

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

Hilquias Silva Epalanga Chiquete

**PROJEÇÃO DA DIFUSÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA
FOTOVOLTAICA PARA CONSUMIDORES COMERCIAIS
CONECTADOS À REDE DE BAIXA TENSÃO**

Santa Maria, RS
2022

Hilquias Silva Epalanga Chiquete

**PROJEÇÃO DA DIFUSÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA PARA
CONSUMIDORES COMERCIAIS CONECTADOS À REDE DE BAIXA TENSÃO**

Dissertação Apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESP), da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Prof. Mauricio Sperandio Dr. Eng.

Santa Maria, RS
2022

CHIQUETE, Hilquias Silva Epalanga
PROJEÇÃO DA DIFUSÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA
FOTOVOLTAICA PARA CONSUMIDORES COMERCIAIS CONECTADOS À
REDE DE BAIXA TENSÃO / Hilquias Silva Epalanga
CHIQUETE.- 2022.
125 p.; 30 cm

Orientador: Mauricio Sperandio
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2022

1. Dinâmica de Sistemas. 2. Modelo de Bass 3. Projeção
4. Sistemas Fotovoltaicos 5. Difusão de Inovações I.
Sperandio, Mauricio II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

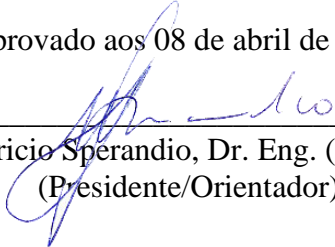
Declaro, HILQUIAS SILVA EPALANGA CHIQUETE, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Hilquias Silva Epalanga Chiquete

**PROJEÇÃO DA DIFUSÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA PARA
CONSUMIDORES COMERCIAIS CONECTADOS À REDE DE BAIXA TENSÃO**

Dissertação Apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESP), da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Aprovado aos 08 de abril de 2022


Mauricio Sperandio, Dr. Eng. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

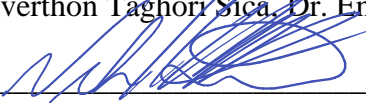


Documento assinado digitalmente

EVERTHON TAGHORI SICA
Data: 27/06/2022 12:29:09-0300
CPF: 022.992.149-33

Verifique as assinaturas em <https://v.ifsc.edu.br>

Everthon Taghori Sica, Dr. Eng. (IFSC)


Nelson Knak Neto, Dr. Eng. (UFSM)

**Santa Maria, RS
2022**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus todo poderoso, pois a ele pertence toda a sabedoria e conhecimento. Agradeço pela saúde, força, proteção concedida em tempos tão tortuosos e pela família, amigos, oportunidades, e pela determinação proporcionada de encarar os desafios da vida.

Agradeço aos meus pais, aos meus irmãos, pelo apoio emocional, dedicação imensurável e sacrifícios suportados, ao não impor desculpas a distância que nos separa de Angola para o Brasil.

Agradeço ao professor Dr. Mauricio Sperandio, pelo acolhimento, pelos valiosos ensinamentos e por toda competência, orientação no planejamento e concepção desta dissertação.

À professora Dr. Laura Lisiane Callai dos Santos, pela colaboração, incentivo e correções que foram de fundamental importância durante o andamento do trabalho.

Aos meus amigos, que souberam entender minha ausência, assim como a todos colegas que de alguma forma colaboraram para a realização desse trabalho.

Gostaria de deixar meu agradecimento a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), e todos os professores do Centro de Estudos em Energia e Sistemas de Potência (CEESP) do PPGEE pela infraestrutura oferecida e pelos ensinamentos.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, ao Programa de P&D regulado pela ANEEL executado pela Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica (CEEE-D) via chamada nº 01/2018, e ao INCT-GD.

“Ó ADEUS À HORA DA LARGADA! Minha Mãe, (todas as mães negras cujos filhos partiram) tu me ensinaste a esperar como esperaste nas horas difíceis, mas a vida matou em mim essa mística esperança eu já não espero sou aquele por quem se espera [...]. Nós vamos em busca de luz os teus filhos Mãe[...]. Vão em busca de vida.”

- Dr. Antônio Agostinho Neto-

RESUMO

PROJEÇÃO DA DIFUSÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA PARA CONSUMIDORES COMERCIAIS CONECTADOS À REDE DE BAIXA TENSÃO

AUTOR: Hilquias Silva Epalanga Chiquete
ORIENTADOR: Mauricio Sperandio, Dr. Eng.

Os incentivos às fontes renováveis proporcionaram um elevado crescimento da geração distribuída fotovoltaica (GDFV) na matriz elétrica Global. Sendo assim, imprescindível que as práticas de planejamento atual estejam prontadas em operar, monitorar e propor cenários ideais a todos os agentes desta cadeia operativa. Pois, o processo da difusão da fonte GDFV assim como das demais fontes intermitentes introduzem um fator de incerteza ao planejamento elétrico pelo fato de que propensão de aderir e o local de instalação esta sujeita a subjetividade do tipo de consumidor final. Desse modo, este trabalho apresenta um modelo para projeção da difusão de sistemas fotovoltaicos (SFV) para consumidores comerciais do Grupo B atendidos pelo nível de tensão inferior a 2,3 kV. O modelo proposto, utiliza a técnica de Dinâmica de Sistemas (DS), fundamentada na teoria de difusão de inovações de Rogers, em conjunto com o modelo de Bass. O modelo avalia a propensão de aquisição de SFV ao longo do tempo considerando três aspectos: regulatórios, econômicos e técnicos. O modelo implementado utilizando o software Vensim[®] da Ventana System. São testados cenários de projeção da difusão dos SFV em dois estudos de caso para validar a metodologia. Os resultados do primeiro estudo de caso demonstram como as políticas de incentivos podem interferir na aquisição da tecnologia FV. O resultado do segundo estudo de caso, aplicado em contexto hipotético com um novo modelo de negócio ou nova política que buscaria estabelecer a venda da energia excedente gerada pelos prossumidores, variando a tarifa de venda desse excedente. Os experimentos mostraram que haveria uma maior atratividade com a venda, o que resultaria em uma quantidade maior de prossumidores adotando SFV. No entanto, sem o ressarcimento adequado desta energia, o tempo de retorno do investimento tende a ser elevado, o que resultaria em baixa aquisição da tecnologia fotovoltaica.

Palavras-chave: Difusão de Inovações. Dinâmica de Sistemas. Modelo de Bass. Projeção. Sistemas Fotovoltaicos.

ABSTRACTS

PROJECTION OF THE DIFFUSION OF PHOTOVOLTAIC DISTRIBUTED GENERATION FOR COMMERCIAL CONSUMERS CONNECTED TO THE LOW VOLTAGE NETWORK

AUTHOR: Hilquias Silva Epalanga Chiquete
ADVISOR: Mauricio Sperandio, Dr. Eng.

Incentives for renewable sources have provided a high growth of distributed photovoltaic generation (GDFV) in the Global electric matrix. Therefore, it is essential that current planning practices are ready to operate, monitor and propose ideal scenarios to all agents of this operational chain. Intended for the process of diffusion of the GDFV source as well as other intermittent sources introduce a factor of uncertainty to electrical planning due to the fact that propensity to adhere and the place of installation is subject to subjectivity of the type of final consumer. This work presents a model for the projection of the diffusion of photovoltaic systems (SFV) for commercial consumers of Group B served by the voltage level below 2.3 kV. The proposed model uses the System Dynamics (DS) technique, based on Rogers' theory of diffusion of innovations, together with the Bass model. The model evaluates the propensity of the SFV acquisition over time considering three aspects: regulatory, economic, and technical. The model is implemented using Ventana Systems Vensim software[®]. Scenarios of projection of the diffusion of SFV in two case studies are evaluated to validate the methodology. The results of the first case study show how incentive policies can interfere with the acquisition of VF technology. The result of the second case study, applied in a hypothetical context with a new business model or new policy that would seek to establish the sale of the surplus energy generated by the prosumers, varying the sales rate of this surplus. The experiments showed that there would be a greater attractiveness with the sale, which would result in a greater amount of prosumers adopting SFV. However, without adequate compensation for this energy, the return on investment tends to be high, which would result in low acquisition of photovoltaic technology.

Keywords: Dissemination of Innovations. Systems Dynamics. Bass model. Projection. Photovoltaic Systems

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Quantidade da MMGD por classe de consumo com geração fotovoltaica no Brasil até 17 de junho de 2021.	45
Tabela 3.1 - Principais barreiras e variáveis no processo da difusão dos sistemas fotovoltaicos.	64
Tabela 3.2 - Variáveis de Entrada do modelo	85
Tabela 4.1 - Quantidade de consumidores comercial do grupo B da região selecionada.	89
Tabela 4.2 – Valor das Premissas para as 12 cidades.....	91
Tabela 4.3- Análise de sensibilidade	94
Tabela 4.4 - Cenários analisados	96
Tabela 4.5 - Adotantes de Sistemas Fotovoltaicos para o caso I.....	98
Tabela 4.6 - Premissas com valor de venda do Excedente para cada cenário.	102
Tabela 4.7 – Premissas utilizadas para as simulações Tramandaí caso II.....	103
Tabela 4.8 - Resumo da quantidade de Adotantes de SFV em cada cenário de venda de excedente Caso A Tramandaí.....	106
Tabela 4.9 - Resumo da quantidade de Adotantes de SFV em cada cenário de venda de excedente caso B Tramandaí.....	109
Tabela A.6.1-Anexo A: Premissas utilizadas para as simulações.....	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Os quatro principais elementos no processo de difusão.....	32
Figura 2.2 – Curva de adoção de inovações de Rogers	34
Figura 2.3 – Curva de adoção de inovações acumuladas de Rogers.	34
Figura 2.4 - Cinco estágios no processo de decisão de inovação.	36
Figura 2.5 - Digrama mental do processo da difusão.	40
Figura 2.6 - Relação dos principais aspectos observados.....	41
Figura 2.7 – Potência Instalada da MMGD até 17 de julho de 2021.	44
Figura 2.8 - Percentual da quantidade da MMGD por tipo de fonte até 17 julho de 2021.	45
Figura 2.9- Evolução da relação dos custos das distorções ao custo das informações nos modelos de planejamento.	47
Figura 2.10 – Modos de comportamentos comuns em dinâmica de sistemas no tempo.	49
Figura 2.11 - Representação dos indicadores de laços.	51
Figura 2.12- Principais elementos utilizados no diagrama de Stock fluxo.	52
Figura 2.13 – Representação de um diagrama de Estoque e fluxo.....	53
Figura 2.14 – Adoção devido a influências externas e internas	55
Figura 2.15 – Modelo de Bass utilizando Dinâmica de Sistemas	58
Figura 2.16 - Passos para a modelagem de um modelo via dinâmica de sistemas.....	59
Figura 3.1 – Metodologia proposta para o desenvolvimento do modelo.	63
Figura 3.2: Diagrama de representação do Mercado Nicho de GDs	66
Figura 3.3 – Estrutura global do diagrama de estoque e fluxo do modelo proposto.	68
Figura 3.4 - Digrama de Estoque e Fluxo do Aspecto Econômico	72
Figura 3.5- Diagrama de estoque e fluxo do aspecto Regulatório.....	77
Figura 3.6 - Diagrama de Estoque e Fluxo do modelo aspecto técnico.	79
Figura 3.7 - Modelo Completo Expandido	81
Figura 3.8 - Macro diagrama de laço causal do modelo global (com os três aspectos)	82
Figura 3.9 - Diagrama de laço causal do modelo completo	84
Figura 3.10: Variáveis de Entrada Vistas no Software Vensim	86
Figura 3.11: Variáveis de saída do modelo vistas no Software Vensim.	87
Figura 4.1- Número real de adotantes de sistemas fotovoltaicos no tempo.	90
Figura 4.2-Quantidade de Potência real Instalada da região selecionada.....	90
Figura 4.3 – Difusão normal e acumulada dos SFV em função do tempo no cenário base.	93

Figura 4.4 – Quantidade de adotantes Acumulado de SFV ao longo do tempo no horizonte de 25 anos caso I.....	99
Figura 4.5 - Quantidade Anual de Adotantes de SFV em função do tempo caso I.	99
Figura 4.6 - Tempo de Retorno em cada cenário caso I.	100
Figura 4.7 - Quantidade do estoque dos PAs em função do tempo caso I.....	101
Figura 4.8 – Quantidade de adotantes do Cenário Base com 20,03% de excedente caso II Tramandaí.	105
Figura 4.9 - Quantidade acumulada de adotantes de SFV em função do tempo caso A Tramandaí.	107
Figura 4.10 - Quantidade Anual de Adotantes de SFV em função do tempo caso A Tramandaí.	107
Figura 4.11 - Tempo de Retorno em cada cenário caso A Tramandaí.....	108
Figura 4.12 - Quantidade acumulada de adotantes de SFV em função do tempo caso B Tramandaí.	110
Figura 4.13 - Quantidade Anual de Adotantes em função do tempo caso B Tramandaí.....	111
Figura 4.14 - Tempo de Retorno de cada cenário caso B Tramandaí.....	111
Figura B.1 – Variáveis de saída vistas no Software Vensim estudo de Caso I.....	121
Figura B.2 - Variáveis de saída vistas no Software Vensim para Tramandaí estudo de Caso II	122

