fotovoltaica distribuída já se mostra viável em aspectos ambientais, técnicos, normativos e está muito próxima de se viabilizar economicamente no Brasil. No entanto, poderia ser fomentada através de medidas como: tarifas *feed-in*; subsídios ao investimento inicial; incentivos à aquisição da energia produzida; planos de educação e treinamento na área; fundos de investimentos para aquisição de sistemas fotovoltaicos; e novos padrões em edificações sustentáveis.

Lacchini (2015) conclui que a utilização de sistemas fotovoltaicos pelos consumidores residenciais brasileiros está próximo da atratividade comercial, e as perspectivas são que essa tecnologia se tornará cada vez mais uma opção atraente para os consumidores.

O Instituto *Market Analysis*, em conjunto com a ONG Greenpeace, realizou uma pesquisa para explorar o conhecimento e as atitudes da população brasileira em relação à energia renovável. Nessa pesquisa foi utilizada uma amostra de 806 casos, com abrangência para 8 capitais brasileiras (São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte, Recife, Salvador, Porto Alegre, Curitiba e Goiânia) e o Distrito Federal. A metodologia utilizada foi através de entrevistas por meio de ligações telefônicas para o domicílio do entrevistado. O perfil do entrevistado foi de adultos entre 18 e 69 anos, com distribuição dos casos por sexo, idade e classe social de forma representativa à população. Os dados foram coletados entre 30 de agosto e 7 de outubro de 2013, com margem de erro de 3,5% para mais ou para menos (GREENPEACE, 2014).

O estudo trouxe como conclusão que a microgeração ainda é pouco conhecida entre os brasileiros, e que o conhecimento está localizado na população de classe alta, alta escolaridade, entre os mais velhos e no centro-oeste. Ainda que seja desconhecido para os brasileiros, o conceito de microgeração de energia gera curiosidade e atinge grande receptividade. A ideia de gerar a própria energia desperta diversas percepções positivas como, a crença de que seja algo positivo para o meio ambiente, a sensação de pioneirismo e de liderança social, e a expectativa de redução de custos com energia (GREENPEACE, 2014).

Entretanto, existe um forte questionamento sobre a relação custo-benefício desse modelo de geração de energia. Acredita-se que o custo de instalação seja elevado, que esse sistema deve gerar muitas mudanças na rotina diária e se

questiona se esse modelo de produção resolveria os problemas de fornecimento de energia (GREENPEACE, 2014).

As barreiras associadas à adoção dos sistemas fotovoltaicos pelos consumidores residenciais influenciam nas projeções de crescimento ao longo do tempo e também têm influência ao longo do espaço.

## **2.5 PROJEÇÕES DE CRESCIMENTO NO ESPAÇO VINCULADAS NO TEMPO**

Ao contrário dos modelos convencionais de difusão dos sistemas fotovoltaicos, que contemplam a difusão ao longo do tempo, a dimensão espacial tem sido recentemente considerada em alguns estudos sobre a difusão de sistemas fotovoltaicos. Dharshing (2017) cita que, enquanto os modelos de difusão de tecnologia estão bem estabelecidos na literatura, os padrões espaciais de adoção doméstica permanecem pouco estudados.

Deste modo, Snape (2016) faz uma análise das características espaciais e temporais da adoção de sistemas fotovoltaicos no Reino Unido. Os resultados revelam que as áreas com capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos semelhante são agrupadas, indicando uma forte dependência das condições locais para a adoção de sistemas fotovoltaicos.

Zhao et al. (2017) afirmam que a difusão de sistemas fotovoltaicos em uma região específica é independente e difícil de prever, trazendo incertezas para o planejamento e operação da rede de distribuição de energia elétrica.

Desse modo, Dharshing (2017) fornece uma análise de fatores que regem as diferenças regionais nas taxas de adoção de sistemas fotovoltaicos residenciais na Alemanha. A análise se concentra em fatores econômicos, características sociodemográficas e adotadores de atitudes, e estrutura de liquidação. Os resultados indicam que as diferenças de incentivos influenciam os padrões espaciais e temporais da adoção de sistemas fotovoltaicos. Os distúrbios espaciais significativos são encontrados entre os municípios vizinhos. Estas descobertas implicam que existe potencial para novas políticas e modelos de negócios para aumentar a diversificação geográfica e social dos padrões de adoção de sistemas fotovoltaicos.

Balta-Ozkan, Yildirim e Connor (2015) empregam métodos de econometria espacial para um conjunto de dados recentemente disponível em uma excelente

localização geográfica, onde os resultados empíricos indicam que a demanda por eletricidade, densidade populacional, níveis de poluição, nível educacional das famílias e tipos de habitação estão entre os fatores que afetam a adoção de sistemas fotovoltaicos em uma região.

Com base em uma equação diferencial parcial que descreve a proporção de difusão de sistemas fotovoltaicos em uma determinada região ao longo do tempo, o método dos elementos finitos é usado por Karakaya (2016) para prever a difusão de sistemas fotovoltaicos no tempo e no espaço.

Morton, Wilson e Anable (2018) concluem que a variação geográfica na adoção de políticas nacionais de eficiência energética mostra que diferentes áreas têm diferentes capacidades de adotar tecnologias renováveis.

Kwan (2012) usou dados do Censo de 2000 dos EUA para investigar a influência de variáveis ambientais, sociais, econômicas e políticas locais na distribuição de sistemas fotovoltaicos residenciais em todo os Estados Unidos. Os resultados do modelo indicam que radiação solar, custo de eletricidade e quantidade de incentivos financeiros disponíveis são fatores importantes que influenciam a adoção de sistemas fotovoltaicos residenciais.

Zhao et al. (2017) investigam a tendência de difusão e a abordagem de previsão de sistemas fotovoltaicos distribuídos de macro e micro-aspectos. A análise macroscópica inclui agrupamento espacial de sistemas fotovoltaicos e a análise quantitativa a adoção dos sistemas fotovoltaicos na dimensão do tempo.

A difusão de sistemas fotovoltaico ao longo do espaço e suas implicações foram abordadas na literatura, mas ainda não foi totalmente explorada, deixando margem para a abordagem realizada na presente pesquisa.

Na literatura revisada não foram propostos modelos de difusão ao longo do espaço utilizando o MMC levando em consideração as variáveis dos domicílios, como: renda, localização (urbana, rural), tipo de domicílio (casa, apartamento), condição de ocupação (próprio, alugado, cedido) e a radiação do local, onde são utilizados os adotantes de sistemas fotovoltaicos determinados ao longo do tempo para determinar sua abrangência ao longo do espaço.

## 2.6 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Devido à crescente importância da microgeração residencial no atendimento à demanda e a preocupação ambiental, os processos de tomada de decisão dos consumidores chegaram ao foco de pesquisas, pois os sistemas fotovoltaicos distribuídos, não tem sua instalação pré-planejada pelas distribuidoras de energia elétrica, sendo determinado pela tomada de decisão descentralizada dos consumidores.

Os autores identificaram vários modelos diferentes para prever a difusão de sistemas fotovoltaicos em consumidores residenciais, bem como as barreiras associadas a esta difusão. Entretanto, nenhum dos trabalhos encontrados na literatura engloba todas as variáveis utilizadas neste trabalho em um único modelo. Do mesmo modo, nenhum dos trabalhos citados, faz a difusão dos sistemas fotovoltaicos em duas dimensões, ao longo do tempo e ao longo do espaço, utilizando a técnica de DS em conjunto com modelo de Bass e MMC.

Neste trabalho são considerados aspectos econômicos, de gestão, políticos, sociais e técnicos. Estes aspectos são determinadas através das barreiras associadas à decisão do consumidor em aderir um sistema fotovoltaico. Além de levar em conta uma gama maior de variáveis, o trabalho apresentado é dividido em duas etapas, a difusão de sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo, onde são determinados os adotantes a cada ano e a difusão ao longo do espaço, onde se determina o local onde serão inseridos os sistemas fotovoltaicos.

Para a metodologia de previsão da difusão de sistemas fotovoltaicos em consumidores residenciais de BT é necessário compreender a aplicação da técnica de DS, bem como o modelo de Bass, os quais são abordados no próximo capítulo.

### 3 DINÂMICA DE SISTEMAS

#### 3.1 TÉCNICA DE DINÂMICA DE SISTEMAS

A Dinâmica de Sistemas (DS) é um método para descrever, modelar, simular e analisar dinamicamente problemas complexos e/ou sistemas em termos de processos, informações, limites organizacionais e estratégias. A DS parte do pressuposto de que o comportamento de um sistema é, em grande parte, causado por sua própria estrutura. Portanto, para melhorar os comportamentos indesejáveis, a estrutura do sistema precisa ser alterada (PRUYT, 2013).

A abordagem de DS foi desenvolvida no final dos anos de 1950 e início dos anos de 1960, por Jay W. Forrester, no *Sloan School of Management do Massachusetts Institute of Technology* – MIT (FORRESTER, 1958; FORRESTER, 1961; FORRESTER, 1989; FORRESTER, 1995; FORRESTER, 2007; LANE, 2007). Forrester argumentou que os métodos tradicionais para resolver problemas proporcionavam uma compreensão insuficiente dos processos estratégicos envolvidos em sistemas complexos.

O objetivo da DS é saber se o sistema em geral é instável ou estável, se ele tende a oscilar, a crescer, a declinar, ou se tende ao equilíbrio. A técnica visa à análise, modelagem e simulação de sistemas complexos e de seus comportamentos no tempo.

A DS considera que todo sistema, não importa sua complexidade, consiste em uma rede de retroalimentação positiva e negativa e que, toda dinâmica inicia-se da interação dos laços de realimentação uns com os outros (STERMAN, 2000).

Desde a sua criação, a técnica de DS vem experimentando momentos de maior destaque e de esquecimento na academia científica. Nos anos 90, com o trabalho de Peter Senge “A quinta disciplina: a Arte e Prática do Aprendizado Organizacional”, com a introdução dos conceitos do comportamento sistêmico e da dinâmica de arquétipos, a abordagem de DS foi recolocada perante a comunidade acadêmica e foi novamente introduzida nas organizações.

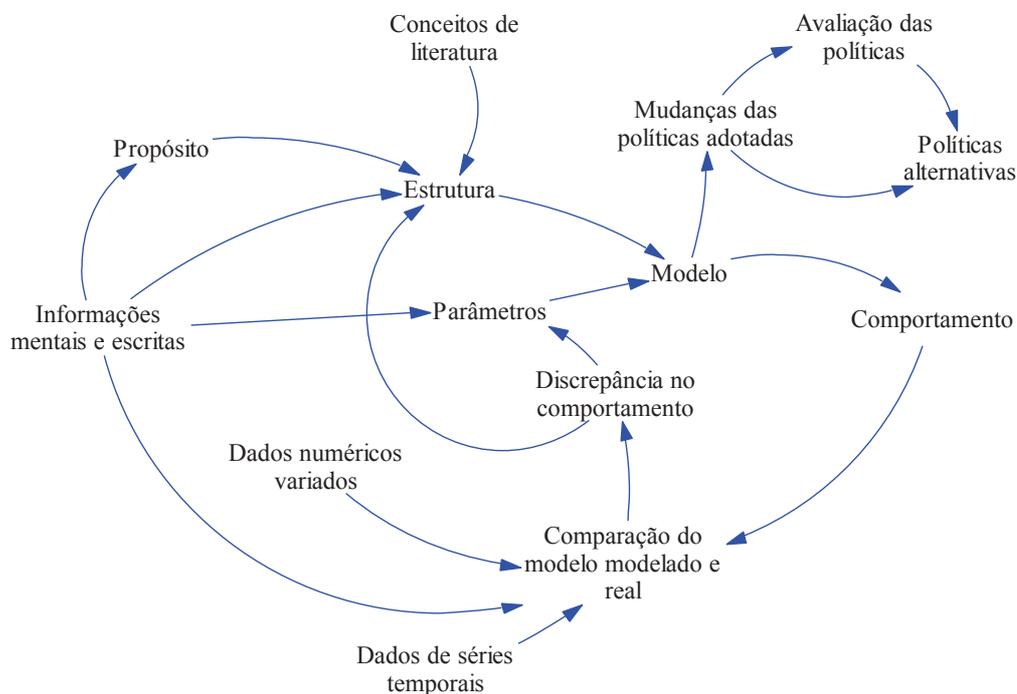
Segundo SENGE (2016), DS é uma metodologia para a construção de modelos de simulação em computador, com o objetivo de se estudar o comportamento dos sistemas.

Forrester (1961) afirmava que as causas de muitos dos maiores problemas públicos, da decadência urbana à ameaça ao meio ambiente global, estão nas políticas bem intencionadas que foram desenvolvidas para resolvê-los. Esses problemas levaram os governantes a intervenções concentradas em sintomas óbvios, e não nas causas subjacentes. Logo, eram produzidos benefícios a curto prazo e danos a longos prazos, estimulando a necessidade de outras intervenções sintomáticas (SENGE, 2016).

O sucesso que as aplicações da metodologia DS vêm alcançando no mundo todo é inquestionável. Desde os famosos modelos urbanos e globais de Forrester e Collins nas décadas de 60 e 70, aos "simuladores de voos gerenciais", que vem sendo usados nas grandes corporações ao redor do mundo, a DS vem provando seu potencial como ferramenta auxiliar em várias áreas do conhecimento.

Na Figura 3-1 está uma exemplificação do processo de modelagem dentro da Dinâmica de Sistemas.

Figura 3-1 – Processo de modelagem utilizando a DS



Fonte: Sterman (2000).

A Figura 3-1 mostra que a partir das informações mentais e escritas é possível criar um modelo através da estrutura com parâmetros determinados. Essas informações também são importantes para se comparar o modelo elaborado com o

modelo real, juntamente com os dados de séries temporais e dados numéricos variados.

A estrutura é função do propósito do trabalho, das informações e literaturas existentes. No modelo, que é função da estrutura e dos parâmetros, são criadas políticas de modificações que poderão ser avaliadas pelo comportamento ou resposta do sistema. As políticas ou medidas adotadas são avaliadas para entender o impacto dentro do sistema. Esse processo é fundamental na modelagem para que se crie uma sequência lógica e consistente no desenvolvimento do modelo.

A realimentação é um dos conceitos fundamentais da DS. Na DS são usadas ferramentas de diagramação para capturar a estrutura dos sistemas, incluindo diagramas de laço causal e diagramas de estoque e fluxo (Sterman, 2000).

### 3.1.1 Diagramas de Laço Causal

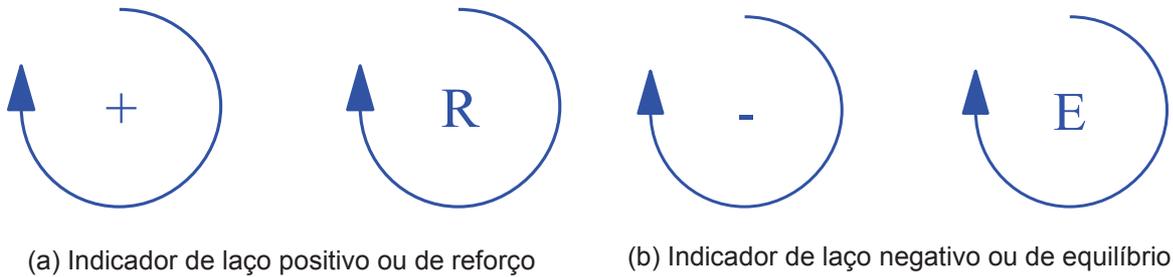
Os diagramas de laço causal são uma ferramenta importante para representar a estrutura de realimentação dos sistemas (Sterman, 2000), e seus usos são para:

- capturar rapidamente a hipótese de trabalho sobre as causas da dinâmica;
- obter e capturar os modelos mentais de indivíduos ou equipes;
- elucidar as realimentações importantes que são responsáveis por um determinado problema.

Um diagrama de laço causal consiste em variáveis conectadas por setas que indicam as influências causais entre as variáveis.

Os laços causais mais importantes são evidenciados pelo indicador de laço, que mostra quando o laço é de realimentação positiva/reforço ou negativa/equilíbrio. A Figura 3-2 representa os dois tipos de laços.

Figura 3-2 – Representação dos indicadores de laços:



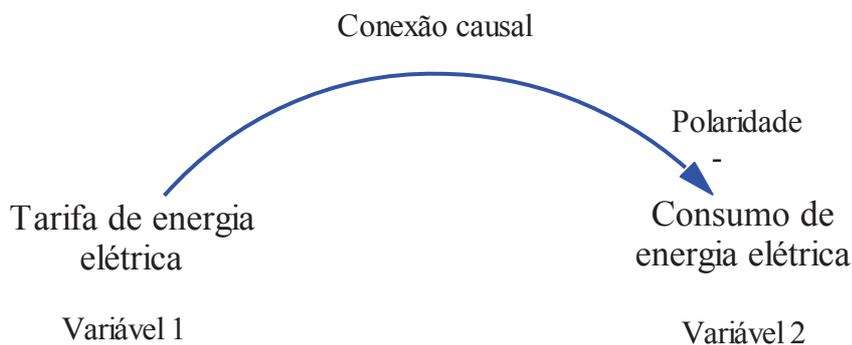
Fonte: Adaptado de Sterman (2000).

Conforme Figura 3-2, os dois tipos de laços são positivo ou de reforço e negativo ou de equilíbrio.

Na construção do diagrama de laço causal, as variáveis são relacionadas por conexões causais, os quais são representados por setas. A cada conexão causal é atribuído uma polaridade, a qual pode ser positiva (+) ou negativa (-), para indicar o tipo de relação existente entre as variáveis (STERMAN, 2000).

A Figura 3-3, exemplifica a relação entre a tarifa de energia e o consumo. Nesse caso, a tarifa de energia elétrica influencia o consumo de energia elétrica com uma conexão causal de polaridade negativa.

Figura 3-3 – Exemplo de uma conexão causal e de polaridade



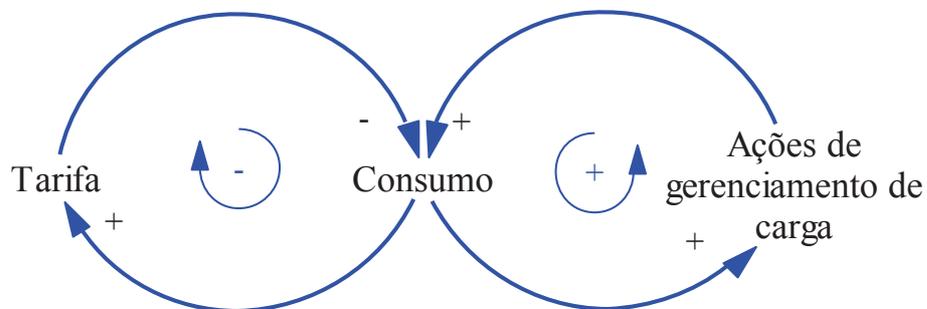
Fonte: do Autor.

Uma conexão negativa, como apresentado na Figura 3-3, significa que quando aumentar a tarifa de energia elétrica o consumo vai diminuir, se baixar o preço da tarifa o consumo vai aumentar.

As conexões descrevem apenas a estrutura do sistema e não o comportamento das variáveis, ou seja, as conexões descrevem o que aconteceria se alguma modificação fosse feita no sistema.

A Figura 3-4 apresenta um exemplo de um diagrama de laço causal completo. No laço de reforço (+), quanto maior forem as ações de gerenciamento de carga maior será o consumo de energia elétrica, e no laço de equilíbrio (-), quanto maior for a tarifa de energia elétrica menor será o consumo. Por outro lado, quanto maior for o consumo, maior a necessidade de geração, que levará ao despacho de fontes mais caras, e conseqüentemente ocasionará um aumento da tarifa.

Figura 3-4 – Exemplo de um diagrama de laço causal



Fonte: do Autor.

Os diagramas de laço causal são adequados para representar interdependências e processos de realimentação, sendo usados efetivamente no início de um projeto de modelagem para capturar modelos mentais (STERMAN, 2000).

Uma das limitações mais importantes dos diagrama de laço causal é a incapacidade de capturar o estoque e o fluxo de sistemas. Os estoques e os fluxos, juntamente com a realimentação, são os dois conceitos centrais da teoria dos sistemas dinâmicos (STERMAN, 2000).

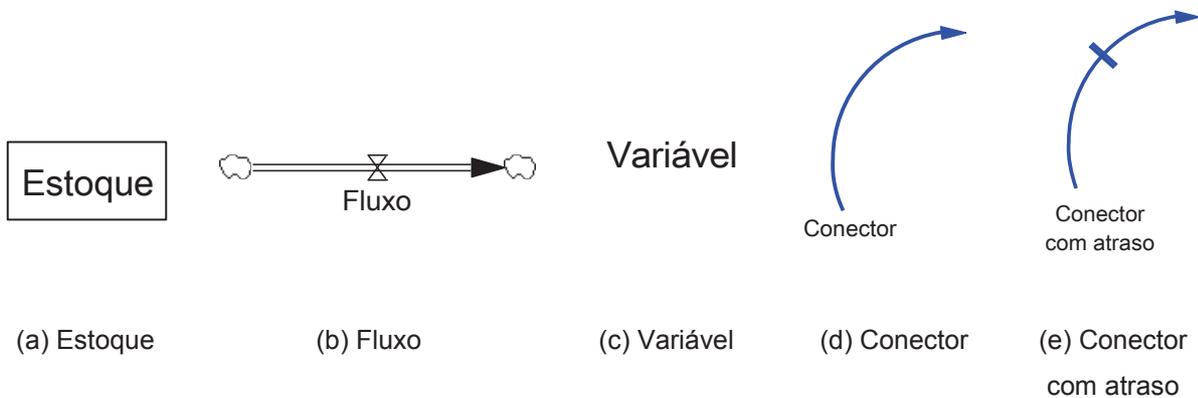
Os diagramas de laço causal são utilizados para representar qualitativamente as relações de causa e efeito que acontecem em um sistema complexo. Contudo, para representar um modelo quantitativamente são utilizados os diagramas de estoque e fluxo, os quais são semelhantes aos diagramas de laço causal, com a diferença de que as relações são expressas através de fórmulas lógico-matemáticas.

### 3.1.2 Diagrama de Estoque e Fluxo

Os estoques são acumulações, eles caracterizam o estado do sistema e geram informações sobre as quais as decisões e as ações são baseadas. As ações fornecem inércia dos sistemas e a memória, criando atrasos e acumulando a diferença entre a entrada para um processo e sua saída (STERMAN, 2000).

Os diagramas de estoque e fluxo utilizam quatro estruturas básicas na construção dos modelos: estoques, fluxos, conectores e auxiliares. A Figura 3-5 apresenta a simbologia utilizada no diagrama de estoque e fluxo.

Figura 3-5 – Simbologia utilizada no diagrama de estoque e fluxo



Fonte: Sterman (2000).

Os elementos básicos utilizados no diagrama de estoque e fluxo mostrados na Figura 3-5 são:

- Estoque: são acumulações que caracterizam o estado do sistema e geram a informação sobre a qual as decisões e as ações se baseiam. As ações dão inércia aos sistemas e lhes fornecem memória. As ações criam atrasos, acumulando a diferença entre a entrada e a saída de um processo (Sterman, 2000). Estoques são tudo aquilo que se acumula no tempo.

- Fluxo: os fluxos podem conectar os estoques ou podem introduzir elementos que estão fora do ambiente do sistema, representados pelas nuvens Figura 3-5 (b). As nuvens funcionam como fontes de onde os elementos entram no sistema, também como coletor, ou ainda de onde os elementos saem do sistema. Tanto as fontes quanto os coletores possuem capacidade infinita, seja de fornecimento ou de recebimento (STERMAN, 2000).

As taxas dos fluxos entre os estoques, ou entre os estoques e o ambiente, são reguladas pelas válvulas. Fatores que afetam as válvulas são provenientes de informações, tanto internas quanto externas aos sistemas. Eles podem controlar o sistema diminuindo a velocidade de transporte do fluxo, causando atrasos e aumentando a acumulação nos estoques. O contrário também pode acontecer quando o fluxo é aumentado no sistema, causando uma redução rápida nos níveis dos estoques (STERMAN, 2000).

- Variável: possuem seus valores baseados em outros componentes do sistema ou outras variáveis. São usadas para representar valores constantes (variáveis constantes que são representadas por um losango) ou manipular e converter dados de entrada, através de cálculos auxiliares por intermédio de equações, gerando valores de saída para uso em outra variável (variáveis auxiliares que são representadas por um círculo).

- Conector: é utilizado para estabelecer relações existentes entre as variáveis do modelo, como se fossem os responsáveis por carregar informações de um elemento a outro, podendo ser essas informações, uma quantidade, uma constante, uma relação algébrica ou gráfica. Representam as relações, tornando muito importante as direções das setas.

As convenções de diagrama de estoque e fluxo, originadas por Forrester (1961) foram definidas com base em uma metáfora hidráulica - o fluxo de água dentro e fora dos reservatórios. É útil pensar em estoques como banheiras de água, onde a quantidade de água na banheira a qualquer momento é a acumulação da água que flui através da torneira, menos a água que flui através do dreno. Apesar da metáfora prosaica, o diagrama de estoque e fluxo tem um significado matemático preciso e inequívoco. As ações acumulam ou integram seus fluxos; o fluxo líquido no estoque é a taxa de mudança do estoque (STERMAN, 2000).

O cálculo matemático do estoque pode ser descrito conforme a equação (1) (STERMAN, 2000):

$$E_t(t) = \int_{t_0}^t [E_n(t_i) - S_d(t_i)] ds + E_t(t_0) \quad (1)$$

Onde  $E_{t(t)}$  é o estoque,  $E_n(t_i)$  representa o valor das entradas em qualquer tempo  $t_i$  entre o tempo inicial  $t_0$  e o tempo corrente  $t$ ,  $S_{d(t_i)}$  representa o valor da

saída em qualquer tempo  $t_i$  entre o tempo inicial  $t_0$  e o tempo corrente  $t$  e  $E_{t(t_0)}$  é o estoque inicial. De forma equivalente, mas através de derivada, a taxa líquida de mudança do estoque pode ser calculada como entradas menos saídas, equação (2).

$$\frac{d(E_t)}{dt} = E_n(t) - S_d(t) \quad (2)$$

A DS não objetiva apenas determinar os valores dos elementos que compõem o sistema, mas, sobretudo, o seu comportamento dinâmico. De acordo com as características dos elementos do sistema, são definidas as variáveis de estado, que representam as condições do sistema ao longo do tempo (SICA, 2009).

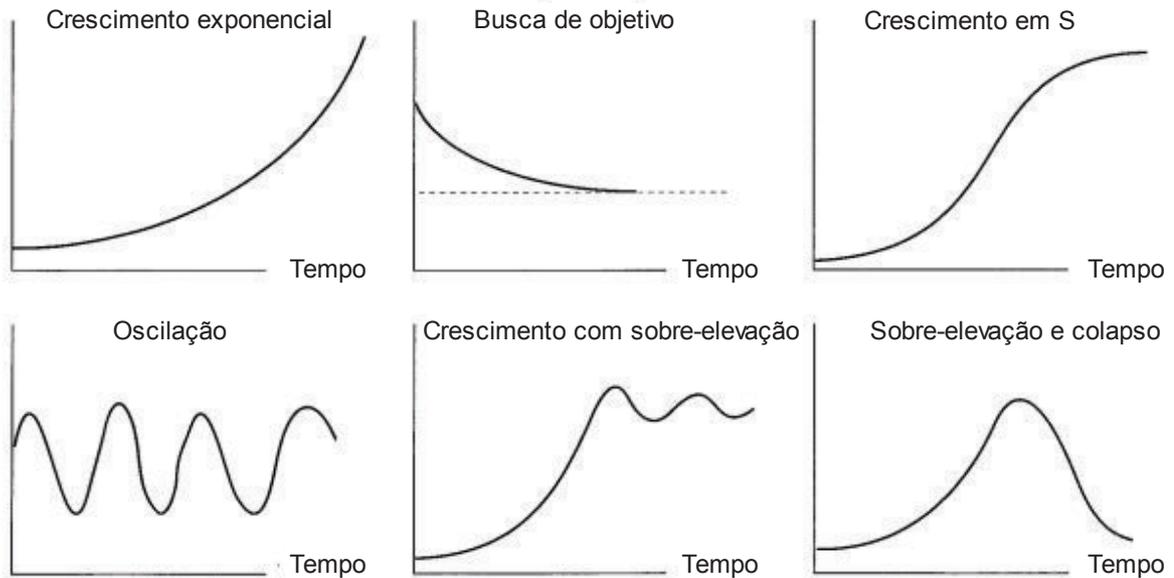
A estrutura passa a ser representada como uma série de relacionamentos causais, em que as decisões tomadas sempre têm consequências, sendo algumas delas não intencionais. Algumas podem ser imediatamente percebidas, outras só virão à tona após algum tempo, até mesmo anos. O uso da simulação permite que se testem essas decisões, avaliando o impacto imediato e a médio e longo prazo.

### 3.1.3 Modos fundamentais de comportamento dinâmico

O comportamento de um sistema depende da sua estrutura. Essa estrutura consiste em laços de realimentação, estoques e fluxos. Os modos básicos de comportamento em sistemas dinâmicos são identificados juntamente com as estruturas de realimentação que os geram. Estes modos incluem crescimento, criado por realimentação positiva, busca de objetivos, criado por realimentação negativa e oscilações (incluindo oscilações amortecidas, ciclos limitados e caos), criados por realimentação negativa com atrasos de tempo. Modos mais complexos, como o crescimento em forma de S, o excesso e o colapso, decorrem da interação não linear dessas estruturas básicas (STERMAN, 2000).

A Figura 3-6 mostra os modos mais comuns de comportamento.

Figura 3-6 – Padrões de comportamento em sistemas dinâmicos



Fonte: Adaptado de Sterman (2000).

Os modos de comportamento mais fundamentais são o crescimento exponencial, a busca de objetivos e a oscilação, onde cada um deles é gerado por uma estrutura de realimentação simples. O crescimento surge da realimentação positiva, a busca por objetivos surge da realimentação negativa, e a oscilação surge de realimentação negativa com atrasos de tempo. Os padrões de crescimento em S, crescimento com sobre-elevação e sobre-elevação e colapso, são provenientes de interações não lineares de estruturas de retroalimentação fundamentais e do fato de que nenhum sistema real pode crescer ou decrescer para sempre, demonstrando que alguma restrição interrompe o crescimento (STERMAN, 2000).