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta-Tensão
BT	Baixa Tensão
CEEE-D	Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica
CGH	Minicentrais de Geração Hidrelétrica
DS	Dinâmica de Sistemas
EOL	Usinas com Geração Eólica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FB ⁻	<i>Feedback</i> Negativo
FB ⁺	<i>Feedback</i> Positivo
FV	Fotovoltaica
GD	Geração distribuída
GDFV	Geração Distribuída Fotovoltaica
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IEA	International Energy Agency
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MMGD	Microgeração e Minigeração Distribuída
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PIB	Produto Interno Bruto
PLD	Preço de Liquidação de Diferenças
PNE	Plano Nacional de Energia
REDS	Recursos Energéticos Distribuídos
REN	Resolução Normativa
SDS	System Dynamics Society
SFV	Sistema Fotovoltaico
SISGD	Sistema de Registro de Geração Distribuída
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
UCs	Unidades Consumidoras
UFV	Usinas de Geração Fotovoltaicas
UTE	Usinas de Geração Termoelétricas

LISTA DE VARIÁVEIS

A_p	Adoção por publicidade
A_b	Adoção por publicidade boca a boca
$AD_{(t)}$	Adotantes do sistema fotovoltaico
$AE_{(t)}$	Aspecto Econômico
$AR_{(t)}$	Aspecto Regulatório
$AT_{(t)}$	Aspecto Técnico
A_{Econ}	Atratividade econômica
q	Coefficiente de imitação
$q_{(t-tx)}$	Coefficiente de imitação onde t_x é o <i>delay</i>
p	Coefficiente de inovação
$a, b, e c$	Coefficiente de peso
α	Coefficiente de peso de Instalação Local
β	Coefficientes de peso de Instalação Remota
$C_{VP_{(t)}}$	Comparador de atratividade do valor presente
$C_{p_{sfv_{(t)}}$	Complexidade de instalação dos sistemas fotovoltaicos
C_{Rede}	Custo de disponibilidade em kWh/mês
$C_{Instalação_{(t)}}$	Custo de instalação do sistema fotovoltaico
$C\&Op$	Custo de manutenção e operação anual
$C_{kWp_{(t)}}$	Custo do quilowatt pico
$C_{Inversor_{(t)}}$	Custo dos inversores
$C_{ModuloFV_{(t)}}$	Custo dos módulos fotovoltaicos
C_{base}	Custo Nominal de Instalação
$D_{kWp_{(t)}}$	Decaimento do custo do kWp
$D_{(t)}$	Demanda mensal
$D_{sfv_{(t)}}$	Despesas com manutenção, operação
$D_{i_{(t)}}$	Dificuldade de instalação local
$E_{f_{(t)}}$	Eficiência do módulo fotovoltaico
$Ec_{(t)}$	Energia a compensar no sistema

$Eg_{(t)}$	Energia Anual Gerada
$Ec_{(t)}$	Energia Economizada
$X_{(t)}$	Esforço do mercado no estante t
$EE_{(t)}$	Esforços Econômicos
$ER_{(t)}$	Esforços Regulatórios
$ET_{(t)}$	Esforços Técnicos
$FC_{(t)}$	Falta de conhecimento
Fa	Fator de perda de aproveitamento dos sistemas fotovoltaicos
$Fi_{(t)}$	Financiamento para compra dos sistemas fotovoltaicos
i	Fração de Adoção
I_p	Imposto de importação
IRT	Índice de Reajuste Tarifário
IDH	Índice desenvolvimento humano
$I_{pb_{(t)}}$	Intenção de investimento
$IT_{sfv_{(t)}}$	Investimento Total da instalação do sistema fotovoltaico
$M_{(t)}$	Mercado Potencial
m	Mercado potencial final
$Net_{m_{(t)}}$	<i>Net Metering</i>
N_E	Nível de Escolaridade
$Y(t)$	Número acumulado de adotantes
OP_I	Outros programas de incentivos
$Ex_{(t)}$	Porcentagem de energia excedente gerada
$TSm_{(t)}$	Porcentual da população que recebe mais de 3 salários mínimos
$UCTC_{(t)\%}$	Porcentual de estabelecimento do Tipo casa
$EP_{\%}$	Porcentual de estabelecimentos Próprios
$IL_{(t)}$	Porcentual de Instalação Local
$IR_{(t)}$	Porcentual de Instalação Remota
$PI_{(t)}$	Potência Instalada pelos adotantes de sistema fotovoltaico
$P_{MI_{(t)}}$	Potência média a instalar em kWp
$Pm_{(0)}(kWp)$	Potência nominal do módulo
$IT_{sfv_{(t)}}$	Preço de instalação do sistema fotovoltaico
$Prm_{(t_0)}$	Preço do modulo fotovoltaico

$P_{Inversor}$	Preço nominal de um inversor
$TI_{(t=n)}$	Preço pela troca de inversor
$P(t)$	Probabilidade de adoção no instante t
N	Quantidade da população total do sistema
$QtdC_{(t)}$	Quantidade de consumidores
$PA_{(t_0)}$	Quantidade de Potenciais Adotantes no ano zero
$R_{(t)}$	Radiação solar em kWh/m ² /dia
$Tc_{(t)}$	Tarifa de compensação
$T_{Rede(t)}$	Tarifa de energia
T_{VEx}	Tarifa de energia elétrica baseando no preço de liquidação diária
T_{TUSD}	Tarifa de energia paga pelo uso da rede à TUSD
$T_{sfv(t)}$	Tarifa do sistema fotovoltaico
$T_{base(0)}$	Tarifa Homologada pela ANEEL
$iPI_{(t)}$	Taxa da potência instalada
TA	Taxa de Adoção
iTC	Taxa de crescimento
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
$P_{ayback(t)}$	Tempo de retorno do investimento
$V_{util_{sfv}}$	Tempo de vida útil dos sistemas fotovoltaicos
$TCP_{i(t)}$	Total de consumidores potenciais inicial
$Vex_{(t)}$	Valor da venda de energia excedente
$VP_{rede(t)}$	Valor Presente da tarifa da concessionária
$VP_{sfv(t)}$	Valor Presente do Sistema Fotovoltaico
$iPIB_{(t)}$	Variação do PIB

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	25
1.1.	CARACTERIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA	25
1.2.	OBJETIVOS	27
1.2.1.	Objetivo Geral.....	27
1.2.2.	Objetivos Específicos	28
1.3.	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	28
1.4.	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	29
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1.	DIFUSÃO DE INOVAÇÕES.....	31
2.1.1.	Processo de difusão de inovações.....	32
2.1.2.	Processo de decisão da inovação.....	35
2.2.	DIFUSÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COMERCIAIS.....	37
2.2.1.	Principais barreiras a difusão dos sistemas fotovoltaicos	39
2.2.2.	Regulamentação Vigente no Brasil	42
2.2.3.	Importância da informação no planejamento.....	46
2.3.	ABORDAGEM DA DINÂMICA DE SISTEMAS.....	48
2.3.1.	Diagrama de Laço Causal	50
2.3.2.	Diagrama de Estoque e Fluxo	51
2.3.3.	Modelo de Bass.....	54
2.3.3.1.	<i>Modelo de Bass utilizando a Técnica de Dinâmica de Sistemas</i>	<i>57</i>
2.3.4.	O Processo de Modelagem	59
2.4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	61
3.	METODOLOGIA PROPOSTA	63
3.1.	ESTRUTURA DO MODELO E BARREIRAS	63
3.2.	FORMULAÇÃO DO MODELO PELA TÉCNICA DE DINÂMICA DE SISTEMAS	67
3.2.1.	Diagrama de estoque e fluxo do modelo proposto	67
3.2.1.1.	<i>Estimativa do mercado potencial.....</i>	<i>69</i>
3.2.1.2.	<i>Aspecto Econômico.....</i>	<i>72</i>

3.2.1.3. <i>Aspecto regulatório</i>	77
3.2.1.4. <i>Aspecto técnico</i>	78
3.2.1.5. <i>Modelo completo</i>	80
3.2.2. Diagrama de laço causal do modelo proposto	82
3.3. CRITÉRIOS E MÉTRICAS APLICADOS NA DETERMINAÇÃO DAS PREMISSAS	84
3.3.1. Parâmetros de entrada do modelo.....	84
3.3.2. Parâmetros de saída do modelo	87
3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	88
4. DESENVOLVIMENTO PRÁTICO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	89
4.1. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA	89
4.1.1. Determinação dos valores dos parâmetros	91
4.1.2. Simulação do modelo e análise de sensibilidade.....	93
4.2. ESTUDO DE CASO I.....	95
4.2.1. Caso I: Resultados.....	97
4.3. ESTUDO DE CASO II	101
4.3.1.1. <i>Caso A com 54,77% de excedente em UCs comerciais</i>	105
4.3.1.2. <i>Caso B com 106,36% de excedente em UCs comerciais</i>	109
4.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES DO MODELO PROPOSTO	112
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	115
5.1. TRABALHOS FUTUROS.....	116
5.2. TRABALHOS REALIZADOS.....	117
6. ANEXOS	119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123

1. INTRODUÇÃO

1.1. CARACTERIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A produção e utilização de energia elétrica a partir das variadas fontes, que se originou na virada do século *XIX* para *XX*, alcançou seu auge no século *XXI*, mudando significativamente a vida em sociedade e a interação com o ambiente ao redor. Todavia, apesar de sua grande importância de caráter imensurável, também tem causado impactos ambientais intransigentes, localmente e globalmente (BAJAY et al., 2018).

Assim, para mitigação desses impactos ambientais as práticas de planejamento estão sendo reestruturadas. Ao contrário de décadas passadas, onde o planejamento das redes de energia elétrica, poderia ser implementada considerando qualquer fonte disponível, mas dava-se enfoque nas fontes de menor custo sem avaliar as externalidades de sustentabilidade e econômicas, é um cenário ultrapassado.

Jannuzzi et al. (2018) expõem que, buscar maneiras de prover serviços energéticos com o menor impacto ambiental é um dos grandes desafios do século *XXI*. Nesse sentido a produção de eletricidade, sendo uma das principais fontes poluidoras que colabora com a criação de gases de efeito estufa, necessita explorar práticas mais sustentáveis.

Até o ano de 2018, mundialmente mais de 60% das emissões de gases do efeito estufa eram oriundas do setor energético em função de sua matriz ter uma alta participação de combustíveis fósseis, perto dos 80% segundo a International Energy Agency (IEA). De 2018 para 2021 este cenário não observou mudanças significativas, em parte devido aos efeitos da pandemia provocada pela COVID-19 (BAJAY et al., 2018; CASTRO; DANTAS, 2018; IEA, 2021).

Parte da solução dessa problemática das emissões de gases de efeito estufa, concentrasse-a na difusão em tecnologias de fontes renováveis, principalmente a fotovoltaica como fonte de Geração Distribuída¹, que possui a maior distribuição equitativa de aproveitamento e é apontada como a energia do futuro. De acordo com Mario Richter ela dominara totalmente o planeta até o ano de 2100. Alguns autores estabelecem prazos ainda menores (ASLANI; MOHAGHAR, 2013; BAJAY et al., 2018; RICHTER, 2013).

Nesse intuito, a China um dos países que mais contribuem com a poluição ambiental, tem traçado um novo rumo e investido bastante na proliferação e difusão da geração renovável,

¹ A Geração Distribuída (GD) pode ser entendida como toda e qualquer fonte de geração de energia elétrica em pequenas instalações próximo do local de consumo.

dado ao seu progresso técnico e políticas de incentivos, já é hoje o líder mundial em instalações de sistemas fotovoltaicos distribuídos do planeta. Em 2018, atingiu a marca dos 50,61 GWp de capacidade instalada acumulada, hoje a china já está programando retirar os incentivos, por acreditar que a fotovoltaica agora pode competir com as fontes tradicionais sem precisar dos incentivos governamentais (ZHANG; ZHANG, 2020).

Contudo, embora a China já programe cortar incentivos, é importante ter cautela. A interrelação dos contextos políticos, regulatórios e sociais, para impulsionar a difusão da geração renovável precisa ocorrer de maneira controlada e consistente focando no longo prazo de preferência, pois políticas e cortes inconsistentes podem mudar o senso de equilíbrio, aumentando a incerteza e afugentar potenciais investidores (ASLANI; MOHAGHAR, 2013; BURGER; LUKE, 2017).

Faz-se assim imprescindível que as práticas de planejamento estejam preparadas para antever, operar e monitorar cenários de inserção ou retiradas de políticas de incentivo. É indispensável que as novas fontes se difundam, contudo, é necessário um balanceamento pois a difusão abrupta poderá levar distúrbios técnicos nos sistemas, o que aumentará a complexidade das redes elétricas de energias se o planejamento não seguir na mesma velocidade da transição.

Bajay et al. (2018) suscitam que o longo período de estabilidade nos processos de produção e consumo de eletricidade, predominado pelas grandes centrais geradoras e fornecedoras de eletricidade com fluxo unidirecional e consumidor passivo, praticamente está chegando ao fim.

Hoje, o setor elétrico e a sociedade em geral, já observam uma das maiores transformações dada pela migração deste setor, para uma nova era energética, predominante por novas tendências, com a ocorrência da troca de papéis e mudança de fluxo elétrico com o consumidor deixando de ser passivo, para um agente ativo conhecido como *prosumidor*².

Os autores Burger e Luke (2017) enfatizam que a mudança da estrutura técnica e de mercado em ocorrência, pode significar que os modelos elétricos e de negócios do futuro provavelmente serão muito diferentes dos modelos de hoje, sendo assim de interesse de todas as partes envolvidas que estas mudanças ocorram no melhor cenário possível. Uma vez que, o crescimento econômico tem aumentado a demanda pela energia elétrica, principalmente nos setores industrial, comercial e residencial, o planejamento que antevê e projete os prováveis

² *Prosumidor* do inglês *Prosumer* é uma junção das palavras produtor e consumidor, ou seja, refere-se a um consumidor e produtor de energia elétrica (BAJAY et al., 2018).

cenários de crescimento de consumo ou a quantidade de consumidores com geração de energia deste grupo é uma necessidade.

Deste modo, estudar como está ocorrendo a difusão dessas novas fontes é um fator de extrema importância, na esfera de entender os desafios envolvidos, buscando incentivos ou tomada de decisões concisas analisando as diferentes tendências do mercado assim como os diferentes aspectos envolvidos, neste processo da difusão. Principalmente no tocante aos pequenos e médios consumidores, que, quando agrupados possuem um consumo de eletricidade considerável tendo em conta a quantidade de unidades consumidoras (UCs) existente a geração própria deste grupo gera novas oportunidades de preservação ambiental.

Os principais estudos sobre projeção da difusão de sistema fotovoltaicos (SFV) encontrados na literatura se concentraram amplamente na análise de difusão de sistemas fotovoltaicos em consumidores residenciais. Nesse contexto, propõe-se no presente trabalho um modelo para projeção da difusão dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede de baixa tensão para consumidores comerciais, adaptado a realidade brasileira, usando a técnica de dinâmica de sistemas em conjunto com o modelo de Bass.

Para o desenvolvimento do modelo é usado como base a teoria da difusão de inovação de Rogers, pelo reconhecimento desta teoria em descrever como uma inovação ou tecnologia se propaga em um sistema social. Nesse contexto quais fatores ou barreiras influem na decisão de um consumidor comercial em adotar a tecnologia fotovoltaica, e como a dinâmica do mercado, as políticas governamentais e dos órgãos reguladores impactam na decisão dos adotantes.

O modelo de estudo é proposto para os consumidores do grupo B comercial considerando três aspectos: *i) aspecto econômico* que engloba todas as premissas de caráter econômico, *ii) aspecto regulatório* que irá refletir as premissas das políticas de regulamentação nacional e *iii) aspecto técnico* englobando as premissas das variáveis técnicas. Portanto, as premissas das variáveis referentes a cada um dos aspectos juntamente aos coeficientes de inovação e de imitação do modelo de Bass alimentam o modelo proposto que é simulado utilizando o software Vensim[®] da Ventana Systems.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo de projeção da difusão da Geração Distribuída fotovoltaica para micro consumidores comerciais conectados à rede de baixa tensão, considerando os aspectos técnicos, econômicos e regulatórios.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Analisar o comportamento dos micros consumidores comerciais frente à decisão de aderir a uma inovação de sistemas fotovoltaicos, através de consulta à literatura;
- Desenvolver o modelo de difusão da geração distribuída fotovoltaica via dinâmica de sistemas e modelo de Bass considerando os aspectos técnicos, econômicos e regulatórios;
- Avaliar o efeito de diferentes medidas de incentivo econômico e de flexibilização regulatória na difusão dos sistemas fotovoltaicos comerciais conectados à rede de baixa tensão.

1.3. CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

A principal contribuição deste trabalho consiste no desenvolvimento de um modelo para projeção da difusão de sistemas fotovoltaicos em consumidores comerciais de baixa tensão conectados à rede, usando a abordagem da técnica de dinâmica de sistemas e modelo de Bass.

O trabalho se diferencia por considerar as novas mudanças regulatórias e atende de maneira parcial as mudanças regulatórias impostas pelo novo marco regulatório Lei nº14.300³ que visa a aplicação da cobrança das componentes tarifárias, relativo aos ativos e serviços de distribuição, postos de operação e manutenção dos serviços de distribuição e parte dos encargos de pesquisa e desenvolvimento. A tarifação sobre estas componentes será de forma gradual e se dará sobre o consumo efetivo da rede, dando grande importância a simultaneidade geração x consumo.

A preocupação de modelar direcionado para classe B comercial em comparação à residencial é em razão de que, embora quantitativamente a classe B residencial seja maioritária, a classe B comercial possui unidades instalada com potência em kWp relativamente superior,

³ A lei nº14.300 conhecida como o novo marco regulatório da GD foi sancionado em janeiro de 2022 e não revogou expressamente as resoluções anteriores porém, busca estabelecer mudanças regulatórias na Resolução Normativa nº482 (“LEI Nº 14.300 DE 06 DE JANEIRO DE 2022”, 2022).

apresenta um processo de decisão mais racional, e um comportamento de consumo diferenciado.

Outros pontos que mudam em relação aos critérios de um modelo residencial para um comercial além da ordem de grandeza de consumo é o fato da maioria dos estabelecimentos comerciais são propriedades alugadas, logo, a importância auferida no processo de decisão para a retroalimentação do modelo irão influenciar de maneira desigual os parâmetros de entrada.

É preciso destacar também, mais do que um processo técnico, a difusão dos sistemas fotovoltaicos é processo social, tal igual ao consumo energético que é uma construção social. Logo, diferentes grupos sociais reagem de maneira distinta mesmo quando estimulados com parâmetros aparentemente semelhantes o que realça a utilidade do presente trabalho.

Por fim, outra contribuição é para estudos de cenários considerando o novo marco regulatório pelas similaridades das mudanças trazidas com lei nº14.300, se forem tomadas as devidas considerações o modelo pode ser usado para estudar consumidores residências da classe B também, porém, o *payback* será considerado descontado e não o *payback* simples que é o normalmente aplicado na classe B residencial. Todavia, apesar desta possibilidade de aplicação ao estudo de difusão classe residencial para o mercado de SFV o modelo não se aplica a outros tipos de GD, nem se aplica a consumidores com armazenamento de qualquer classe.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em 5 capítulos, incluindo este introdutório.

O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica do modelo proposto. Nesse capítulo é apresentada uma breve explanação sobre a teoria da difusão da inovação de Rogers, que foi um dos primeiros autores a explicar como uma nova inovação ou tecnologia se difunde em um meio social, também é tratado sobre a difusão dos sistemas fotovoltaicos no Brasil e as barreiras que os potenciais adotantes de sistemas fotovoltaicos enfrentam para adotar um sistema fotovoltaico. O capítulo termina com uma breve abordagem sobre a teoria e modelagem usada pela técnica de dinâmica de sistemas e a aplicação do modelo de Bass na visão da técnica de dinâmica de sistemas transpondo deste modo a teoria de inovações de Rogers em uma visão matemática.

O capítulo 3 apresenta a metodologia do modelo proposto para difusão dos sistemas fotovoltaicos em consumidores comerciais do grupo B. O modelo proposto determina a curva

de aquisição (adoção⁴) de inovação ao longo do tempo, considerando os três aspectos propostos (regulatórios, econômicos e técnicos) e os coeficientes de Bass p e q . Para tal, primeiro é feito o estudo da análise de barreiras: de caráter econômico, caráter regulatório, caráter técnico, barreiras advindas do tipo de comércio e as barreiras de origem demográfica. A análise dessas barreiras, permite perceber a subjetividade comportamental dos consumidores frente a inovação dos SFV, possibilitando deste modo a determinação das variáveis ou premissas que influenciam na estimativa do mercado potencial e dos três aspectos. O capítulo também mostra todas métricas e equacionamento aplicados para sua construção, usando a técnica de dinâmica de Sistema.

O capítulo 4 apresenta o desenvolvimento prático, e a determinação dos valores dos parâmetros das variáveis de entrada. Após isso, são considerados cenários e testes de novas políticas que podem favorecer ou desfavorecer a instalação de sistemas fotovoltaicos ao se analisar possíveis tipos de incentivos à implantar levando em consideração os fatores relacionados à decisão dos consumidores em aderir, fatores esses que envolvem muitas incertezas. E, por fim é realizada a simulação e análise de resultados para dois estudos de caso, cujo primeiro é realizado considerando cenários no qual em determinado ano n , novos prossumidores incidiriam a pagar pela tarifa de uso da rede de distribuição (TUSD) Fio A, e/ou Fio B, e no segundo estudo de caso é considerado cenários de difusão no qual o prossumidor pode vender a energia excedente e não apenas trocar por crédito como corre na modalidade de compensação *Net metering*.

No capítulo 5 são feitas as considerações finais do trabalho e recomendações de trabalhos futuros.

⁴ O termo aquisição de Sistema fotovoltaicos (SFV) usado até o momento nos capítulos subsequentes é substituído pelo termo Adoção ou Taxa de adoção de SFV, pela consolidação deste no campo da teoria de difusão de inovação de Rogers. Entretanto, a expressão aquisição seria o termo adequado para se referir aos novos adotantes desta inovação, pois, a expressão *Adoção* ou *Taxa de Adoção* remete a adoção de crianças e adolescente conforme consta no Cadastro Nacional de Crianças e Adolescentes Acolhidas (CNCA).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. DIFUSÃO DE INOVAÇÕES

A teoria da difusão de inovações, originou-se no campo de pesquisa das ciências sociais para explicar como ao longo do tempo, uma ideia ou produto ganha impulso e se difunde por meio de uma população ou sistema social, sendo Everett Rogers considerado como propulsor da teoria da difusão de inovações (ROGERS; SINGHAD; QUINLAN, 2009).

Rogers (2003) interessou-se no estudo da teoria da difusão de inovações, por volta das décadas de 50/60, ao observar que os agricultores apresentavam um relativo atraso que poderia durar anos ao aceitar novas ideias mesmo quando estas pareciam relativamente mais favoráveis e benéfica para eles. O autor expõe que, o que mais o intrigava era o fato de que a causa deste atraso, ou *delay* no tempo de aquisição não era explicado simplesmente por questões econômicas ou técnicas.

Em 1954, Rogers começou a estudar a difusão de inovações, com base em estudos passados e observando ele a similaridade de que a difusão de alguma forma ocorria de maneira idêntica a outras áreas e em todos os estudos de difusão existentes naquela época, uma curva em forma de S ao longo do tempo sempre aparecia, independente do lugar, cultura ou tipo de inovação em estudo, convenceu-se deste modo que havia algum tipo de processo universal de mudança social. Logo, guiado pelos estudos dos Professores George Beal e Joe Bohlen, formulou o modelo de difusão generalizado publicado na sua primeira edição em 1962 sob o título *Diffusion of Innovations* (Difusão de Inovações) (ROGERS, 2003; ROGERS; SINGHAD; QUINLAN, 2009).

Rogers define a Inovação como a proliferação de uma ideia, prática, ou novas alternativas, meios novos de resolução de problemas percebidos por um indivíduo, organização ou outra unidade adepta a adquirir. Geralmente, estas tendem a apresentar uma probabilidade de superioridade a práticas anteriores, no entanto, é necessário que haja um motivo e informação. Porque independente de quão boa seja a inovação ou tecnologia, inicialmente é desconhecida (ROGERS, 2003).

Do mesmo modo, a difusão dos sistemas fotovoltaicos comerciais pode ser encarada como um processo da proliferação na adoção de uma inovação, neste caso, das tecnologias de aproveitamento da Geração Distribuída Fotovoltaica (GDFV), seus processos e incertezas envolventes, ao longo do tempo.

Os tópicos subsequentes são escritos com base no livro *Diffusion of Innovations* (Difusão de Inovações) da teoria de inovações de Rogers, apresentada na quinta e última edição, antes do falecimento do autor em 2004. Assim, começar-se-á a abordar sobre o processo de difusão pelo qual uma inovação se difunde em um meio social.

2.1.1. Processo de difusão de inovações

O processo da difusão de inovações é definido como uma mudança social, pelo qual uma inovação é comunicada através de um canal de comunicação cuja mensagem é uma nova ideia a ser difundida em um sistema social, usando um meio específico de comunicação que pode resultar em uma convergência ou divergência em relação a estrutura social inserida (ROGERS, 2003).

Rogers cita que, para a difusão ocorrer, é necessário que primeiramente haja a *i*) inovação ou ideia nova, *ii*) um meio de comunicação, *iii*) tempo para popularização e *iv*) um sistema social na qual irá fluir a nova ideia, estes elementos são chamados de os quatro principais elementos para ocorrência da difusão conforme é mostrado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Os quatro principais elementos no processo de difusão.

Inovação

- Caracteriza o surgimento de uma ideia nova ou prática a ser imposta;
- As características das inovações, percebidas pelos indivíduos, ajudam a explicar suas diferenças na taxas de adoção.

Canais de Comunicação

- Caracterizada pela existências de dois principais grupo de comunicação, a i) comunicação em massa e, ii) comunicação interpessoal;
- Processo pelo qual os participantes criam e compartilham informações uns com os outros para chegar a um entendimento mútuo;
- A Difusão em si é um tipo particular de comunicação em que o conteúdo da mensagem trocada diz respeito a uma nova ideia.

Tempo

- Caracterizado a etapa fundamental, pois é necessário a existência do tempo, para os potenciais adotantes da nova ideia tomem conhecimento da existência da inovação;
- A inclusão do tempo como uma variável na pesquisa de difusão é um de seus pontos fortes;
- É caracterizado por cinco etapas principais, e essas definem o processo de decisão de inovação: 1) Conhecimento, 2) persuasão, 3) decisão, 4) implementação e 5) confirmação.