No decorrer dos anos, a DS tem sido aplicada às diversas áreas do conhecimento e vem provando seu potencial.

### 3.2 DINÂMICA DE SISTEMAS COM MODELO DE BASS

Segundo Sterman (2000), uma das falhas nos modelos logísticos de difusão de alguma inovação é o problema de inicialização. Na logística (e nos outros modelos de crescimento simples, incluindo Richards e Weibull) zero é um equilíbrio. Desse modo, o modelo não pode explicar a origem dos adotantes iniciais de uma inovação.

Diante disso, Frank Bass desenvolveu um modelo para difusão de inovações que supera o problema de inicialização, assumindo que os potenciais adotantes de uma inovação tomam consciência da inovação através de fontes de informações externas, cuja magnitude e persuasão são constantes ao longo do tempo.

### 3.2.1 Modelo de Bass

Tendo como base o estudo de Rogers sobre a difusão de inovações, Frank Bass, em 1969, concebeu o modelo de difusão de Bass, sendo este modelo uma contribuição matemática à teoria de difusão de inovações, capaz de gerar uma curva sigmoide da taxa de penetração de mercado ao longo do tempo.

O modelo de Bass assume que potenciais adotantes de uma inovação são influenciados por dois meios de comunicação: mídia de massa e boca a boca. Assim, considera que os adotantes de uma inovação compreendem dois grupos: um grupo é influenciado apenas pela comunicação de mídia de massa (influência externa) e o outro grupo é influenciado apenas pela comunicação boca a boca (influência interna). Frank Bass denominou o primeiro grupo de inovadores e o segundo grupo de imitadores (MAHAJAN; MULLER; BASS, 1990).

Esta hipótese comportamental pode ser transcrita em um modelo matemático. Considere  $Y(t)$  como sendo o total acumulado no instante  $t$  de consumidores que já adquiriram um determinado produto em um mercado de  $m$  consumidores potenciais. Desse modo,  $P(t)$  corresponde à probabilidade de adoção no instante  $t$ , por um consumidor, conforme equação (3) (BASS, 1969).

$$P(t) = p + \frac{q}{m} \cdot Y(t) \quad (3)$$

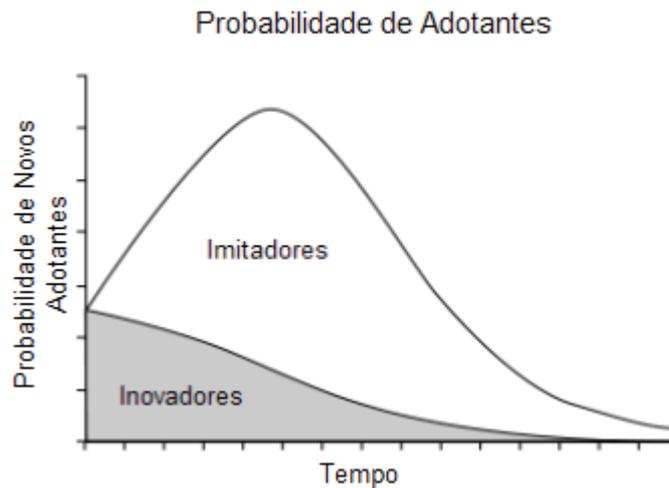
Onde  $P(t)$  é a probabilidade de adoção no instante  $t$ ,  $p$  é o coeficiente de inovação, que representa a influência externa ao processo de difusão,  $q$  é o coeficiente de imitação, que representa a influência interna ao processo de difusão,  $m$  é o mercado potencial final, ou seja, o número de indivíduos que irão adotar a tecnologia dado tempo suficiente de difusão,  $Y(t)$  é o número acumulado de adotantes.

O segundo termo da equação (3) irá crescer na medida em que aumentar a proporção de indivíduos no mercado que adotam o produto,  $Y(t)/m$ , e este

crescimento será proporcional ao parâmetro  $q$ . O parâmetro  $q$  corresponde a uma força de contágio, por isso é conhecido por coeficiente de imitação (MAHAJAN; MULLER; BASS, 1990).

A Figura 3-7 apresenta o gráfico de adoção devido a influências externas e internas pelo modelo de Bass.

Figura 3-7 – Adoção devido a influências externas e internas - Modelo de Bass



Fonte: Adaptado de Mahajan; Muller; Bass (1990).

Uma série de métodos estimativos tem sido sugerida para estimar os parâmetros  $p$ ,  $q$  e  $m$  do modelo de Bass. Mahajan, Muller e Bass (1990) compararam quatro métodos de estimativa: Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), Estimativa por Máxima Verossimilhança (EMV), Mínimos Quadrados Não Lineares (MQNL) e Estimação Algébrica (EA). Eles concluíram que o método MQNL é o que levava às melhores estimativas e previsões, além de ser um método de fácil implementação.

### 3.2.2 Aplicação da Dinâmica de Sistemas com Modelo de Bass

O modelo de Bass foi introduzido como uma ferramenta para previsão de venda de novos produtos, a realimentação positiva é normalmente interpretada como propaganda boca a boca (imitação) e as fontes externas de conscientização e adoção são interpretadas como efeito da publicidade (inovação). O modelo de difusão de Bass tornou-se um dos modelos mais populares para a difusão de novos



$$TA = aP + ciPA/N \quad (7)$$

Quando uma inovação é introduzida, a população adotante é zero, sendo que a única fonte de adoção serão as influências externas, como a publicidade. A publicidade será maior no início do processo de decisão e diminuirá gradualmente à medida que os potenciais adotantes irão se esgotar.

O modelo de Dinâmica de Sistemas permite facilmente se alterar a estrutura do sistema modificando-se, por exemplo, os parâmetros de inovação e imitação, ou mesmo realizando-se mudanças estruturais, como a adição de outros laços e variáveis. Deste modo, a Dinâmica de Sistemas oferece uma estrutura interessante para combinar a base fundamental do modelo de Bass, considerando-se a evolução da difusão no tempo e os aspectos sociais, técnicos, econômicos, políticos e de gestão.

Segundo (Stermann, 2000), a difusão de inovações segue, muitas vezes, padrões de crescimento, onde as realimentações positivas geram crescimento exponencial de uma inovação bem sucedida, e as realimentações negativas limitam o crescimento da inovação.

### 3.3 ETAPAS DA MODELAGEM DE DINÂMICA DE SISTEMAS

Segundo Ford (1999), construir um modelo é um processo iterativo, de teste e erro. Um modelo é construído em etapas, de crescente complexidade até que seja capaz de replicar o comportamento observado do sistema.

Ford (1999) descreve uma abordagem em 8 etapas para construir e testar um modelo:

1 – Conhecimento do sistema: nesta etapa deve-se familiarizar com o sistema, obter o maior conhecimento possível sobre o objetivo do modelo, identificar claramente as variáveis mais importantes.

2 – Especificação do comportamento dinâmico: esta etapa é provavelmente a mais importante no processo, onde deve-se analisar se o sistema tem realmente um comportamento dinâmico. Se a resposta for afirmativa, elaborar um gráfico em relação ao tempo da variável mais importante do modelo, este gráfico é conhecido como o modo de referência.

3 – Construção do diagrama de estoque e fluxo: para a construção desta etapa, inicialmente deve-se definir as variáveis de estoque, após, adicionar os fluxos e, finalmente, as demais variáveis e constantes do modelo. O diagrama de fluxo deve conter a variável mostrada no modo de referência.

4 – Construção do diagrama de laço causal: esta etapa tem como finalidade a visualização dos principais laços do modelo. Em alguns sistemas, a estrutura dos laços é muito complicada. Nessa situação, a elaboração de vários laços parciais é indicada.

Ford (1999) sugere a construção do diagrama de estoque e fluxo em primeiro lugar, e em segundo lugar o diagrama de laço causal. No entanto, esta sequência não é uma regra definitiva, sendo que para alguns projetistas pode ser interessante inverter esta sequência.

5 – Estimação dos valores dos parâmetros: nesta etapa, a estimativa de cada parâmetro do modelo deve ser feita de modo individualizado. Alguns parâmetros podem ser conhecidos com precisão perfeita (100%), outros podem ter uma precisão de 10% e outros podem ser totalmente desconhecidos.

6 – Simulação do modelo: nesta etapa, o objetivo é executar o modelo e compará-lo com o modo de referência (etapa 2). Se isto se confirmar, alcança-se uma das metas do processo de elaboração, a consistência do modelo.

7 – Análise de sensibilidade: nesta etapa procura-se verificar se os resultados são sensíveis às alterações nos parâmetros incertos, parâmetros controlados pelo sistema. Se, após cada teste, o modo de referência manter um comportamento adequado, alcança-se outra meta do processo de elaboração, a robustez do modelo. Um modelo é chamado de robusto quando ele gera o mesmo padrão geral, apesar da grande incerteza nos valores dos parâmetros.

8 – Teste de políticas: a última etapa do processo tem a finalidade de avaliar o comportamento do sistema, variando as estimativas dos parâmetros associadas às variáveis políticas, que são as variáveis controladas pelo projetista.

Por sua vez, Sterman (2000) sugere cinco etapas:

1 – Definir os limites do modelo (o problema): nesta etapa deve-se familiarizar com o problema, definir as principais variáveis, considerar o horizonte temporal, especificar o comportamento das variáveis mais importantes.

2 – Formulação da hipótese dinâmica: nesta etapa é verificada as teorias atuais do problema, desenvolvimento dos mapas de estrutura causal, com base em hipóteses iniciais, variáveis chave, modos de referência e outros dados disponíveis.

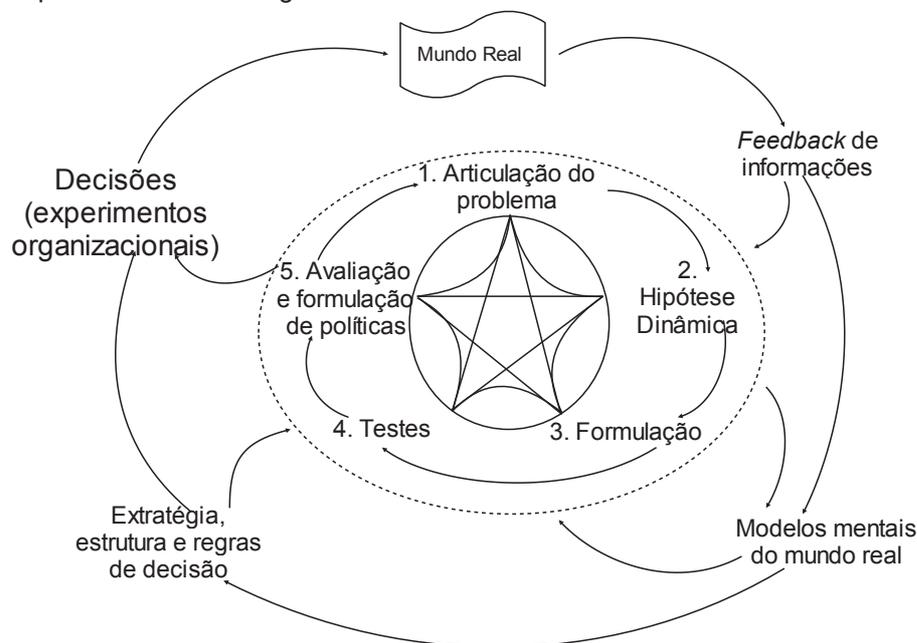
3 – Formulação do modelo de simulação: nesta etapa é definida a estrutura do modelo, estimativa dos parâmetros, relacionamentos comportamentais e condições iniciais, além de testar a consistência com as proposições iniciais e limites estabelecidos.

4 – Testes: nesta etapa é verificado se o modelo reproduz o comportamento previsto de forma adequada, se, quando testado em condições extremas, o modelo reage de modo a imitar a realidade, como o modelo reage a incertezas nos parâmetros, nas condições iniciais, nos limites e nas agregações.

5 – Projeto e avaliações de políticas: nesta etapa são consideradas as especificações de cenários, projeto de políticas, análise de sensibilidade e interações entre as políticas.

A Figura 3-9 apresenta o processo de modelagem segundo Sterman (2000).

Figura 3-9 – O processo de modelagem



Fonte: Adaptado de Sterman (2000).

Os modelos de simulação são informados pelos nossos modelos mentais e pela informação obtida do mundo real. Estratégias, estruturas e regras de decisão usadas no mundo real podem ser representadas e testadas no mundo virtual do

modelo. Os experimentos e testes realizados no modelo reagem para alterar nossos modelos mentais e levam ao projeto novas estratégias, novas estruturas e novas regras de decisão. Essas novas políticas são, então, implementadas no mundo real, e os comentários sobre seus efeitos levam a novos conhecimentos e outras melhorias em nossos modelos formais e mentais. A modelagem não é uma atividade única que produz uma resposta, mas um processo contínuo de ciclismo contínuo entre o mundo virtual do modelo e o mundo real de ação (STERMAN, 2000).

De modo geral, os dois métodos (FORD, 1999; STERMAN, 2000) apresentam a mesma sequência de etapas, com diferença apenas no aspecto de maior ou menor detalhamento no processo de modelagem. Desse modo, optou-se pela metodologia sugerida por Ford (1999), por ser mais detalhada, onde as etapas serão apresentadas ao longo do trabalho.

### **3.4 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO**

O presente capítulo apresentou a técnica de DS e o modelo de Bass, dois conceitos que são usados na metodologia proposta para a projeção da difusão de sistemas fotovoltaicos nos consumidores residenciais de BT ao longo do tempo.

## **4 METODOLOGIA PROPOSTA**

Com o advento das fontes de energia renovável nos últimos anos, espera-se que, em um futuro próximo, haja uma difusão de sistemas fotovoltaicos instalados nas residências.

Sendo que essa difusão é de difícil previsão, pois a decisão em adquirir um sistema fotovoltaico depende de cada consumidor e como ele reage a cada uma das barreiras e estímulos associados à adoção de uma inovação.

A adoção dos sistemas fotovoltaicos pelos consumidores residenciais acarretará em uma mudança no planejamento e operação dos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, sendo necessário determinar essa difusão ao longo do tempo e ao longo do espaço.

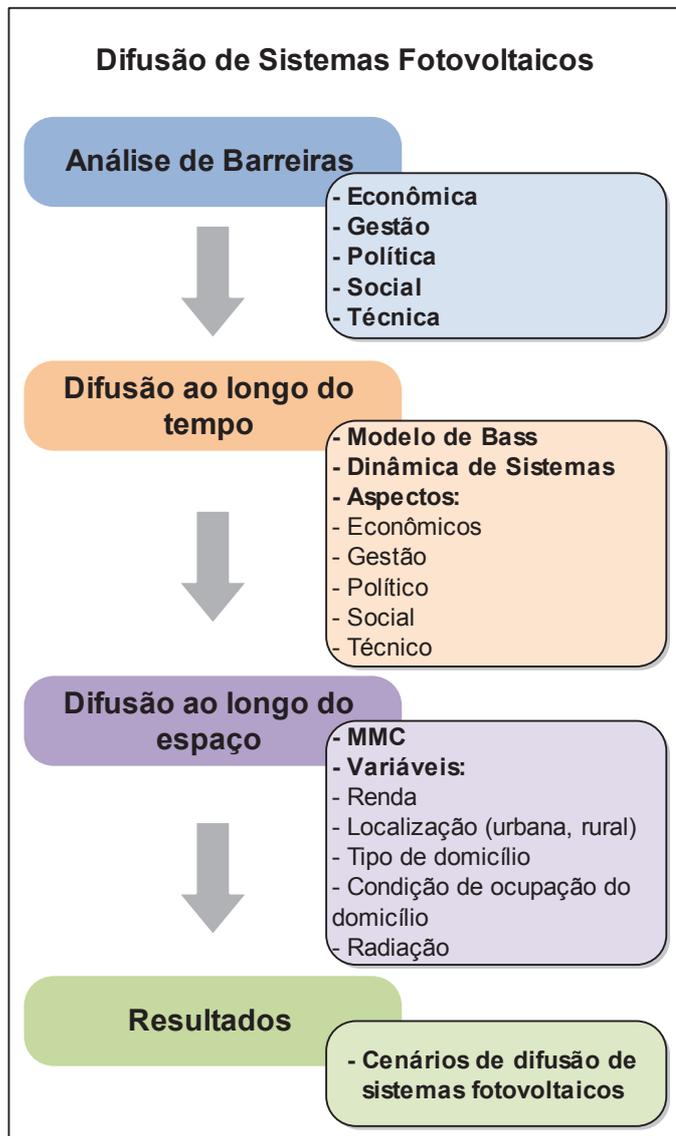
Desse modo, neste capítulo são realizados estudos, modelagens e análise da projeção da difusão de sistemas fotovoltaicos em consumidores residenciais de BT em duas dimensões: ao longo do tempo e ao longo do espaço.

A metodologia global para previsão da difusão de sistemas fotovoltaicos nos consumidores residenciais de BT pode ser utilizada para formulação de políticas energéticas para fontes renováveis.

### **4.1 METODOLOGIA PARA DIFUSÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

A metodologia para difusão de sistemas fotovoltaicos em consumidores residenciais de BT é apresentada na Figura 4-1. Essa difusão é apresentada em duas dimensões: ao longo do tempo e ao longo do espaço. Para a difusão ao longo do tempo, é utilizada a técnica de dinâmica de sistemas em conjunto com modelo de Bass, onde são considerados cinco aspectos: econômico, gestão, político, social e técnico. Para a difusão ao longo do espaço é utilizado o MMC.

Figura 4-1 – Estrutura global da metodologia proposta para difusão de sistemas fotovoltaicos



Fonte: do Autor.

A primeira etapa da metodologia é a identificação das barreiras para a difusão dos sistemas fotovoltaicos, as quais são divididas em cinco aspectos, de acordo com as variáveis que influenciam a decisão do consumidor em aderir um sistema fotovoltaico. A partir da determinação das barreiras, a técnica de dinâmica de sistemas, em conjunto com o modelo de Bass, é utilizada para realizar a projeção da difusão dos sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo. Esse modelo determina a curva de adoção de inovação ao longo do tempo, considerando os cinco aspectos propostos e os coeficientes de Bass (inovação e imitação).

As inovações são difundidas entre os membros de um sistema social ao longo do tempo e uma dimensão espacial também é de importância crucial para compreender esse processo. Desse modo, após a difusão ao longo do tempo, é modelada a difusão dos sistemas fotovoltaicos ao longo do espaço, utilizando o Método de Monte Carlo, onde se determina o local onde estão inseridos os adotantes de sistemas fotovoltaicos. São consideradas características como a renda do domicílio, a localização (rural ou urbano), tipo de domicílio (casa ou apartamento), condição de ocupação do domicílio (próprio ou alugado) e a radiação do local.

Por fim, é realizada a análise de resultados a partir de cenários de projeção da difusão dos sistemas fotovoltaicos. Os cenários são modificados de forma a garantir diferentes arranjos de incentivos para compra dos sistemas fotovoltaicos e campanhas de educação.

As etapas da metodologia apresentadas na Figura 4-1 são detalhadas nas próximas seções.

## 4.2 DETERMINAÇÃO DAS BARREIRAS ASSOCIADAS À DIFUSÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

A primeira etapa da metodologia, Figura 4-1, consiste em determinar as barreiras associadas à difusão dos sistemas fotovoltaicos. Para isto, as barreiras são classificadas em cinco diferentes aspectos: econômico, gestão, político, social e técnico, apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Barreiras associadas a difusão dos sistemas fotovoltaicos

<b>Aspectos Econômicos</b>	<b>Aspectos Gestão</b>	<b>Aspectos Políticos</b>	<b>Aspectos Sociais</b>	<b>Aspectos Técnicos</b>
VPL sistema fotovoltaico	Estratégias de negócio	Situação política	Falta de conhecimento	Qualidade dos sistemas fotovoltaicos
VPL rede	Marketing (publicidade)	Situação econômica	Consciência ecológica	Complexidade dos sistemas fotovoltaicos

<b>Aspectos Econômicos</b>	<b>Aspectos Gestão</b>	<b>Aspectos Políticos</b>	<b>Aspectos Sociais</b>	<b>Aspectos Técnicos</b>
Financiamento para compra dos sistemas fotovoltaicos	Taxa de serviço e microcrédito	Políticas de subsídio para compra de sistemas fotovoltaicos	Adoção dos sistemas fotovoltaicos por outros consumidores	Energia Sistema fotovoltaico (eficiência, potência, recursos solares)
Custo de uma inovação diminui com o tempo	Fraco serviço de pós venda dos sistemas fotovoltaicos	Políticas de juros baixos para compra de sistemas fotovoltaicos	Escolaridade relacionada com a renda	Empresas que trabalham com sistemas fotovoltaicos
<i>Payback</i>	Programas de incentivo	Imposto de importação	Preocupação ambiental	Radiação solar local
Tarifa		Tarifas <i>feed-in</i>	Campanhas de educação	Dificuldade de instalação
Salário do consumidor		<i>Net Metering</i>	Autonomia em relação a distribuidora	Quantidade de módulos fotovoltaicos
		Questões ambientais	Índice de desenvolvimento humano	Durabilidade
				Exigência de manutenção
				Demanda

Fonte: do Autor.

Verifica-se que nenhum dos trabalhos encontrados na literatura engloba todas as variáveis apresentadas na Tabela 4.1 em um único modelo.

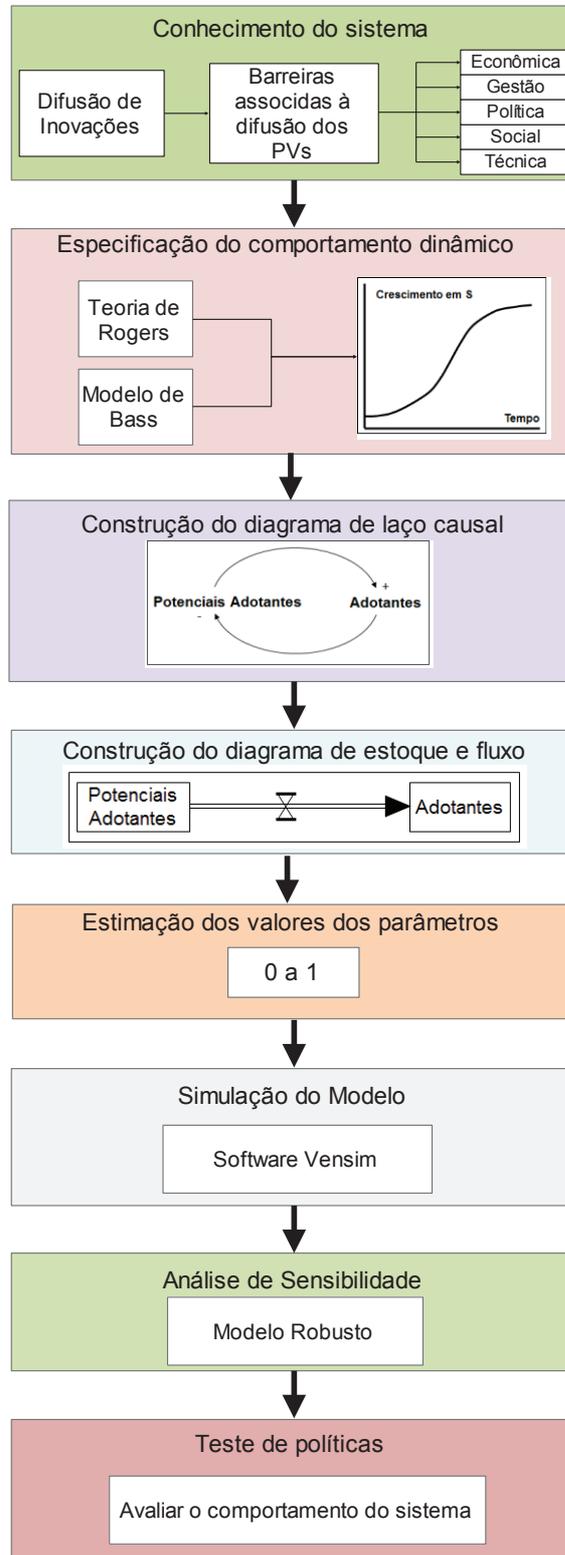
A partir dos cinco aspectos, foi desenvolvido o modelo de difusão de sistemas fotovoltaicos em consumidores de baixa tensão ao longo do tempo, utilizando a técnica de DS em conjunto com o modelo de Bass.

### 4.3 DIFUSÃO AO LONGO DO TEMPO UTILIZANDO DINÂMICA DE SISTEMAS

As etapas para a elaboração de um modelo de DS foi apresentada no item 3.3. Desse modo, o diagrama de blocos da Figura 4-2, apresenta a sequência de

etapas para elaboração do modelo proposto, com uso da DS em conjunto com o modelo de Bass.

Figura 4-2 – Etapas para elaboração do modelo proposto de DS com modelo de Bass

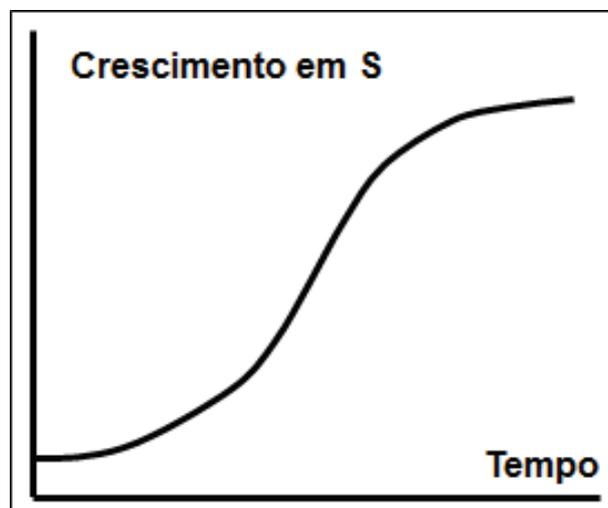


Fonte: do Autor.

Na primeira etapa – conhecimento do sistema – foi feito um estudo sobre a difusão de inovações, apresentada no capítulo 2, bem como as barreiras associadas para a difusão de sistemas fotovoltaicos, as quais foram divididas em 5 aspectos (econômico, gestão, político, social e técnico), conforme Tabela 4.1.

Na segunda etapa, Figura 4-2, é especificado o comportamento dinâmico, por ser a difusão de uma inovação cujo comportamento, de acordo com a teoria de Rogers e do modelo de Bass, é um crescimento em S, conforme apresenta a Figura 4-3.

Figura 4-3 – Curva em crescimento em S



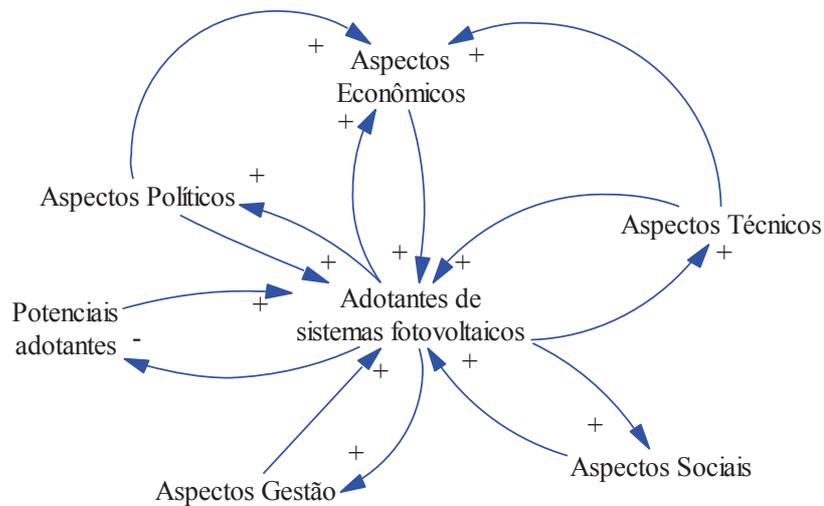
Fonte: Adaptado de Rogers (1971).

A terceira etapa é a construção do diagrama de laço causal.

#### 4.3.1 Diagrama de laço causal

Na construção do Diagrama de Laço Causal (DLC), todas as variáveis do modelo já são conhecidas e é necessário realizar as relações entre elas. Segundo Sterman (2000), o diagrama de laço causal cumpre um importante papel na modelagem dos sistemas, por servirem como um esboço das hipóteses causais e possibilitar que os pressupostos estruturais dos sistemas sejam explicitamente comunicados. Desse modo, a Figura 4-4 apresenta o macro diagrama de DLC.

Figura 4-4 – Macro diagrama com os cinco aspectos



Fonte: do Autor.

No diagrama da Figura 4-4, a variável central são os “Adotantes de sistemas fotovoltaicos”. Verifica-se a contribuição dos “Aspectos Econômicos”, “Aspectos Técnicos”, “Aspectos Políticos”, “Aspectos Gestão”, “Aspectos Sociais” e “Potenciais Adotantes”. Todas essas variáveis apresentam uma contribuição positiva para os “Adotantes de sistemas fotovoltaicos”. A realimentação negativa do diagrama se dá pelos “Potenciais adotantes”, com o aumento dos “Adotantes de sistemas fotovoltaicos” se diminui os “Potenciais adotantes” que consequentemente diminui os “Adotantes de sistemas fotovoltaicos”.

Os “Adotantes de sistemas fotovoltaicos” tem uma influência positiva em relação a cada um dos cinco aspectos: “Aspectos Econômicos”, “Aspectos Técnicos”, “Aspectos Políticos”, “Aspectos Gestão” e “Aspectos Sociais”.

Na Figura 4-5 é apresentado o diagrama de laço causal do modelo completo, com todos os seus laços e variáveis.