Sistema social

- É o meio social, cultural, empresarial ou qualquer que seja onde a inovação é inserida ou;
- É o conjunto de unidades inter-relacionadas que estão engajadas na solução conjunta de problemas para atingir um objetivo comum;
- Determina o limite para um processo de difusão ou mercado total alcançável;
- Pode ser afetado por normas e o grau em que os indivíduos podem influenciar uns aos outros.

Fonte: Adaptado de ROGERS (2003)

Esses elementos para o processo de difusão estão presentes em todos os processos de difusão, ou propagação de novos acontecimentos desde a disseminação de uma doença viral ao processo de obtenção de cura, como pode-se citar a disseminação da COVID-19, a uma inovação tecnológica como é o caso dos sistemas fotovoltaicos.

Para os sistemas fotovoltaicos se tem:

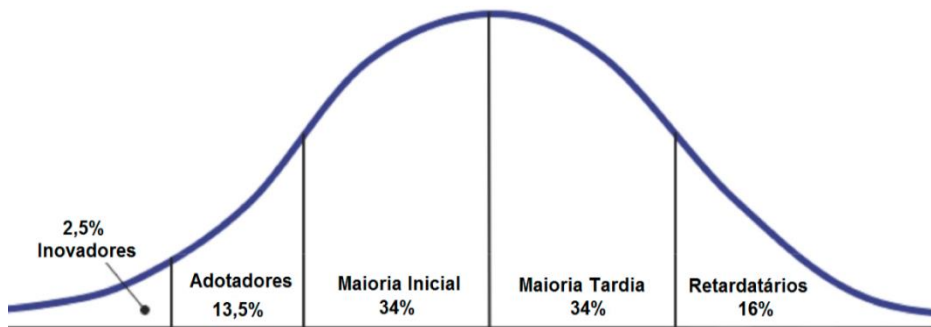
A *i) inovação* como o surgimento da tecnologia fotovoltaica, as características percebidas que explicam as diferentes taxas de aquisição estão embutidas na redução da conta de energia e na conservação ambiental percebida pelo consumidor;

Os *ii) Canais de comunicação* se tem a comunicação em massa trabalhada pelas entidades governamentais e fabricantes dos sistemas e a comunicação interpessoal sobre as vantagens que os indivíduos da sociedade têm percebido acerca da tecnologia fotovoltaica e comunicam para familiares e conhecidos;

iii) *tempo* envolve várias particularidades, mas pode-se citar o tempo de maturação que a tecnologia fotovoltaica leva até que seu conhecimento se difunda para população; iv) *Sistema social* pode-se citar por exemplo todos os consumidores comerciais, que fazem o uso de energia elétrica em suas atividades, ou que tenham como razão social a redução da emissão dos gases de efeito estufa.

As inovações são disseminadas em uma sociedade em função do tempo, logo, nem todas as pessoas ou organizações adotam uma inovação ao mesmo tempo, elas adotam em uma sequência de tempo, as quais podem ser classificadas, conforme Figura 2.2, em cinco principais categorias de adoção: inovadores, adotadores, maioria inicial, maioria tardia e retardatários (ROGERS, 2003).

Figura 2.2 – Curva de adoção de inovações de Rogers

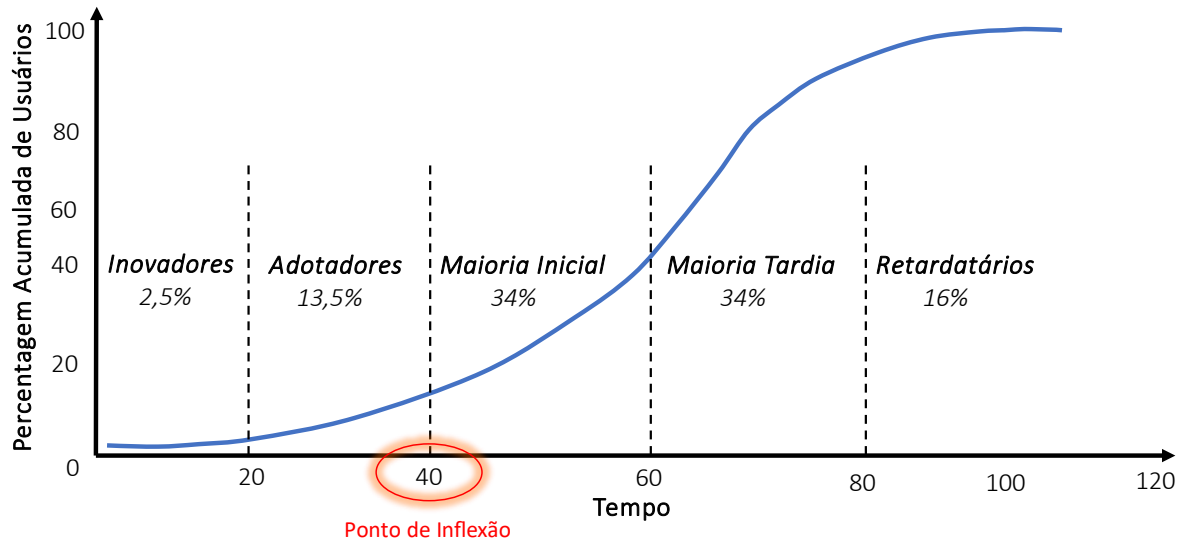


Fonte: Adaptado de ROGERS (2003).

A Figura 2.2 apresenta a distribuição de frequência normal das cinco categorias de adoção de uma inovação em função do tempo de adoção desta. De acordo com Rogers os inovadores geralmente representam 2,5% de um sistema social na qual a inovação está inserida, adotadores representam 13,5%, maioria inicial 34%, maioria tardia também com 34%, por fim os retardatários com 16%.

O processo de adoção de uma inovação segue uma curva normal em forma de sino, conforme Figura 2.2, quando plotado ao longo do tempo em uma base de frequência. Porém, se o número acumulado de adotantes são plotados, o resultado é uma curva em forma de S, conforme Figura 2.3.

Figura 2.3 – Curva de adoção de inovações acumuladas de Rogers.



Fonte: Adaptado de Rogers (2003) (apud Santos (2018))

Ambas as curvas indicaram que um pequeno número de inovadores adota uma inovação inicialmente, seguido posteriormente pelos adotadores e maioria inicial até chegar ao ponto de inflexão também conhecido como massa crítica, destacado em vermelho Figura 2.3 que é o ponto o qual quando atingido a inovação é tida como certa de ocorrer sem mais rupturas (ROGERS, 2003).

As cinco categorias representam o tempo médio em que a inovação leva para ser adotada com base na capacidade de persuasão da inovação, hoje se observa que as curvas do processo de inovação apresentam um crescimento exponencial mais acelerado, o que muitos pesquisadores atribuem ao fato da comunicação em mídia de massas e globalização, e também ao tornar a comunicação mais fácil de ser realizada na inter-relação pessoal (STEPHENSON, 2003).

Existe uma série de correlações e variáveis de decisão que influenciam na relação em um indivíduo do mercado potencial estar em cada uma das categorias como: variáveis sociais, educação, grau de alfabetização, o status social, tipo de atividade econômica exercida, atitude mais favorável ao crédito, atitude mais favorável à mudança, atitude mais favorável à educação, participação social, localização urbana, exposição na mídia de massa, exposição a canais interpessoais, conhecimento de inovações e a função de liderança de opinião, estas variáveis guiam o processo de decisão em relação a adoção precoce ou tardia da inovação dos indivíduos pertencentes ao sistema social em causa (ROGERS, 2003; STEPHENSON, 2003).

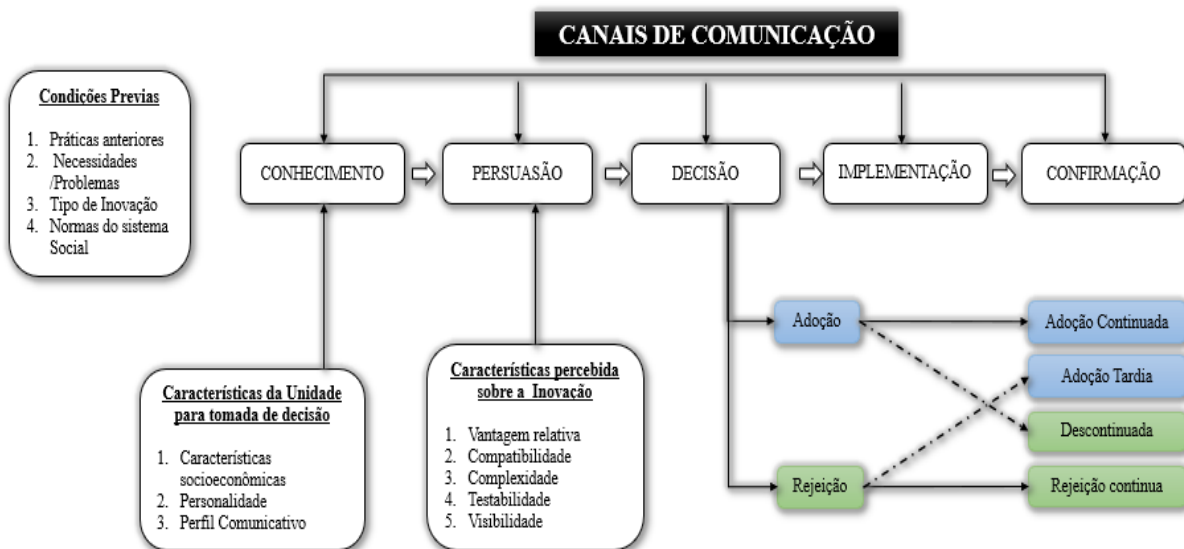
2.1.2. Processo de decisão da inovação

Segundo Stephenson (2003), para que a decisão da adoção ocorra é fundamental no processo a identificação dos critérios usados na tomada de decisão, visto que inicialmente a inovação deve ter uma vantagem relativa sobre a velha prática e deve ser consistente com os padrões culturais existentes no sistema social à ser inserida.

A velocidade com que uma inovação irá se difundir em um sistema social irá depender da natureza da inovação, do sistema social ou sociedade em questão e dos meios de comunicação disponíveis dentro desse sistema atrelada as cinco categorias (inovadores, adotadores, maioria inicial, maioria tardia, e retardatários) de adoção definidas por Rogers.

Devido a esses pontos e características dos indivíduos que dos quatro principais elementos no processo de difusão apresentados anteriormente, referiu-se ao tempo como o elemento mais decisivo, visto que nesta etapa que os adotantes categorizados, Figura 2.2, tomam conhecimento, sofrem a persuasão da inovação, tomam a decisão de adotar ou rejeitar, implementam a decisão tomada e finaliza com a confirmação da decisão tomada, compondo desta forma os cinco estágios que um potencial adotante de uma inovação percorre até a decisão de adotar ou não a inovação, representado conforme o esquema da Figura 2.4.

Figura 2.4 - Cinco estágios no processo de decisão de inovação.



Fonte: Adaptado de Rogers (2003)

Da Figura 2.4, os estágios do processo de decisão da inovação começam com determinação das condições prévias onde surge a inovação com uma certa superioridade as

práticas anteriores, após se tem os canais de comunicação, na qual está vinculada o tempo e a determinação do meio social ou mercado potencial à inovação.

Dos canais de comunicação, a primeira etapa é a disseminação do conhecimento, a segunda é a persuasão na qual existem cinco características principais de inovações que determinam como uma inovação será respondida nomeadamente: a vantagem relativa, que caracteriza o grau em que uma inovação é vista como melhor do que a ideia anterior, programa ou produto que substitui; a compatibilidade, que é o quão consistente a inovação é para os valores, experiências e necessidades aos adotantes do sistema social selecionado; a complexidade, que é o quão difícil é a inovação de entender e/ou usar; a capacidade de realizar teste, até que ponto a inovação pode ser testada ou experimentada antes que um compromisso de adoção seja feito; e finalizando se tem a visibilidade, até que ponto a inovação fornece resultados tangíveis (ROGERS, 2003; STEPHENSON, 2003).

Passado o estágio da persuasão, o indivíduo toma a decisão de adoção, que pode ser adoção continuada ou adoção tardia, rejeição temporária ou rejeição contínua, após esta etapa implementa a decisão tomada, e termina confirmando a decisão tomada.

A difusão dos sistemas fotovoltaicos sendo uma inovação da tecnologia fotovoltaica se configura na mesma perspectiva apresentada, por esta razão a teoria de difusão de inovações de Rogers é o modelo escolhido no presente trabalho, pois, este descreve todo o processo social que leva uma inovação ser aceita ou rejeitada. Rogers teoriza deste modo, um processo complexo que requer mais do que ferramentas técnicas e modelos matemáticos pois estão inclusos fatores sociais, culturais e ambientais difíceis de serem mensurados conforme o tipo de inovação.

2.2. DIFUSÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COMERCIAIS

A difusão dos sistemas fotovoltaicos comerciais pode ser encarada como um processo da proliferação na adoção de uma inovação, neste caso, das tecnologias de aproveitamento desta, seus processos e incertezas envolventes.

O planejamento da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) brasileira usa esta análise na projeção da micro e mini geração distribuída, para projeção do mercado de longo prazo no Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050), fundamentando-se na teoria da difusão de inovações de Rogers (EPE, 2019).

Uma análise comparável é usada por Santos (2018) e Santos et al. (2018) ao caracterizar a difusão de sistemas fotovoltaicos em consumidores residenciais de baixa tensão (BT) como um problema de difusão de inovações. Diante disso, Santos et al. usam o modelo de difusão via dinâmica de sistemas introduzindo-o com o modelo de Frank Bass, para resolver a problemática em relação à inicialização dos potenciais adotantes, assumindo que estes se conscientizem da inovação por meio de fontes externas de informação cuja magnitude e persuasão são constantes ao longo do tempo.

A temática da difusão dos sistemas fotovoltaicos de modo geral como uma fonte renovável de geração distribuída de energia é assunto de uma vasta literatura nos últimos anos. Estudos já comprovaram o enorme potencial desta como suficiente para atender à demanda global de energia e ainda contribuir para o fornecimento sustentável de energia a longo prazo (BAJAY et al., 2018; REDDY; PAINULY, 2004). Entretanto, apesar da vasta literatura, a difusão dos sistemas fotovoltaicos comerciais ainda carece de estudos diretos devido à dificuldade da existência de uma base de dados robusta e das incertezas regulatórias, econômicas, técnicas e sociais que empatam a sua tomada de decisão.

A maioria dos trabalhos, sobre difusão dos sistemas fotovoltaicos comerciais são realizados na mesma ótica do consumidor residencial, ou seja, adotando as mesmas premissas e parâmetros. As modificações normalmente ocorrem na análise do *payback* que ao invés da análise do *payback* simples é realizado *playback* descontado, dado que muitos autores defendem que o fator econômico neste grupo de consumo e o tempo de retorno são parâmetros muito mais importantes por ser um grupo mais racional, que busca por indicadores econômicos mais acurados quando comparado aos consumidores residenciais (KONZEN, 2014).

Wang et al. (2017) ao estudarem e proporem um modelo para adoção comercial de sistemas fotovoltaicos na Califórnia, nos Estados Unidos, descrevem que até o momento de sua pesquisa em 2017, praticamente não havia trabalhos com foco direto a difusão e adoção de sistemas fotovoltaicos comerciais, e se houvesse eram desconhecidos, o que destacou seu trabalho como o pioneiro até então.

Sincronicamente o observado por Wang et al. (2017), reflete a realidade brasileira, até o momento da realização deste trabalho em Janeiro de 2022, não foram encontrados trabalhos que estudem a difusão dos sistemas fotovoltaicos comerciais diretamente, e se existem são desconhecidos.

Em ANEEL (2017) e EPE (2020) é realizada a projeção de consumidores residenciais e comerciais com mini e micro geração de sistemas fotovoltaicos, porém como referido é descrito

que devido à falta de uma base de dados detalhada, para o seguimento dos consumidores comerciais as projeções são feitas partindo da avaliação socioeconômica dos consumidores residenciais e assim estima o mercado potencial, que representa os potenciais adotantes calculados pelos mesmos parâmetros do fator de aptidão⁵ residencial, mudando apenas o cálculo do *payback*, de simples para descontado.

Estes fatos realçam a importância do presente trabalho em abordar e analisar de forma direta a projeção da difusão dos sistemas fotovoltaicos em consumidores comerciais, buscando identificar as principais barreiras à difusão, que constitui umas das etapas fundamentais do processo de difusão.

2.2.1. Principais barreiras a difusão dos sistemas fotovoltaicos

Pesquisas encontradas na literatura confirmam a existência de um padrão em relação as barreiras enfrentadas pelos adotadores de sistemas fotovoltaicos, uma vez que várias das barreiras registradas foram identificadas por diversos estudos ao redor do mundo e não especificamente no Brasil. Como mostra GARLET et al. (2019), em que, no seu estudo os autores buscaram identificar o panorama da geração distribuída de energia fotovoltaica e barreiras que comprometem sua maior difusão na região sul do Brasil, e concluem que as barreiras diferem de uma região para outra apenas no grau de dificuldade, mas parecem convergir nas mesmas premissas.

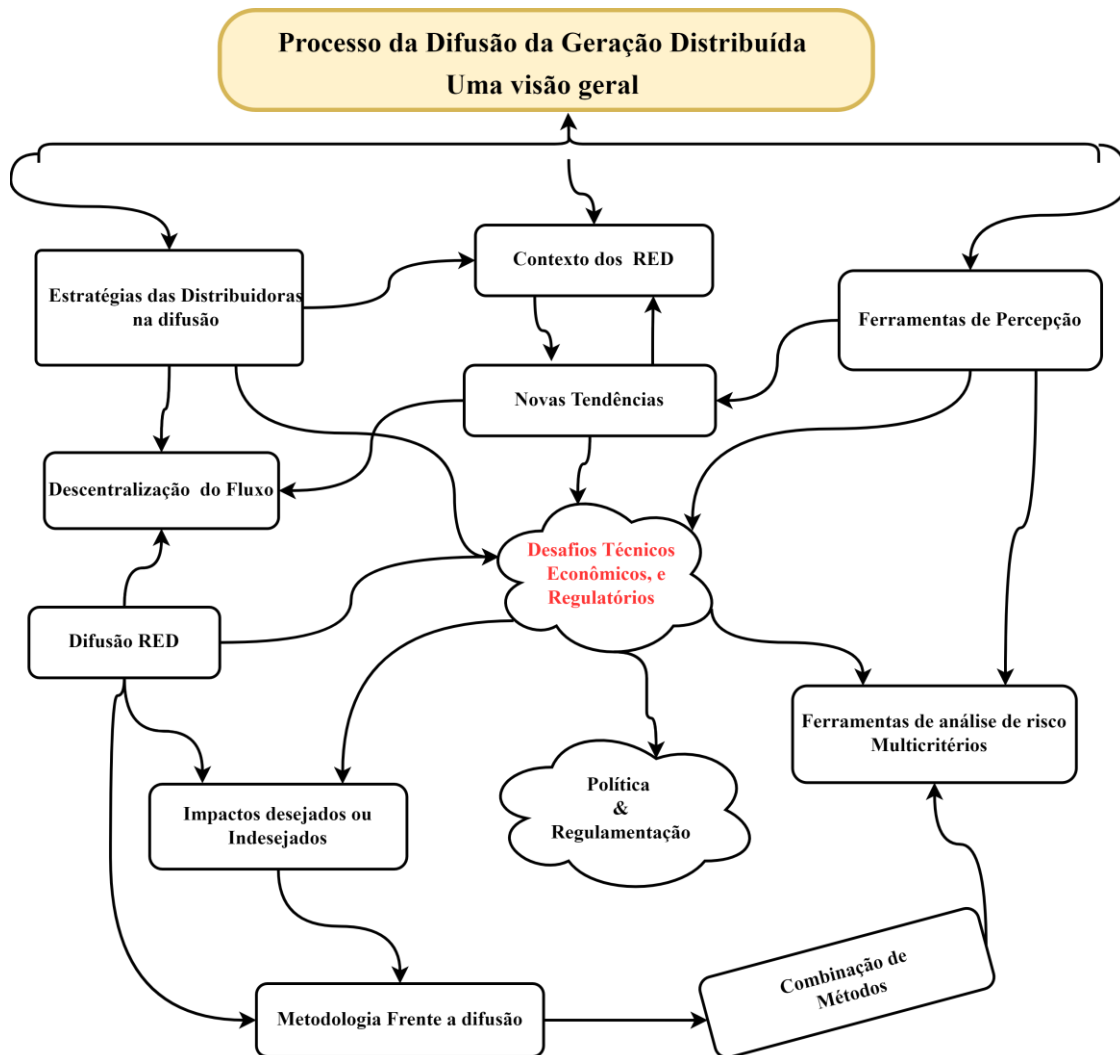
O estudo feito na Índia em 2004 por Reddy e Painuly (2004) pesquisando os processos de difusão no país, mostrou que a geração distribuída, para as economias emergentes, carece dos mesmos desafios de incentivos em política de eletricidade diversificada, o que favorece grandes centrais de geração hidrelétrica. O mesmo estudo identificou que a capacidade instalada é muito menor que o potencial de geração existente, evidenciando a presença de fatores que dificultam a maior adoção e difusão destas tecnologias, ele completa que os resultados permitem compreender a geração fotovoltaica distribuída praticamente em todas as economias emergentes.

Elaborando um diagrama de correlação e procedência de informação no processo da difusão criou-se a Figura 2.5, que mostra de forma generalizada o processo de propagação da geração distribuída. Nesse, três aspectos (técnicos, econômicos e regulatórios) que também

⁵ É a determinação da quantidade de consumidores aptos a realizar o investimento. Ou seja, a parcela de consumidores que não apresenta dificuldades técnicas e financeiras para aquisição de um sistema fotovoltaico.

caracterizam os desafios se destacam, contudo estes estão intimamente ligados aos aspectos políticos e de regulamentação demonstrando um maior impacto a todo o processo.

Figura 2.5 - Digrama mental do processo da difusão.



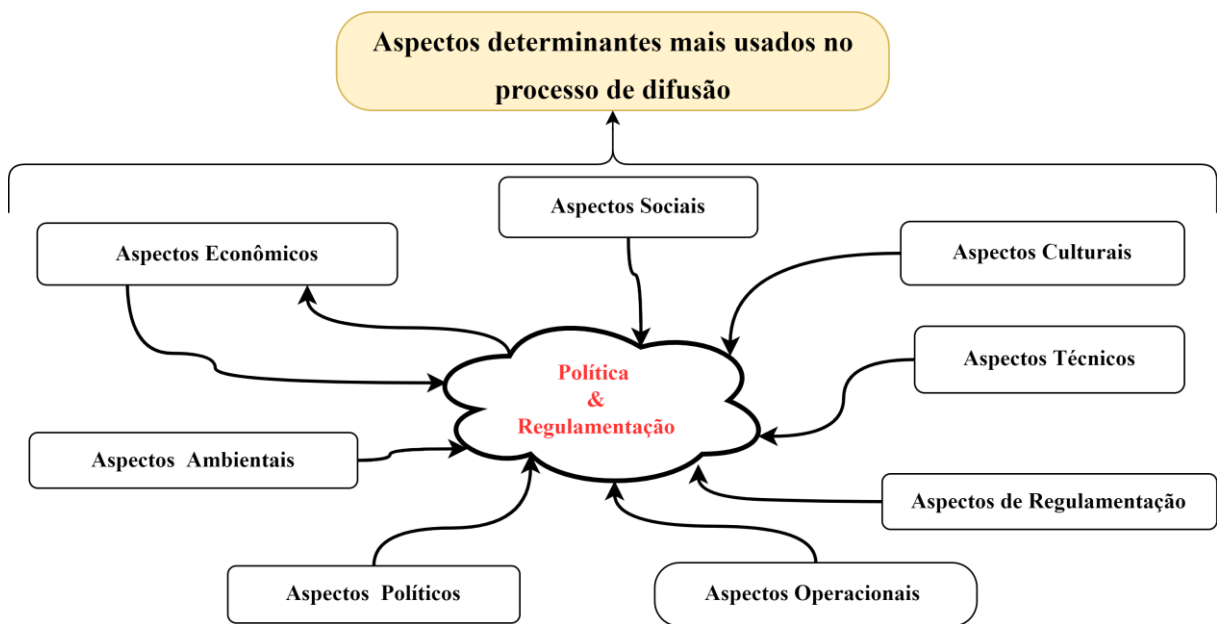
Fonte: do Autor

A tendência descrita na Figura 2.5 pode ser estendida para quase todas as fontes de GDs que englobam os Recursos Energéticos Distribuídos (REDs). Uma outra problemática a ser superada é a constatação das empresas de distribuição tradicionais que ainda são pessimistas em relação à difusão das GDs. Em específico a geração fotovoltaica, pois apesar destas estarem a mobilizar recursos, apostando e investindo em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), elas acreditam que este processo os obriga a investir em novas tecnologias. Para tal mudanças regulatórias são necessárias para garantir a sustentabilidade econômico-financeira de suas organizações (TOLMASQUIM et al., 2020).

Da literatura é possível observar uma tendência de que o processo da difusão dos sistemas fotovoltaicos ocorre através de fenômenos e processos complexos, que dependem de vários cenários e aspectos que tem uma correlação de retroalimentação⁶, conectada diretamente com as barreiras envolvidas nestas. Fazendo uma análise acautelada, de modo geral os principais aspectos jazem em torno das características de regulamentação, técnicas, econômicas, social, cultural, políticas e ambiental, características estas chamadas de aspectos, visto que representam um conjunto de variáveis agregadas conforme destaques da Figura 2.5 e Figura 2.6 (BURGER; LUKE, 2017; KONZEN, 2014; REDDY; PAINULY, 2004; SANTOS; CANHA; BERNARDON, 2018; TOLMASQUIM et al., 2020).

A Figura 2.6 apresenta uma esquematização dos principais aspectos observadas na difusão de sistemas fotovoltaicos de modo geral.

Figura 2.6 - Relação dos principais aspectos observados



Fonte: do Autor

Observando o diagrama da Figura 2.6, a relação de causa, e a convergência aos aspectos mais utilizados, juntando as observações descritas na Figura 2.5, percebe-se que a difusão das GDs contribui decisivamente para a implementação de novos modelos de negócios e serviços

⁶ Retroalimentação são processo ou ciclos de “*feedback*” positivos (FB⁺) e negativos (FB⁻), das relações existentes entre as partes dos sistemas. Onde os ciclos de FB⁺, são responsáveis pelos processos de crescimento e morte dos sistemas. Os ciclos de FB⁻ responsáveis pelos processos de equilíbrio sistêmico, permitindo que os sistemas apresentem relativa estabilidade durante algum tempo (segundos, anos, séculos, milênios, etc.) (COSTA, 2004, p. 76).

de distribuição de eletricidade, atrelando-se à necessidade de adaptação que recai principalmente em desafio de natureza técnica, econômica e de regulamentação (EPE, 2019; TOLMASQUIM et al., 2020).