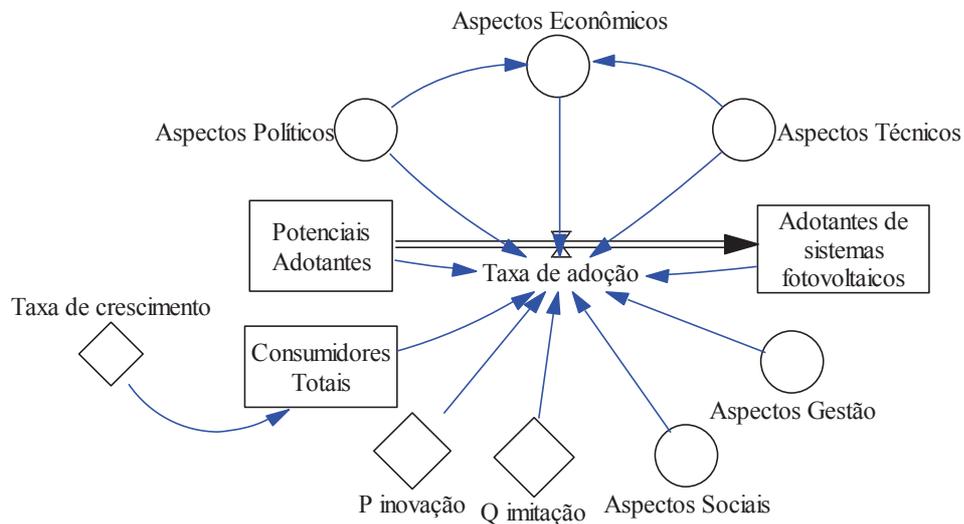
Após a elaboração do diagrama de laço causal, a quarta etapa é a construção do diagrama de estoque e fluxo.

#### 4.3.2 Diagrama de estoque e fluxo

Este item descreve o Diagrama de Estoque e Fluxo (DEF) do modelo, desenvolvido para projeção da difusão de sistemas fotovoltaicos em consumidores residenciais de BT ao longo do tempo, principais relações e equações envolvidas, e justificativas para os pressupostos.

Primeiramente, foi construída a estrutura global do diagrama de estoque e fluxo do modelo proposto para projeção da difusão de sistemas fotovoltaicos, Figura 4-6, onde foram considerados cinco aspectos (“econômico”, “gestão”, “político”, “social” e “técnico”) e os dois coeficientes do modelo de Bass: “inovação (p)” e “imitação (q)”. Cada um dos aspectos, bem como as duas variáveis do modelo de Bass, podem variar de 0 a 1.

Figura 4-6 – Estrutura global do diagrama de estoque e fluxo do modelo proposto



Fonte: do Autor.

De acordo com a Figura 4-6, os “Adotantes de sistemas fotovoltaicos” dependem da “Taxa de adoção”, se a mesma aumentar, aumenta a quantidade de adotantes, se a “Taxa de adoção” diminuir, conseqüentemente diminui a quantidade de novos “Adotantes de sistemas fotovoltaico”.

A “Taxa de adoção” depende dos cinco aspectos e dos coeficientes de “inovação (P)” e “imitação (Q)” do modelo de Bass. Todos eles têm realimentação positiva, ou seja, se qualquer um dos aspectos ou coeficientes aumentar, a “Taxa de adoção” também aumenta. Além disso, a “Taxa de adoção” vai depender dos “Consumidores Totais”, dos “Potenciais Adotantes” e dos “Adotantes de sistemas fotovoltaicos”. Com o aumento dos “Consumidores totais” e dos “Potenciais adotantes”, a “Taxa de adoção” aumenta. Entretanto, com o aumento dos “Adotantes de sistemas fotovoltaico”, a “Taxa de adoção” diminui. Neste caso, a realimentação negativa são os “Adotantes de sistemas fotovoltaicos”, pois eles não podem ser maiores que os “Potenciais adotantes”.

A variável “Taxa de adoção”, apresentada na equação (8), indica uma parcela da população que estaria apta a adquirir um sistema fotovoltaico, a qual aumenta o estoque de “Adotantes de sistemas fotovoltaicos” e diminui o estoque de “Potenciais adotantes”, onde os “Potenciais adotantes” são uma parcela dos “Consumidores totais”, considerando os aspectos “econômicos”, “gestão”, “políticos”, “sociais” e “técnicos” e os coeficientes de “inovação” e “imitação”.

$$TA_{(t)} = p_{(t)} \cdot PA_{(t)} + q_{(t-2)} \cdot PA_{(t)} \cdot \frac{ASF_{(t)}}{CT_{(t)}} \cdot (a \cdot AE_{(t)} + b \cdot AG_{(t)} + c \cdot AP_{(t)} + d \cdot AS_{(t)} + e \cdot AT_{(t)}) \quad (8)$$

Onde  $TA_{(t)}$  é a “Taxa de adoção”,  $p$  é o coeficiente de “inovação”,  $q$  é o coeficiente de “imitação”, que está com atraso de dois anos,  $PA_{(t)}$  são “Potenciais adotantes”,  $ASF_{(t)}$  são os “Adotantes de sistemas fotovoltaicos”,  $CT_{(t)}$  são os “Consumidores totais”,  $a, b, c, d, e$  são as contribuições na tomada de decisão para cada aspecto considerado,  $AE_{(t)}$  é o “Aspecto Econômico”,  $AG_{(t)}$  é o “Aspecto Gestão”,  $AP_{(t)}$  é o “Aspecto Político”,  $AS_{(t)}$  é o “Aspecto Social” e  $AT_{(t)}$  é o “Aspecto Técnico”.

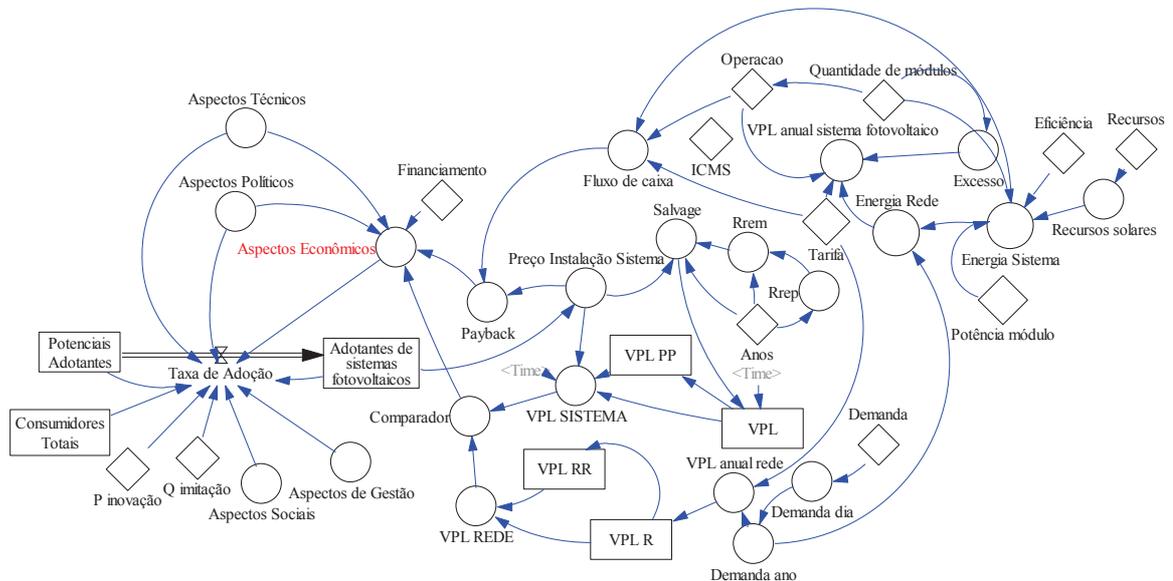
Os cinco aspectos considerados, bem como os coeficientes, são realimentações positivas do modelo. Já o tamanho do mercado é limitado pelos “Potenciais adotantes”, que são uma parcela dos “Consumidores totais”. Essa parcela depende da dificuldade de instalação e do salário da residência a se instalar o sistema fotovoltaico, que atuaria como uma realimentação negativa do modelo.

Para facilitar o entendimento do modelo proposto cada um dos cinco aspectos é apresentado, separadamente, na forma de um submodelo.

### i. Aspecto Econômico

O “Aspecto econômico” tem um grau de importância maior nos “Adotantes de sistemas fotovoltaicos”, pois, para instalar um sistema fotovoltaico, o consumidor tem uma maior preocupação com o benefício econômico. Nesse aspecto, são considerados o “VPL do sistema fotovoltaico” (“módulos”, “inversor” e “energia da rede”), o “VPL da rede” (“demanda” e “tarifa”), o tempo de retorno do investimento (“payback”), “financiamento” para compra de sistemas fotovoltaicos, aspectos “políticos” e “técnicos”. A Figura 4-7 apresenta o DEF do submodelo do “aspecto econômico”.

Figura 4-7 – Diagrama de estoque e fluxo do submodelo do aspecto econômico



Fonte: do Autor.

Para o cálculo do “VPL anual da rede” da distribuidora de energia elétrica é considerada a “Demanda anual de energia”, “Demanda ano” que é o produto da “Demanda do dia” pelos 365 dias do ano, e a “Tarifa” de energia elétrica, conforme equação (9).

$$VPL_{R(t)} = \frac{D_{ano(t)} \cdot T(t)}{(1 + 0,06)} \quad (9)$$

Onde  $VPL_{R(t)}$  é o “VPL anual rede”,  $D_{ano(t)}$  é a “Demanda ano” e  $T(t)$  é a “Tarifa” de energia elétrica.

Sendo a “Demanda ano” calculada através da equação (10).

$$D_{ano(t)} = D_{dia(t)} \cdot 365 \quad (10)$$

Onde  $D_{dia(t)}$  é a “Demanda do dia”.

Para determinar o “VPL anual do sistema fotovoltaico” se considera a “Energia Rede”, que é a “Demanda ano” menos “Energia sistema”, “Tarifa” de energia elétrica e o custo de “Operação” do sistema, que vai depender da “Quantidade de módulos” utilizados, calculado pela equação (11).

$$VPL_{S(t)} = \frac{-E_{r(t)} \cdot T(t) - E_{x(t)} \cdot T(t)}{(1 + 0,06) - \frac{O_p(t)}{(1 + 0,06)}} \quad (11)$$

Onde  $VPL_{S(t)}$  é o “VPL anual do sistema fotovoltaico”,  $E_{r(t)}$  é a “Energia da rede”,  $E_{x(t)}$  é o “Excesso”,  $O_p$  é a “Operação”.

Sendo a “Energia da rede” calculada pela equação (12).

$$E_{r(t)} = D_{ano(t)} - (E_{m(t)} * 0,9) \quad (12)$$

Onde  $E_{m(t)}$  é a “Energia do sistema”, calculada pela equação (13).

$$E_{m(t)} = Q_{u(t)} \cdot \frac{P_{t(t)}}{1000} \cdot E_{f(t)} \cdot R_{e(t)} \quad (13)$$

Onde  $Q_{u(t)}$  é a “Quantidade de módulos fotovoltaicos”,  $P_{t(t)}$  é a potência dos módulos em W,  $E_{f(t)}$  é a eficiência do sistema e  $R_{e(t)}$  são os “Recursos solares” em kWh/m<sup>2</sup>/dia.

Com o “VPL anual da rede” e “VPL anual do sistema fotovoltaico” é necessário calcular o “VPL REDE” e o “VPL SISTEMA”.

O “VPL SISTEMA” é calculado através da equação (14).

$$VPL S = se tempo = 20, VPL PP + VPL + P_s, senão VPL PP + VPL \quad (14)$$

Onde  $VPL S$  é o “VPL SISTEMA” e  $P_s(t)$  é “Preço do sistema fotovoltaico”.

Para calcular o “VPL SISTEMA” é necessário calcular as variáveis “VPL PP” e “VPL”, conforme as equações (15) e (16) respectivamente.

$$VPL PP = INTEG(VPL, 0) \quad (15)$$

$$VPL = INTEG \left( se T = 19, \frac{VPL}{(1 + 0,06)} - VPL - S_{a(t)}, sen\tilde{a}o, \frac{VPL}{(1 + 0,06)} - VPL \right) - VPL_S \quad (16)$$

Para o cálculo da variável  $VPL$  é necessário determinar a variável  $S_{a(t)}$ , conforme equação (17).

$$S_{a(t)} = se Anos = 20, 0, sen\tilde{a}o, P_{s(t)} \cdot \frac{Rrem}{20} \cdot \frac{1}{(1 + 0,06)^{Anos}} \quad (17)$$

Onde  $S_a$  é “Salvage”.

Para o cálculo da variável “Salvage” é necessário calcular “Rrem”, conforme equação (18).

$$Rrem_{(t)} = 20 - (Anos - Rrep) \quad (18)$$

Para cálculo do “Rrem” é necessário determinar Rrep, conforme equação (19).

$$Rrep_{(t)} = 20 * INTEGER \left( \frac{Anos}{20} \right) \quad (19)$$

O “VPL REDE” é calculado através da equação (20).

$$VPL REDE = VPL R + VPL RR \quad (20)$$

Para o cálculo do “VPL REDE” é necessário calcular o “VPL RR” e “VPL R”, conforme equações (21) e (22), respectivamente.

$$VPL RR = INTEG(VPL R, 0) \quad (21)$$

$$VPL R = INTEG \left( \frac{VPL R}{(1 + 0,06)} - VPLR, VPL_R \right) \quad (22)$$

Após o cálculo do “VPL REDE” e o “VPL SISTEMA”, faz-se a comparação dos dois “VPLs”. Se “VPL SISTEMA” for menor que “VPL REDE”, variável “Comparador” é igual a 1, senão “Comparador” é igual a 0, considerando os valores para o ano 20, conforme equação (23).

$$C_o = se VPL S \leq VPL REDE, 1 sen\tilde{a}o, 0 \quad (23)$$

Onde  $C_o$  é a variável “Comparador”.

O “Payback” depende do “Fluxo de caixa” e do “Preço de instalação do sistema”, conforme equação (24).

$$P_{k(t)} = \frac{P_{s(t)}}{F_{l(t)}} \quad (24)$$

Onde  $P_{k(t)}$  é a variável “Payback” e  $F_{l(t)}$  é a variável “Fluxo de caixa”.

Sendo “Fluxo de caixa” a “Energia sistema”, “Tarifa” e custo de “Operação”, conforme equação (25).

$$F_{l(t)} = E_{m(t)} \cdot T_{(t)} + O_{p(t)} \quad (25)$$

O “Financiamento” será 1, se tiver “Financiamento” para compra de sistemas fotovoltaicos, ou será 0 se não tiver “Financiamento”.

As variáveis “Comparador”, “Financiamento”, “Aspecto Político” e “Aspecto Técnico” tem realimentação positiva, ou seja, se qualquer uma delas aumentar aumentará o “Aspecto Econômico”, e a variável “Payback” tem realimentação negativa, ou seja, se ela aumentar o “Aspecto Econômico” irá diminuir.

No submodelo econômico para difusão de sistemas fotovoltaicos, Figura 4-7, o “Preço de instalação dos sistemas fotovoltaicos” depende da quantidade de “Adotantes de sistemas fotovoltaicos”. Aumentando a quantidade de “Adotantes” diminui o preço do sistema, fazendo com que diminua o “Payback” e o “VPL sistema” se torne menor que a rede, aumentando, assim, os “Aspectos Econômicos”, o qual aumenta a “Taxa de adoção”.

O “Payback” simples não leva em consideração a taxa de juros, inflação ou custo de oportunidade no período. Porém, pela facilidade de cálculo do ponto de vista do consumidor, ele é uma das opções nos “Aspectos Econômicos”, juntamente com o “VPL SISTEMA” e do “VPL REDE”, e do “Financiamento” para compra dos sistemas fotovoltaicos, além dos “Aspectos Políticos” e “Aspectos Técnicos” que têm influência nos “Aspectos Econômicos”. A equação (26) apresenta a “Taxa de Adoção” em relação aos “Aspectos Econômicos”.

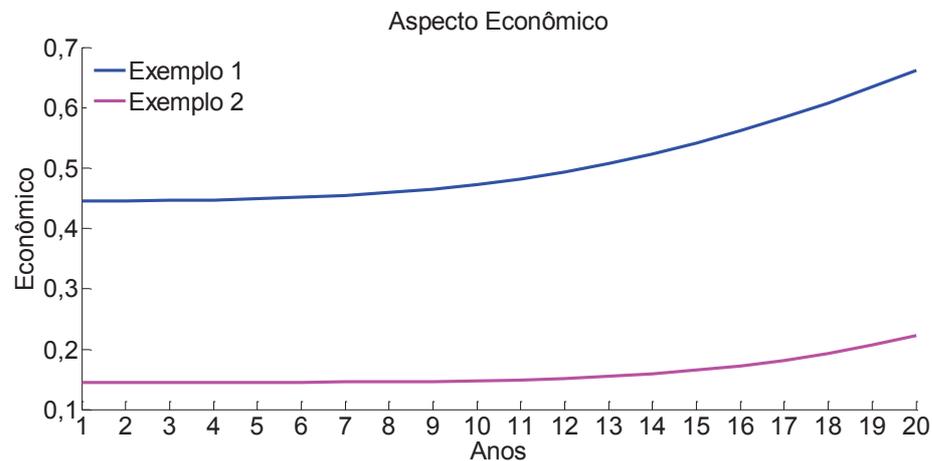
$$AE_{(t)} = C_o \cdot 0,3 + \exp(-1,3863 \cdot P_{k(t)}) + 0,2 \cdot F_{i(t)} + 0,15 \cdot AP_{(t)} + 0,1 \cdot AT_{(t)} \quad (26)$$

Onde  $C_o$  faz a comparação entre valores de “VPL rede” e “VPL do sistema fotovoltaico”, para 20 anos; se “VPL do sistema fotovoltaico” menor que “VPL rede”, então “Comparador” é 1, senão é zero,  $P_{k(t)}$  é o “tempo de retorno do investimento”,  $F_{i(t)}$  é o “Financiamento” para compra de sistemas fotovoltaicos (0 ou 1).

a. Exemplo de aplicação

Supondo que “VPL SISTEMA” seja menor que “VPL REDE”, a variável comparador é igual a 1, “Payback” variando de 7 a 2 anos, sem “Financiamento” para compra de sistemas fotovoltaicos, “Aspecto Político” igual a 0,5 e “Aspecto Técnico” igual a 0,7. A Figura 4-8 apresenta a curva do “Aspecto Econômico”, exemplo 1, na cor em azul. Com mudança no “Preço dos sistemas fotovoltaicos”, dobrando seu valor, a variável “Comparador” é 0 e o “Payback” varia de 9 a 2 anos, apresentando o “Aspecto Econômico” na cor rosa, exemplo 2, na Figura 4-8.

Figura 4-8 – Exemplo de aplicação do aspecto econômico

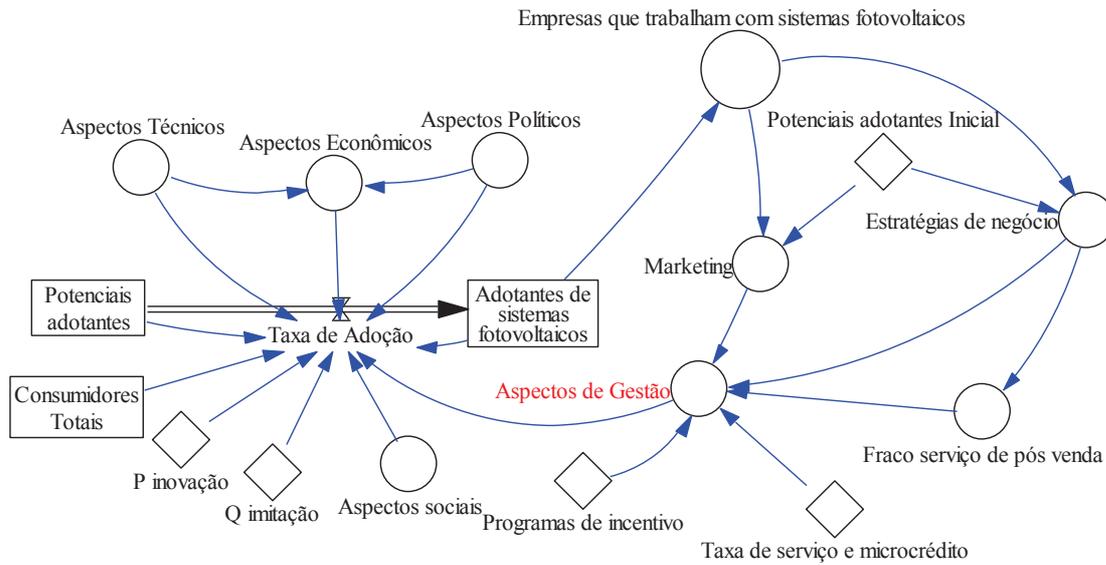


Fonte: do Autor.

ii. Aspecto de Gestão

O “Aspecto de Gestão” depende do “Marketing”, das “Estratégias de negócio”, “Fraco serviço de pós-venda” prestados pelas empresas que trabalham com sistemas fotovoltaicos, “Programas de incentivo” e de “Taxas de serviço e microcrédito”. A Figura 4-9 apresenta o modelo do aspecto gestão.

Figura 4-9 – Diagrama de estoque e fluxo do submodelo do aspecto de gestão



Fonte: do Autor.

As “Estratégias de negócio”, “Marketing”, “Programas de incentivo” e “Taxa de serviço e microcrédito” têm realimentação positiva, em relação aos “Aspectos de Gestão”. Se qualquer um deles aumentar, os “Aspectos de Gestão” também aumentam e o “Fraco serviço de pós-venda” tem realimentação negativa, ou seja, se aumentar esse aspecto os “Aspectos de Gestão” diminuirá.

No modelo do “Aspecto de Gestão”, Figura 4-9, as “Empresas que trabalham com sistemas fotovoltaicos” aumentam dependendo dos “Adotantes de sistemas fotovoltaicos”, conforme equação (27), o que influencia no “Marketing”, equação (28), e nas “Estratégias de negócio”, conforme equação (29).

$$E_{mt(t)} = \text{INTEGER}(ASF_{(t)} \cdot 0,035) \quad (27)$$

Onde  $E_{mt}$  são as “Empresas que trabalham com sistemas fotovoltaicos”.

$$M_{k(t)} = \frac{E_{m(t)}}{PA_i} \cdot 20 \quad (28)$$

Onde  $M_{k(t)}$  é o “Marketing” e  $PA_i$  são os “Potenciais adotantes inicial”.

$$E_{s(t)} = \frac{E_{mt(t)}}{PA_i} \cdot 25 \quad (29)$$

Onde  $E_{s(t)}$  são as “Estratégias de negócio”.

Sendo “Potenciais adotantes inicial” calculado pela equação (30).

$$PA_i = INITIAL(PA) \quad (30)$$

Um “Fraco serviço de pós-venda” dos sistemas fotovoltaicos pode ser corrigido através das “Estratégias de negócio”, conforme equação (31).

$$F_{N(t)} = 1 - E_{S(t)} \quad (31)$$

Onde  $F_{N(t)}$  é o “Fraco serviço de pós venda” dos sistemas fotovoltaicos.

Os “Programas de incentivo” e a “Taxa de serviço e microcrédito” vão influenciar diretamente nos “Aspectos de gestão”, os quais, por sua vez, afetam a “Taxa de Adoção” dos sistemas fotovoltaicos que, conseqüentemente, vão afetar os “Adotantes de sistemas fotovoltaicos”.

A equação (32) apresenta a “Taxa de Adoção” em relação aos “Aspectos de Gestão”.

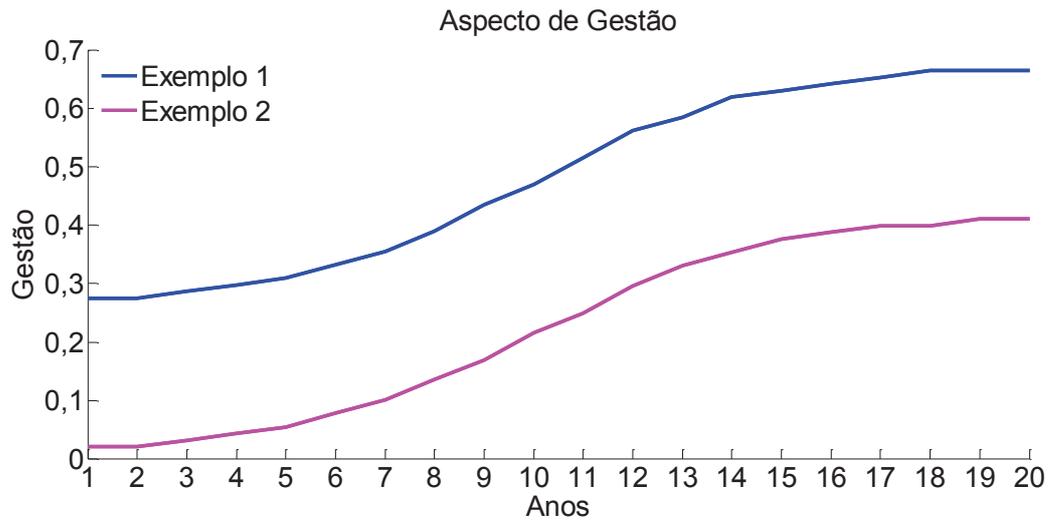
$$AG(t) = E_{S(t)} \cdot 0,2 - F_{N(t)} \cdot 0,1 + M_{k(t)} \cdot 0,2 + P_{In(t)} \cdot 0,25 + T_{ax(t)} \cdot 0,25 \quad (32)$$

Onde  $E_{S(t)}$  são as “Estratégias de negócios” praticadas pelas empresas de sistemas fotovoltaicos,  $F_{N(t)}$  é o “Fraco serviço de pós-venda” dos sistemas fotovoltaicos,  $M_{k(t)}$  é o “Marketing” praticado pelas empresas de sistemas fotovoltaicos,  $P_{In(t)}$  são “Programas de incentivo” para compra de sistemas fotovoltaicos e  $T_{ax(t)}$  são “Taxas de serviço e microcrédito” para compra dos sistemas fotovoltaicos.

#### a. Exemplo de aplicação

Neste exemplo, supõe-se que as “Estratégias de negócio” estejam variando de 0 a 0,85, o “Fraco serviço de pós venda” variando de 1 a 0,15, “Marketing” variando de 0 a 0,68, “Programas de incentivo” igual a 0,8 e a “Taxa de serviço e microcrédito” igual a 0,7. A partir disso, a Figura 4-10 apresenta a curva do “Aspecto de Gestão”, exemplo 1, em azul. Considerando que não haverá “Programas de incentivo”, nem “Taxa de serviço e microcrédito”, a Figura 4-10 apresenta a curva do “Aspecto de Gestão”, exemplo 2, em rosa.

Figura 4-10 – Exemplo de aplicação do aspecto de gestão

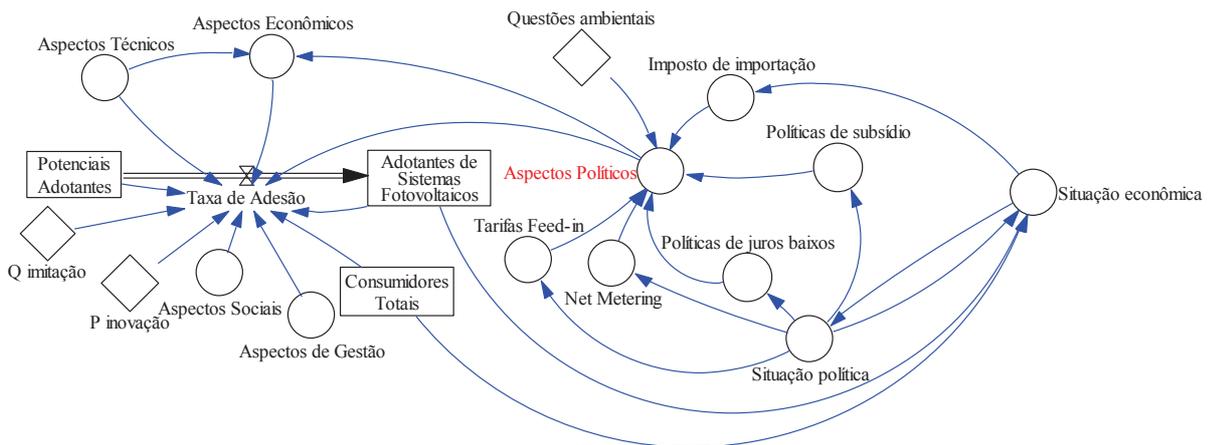


Fonte: do Autor.

### iii. Aspecto Político

O “Aspecto Político” depende das “Tarifas *feed-in*”, “*Net metering*”, “Políticas de juros baixos” para compra de sistemas fotovoltaicos, “Políticas de subsídios” para compra de sistemas fotovoltaicos, “Questões ambientais” e “Imposto de importação”. A Figura 4-11 apresenta o modelo do “Aspecto Político”.

Figura 4-11 – Diagrama de estoque e fluxo do submodelo do aspecto político



Fonte: do Autor.

“Questões ambientais”, “Políticas de subsídio” para compra de sistemas fotovoltaicos, “Políticas de juros baixos” para compra de sistemas fotovoltaicos, “*Net metering*” e “Tarifas *feed-in*” possuem realimentação positiva em relação aos

“Aspectos Políticos”, enquanto que os “Impostos de importação” possuem realimentação negativa.

O modelo do “Aspecto Político”, Figura 4-11, demonstra que a “Situação econômica” depende dos “Adotantes de sistemas fotovoltaicos” em relação aos “Consumidores totais” e da “Situação política”, conforme equação (33).

$$S_{e(t)} = \frac{ASF(t)}{CT(t)} + S_{p(t)} \cdot 0.3 \quad (33)$$

Onde  $S_{e(t)}$  é a situação econômica e  $S_{p(t)}$  é a situação política.

Sendo a “Situação política” calculada através da equação (34).

$$S_{p(t)} = S_{e(t)} \cdot 1,4 \quad (34)$$

O “Imposto de importação” das peças para os sistemas fotovoltaicos depende da “Situação econômica”, conforme equação (35).

$$I_{m(t)} = 0,9 - S_{e(t)} \quad (35)$$

Onde  $I_{m(t)}$  é o “Imposto de importação”.

E as “Políticas de subsídio” e “Políticas de juros baixos” para compra de sistemas fotovoltaicos dependem da “Situação política”, conforme equações (36) e (37), respectivamente.

$$S_{b(t)} = 1 - (S_{p(t)} \cdot 0,74) \quad (36)$$

Onde  $S_{b(t)}$  são as “Políticas de subsídio” para compra de sistemas fotovoltaicos.

$$J_{B(t)} = S_{p(t)} \cdot 0,85 \quad (37)$$

Onde  $J_{B(t)}$  são as “Políticas de juros baixos” para compra de sistemas fotovoltaicos.

As “Tarifas *feed-in*” e o “*Net metering*” também dependem da “Situação política”, conforme equações (38) e (39), respectivamente.

$$T_{f(t)} = S_{p(t)} \cdot 0,67 \quad (38)$$

Onde  $T_{f(t)}$  são as “Tarifas *feed-in*”.

$$N_{et(t)} = S_{p(t)} \cdot 0,35 \quad (39)$$

Onde  $N_{et(t)}$  é o “*Net metering*”.

A equação (40) apresenta a “Taxa de Adoção” pelos “Aspectos políticos”.

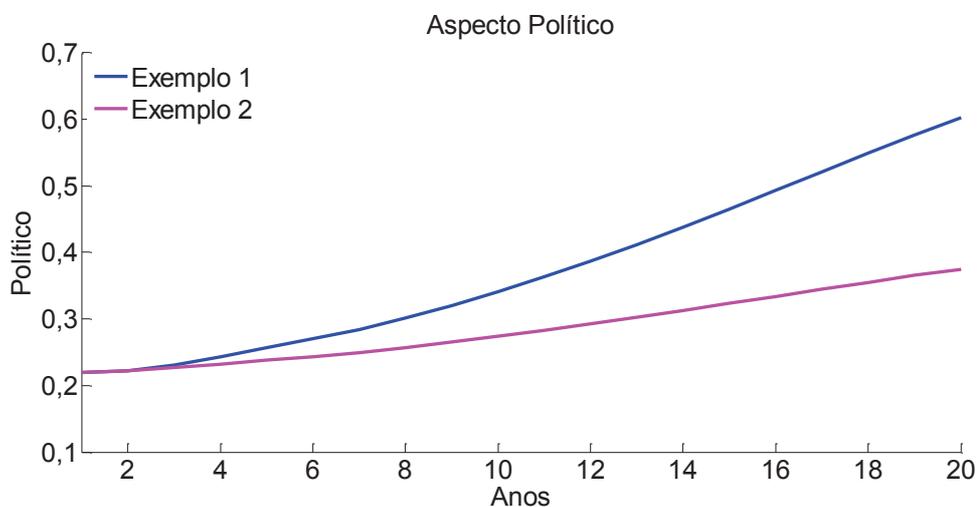
$$AP(t) = N_{et(t)} \cdot 0,1 + J_{B(t)} \cdot 0,2 + S_{b(t)} \cdot 0,2 + T_{f(t)} \cdot 0,3 - I_{m(t)} \cdot 0,2 + A_{m(t)} \cdot 0,2 \quad (40)$$

Onde  $N_{et(t)}$  é o sistema de “*Net Metering*”,  $J_{B(t)}$  é “Políticas de juros baixos” para compra dos sistemas fotovoltaicos,  $S_{b(t)}$  são “Políticas de subsídio” para compra dos sistemas fotovoltaicos,  $T_{f(t)}$  são “Tarifas *feed-in*”,  $I_{m(t)}$  são os “Imposto de importação” dos componentes dos sistemas fotovoltaicos e  $A_{m(t)}$  se referem às “Questões ambientais”.

#### a. Exemplo de aplicação

Supondo que há sistema de “*Net metering*”, “Tarifas *feed-in*”, “Políticas de subsídio e de juros baixos” variando de 0 a 1, “Imposto de importação” variando de 0,9 a 0,2 e preocupação governamental com “Questões ambientais”, a Figura 4-12, exemplo 1, apresenta a curva do “Aspecto Político”, na cor azul. Sem o sistema “*Net metering*” e sem as “Tarifas *feed-in*”, a curva do “Aspecto Político” muda seu comportamento, exemplo 2, em rosa, da Figura 4-12.

Figura 4-12 – Exemplo de aplicação do aspecto político

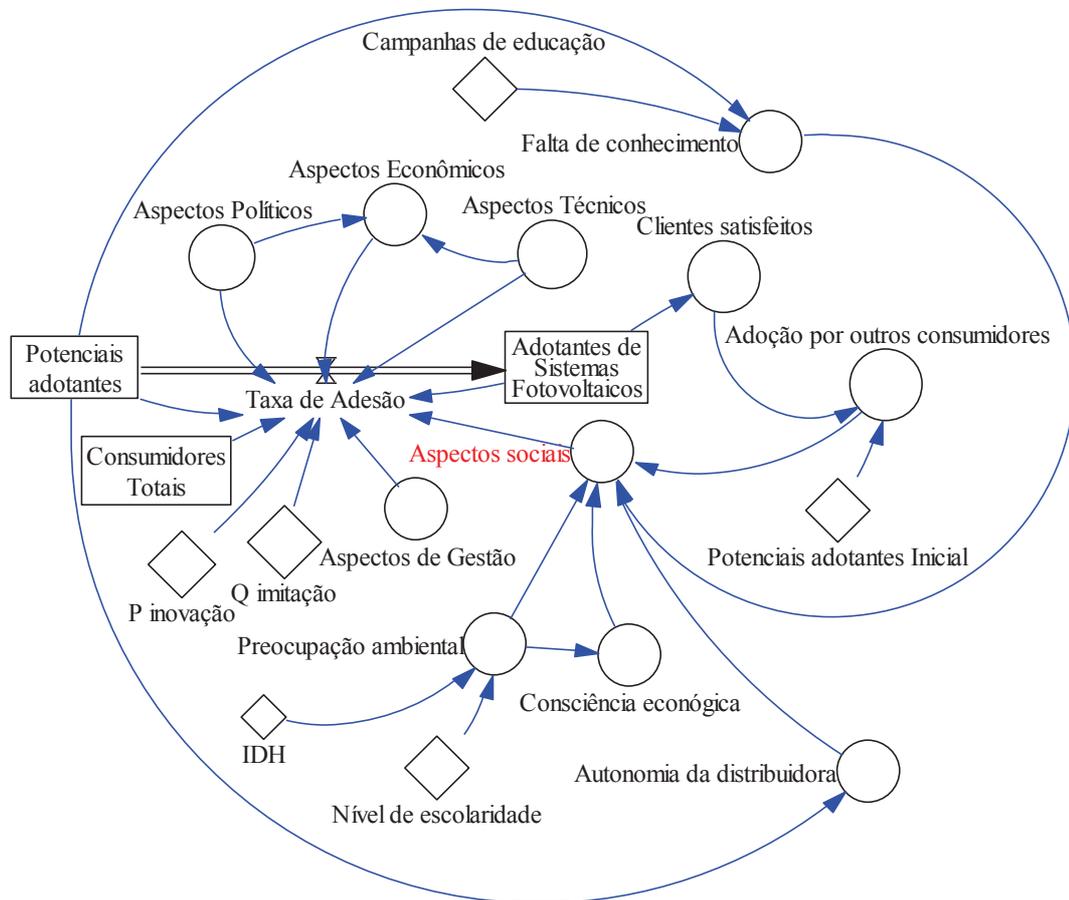


Fonte: do Autor.

#### iv. Aspecto Social

O “Aspecto Social” depende da “Adoção de sistemas fotovoltaicos” por outros consumidores, da “Falta de conhecimento” dos “Potenciais adotantes” em relação aos sistemas fotovoltaicos, da “Preocupação ambiental” da população, da “Consciência ecológica” e da “Autonomia da distribuidora”. A Figura 4-13 apresenta o modelo do “Aspecto Social”.

Figura 4-13 – Diagrama de estoque e fluxo do submodelo do aspecto social



Fonte: do Autor.

A “Preocupação ambiental”, “Consciência ecológica”, “Autonomia da distribuidora” de energia e “Adoção por outros consumidores” tem realimentação positiva em relação aos “Aspectos Sociais”. Já a “Falta de conhecimento” tem realimentação negativa.

No modelo do “Aspecto Social”, Figura 4-13, a “Adoção por outros consumidores” depende dos “Adotantes” que são “Clientes satisfeitos”, o qual interfere no “Aspecto Social”, conforme equação (41).

$$A_{d(t)} = \frac{C_{l(t)}}{PA_i} \quad (41)$$

Onde  $A_{d(t)}$  é a “Adoção por outros consumidores”,  $C_{l(t)}$  são os “Clientes satisfeitos”.

Sendo “Clientes satisfeitos”, determinado pela equação (42).

$$C_{l(t)} = INTEGER(ASF_{(t)} \cdot 0,6) \quad (42)$$

A “Falta de conhecimento” depende dos “Potenciais Adotantes”, podendo ser diminuída através de “Campanhas de educação”, calculada conforme equação (43).

$$F_{t(t)} = \frac{PA_{(t)} \cdot 0,7 - C_{a(t)} \cdot PA_{(t)} \cdot 0,7}{PA} \quad (43)$$

Onde  $F_{t(t)}$  é a “Falta de conhecimento” e  $C_{a(t)}$  são as “Campanhas de educação”.

Os “Potenciais Adotantes” podem adotar os sistemas fotovoltaicos para ter “Autonomia da distribuidora”, calculada conforme equação (44).

$$A_{ut(t)} = INTEGER\left(\frac{PA_{(t)} * 0,03}{PA_{(t)}}\right) + 0,15 \quad (44)$$

Onde  $A_{ut(t)}$  é a “Autonomia da distribuidora”.

A “Preocupação ambiental” e a “Consciência ecológica” dependem do “nível de escolaridade” e do “Índice de Desenvolvimento Humano (IDH)”, calculadas conforme equações (45) e (46), respectivamente. De acordo com Baumgarten (2016), o fator consciência ecológica apresenta a tendência da população em gerar energia de forma sustentável.

$$P_{am(t)} = N_{e(t)} * IDH_{(t)} \quad (45)$$

Onde  $P_{am(t)}$  é a “Preocupação Ambiental” e  $N_{e(t)}$  é o “Nível de escolaridade”.

$$C_{s(t)} = P_{am(t)} + 0,3 \quad (46)$$

Onde  $C_{s(t)}$  é a “Consciência ecológica”.

A equação (47) apresenta a “Taxa de Adoção” em relação aos “Aspectos Sociais”.

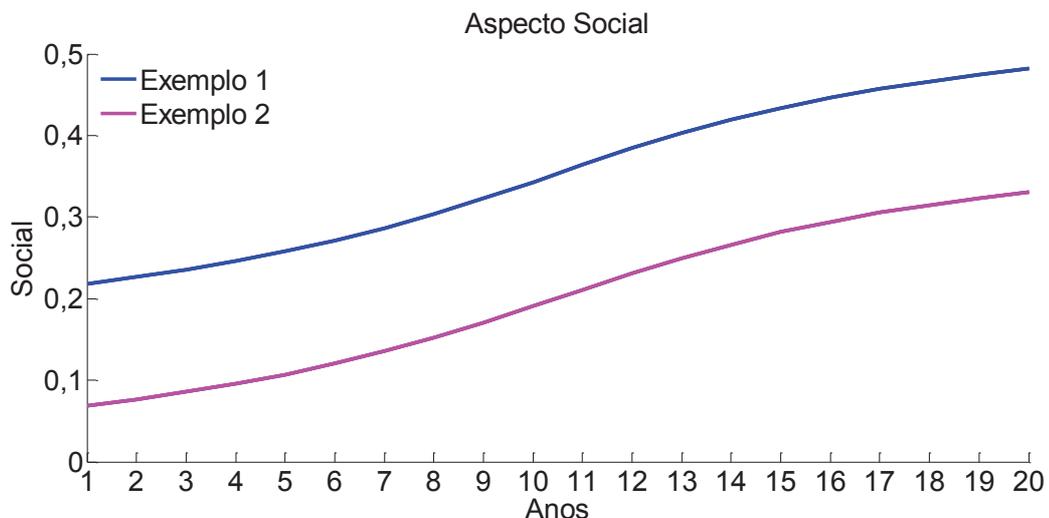
$$AS_{(t)} = A_{d(t)} \cdot 0,25 + A_{ut(t)} \cdot 0,15 + C_{s(t)} \cdot 0,2 - F_{t(t)} \cdot 0,15 + P_{am(t)} \cdot 0,25 \quad (47)$$

Onde  $A_{d(t)}$  é a “Adoção de sistemas fotovoltaicos por outros consumidores”,  $A_{ut(t)}$  é “Autonomia em relação a energia da distribuidora”,  $C_{s(t)}$  é a “Consciência ecológica” da população,  $F_{t(t)}$  é a “Falta de conhecimento” em relação aos sistemas fotovoltaicos e  $P_{am(t)}$  é a “Preocupação ambiental”.

#### a. Exemplo de aplicação

No exemplo do “Aspecto Social” supõe-se que a “Adoção por outros adotantes” varia de 0 a 0,6, a “Autonomia da distribuidora” de 0,17 a 0,7, a “Consciência ecológica” é igual a 0,6, a “Falta de conhecimento” é igual a 0 (“Campanhas de educação” são iguais a 1), e “Preocupação ambiental” igual a 0,3. Assim, a Figura 4-14, exemplo 1, apresenta a curva do “Aspecto Social”, levando em conta as características acima citadas. Considerando “Campanhas de educação” igual a 1, se diminui a “Falta de conhecimento” para zero, exemplo 2, exemplificando essa condição, Figura 4-14.

Figura 4-14 – Exemplo de aplicação aspecto social

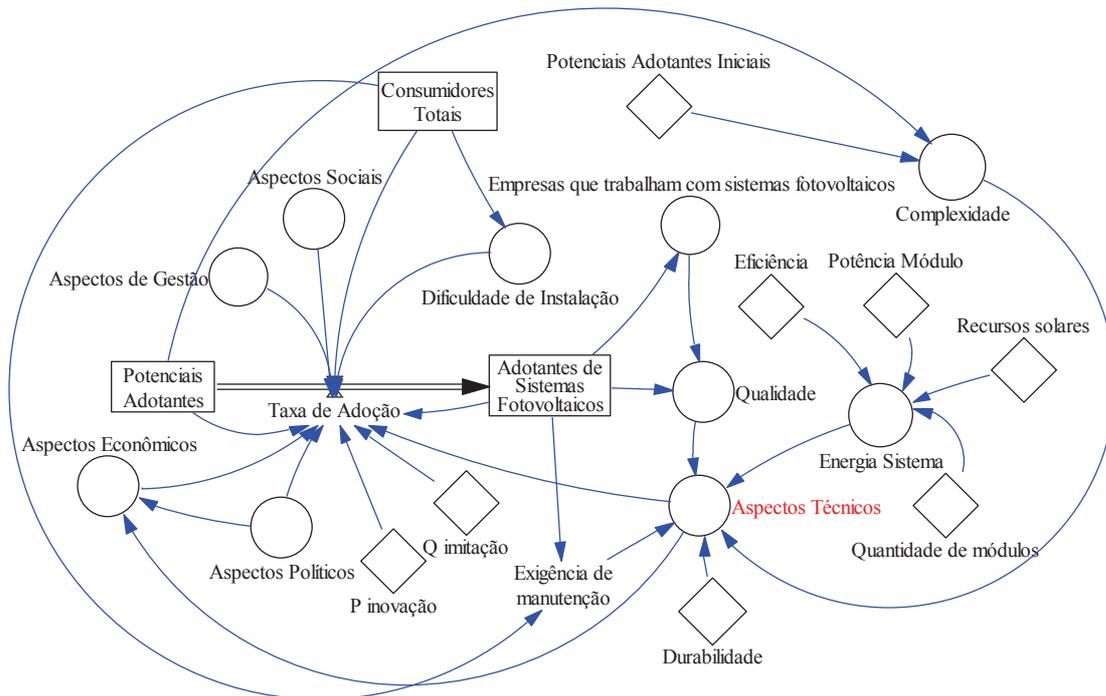


Fonte: do Autor.

## v. Aspecto Técnico

O “Aspecto Técnico” depende da “Qualidade dos sistemas fotovoltaicos”, da “Energia do sistema fotovoltaico”, “Durabilidade”, “Exigência de manutenção” e da “Complexidade dos sistemas fotovoltaicos”. A Figura 4-15 apresenta o modelo do “Aspecto Técnico”.

Figura 4-15 – Diagrama de estoque e fluxo do submodelo do aspecto técnico



Fonte: do Autor.

A “Qualidade dos sistemas fotovoltaicos”, “Energia sistema fotovoltaico” e a “Durabilidade” tem realimentação positiva em relação aos “Aspectos Técnicos” e a “Complexidade dos sistemas fotovoltaicos” e a “Exigência de manutenção” possuem realimentação negativa.

No modelo do “Aspecto Técnico”, Figura 4-15, as “Empresas que trabalham com sistemas fotovoltaicos” aumentam de acordo com os “Adotantes de sistemas fotovoltaicos”, equação (27) o que influencia na “Qualidade dos sistemas fotovoltaicos”, calculada conforme equação (48).

$$Q_{l(t)} = INTEG \left( \frac{E_{m(t)}}{ASF_{(t)} + 0,1} \right) + 0,4 \quad (48)$$

Onde  $Q_{l(t)}$  é a “Qualidade dos sistemas fotovoltaicos”.

A “Complexidade dos sistemas fotovoltaicos” depende dos “Potenciais Adotantes” e dos “Potenciais Adotantes inicial”, calculada conforme equação (49).

$$C_{om(t)} = \frac{PA_{(t)}}{PA_i} \quad (49)$$

Onde  $C_{om(t)}$  é a “Complexidade do sistema”.

A “Energia do sistema fotovoltaico” vai depender da “Eficiência”, “Potência” de pico, dos “Recursos solares” e da “Quantidade de módulos” utilizados, conforme equação (13).

A “Exigência de manutenção” vai depender dos “Consumidores Totais” e dos “Adotantes de sistemas fotovoltaicos”, calculada conforme equação (50).

$$M_{t(t)} = \frac{ASF_{(t)}}{CT_{(t)}} \quad (50)$$

Onde  $M_{t(t)}$  é a “Exigência de manutenção” dos sistemas fotovoltaicos.

A equação (51) apresenta a taxa de adoção em relação aos aspectos técnicos.

$$AT_{(t)} = Q_{l(t)} \cdot 0,35 + E_g \cdot 0,15 + D_{b(t)} \cdot 0,2 - M_{t(t)} \cdot 0,2 - C_{om(t)} \cdot 0,1 \quad (51)$$

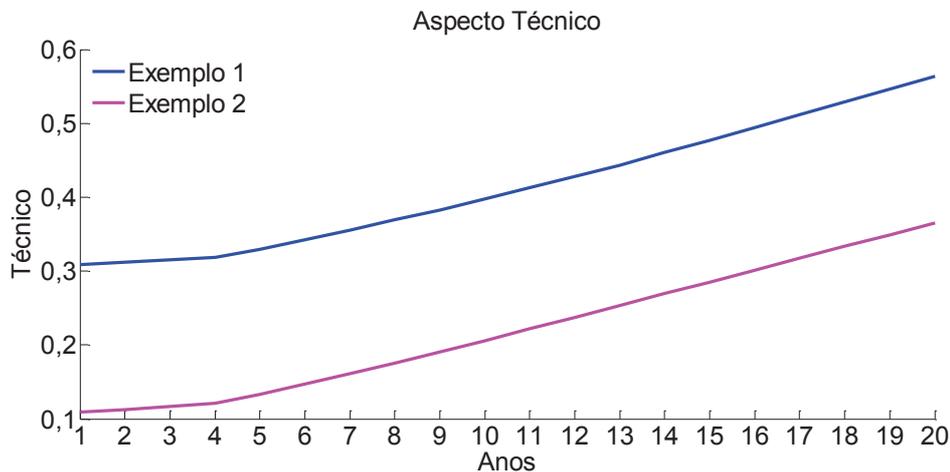
Onde  $Q_{l(t)}$  é a “Qualidade dos sistemas fotovoltaicos”,  $E_g$  é a “Energia do sistema fotovoltaico”,  $D_{b(t)}$  é a “Durabilidade”,  $M_{t(t)}$  é a preocupação dos consumidores em fazer a “manutenção” do sistema e  $C_{om(t)}$  é a “Complexidade do sistema”.

#### a. Exemplo de aplicação

Supondo que a “Qualidade dos sistemas fotovoltaicos” varia de 0,4 a 0,9, “Energia do sistema fotovoltaico” igual a 1,06, “Durabilidade” de 0,5 a 0,9, “Exigência de manutenção” de 0 a 0,5 e “Complexidade do sistema” variando de 1 a 0, a Figura 4-16 apresenta a curva do “Aspecto Técnico”, exemplo 1.

Fazendo modificações em relação a “Complexidade do sistema” e a “Exigência de manutenção”, considerando os dois iguais a 1, a curva do “Aspecto Técnico” é apresentada na Figura 4-16, exemplo 2.

Figura 4-16 – Exemplo de aplicação aspecto técnico



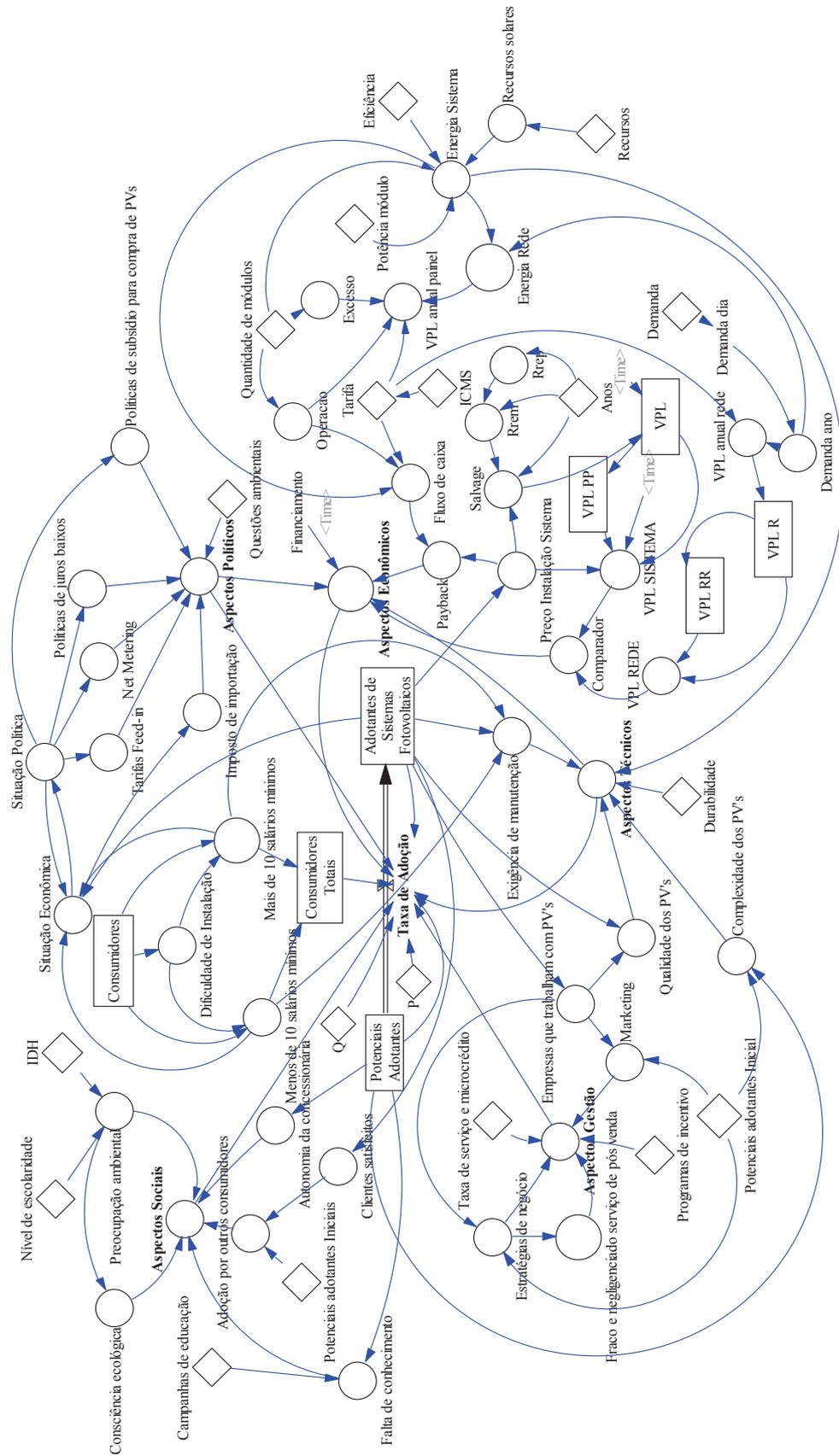
Fonte: do Autor.

#### vi. Modelo Completo

A Figura 4-17 apresenta o modelo completo de projeção da difusão de sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo utilizando a técnica de DS, com modelo de Bass, com base nos 5 aspectos apresentados, bem como os coeficientes de inovação e imitação.

Os 5 aspectos influenciarão na taxa de adoção dos sistemas fotovoltaicos, que conseqüentemente vai influenciar nos adotantes de sistemas fotovoltaicos, fazendo com que aumente ou diminua a quantidade dos mesmos a cada ano considerado, de acordo com mudanças feitas em cada um dos aspectos.

Figura 4-17 – Diagrama de Estoque e Fluxo do Modelo completo



Fonte: do Autor.

Sendo que os “Consumidores Totais” serão os consumidores que não terão dificuldade de instalação e uma maior renda, conforme equação (52).

$$CT_{(t)} = S_{mi_{(t)}} \cdot 0,27 + S_{ma_{(t)}} \cdot 0,73 \quad (52)$$

Onde  $S_{mi_{(t)}}$  são os domicílios com “Menos de 10 salários mínimos” e  $S_{ma_{(t)}}$  são os domicílios com “Mais de 10 salários mínimos”.

Os domicílios com “Menos de 10 salários mínimos” e com “Mais de 10 salários mínimos” são calculados conforme as equações (53) e (54).

$$S_{mi_{(t)}} = (C_{on_{(t)}} - D_{i_{(t)}}) \cdot 0,9289 \quad (53)$$

$$S_{ma_{(t)}} = (C_{on_{(t)}} - D_{i_{(t)}}) \cdot 0,0711 \quad (54)$$

Onde  $C_{on_{(t)}}$  são os “Consumidores” e  $D_{i_{(t)}}$  é a “Dificuldade de instalação”.

Sendo que a “Dificuldade de instalação” é calculada conforme equação (55).

$$D_{i_{(t)}} = C_{on_{(t)}} \cdot 0,2 \quad (55)$$

Com o modelo completo, apresentado na Figura 4-17, são realizadas as simulações dos estudos de caso para os quatro cenários considerados, onde se determina a quantidade de adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo, considerando modificações das variáveis do modelo.

Após a elaboração do modelo de difusão dos sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo, é determinado o modelo de difusão ao longo do espaço utilizando o MMC.

#### 4.4 DIFUSÃO AO LONGO DO ESPAÇO UTILIZANDO MMC

No item 4.3 foi estruturada uma metodologia para a difusão dos sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo, onde foi determinada a quantidade de adotantes de sistemas fotovoltaicos em cada um dos 20 anos, simulados para uma região de estudo. Após a difusão dos consumidores com sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo, é feita a difusão destes consumidores ao longo do espaço, ou seja, é determinada a quantidade de consumidores para cada uma das cidades pertencentes à região de estudo.

Para tanto, é utilizado o Método de Monte Carlo para difusão dos sistemas fotovoltaicos na área de estudo. Dessa maneira, é feito o sorteio ponderado com

critérios da quantidade de consumidores, com sistemas fotovoltaicos obtido no modelo de dinâmica de sistemas para as cidades pertencentes à região estudada, considerando o horizonte de 20 anos.

#### 4.4.1 Método de Monte Carlo

Para a definição da abrangência dos sistemas fotovoltaicos dentro de uma determinada área de estudo, é utilizado o MMC. O MMC é uma técnica de amostragem estatística que, ao longo dos anos, foi aplicada com sucesso a uma grande quantidade de problemas científicos (ECKHARDT, 1987).

A aplicação de métodos estatísticos nas ciências físicas chegou ao seu ápice com o advento dos computadores na década de 1940. A proposta inicial foi feita por Stan Ulam e John Von Neumann (USLAM, 1976; METROPOLIS, 1987; RICHTMYER; NEUMANN, 1947).

O MMC pode ser denominado como um experimento para gerar números aleatórios de qualquer distribuição de probabilidade ou processo estocástico para avaliar de forma numérica, indireta ou artificial um modelo matemático que permite estimar o comportamento de um sistema ou processos que envolvem variáveis estocásticas.

Andrade (2011) define o método de Monte Carlo em um conceito estatístico simples.

“Seja  $x$  uma variável aleatória com as seguintes características:

- função de distribuição de probabilidades:  $f(x)$ ;
- função cumulativa de probabilidades:  $F(x)$ .

Se definir uma nova variável aleatória  $y = F(x)$ , esta tem uma distribuição uniforme sobre o intervalo fechado  $(0,1)$ . Assim, como a função cumulativa de probabilidades representa as características aleatórias da variável em questão, a função  $y = F(x)$  é uma relação entre duas variáveis:

- variável  $x$ , com distribuição aleatória própria;
- variável  $y$ , com distribuição uniforme, entre 0 e 1.

O método de Monte Carlo consiste nos seguintes passos:

- dada a função cumulativa de probabilidades da variável em simulação  $F(x)$ , toma-se um número gerado aleatoriamente, nos intervalos (0,1) ou (0 a 100).
- usando a função cumulativa de probabilidades, determina-se o valor da variável  $x$  que corresponde ao número aleatório gerado.”

O anexo A apresenta um processo de simulação hipotético em termos de probabilidade da variável  $x$ .