Os aspectos⁷ atualmente são normalmente influenciados ou impulsionados pelas variáveis detérgidas pelas: ações voltadas à demandas de descarbonização, expansão da geração por REDs⁸, na redução do preço destas tecnologias, opções inovadoras para melhorar o desempenho da rede, advento do *big data* no processo das redes inteligentes e a crescente demanda de apelo aos veículos elétricos (TOLMASQUIM et al., 2020).

Em suma, observa-se que os critérios de entrada ou barreiras para a difusão são dados pela análise multicritério, associada à análise de risco, sendo que a maioria das análises em média usa três aspectos dependendo da objetividade do trabalho. Santos et al. (2018) em seu trabalho de projeção da difusão para consumidores residenciais, faz uma análise com 5 aspectos, tornando seu trabalho praticamente o único na incorporação deste conjunto de variáveis. Vale lembrar que outros trabalhos fazem o uso das mesmas variáveis, porém não todas ao mesmo tempo.

No presente trabalho, é optado por fazer o uso de três aspectos (econômico, regulatório e técnico), pela natureza da complexidade de aquisição de dados e pelo fato de que a regulamentação brasileira sobre a geração distribuída e o histórico de adotantes comerciais ainda é novo. Dar uma tratativa com esses três aspectos permitirá ter uma visão mais concisa.

2.2.2. Regulamentação Vigente no Brasil

A regulamentação dos sistemas fotovoltaicos no Brasil, é regida pela Resolução Normativa nº 482/2012, que instituiu a regulação da micro e mini geração distribuída pelo modelo de *net-metering*⁹, definindo os critérios de conexão e compensação desta a rede de energia elétrica, e da cogeração qualificada. Mais tarde atualizada pela Resolução Normativa nº 687/2015, que objetivou reduzir os custos e tempo para a conexão e aumentar o público alvo,

⁷ No presente trabalho aspectos caracterizam um conjunto de barreiras, ou premissas da mesma natureza representadas por uma variável abrangente.

⁸ A Difusão dos Recursos Energéticos Distribuídos (REDs) engloba a geração distribuída, armazenamento, veículos elétricos e medidas de *demand response* associados a redes inteligentes (CASTRO; DANTAS, 2018).

⁹ *Net-metering* é um sistema de compensação de energia elétrica que surge no intuito de incentivar as fontes renováveis distribuídas, ao estabelecer diretriz de compensação aos pequenos geradores, que pela política podem usar a energia gerada para abater o consumo em quase 100%.

assim como melhorar outras informações não muito específicas na resolução anterior (ANEEL, 2018a).

O Brasil é um país consideravelmente abundante de fontes de energias renováveis, como solar, eólica, biomassa e hidráulica, amplamente distribuídas em todo território. Seu “contexto político em torno das GDs tem sido bastante discutido e analisado dentro do escopo mais amplo das metas de planejamento de eletricidade, que é de responsabilidade do Ministério de Minas e Energia”, todavia, apesar do grande aumento, o órgão ainda mostra forte preferência ao regime centralizado e as poucas políticas existentes ainda não explora o leque da diversidade existente no país (GARCEZ, 2017).

Burger et al. (2017) analisam 144 modelos de negócios dos atuais modelos disponíveis para geração distribuída e outras que se enquadram no campo dos RED considerando os fluxos de receita, segmentos de clientes, serviços de eletricidade, chegando à conclusão de que os modelos de negócios são dinâmicos, mudando com o tempo, por influência da tecnologia e das políticas de regulamentação, por isso a importância dos passos de regulamentação que a ANEEL tem instituído.

Entretanto, os autores Burger e Luke realçam que é fundamental os reguladores e formuladores de políticas evitem criar uma dependência regulatória e política evidente. Pois, isso expõe as empresas a riscos regulatórios e políticos significativos, que comprometeria o já complexo processo da difusão e a “falha em abordar proativamente esses riscos pode ter consequências terríveis para os setores em que operam”.

Podendo incorrer ao acontecido em 2011 na Itália, onde as políticas de suporte para energia solar fotovoltaica custavam mais de 6 bilhões de euros anualmente, devido a uma política implementada em 2001. E estes custos de suporte foram arcados pelos contribuintes incluindo aqueles que não possuíam energia solar fotovoltaica (BURGER; LUKE, 2017). Outros ciclos semelhantes de expansão e queda em resposta às mudanças ocorreu na Espanha e no Reino Unido citam os autores, reforçando outra vez que é necessário criar boas reformas regulatórias e proativas, que reduzam a dependência regulatória sem interromper o equilíbrio do processo.

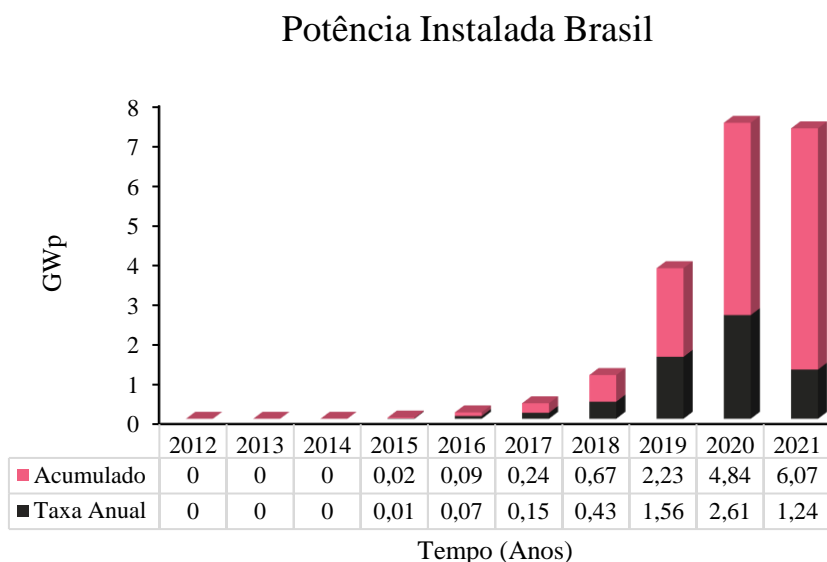
Desse modo, é necessário que governos locais continuem a criar e introduzir programas regulatórios específicos para supervisionar o processo da difusão das GDs até a autossuficiência destas, dado que, seus investimentos atualmente são frequentemente considerados como um investimento de alto risco devido à questões tecnológicas e regulatórias como observado em países com altas inserção de GDs (ASLANI; MOHAGHAR, 2013).

Esse fato mostra a importância do presente trabalho pois a construção de um modelo de difusão pela teoria de inovações permite testar políticas de incentivos em função do tempo e avaliar, como as premissas econômicas, regulatórias e técnicas influenciam a difusão da GDFV, pois é de interesse global que as fontes renováveis substituam as fontes de geração causadoras de gás de efeito estufa e dióxido de carbono buscando matrizes energéticas mais ecológicas.

No Brasil, como referido em parágrafos anteriores, para ampliar e diversificar a matriz energética de forma ecológica e sustentável, a ANEEL publicou em abril de 2012 a resolução normativa (REN) nº 482/2012, mas tarde atualizada pelas REN nº 687/2015, REN 786/2017 e pela LEI 14.300/22 do novo Marco Regulatório com o intuito de potencializar e democratizar o crescimento da difusão da Geração Distribuída (GD) no país e aumentar o público-alvo (ANEEL, 2018a).

Estas RENs permitiram ao Brasil ultrapassar a marca de 1 GW de potência instalada em micro e mini geração distribuída¹⁰ (MMGD) de energia elétrica em 2019, e de 2020/2021 mesmo com a crise Global da pandemia provocada pela COVID-19, este valor mais que triplicou para 6,07 GW de potência instalada, conforme Figura 2.7, de acordo com o Sistema de Registro de Geração Distribuída (SISGD) da ANEEL (ANEEL, 2021).

Figura 2.7 – Potência Instalada da MMGD até 17 de julho de 2021.

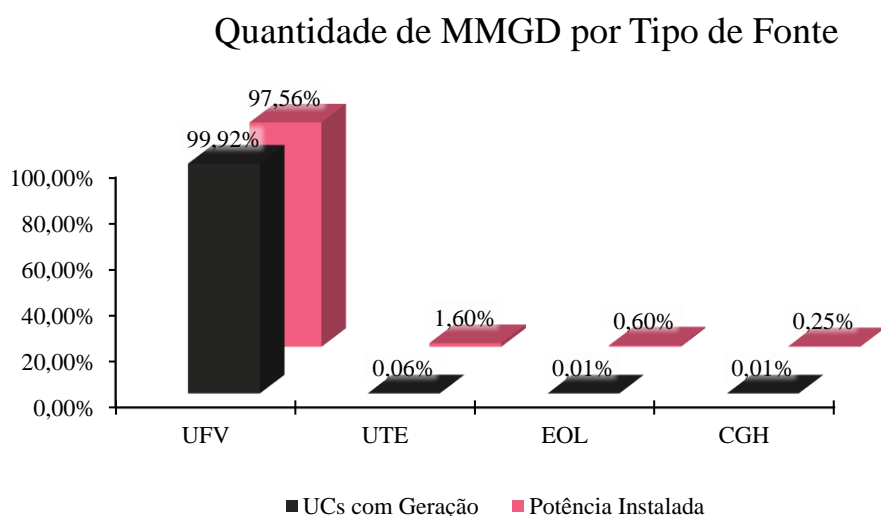


Fonte: Adaptado do SISGD (2021).

¹⁰ Microgeração distribuída, na regulamentação brasileira refere-se a uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW. Já a minigerção diz respeito às centrais geradoras com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fonte hídrica, ou 5 MW para as demais fontes (ANEEL, 2016).

No cenário da difusão das fontes renováveis distribuídas, a energia solar é a fonte mais promissora de MMGD, conforme Figura 2.8, com 99,92% de participação em termos quantitativos e 97,56% de Potência Instalada que correspondeu a 5,93 GW até 17 de junho de 2021 este valor equivale a uma tendência de crescimento de quase 9.216,67% nos últimos 6 anos (ANEEL, 2021).

Figura 2.8 - Percentual da quantidade da MMGD por tipo de fonte até 17 julho de 2021.



Fonte: Adaptado do SISGD (2021).

Na Figura 2.8, UFV são usinas de geração fotovoltaicas, UTE são usinas de geração termoelétricas, EOL são usinas com geração eólica e CGH são as Minicentrals de geração hidrelétrica.

A quantidade de UFV por classe de consumo até 17 de junho de 2021 é apresentado na Tabela 2.1

Tabela 2.1: Quantidade da MMGD por classe de consumo com geração fotovoltaica no Brasil até 17 de junho de 2021.

Quantidade de consumidores por classe			Potência Instalada por classe		
Classes	Quantidade de UCs (%)	Quantidade de UCs	Classes	Potência Instalada (%)	Potência Instalada (kWp)
Residencial	75,11%	384.439	Residencial	40,82%	2.418.655,48
Comercial	16,16%	77.586	Comercial	36,34%	2.153.556,00

Rural	7,15%	36.570	Rural	13,33%	790.140,36
Industrial	2,20%	11.242	Industrial	8,24%	488.244,48
Poder Público	0,35%	1.812	Poder Público	1,15%	68.399,87
Serviço Público	0,03%	128	Serviço Público	0,10%	5.862,08
Iluminação Pública	0,01%	33	Iluminação Pública	0,02%	1.025,36
Total	100%	511.381	Total	100%	5.925.883,66

Fonte: Adaptado do SISGD (2021)

A Tabela 2.1, apresenta a quantidade e o percentual de consumidores por classe de consumo em (a) e em (b) a quantidade de potência instalada de UFV no Brasil até 17 de junho de 2021.

Pela análise dos dados da Tabela 2.1, com as principais classes de consumo, é possível verificar que a classe de consumo comercial corresponde a 15,16% da quantidade de consumidores, já a classe residencial corresponde a 75,17%, porém, quando se analisa a quantidade de potência instalada, a diferença não é tão expressiva, onde a classe comercial responde por 36,34% e a classe residencial por 40,82%, fato este que mostra a importância de realizar estudos sobre a projeção da difusão dos consumidores comerciais e residenciais pela considerável potência instalada.

2.2.3. Importância da informação no planejamento

Não existe um consenso sobre uma única classificação dos modelos de planejamento, para difusão e projeção. No entanto, de modo geral, eles variam conforme a complexidade da análise e o grau de informações requeridas, aplicando o mesmo princípio de variação dos modelos de previsão apresentada por Jannuzzi et al. (2018) no planejamento integrado de recursos energéticos no qual ele especifica que os modelos de planejamento podem ser divididos ou diferenciados segundo:

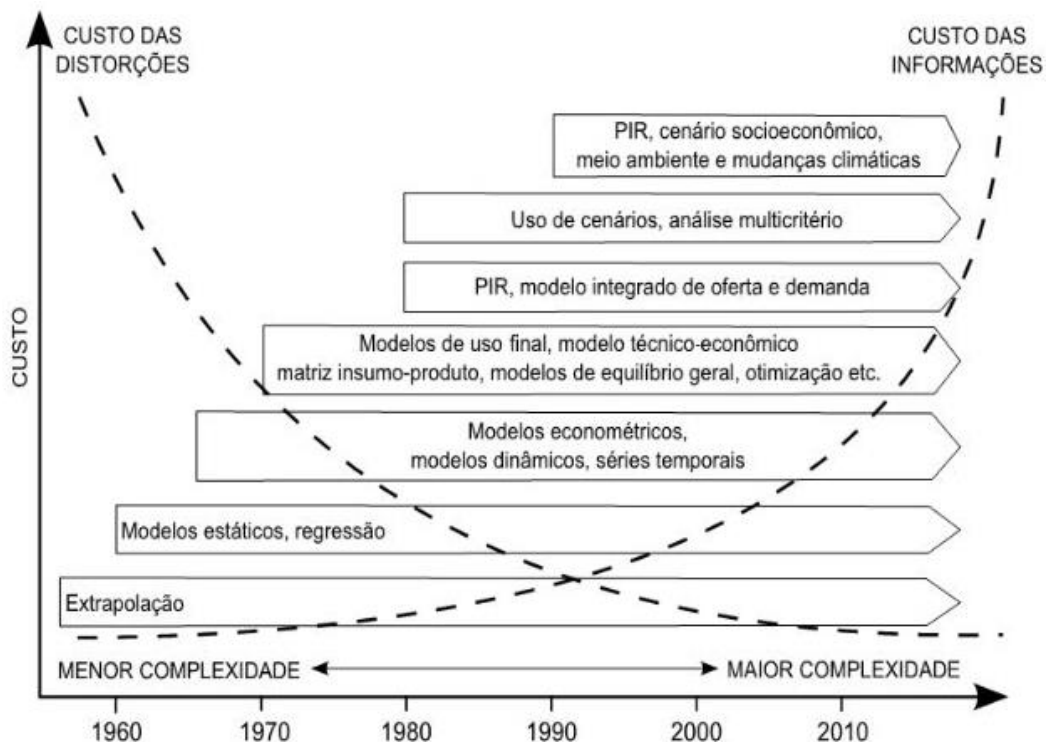
- Segundo a estratégia de abordagem: podendo ser modelos agregados e desagregados;
- Segundo a técnica matemática utilizada: em que, tem-se os modelos de usos finais ou técnico-econômico, econometria, regressão univariada e multivariada, matriz insumo-produto, séries temporais, algoritmo genético, lógica *fuzzy*, simulação e otimização por meio de funções objetivo entre outros modelos lógicos;
- Segundo a evolução: as variáveis no tempo que podem ser analisadas em estado estático ou dinâmico dependendo do horizonte temporal que pode ser curto, médio e de longo prazo;

▪ Segundo o alcance geográfico: podendo ser local, regional, nacional e mundial, quando maior o alcance temporal maior são as incertezas e estas podem ser tratadas como parâmetros determinístico, estocástico, cenários, análise multicritério entre outras técnicas de análise;

▪ Segundo a finalidade: configura o contexto e o meio no qual o modelo poderá ser usado.

Para contemplar diferente cenários socioeconômicos, variáveis ambiente, efeitos climáticos e outras variáveis complexas de mensurar os modelos de planejamento ao longo das últimas décadas, tem evoluído da popular análise de extrapolação de dados do passado para um planejamento mais complexo no qual o estudo é feito em ambientes mais interativos e dinâmicos, no qual a quantidade de informação disponível aparece como um dos principais pilares para minimizar as distorções, conforme apresentado na Figura 2.9. Agora na era dos *Big Data* informação é praticamente uma moeda.

Figura 2.9- Evolução da relação dos custos das distorções ao custo das informações nos modelos de planejamento.



Fonte: Adaptado de Jannuzzi et al. (2018).

Da Figura 2.9, o grau de complexidade, e o custo das distorções são inversamente proporcionais ao custo das informações os modelos de projeção baseada em cenários socioeconômicos apresentam menores distorções e permite a realização de projeção mais elaboradas com diferentes cenários e possibilidade para criação de teste com políticas. Entretanto, requer um alto custo de informações e possui alto grau de dificuldade e complexidade. Neste contexto, uma abordagem baseada em dinâmica de sistemas é uma técnica indica pela sua capacidade de lidar com sistemas complexos e prover maneiras de análise variáveis qualitativas e quantitativas em um mesmo modelo.

2.3. ABORDAGEM DA DINÂMICA DE SISTEMAS

A Dinâmica de Sistemas (DS) é uma técnica de modelagem e simulação para análise de sistemas complexos, baseado no pensamento sistêmico, seus resultados possibilitam prover ou testar políticas de recomendação dado ao entendimento que ela pode fornecer, ao representar sistemicamente a complexidade estrutural do meio em estudo, de uma maneira prática e arranjada a realidade, baseado na teoria da não linearidade moderna (COSTA, 2004; STERMAN, 2014).

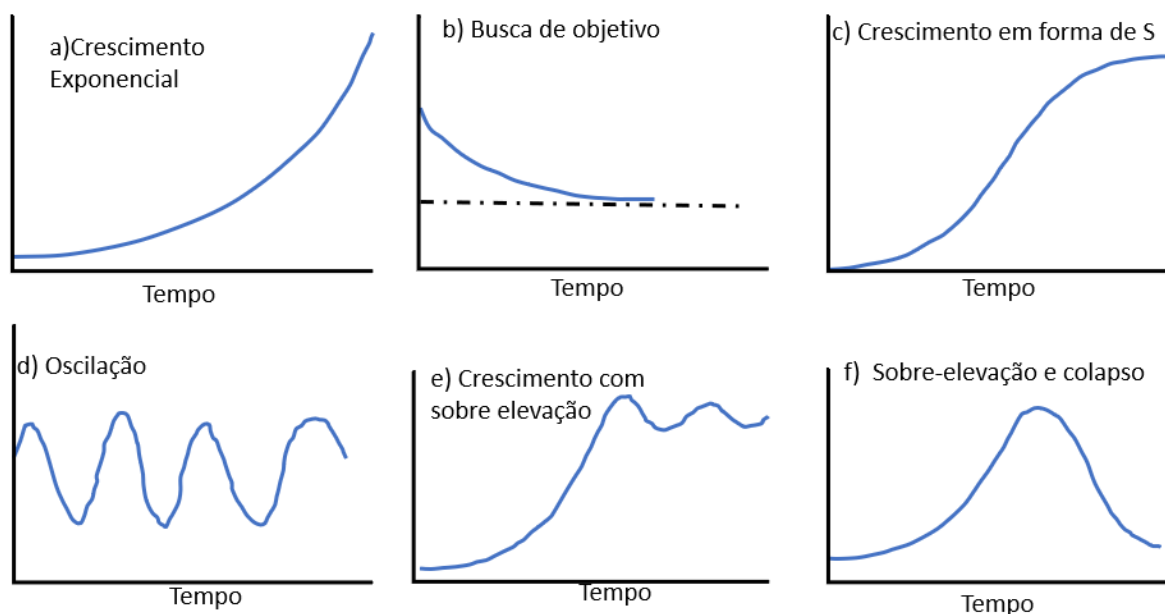
A Sociedade de Dinâmica de Sistemas (SDS) do Inglês *SYSTEM DYNAMICS SOCIETY* define a DS como “uma abordagem auxiliada por computador para o desenho de estratégias e políticas” cujo objetivo principal é ajudar as pessoas ou tomadores de decisões a adotarem melhores decisões quando se depararem com sistemas complexos e dinâmicos, auxiliando-os a compreender o comportamento desta estrutura social (SDS, 2021).

O estudo da DS tal como conhecemos hoje, teve seu desenvolvimento no Instituto de Tecnologia de Massachusetts, do Inglês *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), nos Estados Unidos da América por volta dos anos 1950. Jay W. Forrester, um Engenheiro de computação, com formação inicial em Engenharia elétrica e criador da primeira animação computacional, é considerado o pai deste campo de pensamento sistêmico, pela sua contribuição imensurável (SDS, 2021).

O entendimento da dinâmica de sistemas ajuda a entender o comportamento de mudança dos sistemas complexos ao longo do tempo usando uma abordagem da teoria dos sistemas de retroalimentação ou *feedback* que levam a um certo padrão de comportamento. Na Figura 2.10 constam os principais gráficos que representam os principais padrões de variação

dos sistemas ao longo tempo, existem outras formas não destacadas que podem ser compostas pela representação mista dessas (STERMAN, 2000).

Figura 2.10 – Modos de comportamentos comuns em dinâmica de sistemas no tempo.



Fonte: adaptado de Sterman (2000).

Na Figura 2.10, o item *a)* representa os sistemas com ciclo de crescimento exponencial caracterizado pelo *Feedback* positivo (FB^+), *b)* representa o sistema com função de busca de objetivos *Feedback* negativo (FB^-) também chamado de Ciclo de Equilíbrio, *c)* representa o sistema com Curva de crescimento em “S” ou crescimento com limite, e *d)* representa um sistema com oscilação caracterizado pela presença de ambos os tipos de *Feedbacks*, *e)* Representa um sistema complexo com crescimento sobre elevação, *f)* descreve sistemas complexos com sobre elevação e colapso, processo muito similar ao que ocorre com a disseminação da moda em certos estilos de roupa onde repentinamente surge uma tendência com crescimento exponencial, e meses, anos depois entra em colapso.

Os modos de comportamentos comuns em dinâmica de sistemas no tempo podem ser observados em problemas sociais aplicados a diversas áreas do conhecimento como: sistemas sociais, gerenciais, econômicos, ecológicos, propagação virais e fisiológicas, ajudando a entender a dificuldade de lidar com sistemas complexos. Sterman (2014), argumenta que a maioria dos problemas em sistemas complexos são geralmente consequências não intencionais de soluções implementadas em um passado, fato esse que enfatiza um certo ceticismo de

resistência à mudança ou resistência à adoção de novas práticas, mesmo quando estas são bem-intencionadas, como uma resposta do próprio sistema.

Sterman (2014) cita ainda que, ao contrário dos problemas puros de engenharia, se é que existem, os problemas sociais apresentam desafios e características únicas que cruzam a fronteira da interdisciplinaridade com grande dificuldade para testes experimentais dadas as características da subjetividade humana envolvida, demanda tempo e análise de n – variáveis para capturar a complexidade deste ambiente.

Razão pelo qual a teoria da DS é apoiada na engenharia de controle, necessita do grande poderio do processamento dos computadores atuais, e com a evolução da teoria da não linearidade moderna, tem-se as ferramentas ideais para estudo de sistemas complexos. Com base nessa interdisciplinaridade a Sociedade de Dinâmica de Sistemas acredita que a DS em um futuro breve estará presente em todas as partes do sistema educacional, levando ao entendimento público e à demanda por melhores políticas em toda a sociedade (SDS, 2021).

Para sua modelagem, a técnica da dinâmica de sistemas dispõe de técnicas próprias de diagramação, feita à partir da construção de Diagramas de Laços Causais e dos Diagramas de Estoque e Fluxo que servem para expressar a cadeia de ideias de eventos da simulação ao longo do tempo considerando os efeitos de retroalimentação.

2.3.1. Diagrama de Laço Causal

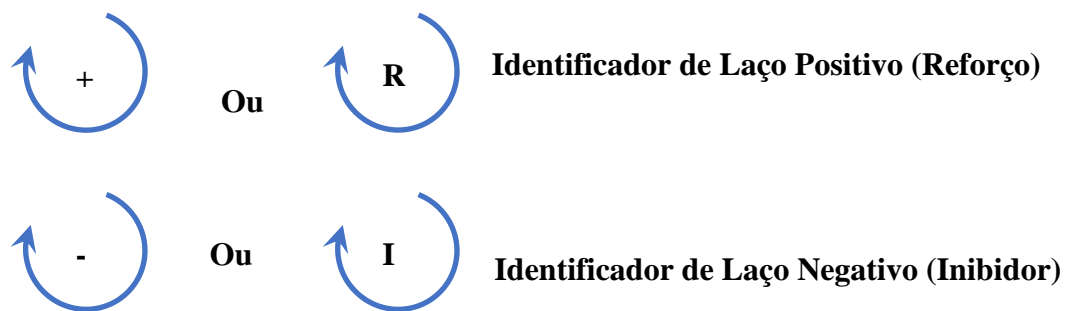
Os diagramas de laços causais são usados para capturar a estrutura do sistema, através de modelos mentais denotados pela retroalimentação que descrevem a relação de causa e efeito. Sterman (2000) cita três principais pontos da importância de utilizar os Diagramas de Laço Causal que são:

- Captura rápida de hipóteses sobre as causas da dinâmica;
- Elucidação e captura rápida dos modelos mentais de indivíduos ou equipes;
- Comunicação dos processos de realimentação que são importantes e responsáveis por um problema.

De modo geral, um diagrama causal consiste em variáveis conectadas por setas indicando as influências causais ou de causa e efeito entre as variáveis. Neste, os ciclos de retroalimentação são identificados no diagrama e as variáveis relacionadas por ligações causais, mostradas por setas (STERMAN, 2000).

As setas de representação dos diagramas de laços causais servem para identificação da influência de uma variável em relação a outra dentro do sistema, e esta podem ser de dois tipos, primeiro com *i) Loop* de identificação positiva ou reforço, que caracteriza um efeito de crescimento no sistema e *ii) Loops* de representação negativa ou de Equilíbrio que representaria uma causa de decrescimento, a Figura 2.11 mostra os dois tipos de indicadores que denotam os loops de laços causais.