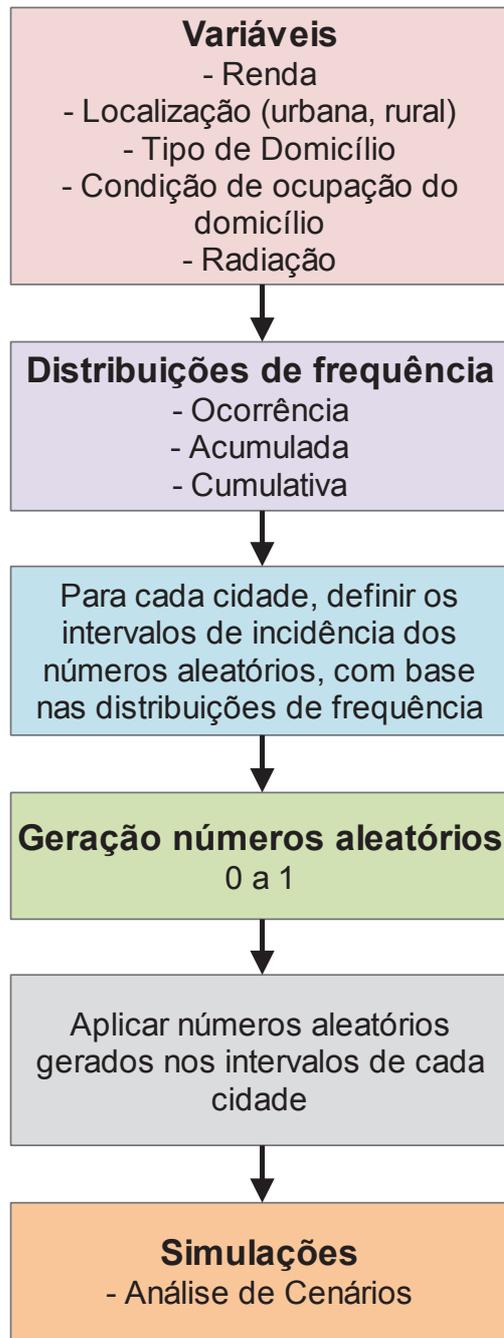
#### 4.4.2 Difusão ao longo do espaço aplicando MMC

Para a difusão ao longo do espaço utilizou-se o MMC. A Figura 4-18 apresenta as etapas para a elaboração do modelo do MMC.

O primeiro passo consiste na definição das variáveis de entrada: a renda do domicílio (5 a 10 salários mínimos, 10 a 20 salários mínimos e mais de 20 salários mínimos), considerando que domicílios com renda inferior a 5 salários mínimos não irão instalar um sistema fotovoltaico, urbano ou rural, tipo de domicílio (casa ou apartamento), condição de ocupação (próprio ou alugado) e a radiação do local.

No segundo passo, são determinadas as distribuições de frequência (ocorrência, acumulada e cumulativa). Posteriormente, os intervalos de incidência dos números aleatórios são definidos com base na frequência das distribuições para cada cidade avaliada. Após, são gerados números aleatórios (0 a 1), os quais são aplicados nos intervalos de cada cidade. E por fim, são feitas as simulações e análise dos cenários.

Figura 4-18 – Etapas para elaboração do modelo do MMC



Fonte: do Autor.

A equação (56) apresenta o cálculo para a frequência de ocorrência para ser utilizada em cada cidade para instalação dos sistemas fotovoltaicos.

$$Foc = \frac{\frac{A * 0,1}{\sum_1^t A} + \frac{B * 0,3}{\sum_1^t B} + \frac{C * 0,6}{\sum_1^t C}}{5} + \frac{\frac{D * 0,7}{\sum_1^t D} + \frac{E * 0,3}{\sum_1^t E}}{5} + \frac{F}{5} + \frac{H}{5} + \frac{I}{5} \quad (56)$$

Onde  $F_{oc}$  é a frequência de ocorrência,  $A$  são domicílios com renda de 5 a 10 salários mínimos,  $B$  são domicílios com renda de 10 a 20 salários mínimos e  $C$  são domicílios com renda maior que 20 salários mínimos,  $D$  são domicílios urbanos e  $E$  são domicílios rurais,  $F$  são domicílios próprios,  $G$  domicílios do tipo apartamento e  $H$  domicílios do tipo casa,  $I$  é a radiação do local de acordo com (CRESESB, 2012).

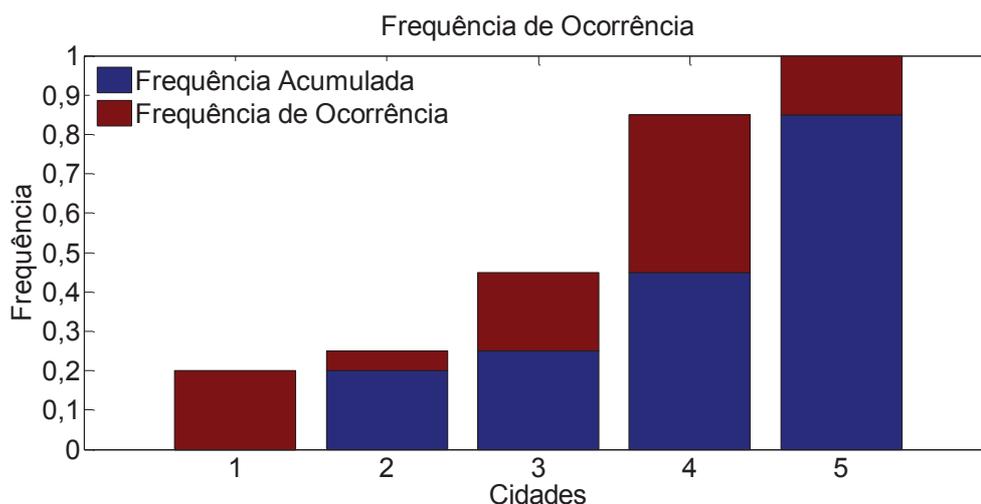
Pela análise da Equação (56) pode-se perceber que as variáveis: renda, localização, tipo de domicílio, condição de ocupação e radiação, possuem o mesmo peso na variável frequência de ocorrência.

O modelo trabalha com a geração de números aleatórios distribuídos dentro de um intervalo de 0 a 1, dependendo do número sorteado, será escolhida uma das cidades pertencentes à região de acordo com a sua frequência de ocorrência. Cabe salientar que são testadas 100 iterações para diminuir o erro de simulação.

#### a. Exemplo de aplicação

Supondo que determinada região tenha cinco cidades, para cada cidade são calculadas a frequência de ocorrência considerando as variáveis: renda, localização, tipo de domicílio, condição de ocupação e radiação solar, conforme equação (56). A Figura 4-19 apresenta a frequência de ocorrência para cada uma das 5 cidades.

Figura 4-19 – Frequência de ocorrência exemplo de aplicação

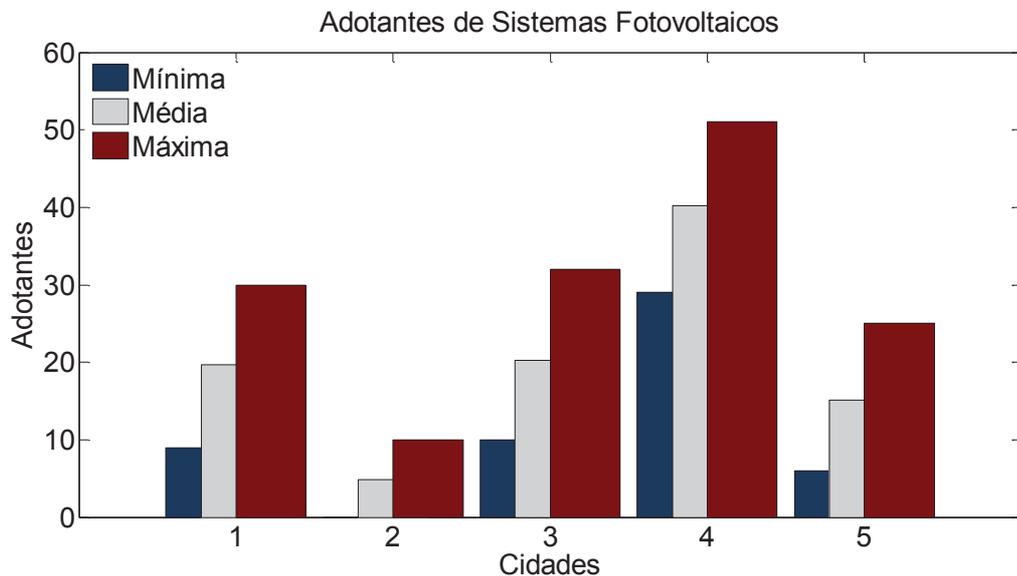


Fonte: do Autor.

Pela análise da Figura 4-19, as frequências de ocorrência para cada uma das cinco cidades são: 0,2, 0,05, 0,2, 0,4 e 0,15 respectivamente.

Considerando que nesta região existem 100 consumidores que aderiram aos sistemas fotovoltaicos, são gerados 100 números aleatórios que variam de 0 a 1. Esses números gerados são aplicados nos intervalos de cada cidade, determinando assim a difusão dos adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do espaço. Nesse exemplo foram testadas 100 iterações, onde se determinou a quantidade mínima, média e máxima de adotantes de sistemas fotovoltaicos, conforme apresenta a Figura 4-20.

Figura 4-20 – Adotantes de sistemas fotovoltaicos exemplo de aplicação



Fonte: do Autor.

Conforme análise da Figura 4-20, a cidade 4 possui um maior número de adotantes de sistemas fotovoltaicos. Isso ocorre, pois essa cidade tem uma maior frequência de ocorrência. A cidade 2, que possui a menor frequência de ocorrência, é a cidade com menos adotantes quando comparada com às demais.

#### 4.5 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada a metodologia para difusão de sistemas fotovoltaicos. Foram determinadas as barreiras associadas à difusão dos sistemas fotovoltaicos. A partir delas, foi modelada a difusão dos sistemas fotovoltaicos ao

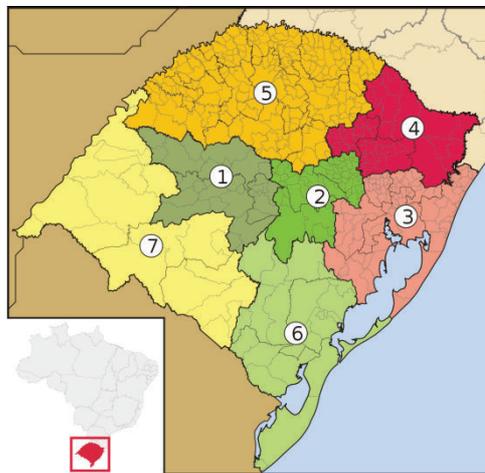
longo do tempo utilizando a técnica de DS em conjunto com o modelo de Bass. Posteriormente, foi modelada a difusão dos sistemas fotovoltaicos ao longo do espaço utilizando o MMC.

A próxima etapa da metodologia para difusão dos sistemas fotovoltaicos são os resultados para cada cenário analisado, onde são feitas modificações nos parâmetros de entrada para observar o comportamento dos adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo e ao longo do espaço.

## 5 DESENVOLVIMENTO PRÁTICO E ANÁLISE DE RESULTADOS

O presente capítulo tem como objetivo contextualizar o modelo proposto para a projeção da difusão dos sistemas fotovoltaicos, apresentado no capítulo 4. O estudo de caso é realizado no estado do Rio Grande do Sul (RS), situado no sul do Brasil, o qual é dividido geograficamente em 7 mesorregiões, como apresentado na Figura 5-1. A projeção da difusão dos sistemas fotovoltaicos será realizada considerando um horizonte de 20 anos.

Figura 5-1 – Mapa do Rio Grande do Sul dividido nas 7 mesorregiões



Fonte: FEE (2010).

Pela análise da Figura 5-1, pode-se observar que o estado do RS é dividido em 7 mesorregiões:

- 1 – Mesorregião do Centro Ocidental Rio-grandense.
- 2 – Mesorregião do Centro Oriental Rio-grandense.
- 3 – Mesorregião Metropolitana de Porto Alegre.
- 4 – Mesorregião do Nordeste Rio-grandense.
- 5 – Mesorregião do Noroeste Rio-grandense.
- 6 – Mesorregião do Sudeste Rio-grandense.
- 7 – Mesorregião do Sudoeste Rio-grandense.

Para a aplicação da metodologia para difusão de sistemas fotovoltaicos, Figura 4-1, é necessário fazer a estimativa dos valores dos parâmetros para o

modelo de DS em conjunto com modelo de Bass, que é o quinto passo para a elaboração do modelo de Dinâmica de Sistemas, Figura 4-2.

## 5.1 ESTIMAÇÃO DOS VALORES DOS PARÂMETROS

Os valores dos parâmetros são utilizados nas variáveis de entrada do modelo completo de DS, Figura 4-17.

1) Potencial Disponível: para o cálculo do potencial solar fotovoltaico de cada mesorregião do RS se leva em conta a área de estudo, fator de utilização da área com módulos fotovoltaicos, fator de conversão da energia irradiada para energia elétrica e a radiação solar diária. O potencial disponível é determinado pela equação (57), baseado em Capelleto e Moura (2011).

$$EA = \frac{AEs * FU * FC * R * 0,27 * 365}{Fc} \quad (57)$$

Onde  $EA$  é a Energia Anual TWh/km<sup>2</sup>/ano,  $AEs$  é a Área de estudo, em km<sup>2</sup>,  $FU$  é o Fator de utilização da área com coletores solares, em relação à área total, no caso  $FU = 0,0001$ ,  $FC$  é o Fator de conversão da energia irradiada para energia elétrica, sendo utilizado  $FC = 0,15$ ,  $R$  é a Radiação solar diária, em MJ/m<sup>2</sup>.dia,  $F_c$  é o Fator de conversão para TW, igual a 1000.

A Tabela 5.1 apresenta a energia anual disponível de geração solar fotovoltaica em cada mesorregião do estado do RS, Figura 5-1, determinada a partir da equação (57).

Tabela 5.1 – Energia anual disponível para geração solar no RS

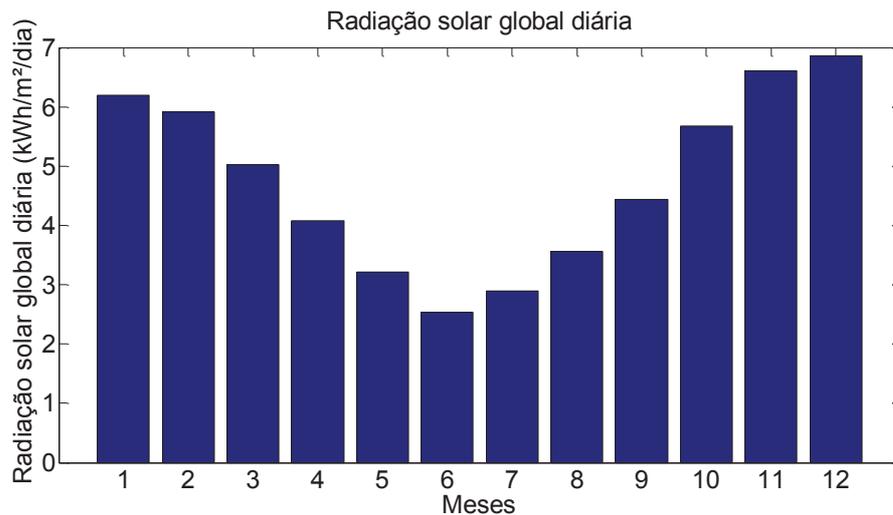
Regiões	Área total (km <sup>2</sup> )	Radiação solar global diária (MJ/m <sup>2</sup> .dia)	Radiação solar global anual (kWh/m <sup>2</sup> /ano)	Energia anual (TWh/km <sup>2</sup> /ano)
Mesorregião 1	25594,689	15	1520,79075	0,58
Mesorregião 2	17192,037	14	1419,4047	0,36
Mesorregião 3	29734,982	14	1419,4047	0,63
Mesorregião 4	25749,128	14	1419,4047	0,54
Mesorregião 5	64930,583	15	1520,79075	1,48
Mesorregião 6	42539,655	14	1419,4047	0,90
Mesorregião 7	62861,157	15	1520,79075	1,43
Total do RS	268602,231	14,42	1462,85	6,18

Fonte: Do Autor.

Pela análise da Tabela 5.1, considerando a energia anual de cada mesorregião, se tem como região mais propícia para instalação de sistemas fotovoltaicos a mesorregião 5, seguida da mesorregião 7. Desse modo, foi escolhida a mesorregião 7, por possuir um alto valor de energia anual e ter uma quantidade menor de cidades, facilitando a análise da difusão dos sistemas fotovoltaicos ao longo do espaço.

2) Recursos Disponíveis: para a geração de energia solar é feita a análise da radiação solar global diária, utilizando os dados disponíveis no site do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sergio Brito (CRESESB, 2012). A Figura 5-2 apresenta a radiação solar global diária na mesorregião 7, por ser uma mesorregião com uma alta disponibilidade de energia anual.

Figura 5-2 – Radiação solar global diária na mesorregião 7



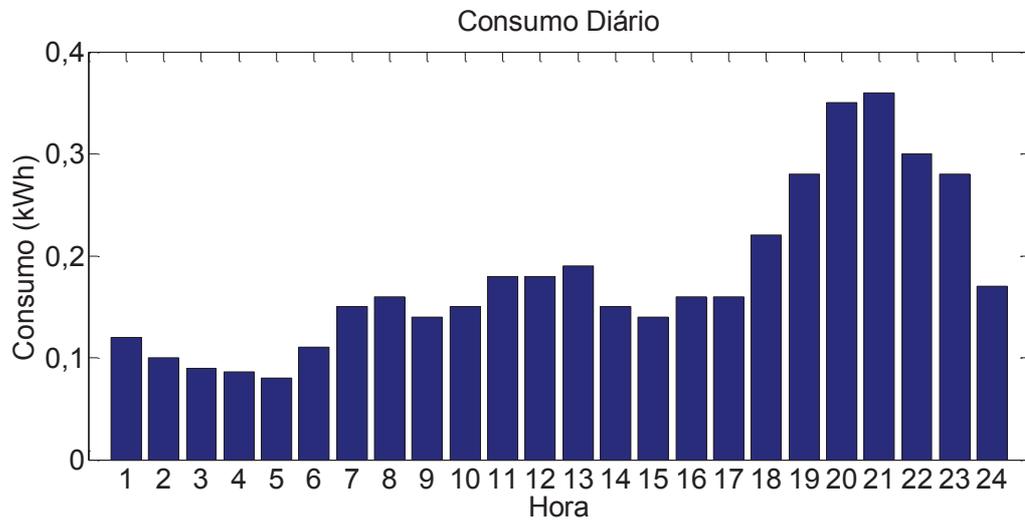
Fonte: CRESESB (2012).

De acordo com a Figura 5-2, a radiação solar global diária média é de 4,75 kWh/m²/dia. Utilizando os dados do site da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), a média encontrada foi de 4,77 kWh/m²/dia na mesorregião 7, mostrando que os resultados estão muito próximos (CRESESB, 2012; NASA, 2018).

3) Consumo do domicílio: foi utilizada a faixa de consumo de 101 a 200 kWh/mês, pois, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética EPE (2016), o consumo médio residencial no estado do RS é de 129,2 kWh/mês. A Figura 5-3

apresenta o consumo diário característico de um domicílio dessa faixa. Os dados obtidos são de uma distribuidora localizada no sul do Brasil.

Figura 5-3 – Consumo diário do domicílio



Fonte: Adaptado de distribuidora do sul do Brasil.

Através da análise da Figura 5-3, o consumo diário do domicílio é de 4,306 kWh, totalizando um consumo anual de 1571,69 kWh.

4) Tarifa de energia elétrica: é utilizada a tarifa de energia elétrica da distribuidora que atende a mesorregião 7, RGE Sul. O valor é de R\$ 0,517539 kWh, acrescido de 43%, referente ao Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) (RGE SUL, 2018).

5) Tecnologia de módulo fotovoltaico: com os dados de radiação solar global diária, Figura 5-2, foi escolhido um módulo da marca *Canadian Solar*, de 265  $W_p$  (SOLAR, 2017), por possuir um preço menor quando comparado com outras marcas disponíveis no mercado.

6) Eficiência do módulo fotovoltaico: de acordo com o manual do fabricante, o módulo fotovoltaico KD245GH possui uma eficiência de 16,47% (SOLAR, 2017).

7) Quantidade de módulos: para a determinação da quantidade de módulos fotovoltaicos foi utilizado o consumo anual do domicílio e a energia gerada pelos módulos. O consumo anual do domicílio foi de 1571,69 kWh. A energia gerada pelos sistemas fotovoltaicos é determinada através da equação (58) (MASTERS, 2004).

$$E_g = P_t \cdot E_f \cdot H_s \cdot D_a \quad (58)$$

Onde  $E_g$  é a energia gerada pelos sistemas fotovoltaicos em  $kWh/ano$ ,  $P_t$  é a potência dos módulos em  $kW_p$ ,  $E_f$  é a eficiência do sistema fotovoltaico igual a 85,48% (WORLD BANK GROUP, 2018),  $H_s$  são as horas de pico de sol ao dia determinadas através do histograma de insolação em  $h/dia$ ,  $D_a$  são os dias do ano.

Neste trabalho são utilizadas apenas as variáveis apresentadas na equação (58), não levando em conta outras variáveis, como por exemplo, a inclinação dos módulos fotovoltaicos.

A energia gerada, de acordo com a quantidade de módulos, é apresentada na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Quantidade de módulos e energia gerada

Quantidade de módulos	Energia (kWh/ano)
1	392,73
2	785,46
3	1178,19
4	1570,93
5	1963,66
6	2356,39

Fonte: Calculado de acordo com Masters (2004).

Através da análise da Tabela 5.2, foram utilizados quatro módulos fotovoltaicos de 265  $W_p$ , pois a energia gerada fica próxima ao consumo anual do domicílio, sem que haja a necessidade de compensar a energia excedente para a distribuidora de energia elétrica.

8) Vida útil do sistema: de acordo com os dados dos fabricantes, foi considerada uma vida útil de 20 anos para o sistema (módulo fotovoltaico e inversor).

9) Preço de instalação: foi considerado um preço de R\$ 700,00 por módulo de 265  $W_p$  da *Canadian Solar*, R\$ 2.000,00 por inversor de 1 kW, considerando os preços médios desses equipamentos, e R\$ 1.200,00 de mão de obra.

10) Preço de operação: foi considerado o preço de R\$ 70,00 ao ano por módulo fotovoltaico, para limpeza das placas.

11) Financiamento: valor do financiamento será 0 (sem financiamento) ou 1 (com financiamento).

12) Programas de incentivo: pode variar gradualmente de 0 a 1, sendo 0 sem programas de incentivo para adoção de sistemas fotovoltaicos.

13) Taxa de serviço e microcrédito: pode variar gradualmente de 0 a 1, sendo 0 sem programas de incentivo para compra de sistemas fotovoltaicos.

14) Mais de 10 salários mínimos: de acordo com os dados do Censo 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), apenas 7,11% dos domicílios pertencentes à mesorregião 7 possuem renda superior a 10 salários mínimos (IBGE, 2010).

15) Menos de 10 salários mínimos: 92,89% dos domicílios pertencentes à mesorregião 7 possuem renda inferior a 10 salários mínimos (IBGE, 2010).

16) Durabilidade: varia de 0 a 1, com um acréscimo de 0,02 ao ano, considerando que a cada ano as tecnologias de sistemas fotovoltaicos evoluem.

17) Dificuldade de instalação: foi considerado que 80% dos domicílios possuem dificuldade de instalação dos sistemas fotovoltaicos. De acordo com EPE (2014), 85% dos locais têm limitantes para instalação dos sistemas fotovoltaicos, como sombras, chaminés, caixas d'água, antenas, aquecedores solares, que podem inviabilizar a instalação dos sistemas fotovoltaicos em algumas residências.

18) Índice de Desenvolvimento Humano (IDH): foi utilizado o IDH de cada cidade pertencente à mesorregião 7, através dos dados do Censo 2010 do IBGE, fazendo uma média, se obteve o valor de 0,697 (IBGE, 2010).

19) Nível de escolaridade: utilizando o nível de instrução de cada cidade pertencente à mesorregião 7, através dos dados do Censo 2010 do IBGE, verificou-se que 28% da população possui nível médio ou superior, utilizando assim 0,28 (IBGE, 2010).

20) Campanhas de educação: podem variar de 0 a 1, sendo 0 sem campanhas de educação.

21) Questões ambientais: podem variar de 0 a 1, sendo 0 sem considerar as questões ambientais.

22) Coeficiente de Inovação (p): foi considerado o valor 0,015.

23) Coeficiente de Imitação (q): foi considerado o valor de 0,5.

Sulta, Farley e Lehmann (1990) analisaram as estimativas de parâmetros de 213 aplicações publicadas do modelo Bass e suas extensões. Os autores relatam o

valor médio de  $p$  igual a 0,03 e o valor médio de  $q$  igual a 0,38. No presente trabalho, os valores de  $p$  e  $q$  foram definidos através de uma análise de sensibilidade, Figura 4-2.

A Tabela 5.3 apresenta uma síntese da estimação dos valores dos parâmetros utilizados na metodologia para difusão de sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo.

Tabela 5.3 – Estimação dos valores dos parâmetros

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>
Recursos disponíveis	4,75 kWh/m <sup>2</sup> /dia
Consumo do domicílio	129,2 kWh/mês
Tarifa de energia elétrica	R\$ 0,517539 kWh + 43% ICMS
Tecnologia de módulo fotovoltaico	<i>Canadian Solar</i> de 265 $W_p$
Eficiência sistema fotovoltaico	85,48%
Quantidade de módulos	4 módulos
Vida útil do sistema	20 anos
Preço de instalação	R\$ 700,00 por módulo, R\$ 2000,00 inversor, R\$ 1200,00
Preço de operação	R\$ 70,00 por ano
Financiamento	0 (sem financiamento) ou 1 (com financiamento)
Programas de incentivo	Variação gradual de 0 a 1
Taxa de serviço e microcrédito	Variação gradual de 0 a 1
Mais de 10 salários mínimos	7,11% dos domicílios
Menos de 10 salários mínimos	92,89% dos domicílios
Durabilidade	Variação gradual de 0 a 1
Dificuldade de instalação	80% dos domicílios
IDH	0,697
Nível de escolaridade	0,28
Campanhas de educação	Variação gradual de 0 a 1
Questões ambientais	Variação gradual de 0 a 1
Coefficiente de inovação ( $p$ )	0,015
Coefficiente de imitação ( $q$ )	0,5

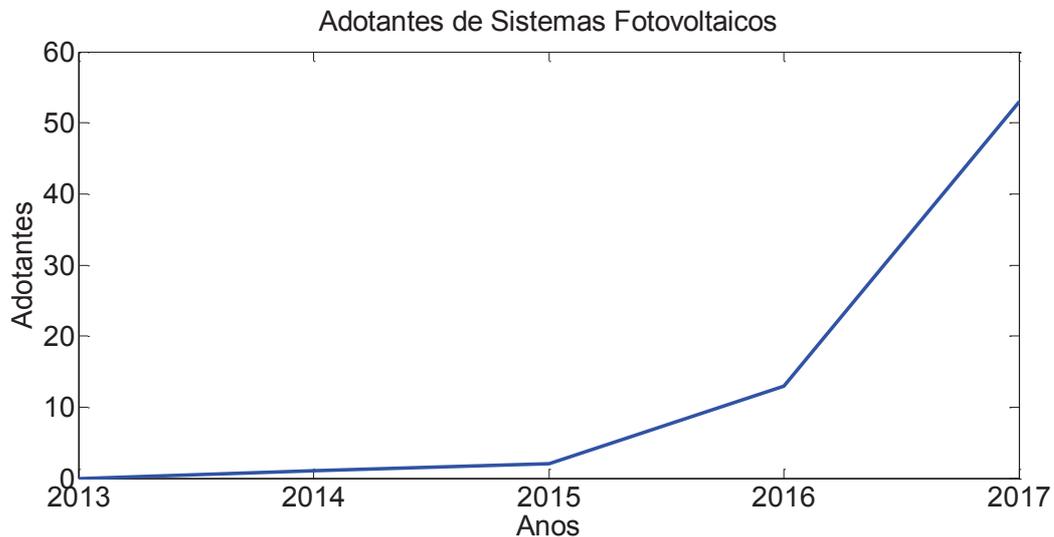
Fonte: do Autor.

## 5.2 DIFUSÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS – DADOS REAIS

Com os dados das unidades consumidoras com geração distribuída - fonte de radiação solar – disponibilizadas no site da ANEEL (ANEEL, 2018), foi determinada a

quantidade de adotantes de sistemas fotovoltaicos na mesorregião 7 do estado do RS, para os anos 2014, 2015, 2016 e 2017, conforme ilustra a Figura 5-4.

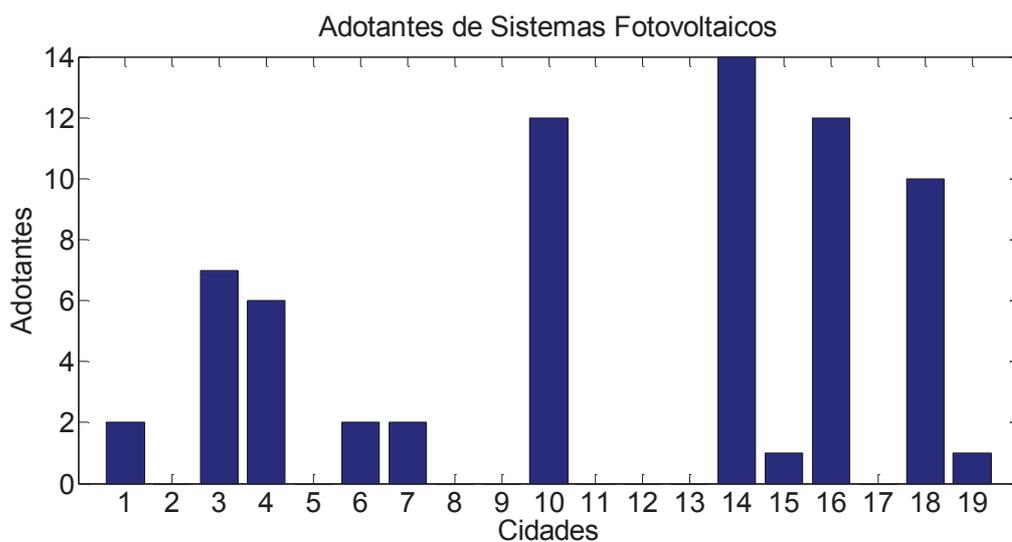
Figura 5-4 – Número real de adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo



Fonte: ANEEL (2018).

Para analisar a difusão destes consumidores ao longo do espaço, foi utilizada a quantidade de adotantes em cada uma das 19 cidades pertencentes à mesorregião 7, conforme apresenta a Figura 5-5.

Figura 5-5 – Número real de adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do espaço



Fonte: ANEEL (2018).

Conforme Figura 5-5, as cidades com maior quantidade de adotantes de sistemas fotovoltaicos foram as cidades: 3, 4, 10, 14, 16 e 18. E as cidades 2, 5, 8, 9, 11, 12, 13, 17 e 19 foram as cidades com menor quantidade de adotantes de sistemas fotovoltaicos.

### 5.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

As próximas etapas para elaboração do modelo de DS, Figura 4-2, são a simulação do modelo, etapa 6 e análise de sensibilidade, etapa 7. De acordo com Ford (1999), na análise de sensibilidade, procura-se verificar se os resultados são sensíveis às alterações nos parâmetros do modelo. Se, após cada teste, o modo de referência manter um comportamento adequado, alcança-se outra meta do processo de elaboração, a robustez do modelo. Um modelo é chamado de robusto quando ele gera o mesmo padrão geral, apesar da grande incerteza nos valores dos parâmetros.

Dessa forma, os parâmetros foram alterados em relação ao valor referência e, os resultados são retirados no último ano da simulação (ano 20), conforme apresenta Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Análise de sensibilidade

Variável	Variações (%)	Adotantes de sistemas fotovoltaicos
Preço de instalação	Valor atual	34250
	- 20%	34640
	- 40%	35640
Financiamento	Com	39420
	Sem	34250
Programas de incentivo	Com	36410
	Sem	34250
Campanhas de educação	Com	36060
	Sem	34250
ICMS Tarifa	Atual	34250
	20%	34310
	40%	32380
Questões ambientais	Atual	34250
	20%	34670
	40%	35090

Variável	Variações (%)	Adotantes de sistemas fotovoltaicos
Tarifa	Atual	34250
	20%	34480
	40%	34780
	- 20%	34100
	- 40 %	26670
Taxa de serviço e microcrédito	Com	36410
	Sem	34250
Nível de escolaridade	Atual	34250
	20%	34400
	40%	34850
Durabilidade	Atual	34250
	20%	34690
	40%	35120
Tarifas feed-in	Atual	34250
	20%	34580
	40%	34900
Net-metering	Atual	34250
	20%	34310
	40%	34370

Fonte: do Autor.

Dos resultados apresentados na Tabela 5.4, verifica-se que o comportamento do modelo é robusto. Os parâmetros que apresentam uma maior sensibilidade são financiamento, programas de incentivo, campanhas de educação, taxa de serviço e microcrédito. Dessa forma, essas políticas serão exploradas nos cenários apresentados.

#### 5.4 ESTUDO DE CASO PARA DIFUSÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

A próxima etapa para a elaboração do modelo de DS, Figura 4-2, são os testes de políticas, etapa 8. Para o estudo de caso da difusão dos sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo na mesorregião 7, foi utilizado o modelo completo apresentado na Figura 4-17, considerando quatro cenários para estudo de caso.

A utilização dos quatro cenários se deve ao fato de se determinar a quantidade de adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo, fazendo

mudanças nas variáveis do modelo, para analisar como o mesmo se comporta. Conseqüentemente, com as premissas de cada cenário, haverá mudanças nos adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo.

Nessa mesorregião, no ano de 2015, havia em torno de 233.398 consumidores residenciais e 23.517 consumidores rurais. Analisando os últimos 10 anos, de acordo com os dados da Fundação de Economia e Estatística (FEE), o número de consumidores residenciais teve crescimento anual de 1,65% e o número de consumidores rurais teve um crescimento anual de 2,6%. Desse modo, são usados esses dados para a projeção de crescimento para os próximos 20 anos.

Do total de consumidores (residenciais e rurais), considerou-se que 20% das residências apresentavam dificuldades para instalar os sistemas fotovoltaicos (EPE, 2014), 92% desses consumidores tem renda inferior a 10 salários mínimos e 8% tem renda maior que 10 salários mínimos (IBGE, 2010). Nessa perspectiva, os possíveis adotantes da mesorregião 7 são calculados determinando, assim, que no ano 1 os potenciais adotantes são 62.220 consumidores, o que representa 25% do total de consumidores (256.915).

Para a simulação dos quatro cenários, utilizou-se o software Vensim (VENSIM, 2018), desenvolvido pela Ventana Systems®, software este empregado para a simulação de modelos de dinâmica de sistemas, onde se determina a projeção de adotantes de sistemas fotovoltaicos em um horizonte de 20 anos.

Com a determinação dos adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo, é feita a difusão desses adotantes ao longo do espaço, utilizando o MMC. A Tabela 5.5 apresenta as 19 cidades pertencentes à mesorregião 7 e a quantidade de consumidores em cada cidade (FEE, 2010).

Tabela 5.5 – Cidades pertencentes a mesorregião 7

<b>Cidade</b>	<b>Cidade</b>	<b>Consumidores</b>
1	Rosário do Sul	13158
2	Santa Margarida do Sul	761
3	Santana do Livramento	27381
4	São Gabriel	19975
5	Aceguá	1397
6	Bagé	38504
7	Dom Pedrito	13132
8	Hulha Negra	1926
9	Lavras do Sul	2637
10	Alegrete	25921
11	Barra do Quaraí	1212
12	Manoel Viana	2505
13	Quaraí	7570
14	São Borja	19594
15	São Francisco de Assis	6807
16	Uruguaiana	37422
17	Garruchos	1090
18	Itaqui	11605
19	Maçambará	1489

Fonte: FEE (2010).

A primeira etapa para elaboração do modelo de MMC, Figura 4-18, é a determinação das variáveis das cidades que pertencem a mesorregião 7, Tabela 5.5. Com os dados das variáveis, são determinadas as distribuições de frequência. Para isso, foram utilizados os valores apresentados na Tabela 5.6.

Para determinação das variáveis A, B, C, D, E, F, G e H, definidas a seguir, foram utilizados os dados do Censo 2010 do IBGE (CENSO, 2010), e para a variável I foram utilizados dados do (CRESESB, 2012).

Onde A são domicílios com renda de 5 a 10 salários mínimos, B são domicílios com renda de 10 a 20 salários mínimos, C são domicílios com renda

maior que 20 salários mínimos, D são domicílios urbanos, E são domicílios rurais, F são domicílios próprios, G são domicílios do tipo apartamento, H são domicílios do tipo casa e I é a radiação do local dada em  $kW_h/m^2/dia$  de acordo com (CRESESB, 2012).

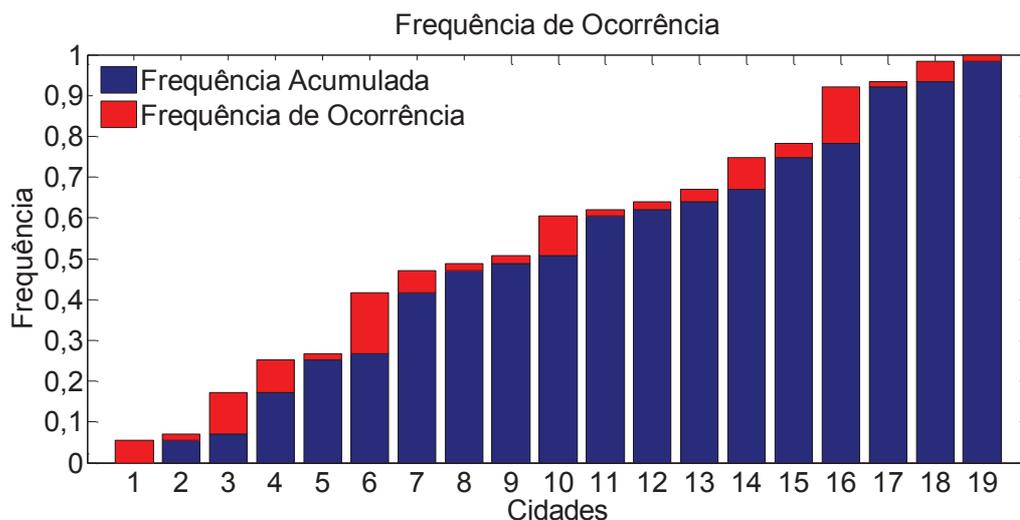
Tabela 5.6 – Determinação das variáveis para cada cidade pertencente a mesorregião 7

Cidade	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	1661	536	231	11428	1739	10441	224	12929	4,76
2	66	20	10	186	573	593	0	761	4,48
3	3365	1322	561	24624	2749	20749	2010	25299	4,48
4	2600	874	421	17792	2172	14707	794	19088	4,65
5	158	76	25	314	1084	1024	0	1390	4,38
6	5742	2135	984	32652	5864	28957	3328	35086	4,38
7	1429	597	268	11818	1323	9522	578	12505	4,38
8	170	48	15	978	964	1488	2	1922	4,38
9	246	80	25	1657	981	2172	7	2629	4,38
10	3367	1340	499	23045	2841	18628	2040	23733	4,76
11	90	21	0	825	381	763	10	1202	4,75
12	186	96	33	1906	597	1686	7	2498	4,76
13	616	293	69	6937	638	5726	155	7370	3,85
14	2417	940	450	17396	2160	14221	1098	18445	4,46
15	559	205	50	4795	2016	5545	177	6624	4,76
16	5283	2032	921	34938	2469	27385	4598	32398	4,75
17	97	24	10	724	367	830	1	1089	4,46
18	1342	379	199	10109	1509	8451	367	11060	4,75
19	128	30	19	427	1065	995	3	1486	4,76

Fonte: Do Autor.

A Figura 5-6 apresenta a frequência de ocorrência para cada uma das cidades na mesorregião 7. A frequência de ocorrência foi calculada de acordo com a equação (56), a partir dos dados da Tabela 5.6. A frequência acumulada é apresentada em azul e a amplitude em vermelho. A partir do sorteio ponderado, usando os critérios de números aleatórios (0 a 1), o número de consumidores que terão os sistemas fotovoltaicos instalados em suas casas é determinado.

Figura 5-6 – Frequência de ocorrência para cada cidade



Fonte: do Autor.

A partir da análise da Figura 5-6 é possível observar as cidades com uma maior frequência de ocorrência: 3, 4, 6, 10 e 16 e as cidades com uma menor frequência de ocorrência: 2, 5, 8, 9, 11, 12, 17 e 19.

Com o número de consumidores com sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo é feita a difusão desses consumidores no espaço para o ano 20. Para cada uma das 19 cidades é determinada a quantidade de adotantes de sistemas fotovoltaicos para os quatro cenários ao longo do tempo, considerando valores mínimos, médios e máximos de adotantes. Após, é calculada a porcentagem de consumidores com sistemas fotovoltaicos em relação à quantidade total de consumidores para cada cidade.

Nos quatro cenários analisados ao longo do espaço são utilizados os mesmos valores de frequência de ocorrência apresentados na Figura 5-6 para cada cidade.

Do mesmo modo que na difusão ao longo do tempo, foi considerado um crescimento anual de 1,65% nos consumidores residenciais e um crescimento anual de 2,6% nos consumidores rurais, fazendo a projeção de crescimento para os próximos 20 anos.

A Tabela 5.7 apresenta as premissas dos cenários analisados.

Tabela 5.7 – Cenários analisados

<b>Cenários</b>	<b>Variáveis</b>
Cenário 1	Todos os aspectos iguais a 1
Cenário 2	Políticas atuais ( <i>Net metering</i> )
Cenário 3	Considerando incentivos decrescentes para a compra dos sistemas fotovoltaicos
Cenário 4	Considerando incentivos para a compra dos sistemas fotovoltaicos

Fonte: do Autor.

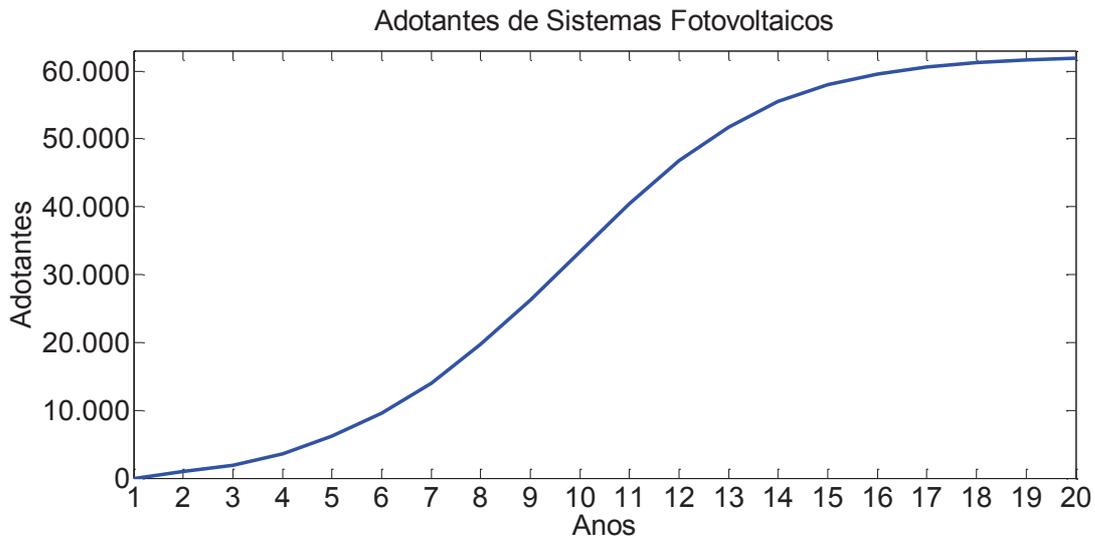
De acordo com a Tabela 5.7, no cenário 1 são considerados que todos os aspectos são iguais a 1, no cenário 2 é considerado como incentivo para a instalação dos sistemas fotovoltaicos pelos consumidores o sistema *net metering*, no cenário 3 são considerados incentivos decrescentes para a compra dos sistemas fotovoltaicos, ou seja, os incentivos começam com seu valor máximo no primeiro ano e vão decrescendo até chegar ao ano 20, e no cenário 4 são considerados incentivos em todos os anos.

#### 5.4.1 Cenário 1

No primeiro cenário analisado, foram considerados que todos os aspectos (econômico, gestão, social, político e técnico) são iguais a 1, coeficiente de inovação igual a 0,5 e o coeficiente de imitação igual a 0,015.

Este cenário é o melhor caso, sendo um cenário hipotético, pois não existe a possibilidade de todos os aspectos assumirem seu valor máximo concomitantemente. Na Figura 5-7 é apresentada a curva de adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo, para um horizonte de 20 anos.

Figura 5-7 – Adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo – Cenário 1

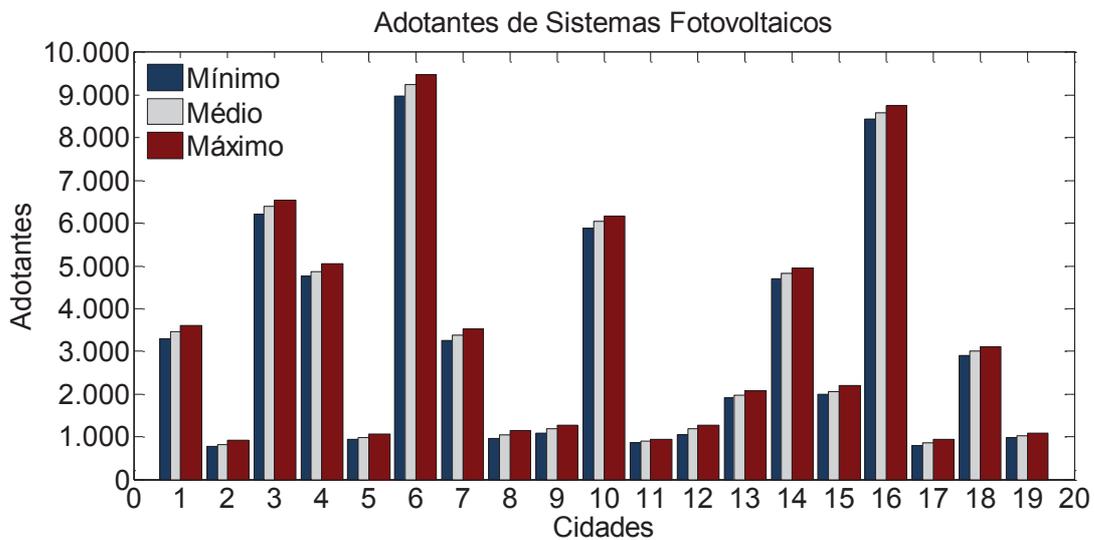


Fonte: do Autor.

Pode-se visualizar, a partir da Figura 5-7, que ao assumir os cinco aspectos iguais a 1, os adotantes do sistema fotovoltaico no ano 20 são 61.840, valor muito próximo ao potenciais adotantes (62.220) e a curva obtida é parecida com o modo de referência, Figura 4-3, crescimento em S.

Depois de determinar a quantidade de adotantes ao longo do tempo no cenário 1, é feita a difusão desses adotantes ao longo do espaço (mínimo, médio e máximo), para cada cidade pertencente à mesorregião 7, como ilustra a Figura 5-8.

Figura 5-8 – Adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do espaço – Cenário 1

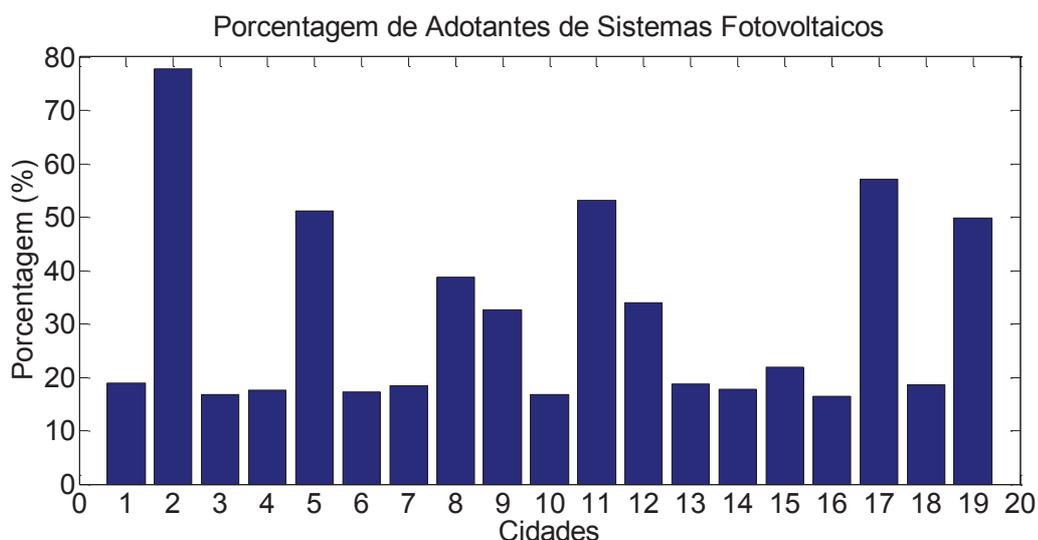


Fonte: do Autor.

Através da análise da Figura 5-8, pode-se perceber que as cidades com maior quantidade de adotantes de sistemas fotovoltaicos são as que possuem maior probabilidade de adotantes de sistemas fotovoltaicos, cidades 3, 4, 6, 10 e 16.

Com a quantidade de adotantes de sistemas fotovoltaicos (valor médio) é determinada a porcentagem desses consumidores em relação aos consumidores totais, em cada uma das 19 cidades, conforme apresenta a Figura 5-9.

Figura 5-9 - Porcentagem de adotantes de sistemas fotovoltaicos no espaço - Cenário 1



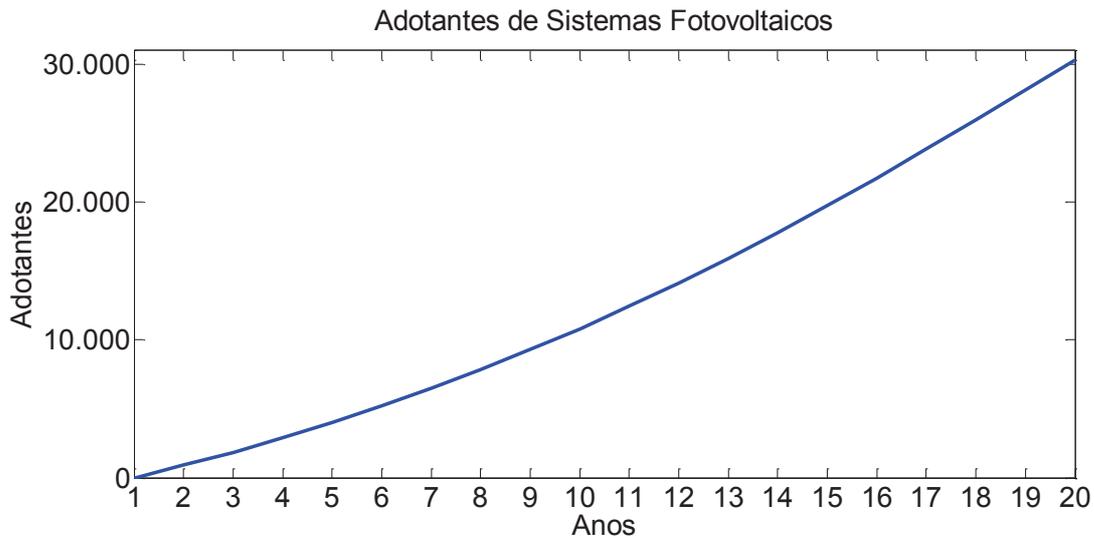
Fonte: do Autor.

Pela análise da Figura 5-9, é possível observar que as maiores porcentagens se encontram nas cidades 2, 5, 11, 17 e 19. Isso se deve ao fato de que essas cidades possuem uma maior quantidade de domicílios próprios e domicílios do tipo casa, variáveis importantes na equação (56), equação que determina a frequência de ocorrência de cada cidade em instalar um sistema fotovoltaico.

#### 5.4.2 Cenário 2

No segundo cenário foi considerado que não há financiamento, programas de incentivo, taxa de serviço, microcrédito, imposto de importação, política de juros baixos e subsídio, *feed-in* e campanhas de educação para instalação do sistema fotovoltaico, o único incentivo é o *net metering*. Desse modo, a Figura 5-10 apresenta a adoção dos sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo, considerando um horizonte de 20 anos.

Figura 5-10 – Adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo – Cenário 2



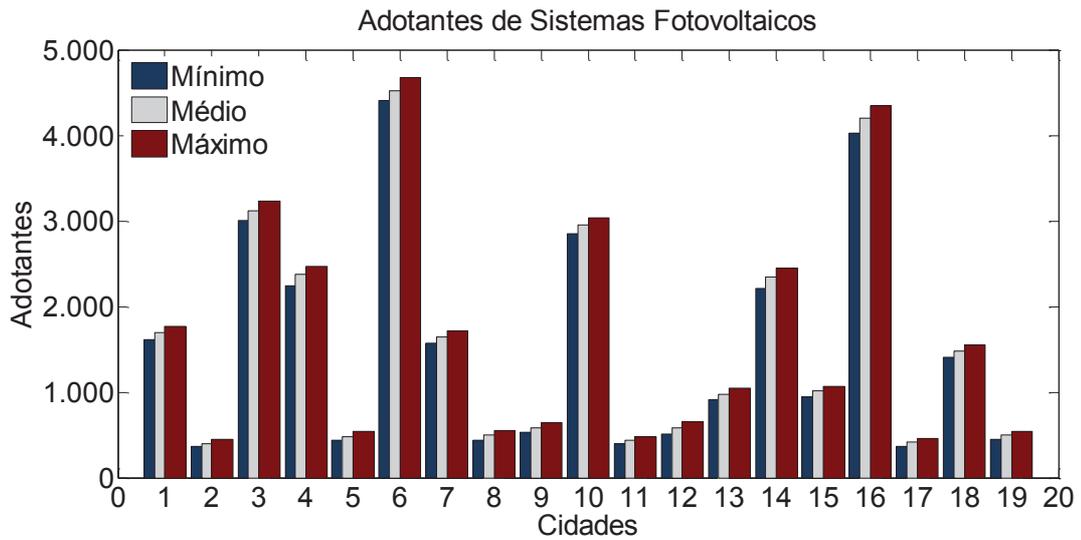
Fonte: do Autor.

Pela análise da Figura 5-10 se tem 30.300 consumidores com sistemas fotovoltaicos no ano 20, o que corresponde a 48,7% dos potenciais adotantes. Como há um único incentivo para a compra dos sistemas fotovoltaicos, se tem uma taxa de crescimento menor, se comparado ao cenário 1, onde todos os incentivos eram iguais a um.

Esse é o cenário mais parecido com os dados reais de adotantes de sistemas fotovoltaicos, Figura 5-4, sendo que nos dados reais, houve um menor crescimento nos primeiros anos, devido aos consumidores inovadores.

Para o cenário 2, foi feita a difusão dos adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do espaço (mínimo, médio e máximo) considerando os dados obtidos na difusão ao longo do tempo, conforme apresenta a Figura 5-11.

Figura 5-11 - Adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do espaço – Cenário 2

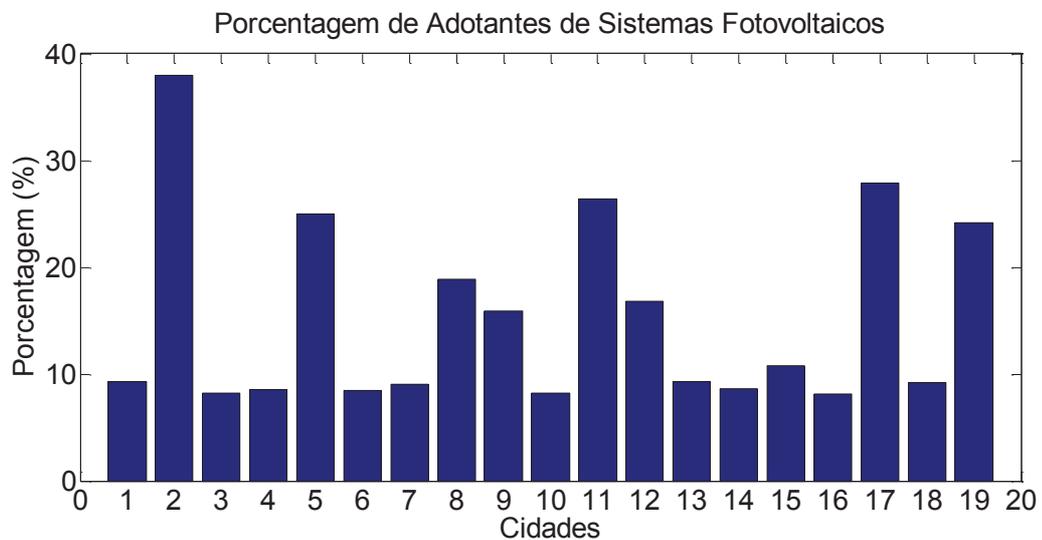


Fonte: do Autor.

Através da análise da Figura 5-11, pode-se perceber que as cidades com menor quantidade de adotantes de sistemas fotovoltaicos são as que possuem menor probabilidade de adotantes de sistemas fotovoltaicos, cidades 2, 5, 8, 9, 11, 12, 17 e 19.

A Figura 5-12 apresenta a porcentagem de adotantes de sistemas fotovoltaicos para cada cidade pertencente à mesorregião 7, em relação aos consumidores totais, considerando a quantidade média de adotantes apresentada na Figura 5-11.

Figura 5-12 - Porcentagem de adotantes de sistemas fotovoltaicos no espaço – Cenário 2



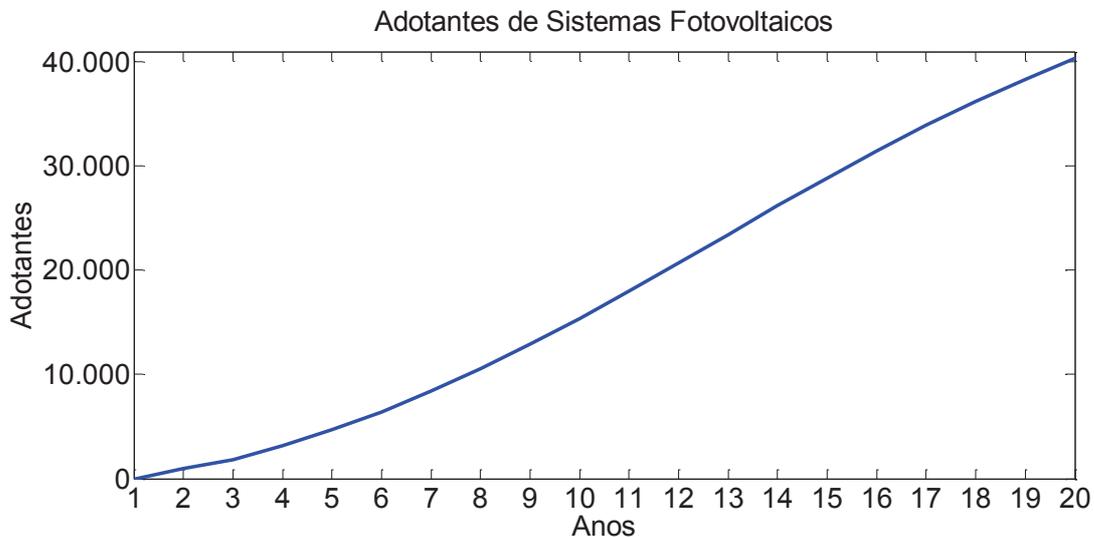
Fonte: do Autor.

Através da análise da Figura 5-12, verifica-se que a porcentagem de adotantes não se encontra nas cidades que possuem uma maior população e sim nas cidades que possuem melhor faixa salarial, domicílios urbanos, próprios e casa.

### 5.4.3 Cenário 3

No cenário 3 foram considerados incentivos decrescentes para instalação dos sistemas fotovoltaicos, ou seja, financiamento, programas de incentivo, taxa de serviço, microcrédito, imposto de importação, política de juros baixos e subsídio, *feed-in*, *net metering* e campanhas de educação, todos começam com valor máximo e vão decrescendo com o passar dos anos, ou seja, após os primeiros anos da inovação, se diminui os incentivos. Desse modo, a Figura 5-13 apresenta a adoção dos sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo, considerando um horizonte de 20 anos.

Figura 5-13 - Adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo – Cenário 3

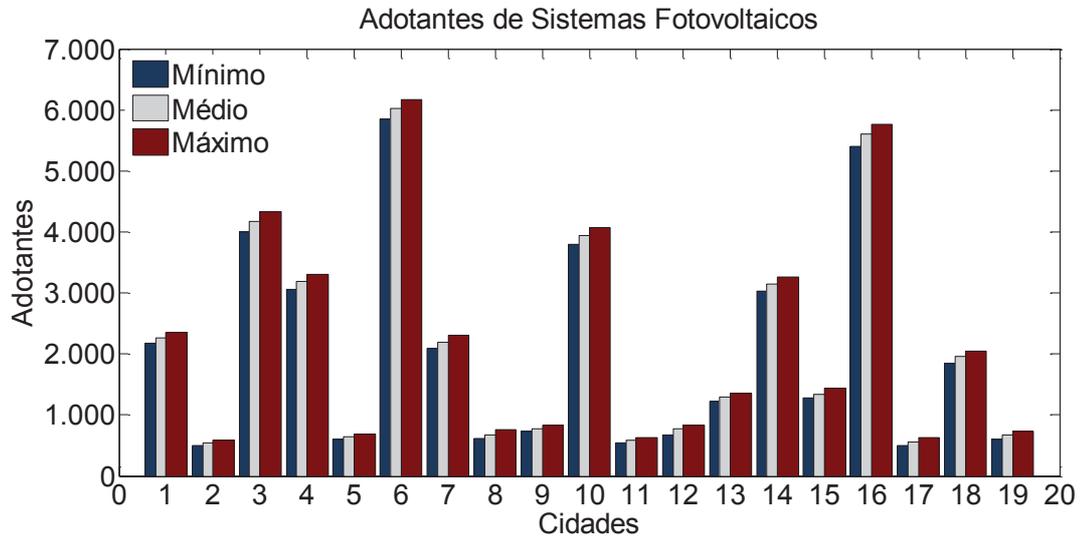


Fonte: do Autor.

Na Figura 5-13 houve um crescimento dos adotantes de sistemas fotovoltaicos, se comparado ao cenário 2, isso se deve ao fato de se ter incentivos decrescentes para que o consumidor adquira essa inovação. A curva obtida se assemelha ao modo de referência, Figura 4-3. Nesse cenário se tem 40.350 adotantes de sistemas fotovoltaicos no ano 20, o que corresponde a 64,85% dos potenciais adotantes.

A Figura 5-14 apresenta os adotantes de sistemas fotovoltaicos (mínimo, médio e máximo) ao longo do espaço no cenário 3, considerando a quantidade de adotantes de sistemas fotovoltaicos determinada na difusão no tempo no ano 20.

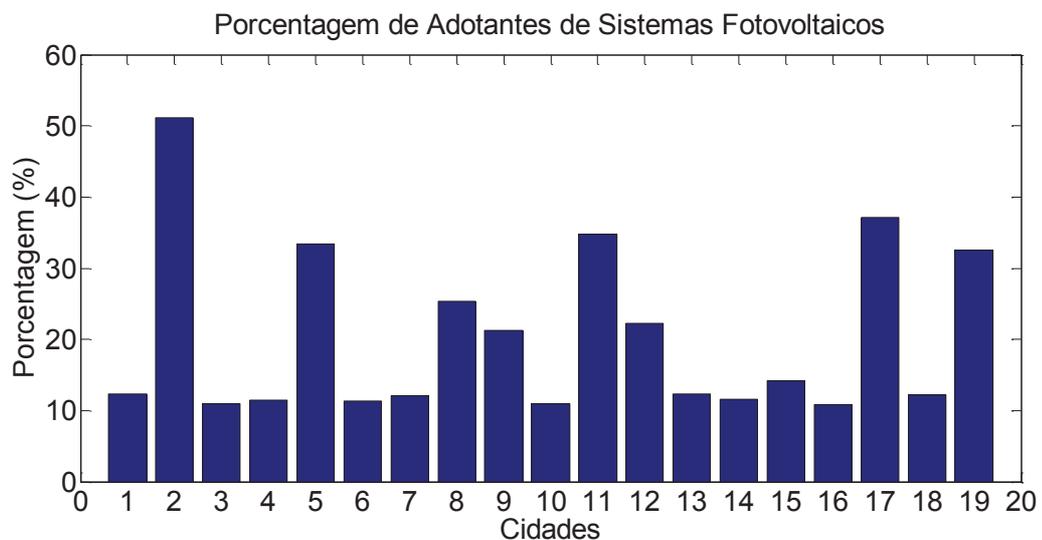
Figura 5-14 - Adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do espaço – Cenário 3



Fonte: do Autor.

A Figura 5-15 apresenta a porcentagem dos adotantes de sistemas fotovoltaicos, utilizando o valor médio, em relação aos consumidores totais de cada cidade, determinados na Figura 5-14.

Figura 5-15 - Porcentagem de adotantes de sistemas fotovoltaicos no espaço – Cenário 3



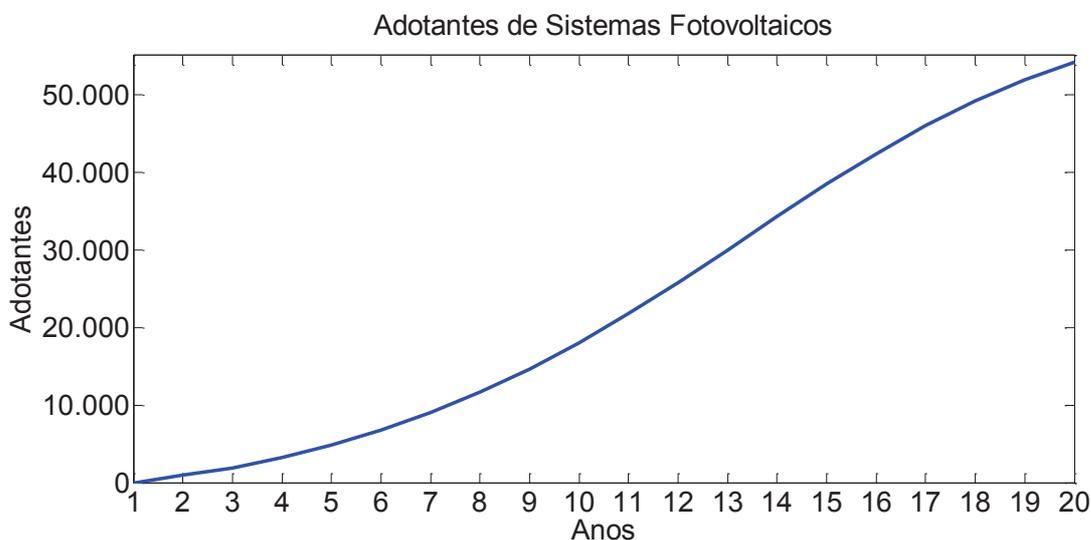
Fonte: do Autor.

Através da análise da Figura 5-15, é possível observar que as cidades 6 e 13 tem uma porcentagem de adotantes de sistemas fotovoltaicos muito próximos, mesmo que a quantidade de domicílios na cidade 6 seja cinco vezes maior do que na cidade 13. Isso se deve ao fato de que, proporcionalmente, as duas cidades tem características muito semelhantes (renda, localização, condição de ocupação e tipo de domicílio).

#### 5.4.4 Cenário 4

No último cenário, são considerados incentivos para a instalação dos sistemas fotovoltaicos (financiamento, programas de incentivo, taxa de serviço e microcrédito, imposto de importação, política de juros baixos e subsídio, *net metering*, *feed-in*, campanhas de educação, questões ambientais). Desse modo, os adotantes dos sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo são apresentados na Figura 5-16.

Figura 5-16 - Adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo – Cenário 4



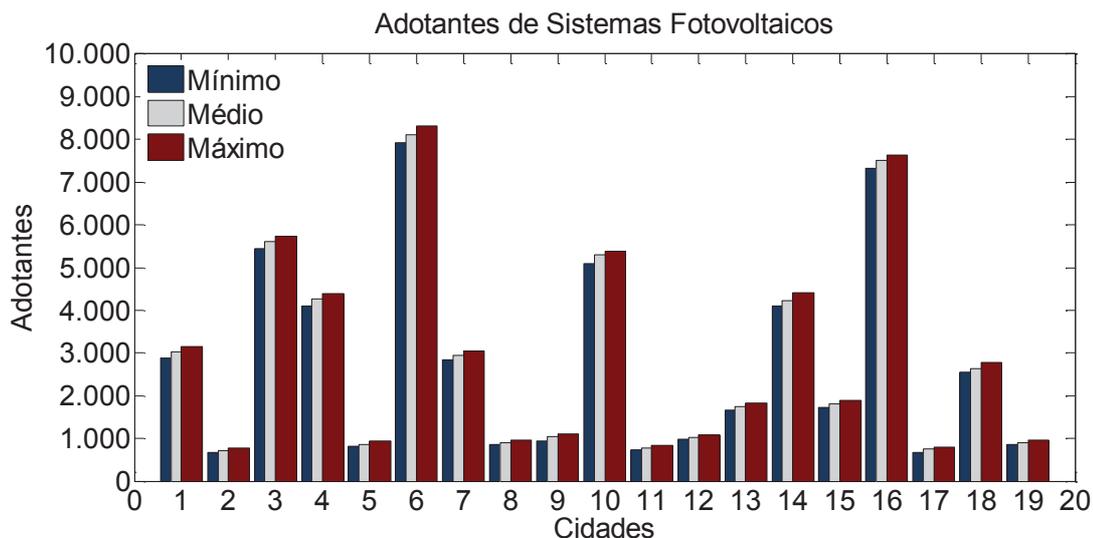
Fonte: do Autor.

Pela análise da Figura 5-16, se tem 54.150 consumidores com sistemas fotovoltaicos no ano 20, o que corresponde a 88% dos potenciais adotantes. A quantidade de adotantes de sistemas fotovoltaicos tem uma maior taxa de penetração, pois nesse cenário são considerados incentivos em todos os 20 anos

para a compra dos mesmos, sendo que a curva obtida nesse cenário é um crescimento em S, conforme modo de referência, Figura 4-3.

Após a difusão dos sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo no cenário 4, é feita a difusão desses consumidores ao longo do espaço, conforme apresenta a Figura 5-17, considerando valores mínimo, médio e máximo de adotantes.

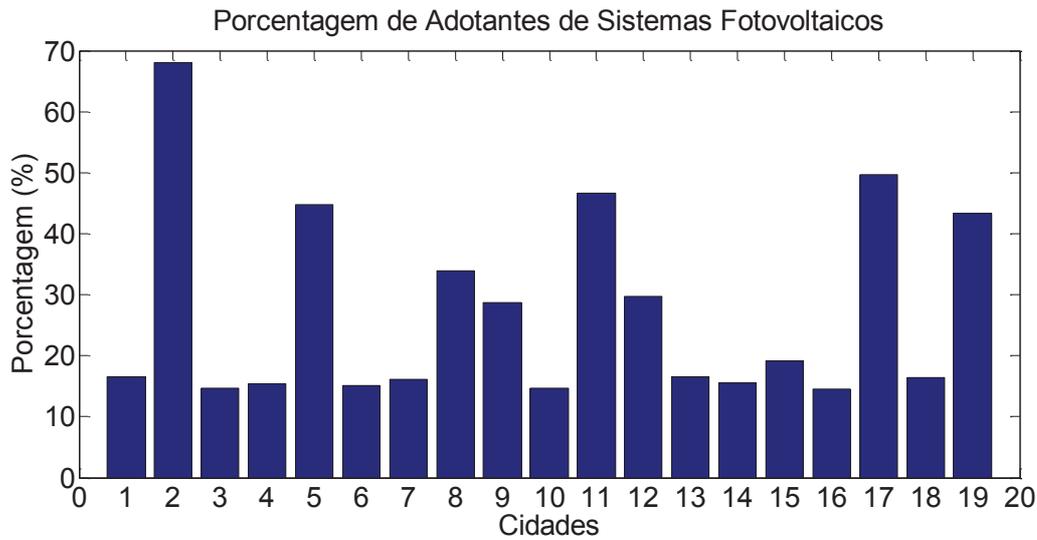
Figura 5-17 - Adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do espaço – Cenário 4



Fonte: do Autor.

Com a difusão dos adotantes sistemas fotovoltaicos no espaço para cada cidade, Figura 5-17, é determinada a porcentagem de adotantes em relação aos consumidores totais, utilizando o valor médio de adotantes de sistemas fotovoltaicos, conforme ilustra Figura 5-18.

Figura 5-18 - Porcentagem de adotantes de sistemas fotovoltaicos no espaço - Cenário 4



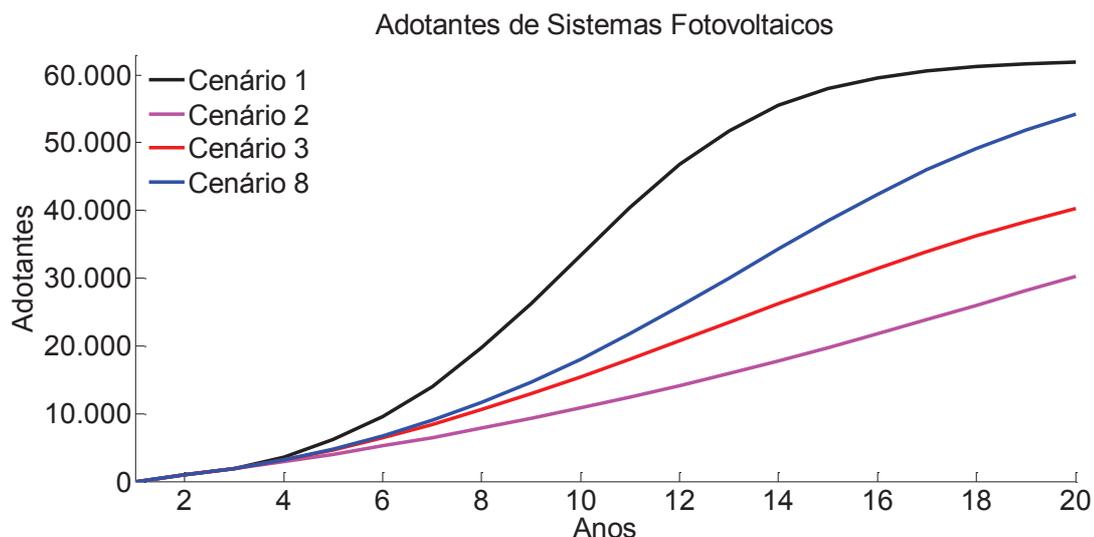
Fonte: do Autor.

As cidades 11 e 17 apresentam pouco mais de 45% de adotantes de sistemas fotovoltaicos, Figura 5-18, mesmo sendo cidades com uma quantidade pequena de domicílios.

## 5.5 ANÁLISE DE RESULTADOS AO LONGO DO TEMPO

Após simulação e análise de cada cenário, é feita uma comparação entre os cenários analisados. A Figura 5-19 apresenta a comparação dos quatro cenários analisados em razão da quantidade de adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do horizonte de 20 anos.

Figura 5-19 – Comparação dos cenários analisados ao longo do tempo

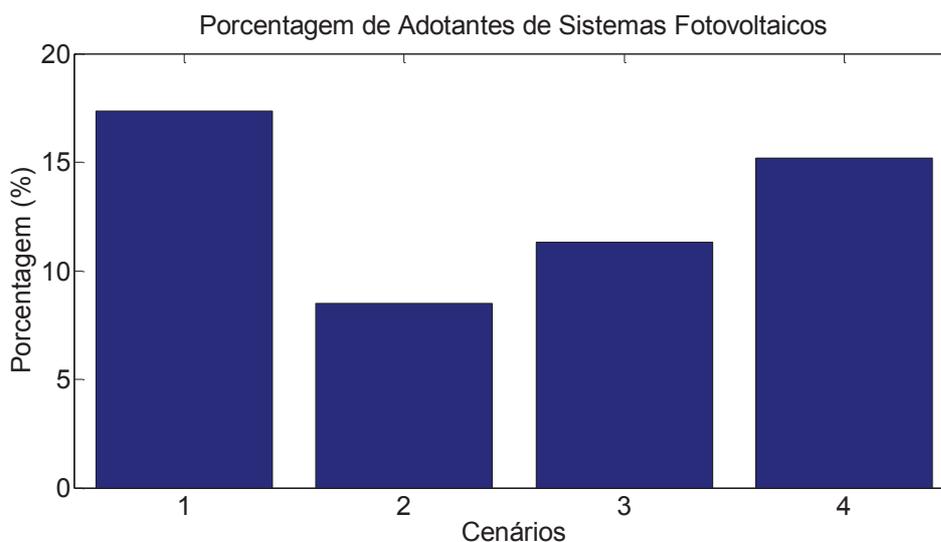


Fonte: do Autor.

Pela análise da Figura 5-19, percebe-se pouca diferença nos primeiros anos, observando que a difusão de sistemas fotovoltaicos tem um prazo de maturação.

Após a determinação da quantidade de adotantes de sistemas fotovoltaicos no ano 20, conforme apresentado na Figura 5-19, é calculada a porcentagem de adotantes de sistemas fotovoltaicos em relação aos consumidores totais da mesorregião 7, conforme apresenta a Figura 5-20.

Figura 5-20 – Porcentagem de adotantes de sistemas fotovoltaicos ao final de 20 anos.



Fonte: do Autor.

Pode-se perceber, pela análise da Figura 5-20, que a maior porcentagem se encontra no cenário 1 e a menor no cenário 2.

A Tabela 5.8 faz a comparação dos quatro cenários analisados ao longo do tempo.

Tabela 5.8 – Comparação dos cenários ao longo do tempo

<b>Cenários</b>	<b>Variáveis</b>	<b>Conclusão</b>
Cenário 1	Todos os aspectos iguais a 1	No ano 20, o número de adotantes corresponde a 99,4% dos potenciais adotantes e 17,4% dos consumidores totais.
Cenário 2	Apenas com incentivo do <i>net-metering</i>	No ano 20, o número de adotantes corresponde a 48,7% dos potenciais adotantes e 8,5% dos consumidores totais.
Cenário 3	Com incentivos decrescentes	No ano 20, o número de adotantes corresponde a 64,85% dos potenciais adotantes e 11,33% dos consumidores totais.
Cenário 4	Com incentivos em todos os anos	No ano 20, o número de adotantes corresponde a 87,03% dos potenciais adotantes e 15,2% dos consumidores totais.

Fonte: Do Autor.

Pela análise da Figura 5-19 e da Tabela 5.8, pode-se perceber que o melhor cenário analisado, cenário 1, ocorre quando todos os aspectos são iguais a 1. Nesse cenário, no ano 20 quase todos os potenciais adotantes se tornam adotantes.

No cenário 2, mesmo com poucos incentivos para compra dos sistemas fotovoltaicos, o número de adotantes no ano 20 é significativo, isto porque o preço do sistema fotovoltaico tende a diminuir com o aumento de novos adotantes e a adoção do sistema fotovoltaico por outros consumidores tem uma influência positiva na taxa de adoção.

No cenário 3, são considerados incentivos decrescentes para a adoção dos sistemas fotovoltaicos, ou seja, nos primeiros anos existe maior incentivo para alavancar a tecnologia e ao longo do tempo esses incentivos vão diminuindo, chegando assim em um número significativo de adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo dos 20 anos.

No último cenário analisado, cenário 4, são considerados incentivos para instalação de sistemas fotovoltaicos ao longo dos 20 anos, fazendo com que haja um número considerável de adotantes de sistemas fotovoltaicos no ano 20.

Os resultados demonstram que a difusão dos sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo depende de diversos fatores, como por exemplo, o preço dos sistemas fotovoltaicos, tarifa de energia elétrica, incentivos para adoção de sistemas fotovoltaicos e adoção por outros consumidores.

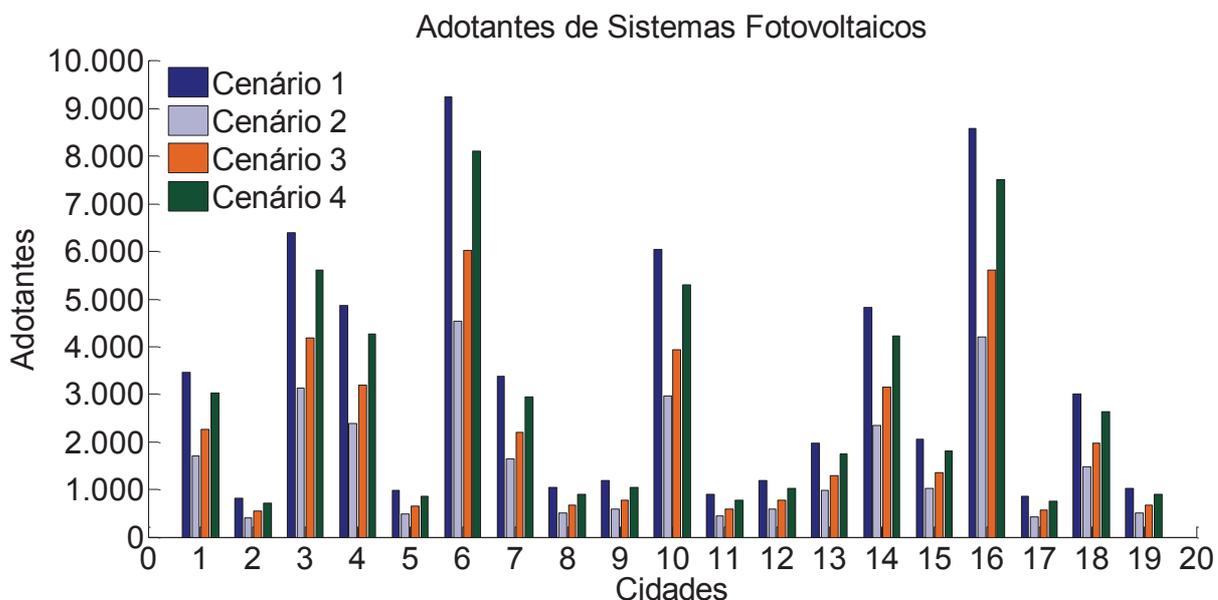
O objetivo da simulação do modelo, consistência do mesmo, foi satisfatório, pois os resultados encontrados nos quatro cenários são próximos ao modo de referência definido, Figura 4-2. O modelo é robusto por ter gerado o mesmo padrão geral, apesar das incertezas de alguns dos parâmetros, mostrando que os resultados obtidos são coerentes.

Após a análise de resultados ao longo do tempo é feita a análise de resultados ao longo do espaço.

## 5.6 ANÁLISE DE RESULTADOS AO LONGO DO ESPAÇO

Após simulação e análise de cada cenário ao longo do espaço é feita uma comparação dos adotantes de sistemas fotovoltaicos para os quatro cenários considerados, conforme apresenta a Figura 5-21.

Figura 5-21 – Comparação dos adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do espaço



Fonte: do Autor.

De acordo com a Figura 5-21, as cidades com maior quantidade de adotantes de sistemas fotovoltaicos foram as cidades com maior frequência de ocorrência: 3,

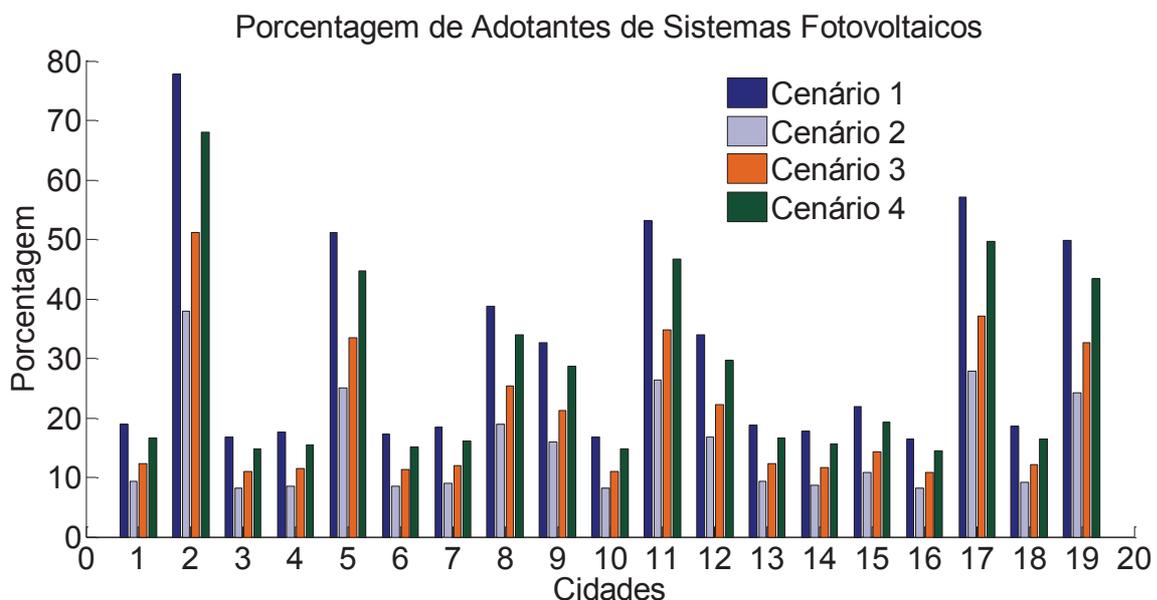
4, 6, 10 e 16. As cidades com menor quantidade de adotantes de sistemas fotovoltaicos foram as cidades com menor frequência de ocorrência: 2, 5, 8, 9, 11, 12, 17 e 19. As cidades 1, 7, 13, 14, 15 e 18 ficaram com uma quantidade intermediária de adotantes de sistemas fotovoltaicos.

Os resultados obtidos ao longo do espaço ficaram próximos aos dados reais, Figura 5-5, onde as cidades 3, 4, 10, 14, 16 e 18 foram as cidades com maior quantidade de adotantes. E as cidades 2, 5, 8, 9, 11, 12, 13, 17 e 19 foram as cidades com menor quantidade de adotantes.

Os quatro cenários considerados tiveram comportamentos parecidos, mudando a quantidade de adotantes de sistemas fotovoltaicos em cada cidade, os quais dependem dos resultados determinados ao longo do tempo. Esse comportamento tem relação com modelo de MMC, pois foi usada a mesma frequência de ocorrência em todos os cenários.

Após a comparação dos adotantes de sistemas fotovoltaicos é feita a comparação da porcentagem de adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do espaço, conforme ilustra a Figura 5-22.

Figura 5-22 – Comparação da porcentagem de adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do espaço



Fonte: do Autor.

De acordo com a Figura 5-22, as cidades 2, 5, 11, 17 e 19 apresentaram maior porcentagem de adotantes com sistemas fotovoltaicos em relação aos

consumidores totais em razão de suas características demográficas. Desse modo, a porcentagem de adotantes de sistemas fotovoltaicos em relação aos domicílios totais de cada cidade vai depender de suas respectivas características: renda, localização, tipo de domicílio, condição de ocupação do domicílio e radiação, e não da quantidade de consumidores.

Com esses dados é possível analisar tipos de incentivos para instalação de sistemas fotovoltaicos e tarifas para cada cidade, de acordo com análise da difusão ao longo do espaço.



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma metodologia para projeção da difusão de sistemas fotovoltaicos em consumidores residenciais de baixa tensão para utilização das empresas de energia elétrica e na formulação de políticas energéticas para fontes renováveis. Essa difusão é extremamente importante para o planejamento de estudos sobre o sistema elétrico, uma vez que a decisão de aderir a esse tipo de sistema depende de cada indivíduo e não da decisão centralizada de um governo.

A utilização da metodologia ao longo do tempo e ao longo do espaço faz com que se consiga determinar a quantidade de consumidores com sistemas fotovoltaicos a cada ano, bem como o local onde estarão estes consumidores, trazendo vantagens para os operadores do sistema elétrico.

A utilização da técnica de Dinâmica de Sistemas em conjunto com o modelo de Bass, possibilitou realizar a previsão dos sistemas fotovoltaicos nos consumidores residenciais de BT ao longo do tempo, onde é determinada a quantidade de consumidores por ano, considerando os cinco aspectos: econômico, gestão, político, social e técnico, além dos coeficientes do modelo de Bass (imitação e inovação), por meio dos quais se consegue relacionar uma série de variáveis com a difusão dos sistemas fotovoltaicos.

Esses aspectos e coeficientes tiveram seus parâmetros estimados, de modo que a simulação pudesse ser feita e, após análise de sensibilidade e teste de políticas, foi determinado que o comportamento do modelo é coerente com o modo de referência. Com a utilização da técnica de dinâmica do sistema foi possível relacionar e compreender as variáveis sistêmicas que impulsionarão a difusão de fontes fotovoltaicas em sistemas de distribuição de energia elétrica ao longo do tempo.

Aliado à difusão ao longo do tempo, foi proposto o método de Monte Carlo para determinar a difusão desses consumidores ao longo do espaço, viabilizando a determinação dos locais em que os adotantes de sistemas fotovoltaicos serão inseridos na área de estudo, considerando as variáveis: renda familiar, residência rural ou urbana, tipo de domicílio, condição de ocupação do domicílio e radiação solar.

Com a utilização do MMC foi possível relacionar e analisar as cidades que possuem uma maior frequência de ocorrência para instalação dos sistemas fotovoltaicos pelos consumidores.

O estudo de caso apresentado ao longo do tempo levou em conta a aplicação de diferentes políticas que influenciam a decisão do consumidor em adquirir um sistema fotovoltaico, diminuição do preço dos sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo, campanhas de educação sobre os sistemas fotovoltaicos e incentivos à compra dos sistemas fotovoltaicos. Por meio deste estudo, foi possível analisar o comportamento dos adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo frente às mudanças dessas variáveis.

O estudo de caso apresentado ao longo do espaço levou em conta a quantidade de adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo, fazendo a distribuição destes adotantes ao longo do espaço, ou seja, determinando a quantidade de adotantes de sistemas fotovoltaicos em cada uma das cidades pertencentes à região de estudo.

Os resultados indicaram que as curvas obtidas através da difusão ao longo tempo estão de acordo com a curva de difusão das inovações propostas por Rogers, onde, mesmo com a mudança de parâmetros, o modelo é robusto, ou seja, mantém seu comportamento, e que a maioria dos potenciais adotantes, até o ano 20, será proprietário de um sistema fotovoltaico.

O modelo de difusão ao longo do tempo mostra uma tendência de redução da taxa de adoção dos sistemas fotovoltaicos quando não há financiamento e incentivos para a adoção dos sistemas fotovoltaicos. Por outro lado, considerando os incentivos para a instalação de sistemas fotovoltaicos (financiamento, programas de incentivo, microcrédito, campanhas de educação e questões ambientais), a taxa de adoção dos sistemas fotovoltaicos torna-se extremamente elevada, fazendo com que uma quantidade notável dos potenciais adotantes se torne adotantes de sistemas fotovoltaicos.

Os resultados da difusão ao longo do espaço apresentam um comportamento adequado, pois depende da frequência de ocorrência de cada cidade e é possível definir o crescimento ou estagnação do sistema fotovoltaico em cada uma das cidades pertencentes à região de estudo, determinando a quantidade de adotantes de sistemas fotovoltaicos em cada cidade, bem como a porcentagem de adotantes

de sistemas fotovoltaicos em relação aos consumidores totais referentes a cada cidade.

A metodologia apresentada pode ser utilizada pelos distribuidores de energia de forma a fazer um estudo de planejamento mais preciso nos sistemas elétricos, pois é levado em consideração os aspectos relacionados à decisão do consumidor em aderir aos sistemas fotovoltaicos, fatores esses que envolvem muitas incertezas fazendo com que seja difícil para a distribuidora determinar esses adotantes, bem como o local onde estão esses adotantes.

## **6.2 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES**

As principais contribuições deste trabalho são:

- Metodologia para analisar a difusão de sistemas fotovoltaicos em duas dimensões: ao longo do tempo e ao longo do espaço.
- Definição de modelos dinâmicos para a representação dos aspectos: econômico, de gestão, político, social e técnico.
- Método para definição da abrangência da inserção dos sistemas fotovoltaicos utilizando o Método de Monte Carlo.

## **6.3 OPORTUNIDADES DE TRABALHOS FUTUROS**

A difusão dos sistemas fotovoltaicos abre um grande leque de oportunidades para trabalhos futuros:

- Em relação ao modelo de difusão de sistemas fotovoltaicos, pode-se explorar a utilização de um método multicritério para tomada de decisão para determinação dos pesos das variáveis utilizadas;
- Análise do efeito sistêmico da difusão dos sistemas fotovoltaicos no sistema de transmissão que atende as regiões analisadas;
- Análise do efeito da difusão dos sistemas fotovoltaicos na operação e no planejamento da expansão de um dos sistemas de distribuição locais;
- Aplicação do modelo de difusão para novas fontes de energia elétrica e na utilização de veículos elétricos.
- Considerar mais variáveis para expandir o modelo de difusão de sistemas fotovoltaicos nos demais consumidores de MT e AT;

- Considerar mudanças no perfil das cidades com o passar dos anos;

## 6.4 PRODUÇÃO CIENTÍFICA

Durante o Doutorado, foram desenvolvidos os seguintes trabalhos:

### 6.4.1 Trabalhos publicados em anais de eventos (completo).

1. **SANTOS, L. L. C.**; CANHA, L. N.; BERNARDON, D. P.; KNAK NETO, N.; PRESSI, R.

Metodologia para Planejamento de Sistemas de Distribuição Considerando a Previsão de Inserção de Geração Distribuída In: XXIII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2015, Foz do Iguaçu – Brasil.

**Anais do XXIII SNPTEE –Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2015.**

2. **SANTOS, L. L. C.**; CANHA, L. N.; BERNARDON, D. P.; PRESSI, R.

Methodology for Long-term Forecasting to Insertion of DG in Distribution Systems In: 2015 50th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC), 2015, Stoke On Trent – Inglaterra.

**2015 – 50th International Universities' Power Engineering Conference**

3. **SANTOS, L. L. C.**; CANHA, L. N.; BERNARDON, D. P.; KNAK NETO, N.; PRESSI, R.

Mapping of Energetic Potential in Southern Brazil to Insertion of DG in Distributed Systems. In: ISGT 2015 – Innovative Smart Grid Technologies Conference, 2015, Montevidéo – Uruguai.

**ISGT 2015 - Innovative Smart Grid Technologies Conferenc 2015.**

4. **SANTOS, L. L. C.**; CANHA, L. N.; BERNARDON, D. P.; KNAK NETO, N.; PRESSI, R.

Mapeamento do Potencial Energético para Inserção da Geração Distribuída nos Estudos de Planejamento dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. In: SEPOC'2015 – 9º Seminário de Eletrônica de Potência e Controle, 2015, Santa Maria – Brasil.

### **SEPOC'2015 – 9º Seminário de Eletrônica de Potência e Controle**

#### 6.4.2 Artigos completos publicados em periódicos

1. **SANTOS, L. L. C.**; CANHA, L. N.; BERNARDON, D. P.; PRESSI, R.; KNAK NETO, N. Metodologia para Planejamento de Sistemas de Distribuição Considerando a Previsão de Inserção de Geração Distribuída. O Setor Elétrico. , v.1, p. 22 - 29, 2016.

2. **SANTOS, L. L. C.**; CANHA, L. N.; BERNARDON, D. P.; Projection of the diffusion of photovoltaic systems in residential low voltage consumers. Renewable Energy, v. 116, p. 384-401, 2018.

#### 6.4.3 Registros de *Software*

1. ABAIDE, A. R. ; BERNARDON, D.P. ; KROEFF, D. G. ; MARTINS, E. S. ; VARGAS, E. L. ; **SANTOS, L. L. C.** ; SPERANDIO, M. ; KNAK NETO, N. ; MILBRADT, R. G. ; PRESSI, R. ; VIANA, S. . Soluções de Planejamento para Sistemas de Distribuição. 2016.

Patente: Programa de Computador. Número do registro: BR512016001442-3, data de registro: 31/10/2016, título: "Soluções de Planejamento para Sistemas de Distribuição", Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

2. ABAIDE, A. R.; BERNARDON, D.P.; KROEFF, D. G. ; MARTINS, E. S. ; VARGAS, E. L. ; SANTOS, L. L. C. ; KNAK NETO, N. ; MILBRADT, R. G. ; PRESSI, R. ; VIANA, S. . Diagnóstico de Redes de Distribuição no Horizonte de Curto e Médio Prazo. 2016.

Patente: Programa de Computador. Número do registro: BR512016001445-8, data de registro: 31/10/2016, título: "Diagnóstico de Redes de Distribuição no Horizonte

de Curto e Médio Prazo", Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

## REFERÊNCIAS

- ABOLHOSSEINI S; HESHMATI A. The main support mechanisms to finance renewable energy development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 40, p. 876 - 885, 2014.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa nº 482/2012**. 2012a. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>> Acesso em: 14 de mar. 2014.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Banco de Informações de Geração**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 27 ago. 2015
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Nota Técnica nº 0043/2010-SRD/ANEEL. 2010. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta\\_publica/documentos/Nota%20T%C3%A9cnica\\_0043\\_GD\\_SRD.pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/Nota%20T%C3%A9cnica_0043_GD_SRD.pdf)>. Acesso em: 10 jan. 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Nota Técnica nº 0056/2017-SRD/ANEEL. 2017. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/documents/656827/15234696/Nota+T%C3%A9cnica\\_0056\\_PROJE%C3%87%C3%95ES+GD+2017/38cad9ae-71f6-8788-0429-d097409a0ba9](http://www.aneel.gov.br/documents/656827/15234696/Nota+T%C3%A9cnica_0056_PROJE%C3%87%C3%95ES+GD+2017/38cad9ae-71f6-8788-0429-d097409a0ba9)>. Acesso em: 01 dez. 2017.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Mod 2 Rev 6**. 2015a. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/PRODIST%20-%20M%C3%B3dulo%202\\_Revisao\\_6.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/PRODIST%20-%20M%C3%B3dulo%202_Revisao_6.pdf)>. Acesso em: 30 nov. 2015
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa nº 687/2015**. 2015b. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 15 dez. 2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Unidades Consumidores com Geração Distribuída**. 2018. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD\\_Distribuidora.asp](http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Distribuidora.asp)>. Acesso em: 16 jan. 2018.
- AHMAD et al. Role of feed-in tariff policy in promoting solar photovoltaic investments in Malaysia: A system dynamics approach. **Energy**, v. 84, p. 808 - 815, 2015.
- ALVES, A. A. F. **Construção de cenários de demanda no setor residencial – uma abordagem baseada em dinâmica de sistemas**. 1997. 121p. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Mestrado em Engenharia Elétrica, Santa Catarina, 1997.
- ANDRADE, E. L. **Introdução à Pesquisa Operacional - Métodos e Modelos para Análise de Decisões**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

AYOMPE, L. M. et al. Projected costs of a grid-connected domestic PV system under different scenarios in Ireland, using measured data from a trial installation. **Energy Policy**, v. 38, n. 7, p. 3731 - 3743, 2010.

AZADIAN, F.; RADZI; M. A. M. A general approach toward building integrated photovoltaic systems and its implementation barriers: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 527 - 538, 2013.

BALCOMBE, P.; RIGBY D.; AZAPAGIC, A. Motivations and barriers associated with adopting microgeneration energy technologies in the UK. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 655 - 66, 2013.

BALTA-OKZAN, N.; YILDIRIM, J.; CONNOR, P. M. Regional distribution of photovoltaic deployment in the UK and its determinants: A spatial econometric approach. **Energy Economics**, v. 51, p. 417 - 429, 2015.

BASHIRI, A.; ALIZADEH, S. H. The analysis of demographics, environmental and knowledge factors affecting prospective residential PV system adoption: A study in Tehran. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 3131 - 3139, 2018.

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

BAUMGARTEN, C. **Modelo para análise da inserção de pequenas fontes solares fotovoltaicas em sistemas de distribuição: uma abordagem multivariável**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de pós graduação em Engenharia Elétrica, Porto Alegre, 2016.

BAUNER, C.; CRAGO L. C. Adoption of residential solar power under uncertainty: Implications for renewable energy incentives. **Energy Policy**, v. 86, p. 27 - 35, 2015.

BERGEK, A.; MIGNON, I. Motives to adopt renewable electricity technologies: Evidence from Sweden. **Energy Police**, v. 106, p. 547 - 559, 2017.

BHANDARI, R., STADLER, I. Grid parity analysis of solar photovoltaic systems in Germany using experience curves. **Solar Energy**, v. 83, p. 1634 - 1644, 2009.

BOURGES, F. **Planejamento da operação de pequenas centrais hidrelétricas: enfoque sistêmico**. 2009. 96p. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, Mestrado em Engenharia Elétrica, Curitiba, 2009.

BORGHESI, A.; MILANO, M. Multi-agent simulator of incentive influence on PV adoption. In: 2014 International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA), p. 556 – 560, October 2014

BUNN, D. W.; LARSEN, E. R. Sensitivity of reserve margin to factors influencing investment behaviour in the electricity market of England and Wales. **Energy Policy**, p. 420 - 429, 1992.

CAMILO et al. Assessment of photovoltaic distributed generation – Issues of grid connected systems through the consumer side applied to a case study of Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 71, p. 712 - 719, 2017.

CAMPOCCIA, A. et al. An analysis of feed'in tariffs for solar PV in six representative countries of the European Union. **Solar Energy**, v. 107, p. 530 - 542, 2014.

CAVANA, R. Y.; FORD, A. Environmental and resource systems: Editors' introduction. **System Dynamics Review**, v. 20, p. 89 - 98, 2004.

CGEE. **Redes Elétricas Inteligentes: contexto nacional**. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <[www.cgee.org.br/atividades/redirect/8050](http://www.cgee.org.br/atividades/redirect/8050)>. 2012

CHOWDHURY, S. et al. Importance of policy for energy system transformation: Diffusion of PV technology in Japan and Germany. **Energy Policy**, v. 68, p. 285 - 293, 2014.

COLMENAR-SANTOS, A. et al. Distributed generation: a review of factors that can contribute most to achieve a scenario of DG units embedded in the new distribution networks. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 1130 - 1148, 2016.

COYLE, G. Qualitative and quantitative modeling in system dynamics: some research questions. **System Dynamics Review**, v. 16, p. 225, 2000.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO – CRESESB. **Potencial Solar SunData**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em: 17 nov. 2014.

DHARSHING, S. Household dynamics of technology adoption: A spatial econometric analyses of residential solar photovoltaic (PV) systems in Germany. **Energy Research & Social Science**, v. 23, p. 113 - 124, 2017.

DIMITROVSKI, A. et. **Comprehensive long term modeling of the dynamics of investment and network planning in electric power systems**. Presented at the 2004 Epnos Workshop, Mayaguez, Puerto Rico, Jul. 12-14, 2004.

ECKHARDT, R. Stan Ulam, John Von Neumann, and the Monte Carlo Method. **Los Alamos Science Special**, 1987.

EBERT, P. S.; **Modelagem de sistemas hidrotérmicos interligados utilizando dinâmica de sistemas**. 2015. 102p. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Pampa, Mestrado em Engenharia Elétrica, 2015.

EFFENDI, P.; COURVISANOS, J. Political aspects of innovation: examining renewable energy in Australia. **Renewable Energy**, v. 38, p. 245 - 252, 2012.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos. 2014

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2016.

EPE. Plano Decenal de Expansão de Energia 2024 / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2015

FAIERS A., NEAME C. Consumer attitudes towards domestic solar power systems. **Energy Policy**, v. 34, n. 14, p. 1797-1806, 2006.

FERREIRA, A. et al. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 181 - 191, 2018.

FORRESTER, J. W. **Industrial Dynamics**. 1ª. Ed. New York: John Wiley & Sons, 1961. ISBN 978-1614275336.

FORRESTER, J. W. Industrial dynamics: a major breakthrough for decision makers. **Harvard Business Review**, 37 - 66, 1958.

FORRESTER, J. W. The beginning of System Dynamics. In: Banquet Talk at International Meeting of the System Dynamics Society, Stuttgart, Germany, 1989.

FORRESTER, J. The beginning of system dynamics. *The McKinsey Quarterly* (4), 4–16, 1995.

FORRESTER, J. W. System dynamics: a personal view of the first fifty years. *System Dynamics Review* 23 (2-3), 345 - 358, 2007.

FORD, A. **Modeling the Environment: An Introduction to System Dynamics Modeling of Environmental Systems**. Washington D. C.: Island Press, 1999.

FORD, A. Simulating the controllability of feedbacks. **System Dynamics Review**, v. 11, p. 3 - 29, 1995.

FORD, A.; GEINZER, J. Adding uncertainty to least-cost planning. A case study of efficiency standards in the Northwest. **Energy Policy**, p. 331 - 339, 1990.

FRANCESCHINIS, C. et al. Adoption of Renewable heating systems: an empirical test of the diffusion of innovation theory. **Energy**, v. 125, p. 313 - 326, 2017.

FUNDAÇÃO DE ECONOMIA E ESTATÍSTICA – FEE. **Dados abertos**. Disponível em: <<http://dados.fee.tche.br/>>. Acesso em: 05 mar. 2015.

GEORGIADIS, P.; VLACHOS, D.; IAHOVOU, E. A system dynamics modeling framework for the strategic supply chain management of food chains. **Journal of Food Engineering**, v. 70, p. 351 - 364, 2005.

GUO, X.; GUO, X. China's photovoltaic power development under policy incentives: A system dynamics analysis. **Energy**, v. 93, p. 589 - 598, 2015.

HAFEZNIA, H. et al. Analysis of the effectiveness of national renewable energy policies: A case of photovoltaic polices. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 669 - 680, 2017.

HALL, B. H. **Innovation and Diffusion**. Cambridge: NBER, Working Paper, 10212, January, 2004.

HAQUE, M. M.; WOLFS, P. A review of high PV penetrations in LV distribution networks: Present status, impacts and mitigation measures. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p. 1195 - 1208, 2016.

HERAS-SAIZARBITORIA I.; CILLERUELO E.; ZAMANILLO I. Public acceptance of renewables and the media: na analyses of the Spanish PV solar experience. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 4685 - 4696, 2011.

HOLDERMANN, C.; KISSEL, J.; BEIGE, J. Distributed photovoltaic generation in Brazil: An economic viability analysis of small-scale photovoltaic systems in the residential and commercial sectors. **Energy Policy**, v. 67, p. 612 - 617, 2014.

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

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Banco de Dados. Censo 2010**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/>>. Acesso em: 05 mar. 2015.

ISLAM, T. Household level innovation diffusion model of photo-voltaic (PV) solar cells from stated preference data. **Energy Policy**, v. 65, p. 340 - 350, 2014.

JAGER, W. Stimulating the diffusion of photovoltaic systems: A behavioural perspective. **Energy Policy**, v. 34, n. 14, p. 1935 - 1943, 2006.

JANNUZZI, G. M.; MELO, C. A. Grid-connected photovoltaic in Brazil: Policies and potential impacts for 2030. **Energy for Sustainable Development**, v. 17, n. 1, p. 40 - 46, 2013.

JAYARAMAN, K.; PARAMASIVAN, L.; KIUMARSI, S. Reasons for low penetration on the purchase of photovoltaic (PV) panel system among Malaysian landed property owners. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 562 - 571, 2017.

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

KAGAN, N. **Redes elétricas inteligentes no Brasil: análise de custos e benefícios de um plano nacional de implantação/** Nelson Kagan, Marcos Gouvea, Fernando Maia, Daniel Duarte, Julio Labronici, Daniel Senna Guimarães, Acacio Barreto Neto, José Francisco Resende da Silva, Fernanda Particelli. – 1. Ed. – Rio de Janeiro: Synergia: iABRADEE; Brasília: ANEEL, 2013.

KARAKAYA, E. Finite Element Method for forecasting the diffusion of photovoltaic systems: Why and how? **Applied Energy**, v. 163, p. 464 - 475, 2016.

KARAKAYA, E.; SRIWANNAWIT, P., Barriers to the adoption of photovoltaic systems: The state of the art. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 60 - 66, 2015.

KATZMAN, T. Paradoxes in the diffusion of a rapidly advancing technology: the case of solar photovoltaics. **Technological Forecasting and Social Change**, v.19, p. 227 - 236, 1981.

KLINGLER, A. Self-consumption with PV + Battery systems: A market diffusion model considering individual consumer behaviour and preferences. **Applied Energy**, v. 205, p. 1560 - 1570, 2017.

KONZEN, Gabriel. **Difusão de sistemas fotovoltaicos residenciais conectados à rede no Brasil: uma simulação via modelo de Bass**. 2014. 108p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

KWAN, C. L. Influence of local environmental, social, economic and political variables on the spatial distribution of residential solar PV arrays across the United States. **Energy Policy**, v. 47, p. 332 - 344, 2012.

KYRITSIS, A. et al. Evolution of PV systems in Greece and review of applicable solutions for higher penetration levels. **Renewable Energy**, v. 109, p. 487 - 499, 2017.

LACCHINI, C.; RÜTHER, R. The influence of government strategies on the financial return of capital invested in PV systems located in different climatic zones in Brazil. **Renewable Energy**, v. 83, p. 786 - 798, 2015.

LANE, D. C. The power of the bond between cause and effect: Jay wright forrester and the field of system dynamics. **System Dynamics Review**, v. 23, p. 95 - 118, 2007.

LANG, T.; AMMANN, D.; GIROD, B. Profitability in absence of subsidies: A techno-economic analysis of rooftop photovoltaic self-consumption in residential and commercial buildings. **Renewable Energy**, v. 87, p. 77 - 87, 2016.

LAZZERONI, P.; OLIVERO, S.; REPETTO, M. Economic perspective for PV under new Italian regulatory framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 71, p. 283 - 295, 2017.

LEE, M.; CHOI, N.; PARK, M. A systems thinking approach to the new administrative capital in Korea: balanced development or not? **System Dynamics Review**. v. 21, p. 69 - 85, 2005.

LIU, X.; ZENG, M. Renewable energy investment risk evaluation model based on system dynamics. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 73, p. 782 - 788, 2017.

LUND, P. D. Boosting new renewable technologies towards grid parity e Economic and policy aspects. **Renewable Energy**, v. 36, p. 2776 - 2784, 2011.

MACAULEY, M. K.; SHIH, J. Effects of Carbon Policies and Technological Change on Consumer Surplus in Electricity Generation. **Discussion Paper**. Resources for the Future. 2003.

MAHAJAN, V.; MULLER, E.; BASS, F. M. New Product Diffusion Models in Marketing: A Review and Directions for Research. **Journal of Marketing**, v. 54, n. 1, p. 1 - 26, 1990.

MARKET ANALYSIS; GREENPEACE. **Os brasileiros diante da microgeração de energia renovável**. 2014.

MARTINS, F. R. et. al. Solar energy scenarios in Brazil. Part two: Photovoltaics applications. **Energy Policy**, v. 36, p. 2865 - 2877, 2008.

MASTERS, G. M. **Renewable and Efficient Electric Power Systems**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2004.

METROPOLIS, N. C. Oral history interview (OH 135) by William Aspray, 29 May 1987, Los Alamos, New Mexico. Charles Babbage Institute, University of Minnesota-Minneapolis, 1987.

MIRANDA, R.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. Technical-economic potential of PV systems on Brazilian rooftops. **Renewable Energy**, v. 75, p. 694 - 713, 2015.

MORTON, C.; WILSON, C.; ANABLE, J. The diffusion of domestic energy efficiency policies: A spatial perspective. **Energy Policy**, v. 114, p. 77 - 88, 2018.

MOTA JÚNIOR, C. S. **Modelo de alocação de unidades geradoras hidrelétricas: estudo de caso da operação coordenada de duas usinas em regimes regulatórios distintos**. 2017. 80p. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, Mestrado em Engenharia Elétrica, Curitiba, 2017.

MOVILLA, S.; L. J. Miguel, L. J.; Blazquez, L. F. A system dynamics approach for the photovoltaic energy market in Spain. **Energy Policy**, v. p. 142 - 154, 2013.

NAILL, R. **Managing the Energy Transition**. Ballinger Publishing Company, Cambridge, MA, 1977.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION – Nasa. **SOLAR**. Disponível em: <<https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/retscreen.cgi?email=rets40nrcan.gc.ca>>. Acesso em: 8 jan. 2018.

- ORTEGOSA, C. Z. **Metodologia para estudos de viabilidade econômico-financeira no uso do gás natural em instalações prediais residenciais: uma abordagem via dinâmica de sistemas**. 2006. 108p. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Mestrado em Engenharia Elétrica, Campo Grande, 2006.
- PALM, A. Local factors driving the diffusion of solar photovoltaics in Sweden: a case study of five municipalities in an early market. **Energy Research & Social Science**, v. 14, p. 1 - 12, 2016.
- PALMER, J.; SORDA, G.; MADLENER, R. Modeling the diffusion of residential photovoltaic systems in Italy: An agente-based simulation. **Technological Forecasting & Social Change**, v. 99, p. 106 - 131, 2015.
- PERES R.; MULLER E.; MAHAJAN, V. Innovation diffusion and new product growth models: A critical review and research directions. **International Journal of Research in Marketing**, v. 27, n. 2, p. 91 - 106, 2010.
- PRUYT, E. Small System Dynamics Models for Big Issues: Triple Jump towards Real-World Complexity, TU Delft Library, 2013.
- PILLAI, G. et al. The effect of distribution network on the annual energy yield and economic performance of residential PV systems under high penetration. **Renewable Energy**, v. 108, p. 144 - 155, 2017.
- PINTO, J. T. M.; AMARAL, K. J.; JANISSEK, P. R. Deployment of photovoltaics in Brazil: Scenarios, perspectives and policies for low-income housing. **Solar Energy**, v. 133, p. 73 - 84, 2016.
- QURESHI, T. M.; ULLAH, K.; ARENTSEN, M. J. Factors responsible for solar PV adoption at household level: A case of Lahore, Pakistan. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p. 754 - 763, 2017.
- RADOMES, A. A.; ARANGO, S. Renewable energy technology diffusion: an analysis of photovoltaic-system support schemes in Medellín, Colombia. **Journal of Cleaner Production**, v. 92, p. 152 - 161, 2015.
- RAI, V.; REVEES, D. Cale.; MARGOLIS, R. Overcoming barriers and uncertainties in the adoption of residential solar PV. **Renewable Energy**, v. 89, p. 498 - 505, 2016.
- REDDY, S.; PAINULY, J. P. Diffusion of renewable energy technologies – barriers and stakeholders perspectives. **Renewable Energy**, v. 29, p. 1431 - 1447, 2004.
- RGE SUL. **Conta de energia elétrica**. Disponível em: <<https://www.rgesul.com.br/clientes-residenciais-comerciais/Paginas/informacoes/entenda-sua-conta-energia.aspx>>. Acesso em: 08 de jan. 2018.

RIBEIRO, A. E. D.; AROUCA, M. C.; COELHO, D. M. Electric energy generation from small-scale solar and Wind power in Brazil: The influence of location, area and shape. **Renewable Energy**, v. 85, p. 554 - 563, 2016.

RICHTMYER, R. D.; NEUMANN, J. V. Statistical Methods in Neutron Diffusion. LAMS-551, Los Alamos National Laboratory, 1947.

ROGERS, E. M. **Diffusion of Innovations**. Rev. ed. of: Communication of innovations. 2. ed. 1971.

SALAMONI, I. T. **Um programa residencial de telhados solares para o Brasil: diretrizes de políticas públicas para a inserção da geração fotovoltaica conectada à rede elétrica**. 2009. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SARDIANOU, E.; GENOUDI, P. Which factors affect the willingness of consumers to adopt renewable energies? **Renewable Energy**, v. 57, p. 1 - 4, 2013.

SENGE, P. M. **A quinta disciplina: arte e prática da organização que aprende**, ed. – Rio de Janeiro: BestSeller, 2016.

SHAYANI, R. A. **Método para determinação do limite de penetração da geração distribuída fotovoltaica em redes radiais de distribuição**. Tese de doutorado em Engenharia Elétrica. Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

SICA, E. T. **Planejamento Integrado de Recursos Hídricos para Geração de Energia Elétrica: um sistema de apoio à tomada de decisões via multicritérios e dinâmica de sistemas**. 2009. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SIMPSON, G.; CLIFTON, J. The emperor and the cowboys: The role of government policy and industry in the adoption of domestic solar microgeneration systems. **Energy Policy**, v. 81, p. 141 - 151, 2015.

SNAPE, J. R. Spatial and temporal characteristics of PV adoption in the UK and their implications for the Smart Grid. **Energies**, v. 9, p. 1 - 18, 2016.

SOLAR, C. **Painel solar 265W - Ficha técnica**. Disponível em: <[http://www.canadiansolar.com/downloads/datasheets/v5.4/Canadian\\_Solar-Datasheet-CS6PPSD\\_SmartDC-v5.4en.pdf](http://www.canadiansolar.com/downloads/datasheets/v5.4/Canadian_Solar-Datasheet-CS6PPSD_SmartDC-v5.4en.pdf)>. Acesso em: 09 dez. 2017.

SOMMERFELD, J.; BUYS, L.; Vine, D. Residential consumers' experiences in the adoption and use of solar PV. **Energy Policy**, v. 105, p. 10-16, 2017.

SOUZA, H. P. D. **Comercialização de energia elétrica na visão do consumidor potencialmente livre: uma abordagem baseada em dinâmica de sistemas**. 2012. 209p. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, Mestrado em Engenharia Elétrica, Curitiba, 2012.

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

STRAZZERA, E.; STATZU, V. Fostering photovoltaic technologies in Mediterranean cities: Consumers' demand and social acceptance. **Renewable Energy**, v. 102, p. 361 - 371, 2017.

STRUPEIT, L.; PALM, A. Overcoming barriers to renewable energy diffusion: business models for customer-sited solar photovoltaics in Japan, Germany and the United States. **Journal of Cleaner Production**, v. 123, p. 124 - 136, 2016.

TARDE, G. *The Laws of Imitation*. New York: Henry Hold and Company, 1903.

USLAM, S. M. **Adventures of a Mathematician**. Charles Scribner's Sons, NY, 1976.

VASSEUR, V.; KEMP, R. The adoption of PV in the Netherlands: A statistical analysis of adoption factors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 483 - 494, 2015.

VENSIM. Disponível em: <<http://vensim.com/>>. Acesso em: 18 abr. 2018.

WILLIS et al. Renewable energy adoption in an ageing population: Heterogeneity in preferences for micro-generation technology adoption. **Energy Policy**, v. 39, p. 6021 - 6029, 2011.

WORLD BANK GROUP. Disponível em :< <http://globalsolaratlas.info/>>. Acesso em: 11 abr. 2018.

YAMAGUCHI, Y. et al. Prediction of photovoltaic and solar water heater diffusion and evaluation of promotion policies on the basis of consumers' choices. **Applied Energy**, v. 102, p. 1148 - 1159, 2013.

YAMAMOTO, Y. Opinion leadership and willingness to pay for residential photovoltaic systems. **Energy Policy**, v. 83, p. 185 - 192, 2015.

YANG, C. Reconsidering solar grid parity. **Energy Policy**, v. 38, n. 7, p. 3270 - 3273, 2010.

ZHAI, P.; WILLIAMS, E. D. Analyzing consumer acceptance of photovoltaics (PV) using fuzzy logic model. **Renewable Energy**, v. 41, n. 1, p. 350 - 357, 2012.

ZHANG, X; SHEN, L.; CHAN, S. Y. The diffusion of solar energy use in HK: What are the barriers? **Energy Policy**, v. 41, p. 241 - 249, 2012.

ZHAO, T. et al. Spatio-Temporal analysis and forecasting of distributed PV systems diffusion: A case study of Shanghai using a data-driven approach. **IEEE Access**, v. 5, p. 5135 - 5148, 2017.