Figura 2.11 - Representação dos indicadores de laços.



Fonte: Adaptado de Sterman (2000).

Na Figura 2.11 tem-se os dois tipos de Laços de identificação, em diagramas de Laço causal as ligações causais serão sempre acompanhadas de uma polaridade, positiva (+) ou negativa (-) na seta de ligação para indicar como a variável dependente muda quando a variável independente muda. Os *Loops* importantes são destacados por um identificador de Loop que mostra se o *Loop* é de retroalimentação positiva (reforço) ou negativa (inibidora) (STERMAN, 2000).

Uma das limitações mais importantes dos diagramas causais é sua incapacidade de capturar a estrutura de estoque e fluxo dos sistemas. Dessa forma os diagramas de Estoque e Fluxo, junto com as estrutura de retroalimentação, são os dois conceitos centrais da teoria dos sistemas dinâmicos (STERMAN, 2000).

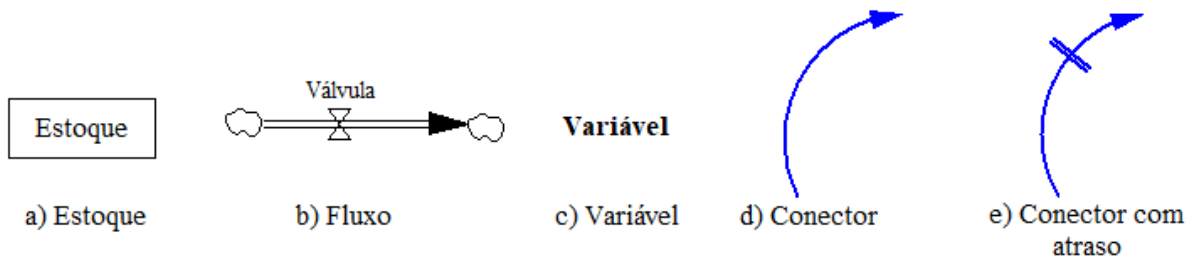
2.3.2. Diagrama de Estoque e Fluxo

A principal vantagem da utilização do diagrama de estoque e fluxo é a sua capacidade de capturar a interdependência do sistema e poder expressá-lo através de fórmulas lógico-matemáticas permitindo a quantificação das variáveis e não apenas sua representação

qualitativa de relações causais, como ocorre no diagrama de laço causal. Isso requer que cada uma das variáveis seja claramente definida, porque essas têm funções diferentes no diagrama de estoque e fluxo (STERMAN, 2000).

Os principais elementos utilizados para notação da diagramação de Estoque e fluxo é mostrado na Figura 2.12, estes são divididos em quatro principais elementos: Estoque, Fluxos, Variáveis (constantes e/ou auxiliares) e Conectores (com atraso e/ou sem atraso).

Figura 2.12- Principais elementos utilizados no diagrama de Stock fluxo.



Fonte: Adaptado de Sterman (2000).

Em que:

▪ **Estoques:** Representados por retângulos, sugerem a ideia de um contêiner contendo o conteúdo do estoque. Os estoques são variáveis que armazenam informações em função do tempo, sendo conhecidas como variáveis-de-estado do sistema.

A equação(1) apresenta a transição de um estoque em função do tempo (STERMAN, 2000).

$$Estoque(t) = \int_{t_0}^t [Entradas(t_i) - Saídas(t_i)]. ds + Estoque(t_0) \quad (1)$$

Em que $Entradas(t_i)$, representa o valor das entradas em qualquer instante de tempo t_i entre o tempo inicial t_0 e o tempo atual t , $Saídas(t_i)$ representa o valor das saídas em qualquer instante de tempo t_i entre o tempo inicial t_0 e o tempo atual t , $Estoque(t_0)$ representa o estoque inicial em t_0 .

Equivalentemente, a taxa líquida de mudança do estoque, é dada pela derivada, que é igual ao fluxo de entradas menos o fluxo de saídas em função do tempo conforme equação (2).

$$\frac{d(Estoque)}{dt} = Entradas(t) - Saídas(t) \quad (2)$$

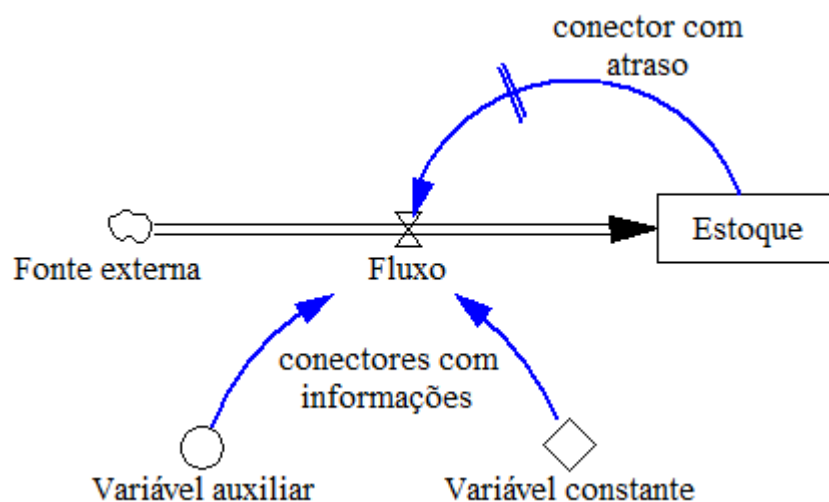
As convenções de diagrama de estoque e fluxo foram concebidas inicialmente por Jay Forrester (1961), definindo-as com base em uma metáfora hidráulica ao considerar o fluxo de água dentro e fora dos reservatórios. Assim, é útil pensar em um estoque como uma caixa de água, onde a quantidade de água da caixa a qualquer momento é igual a acumulação da água que flui a partir da torneira, menos a água que flui através do dreno. A idealização hidráulica do reservatório fornece ao diagrama de estoque e fluxo um significado matemático preciso e inequívoco conforme apresentado na equação (1) e equação (2) (STERMAN, 2000).

▪ **Fluxos:** são concebidos por um tubo de seta dupla, eles representam o transporte de recursos, podem ser de entradas apontando para o estoque, indicando aumento, ou de saída apontando para fora do estoque, indicando a retirada, contêm a válvula que controla os fluxos.

As extremidades do fluxo, conforme Figura 2.12, *b)* podem apresentar nuvens que representam as fontes do estoque do qual surge um fluxo originado fora do limite do modelo, presume-se que as fontes têm capacidade infinita e nunca podem restringir os fluxos que suportam (STERMAN, 2000).

▪ **Variável:** representa as variáveis ou parâmetros que são usados no sistema, baseado em outros componentes desse. Ela pode ser representada por dois tipos *i) variável constante* e *ii) variável auxiliar*, denotadas por um losango quando constante e por círculo quando auxiliar. A principal diferença entre ambas é que as variáveis auxiliares permitem a manipulação por fórmulas matemáticas, porém, não armazenam informação e a variável constante recebe parâmetros constantes, geralmente esta é usada para alimentar o modelo. A Figura 2.13 apresenta ambos os tipos de variáveis.

Figura 2.13 – Representação de um diagrama de Estoque e fluxo.



▪ **Conectores:** explicitam as relações de ligação entre as partes do sistema, servindo como transportadores de informações, e ao contrário dos fluxos os conectores apenas transportam o valor presente na variável ou no estoque sem alterá-lo. Os conectores com atraso (Figura 2.12 e) carregam informação que só estarão disponíveis num instante de tempo futuro, representando um *delay*.

Os conceitos dos diagramas de estoque e fluxo, são aplicados no modelo de Bass que é explicação matemática da teoria de inovação de Rogers.

2.3.3. Modelo de Bass

Everett Rogers introduziu a teoria de difusão de inovações, apresentando todo o ciclo de vida que precede uma inovação até essa ser absorvida no mercado final ou em um sistema social. Deste modo, o modelo de Bass (BASS, 1969) surge como uma contribuição matemática para descrever esta hipótese comportamental capaz de gerar uma curva sigmoide da taxa de penetração de mercado ao longo do tempo, conforme Figura 2.3 da curva de adoção de inovações acumuladas.

O modelo de Bass é amplamente usado para representar os primeiros adotantes de uma tecnologia ou inovação em geral, ao contrário dos modelos logísticos que falham ao explicá-los. Bass parte do princípio da teoria de inovações de Rogers, de que os adotantes tomam conhecimento da tecnologia com base em dois principais meios de comunicação, a comunicação da mídia em massa e a comunicação boca a boca, o que resulta em dois principais grupos ou tipos de adotantes, os que adotam pela influência externa resultantes da comunicação das mídias em massa e o segundo grupo que adota pela influência interna resultante da comunicação boca a boca. Frank Bass denominou o primeiro grupo de inovadores e o segundo grupo de imitadores (MAHAJAN; MULLER; BASS, 1990).

Bass definiu em seu modelo que inicialmente a tecnologia ou inovação é implantada unicamente pelos inovadores, conforme este grupo vai aderindo, surgiram os imitadores e após a entrada dos imitadores, o modelo apresenta um crescimento com comportamento parecido ao dos modelos logísticos.

Esse modelo, pode ser descrito matematicamente. Considerando $Y(t)$ como sendo o total acumulado no instante t de consumidores que já adquiriram um determinado produto em

um mercado de m consumidores potenciais e $P(t)$ correspondendo à probabilidade de adoção no instante t , por um consumidor tem-se deste modo a formulação dada pela equação (3) (BASS, 1969).

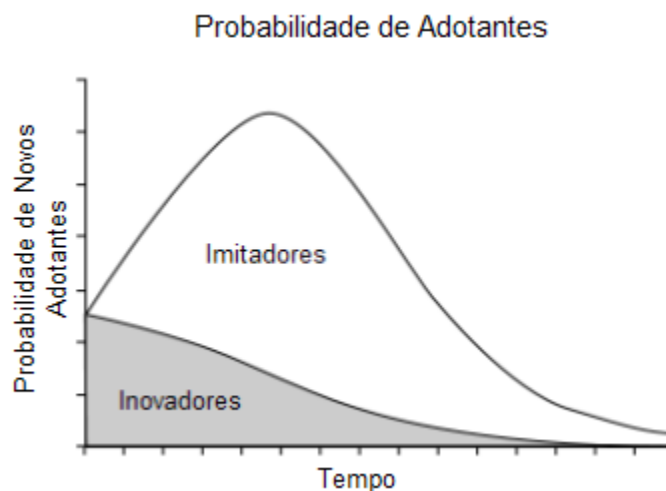
$$P(t) = p + \frac{q}{m} \cdot Y(t) \quad (3)$$

Em que $P(t)$ 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 poderão adotar a tecnologia, $Y(t)$ 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 (BASS, 1969).

A Figura 2.14 apresenta a probabilidade de adoção devido a influências externas e internas pelo modelo de Bass.

Figura 2.14 – Adoção devido a influências externas e internas



Fonte: Adaptado de (MAHAJAN; MULLER; BASS, 1990).

Para a determinação dos coeficientes de imitação e inovação são utilizados métodos estimativos. Todavia para tecnologias e inovações de grande porte, um histórico inferior a 10 anos de dados reais não é tão significativos como retratado por Figueiredo (2012) ao estudar o modelo de difusão de Bass, aplicando-o no estudo de previsão dos ciclos de difusão de marcas e modelos de motocicletas comercializadas no Brasil ao longo das últimas décadas.

O modelo de Bass se tornou um dos mais populares para previsão da difusão de novos produtos em mercados, entretanto a equação (3) é um modelo do tipo top-down, com uma abordagem de análise que leva em conta os fatores macroeconômicos, ou seja, é caracterizado por ser uma abordagem agregada e não existe preocupação com tecnologias e usos finais. Segundo Jannuzzi (2018), os modelos top-down tendem a tratar a energia como mercadoria, desconsiderando os esforços do marketing, aspectos técnicos e aspectos sociais que podem surgir no intuito de frear ou acelerar a difusão.

Logo, para incluir estes fatores de esforço do mercado no modelo, Bass introduziu na equação (3) um fator $X_{(t)}$ tornando-a conforme equação (4) e conhecida como modelo generalizado de Bass.

$$P_{(t)} = \left(p + \frac{q}{m} \cdot Y(t) \right) \cdot X_{(t)} \quad (4)$$

Em que, $X_{(t)}$ é o esforço do mercado no instante t .

Da equação (3) e/ou da equação (4), tem-se que a proporção de indivíduos no mercado que adotam o produto, $Y(t)/m$, tem um crescimento proporcional ao parâmetro q , logo, a probabilidade de adoção ($P_{(t)}$) no instante t , irá corresponder há uma parcela menor do mercado potencial final, chamando essa parcela de potenciais adotantes ($PA_{(t)}$) definida em t_0 , tem-se $PA_{(t_0)}$, e mantendo a mesma taxa de contágio q , pode-se reescrever a equação (4), conforme equação (5).

$$P_{(t)} = \left(p_{(t)} \cdot PA_{(t_0)} + \left(q_{(t)} \cdot PA_{(t_0)} \frac{Y_{(t)}}{m_{(t)}} \right) \right) \cdot X_{(t)} \quad (5)$$

Em que, $PA_{(t_0)}$ é a quantidade de potenciais adotantes no ano zero, $X_{(t)}$ representa os esforços do mercado em função do tempo agindo como um fator redutor ou acelerador, pela eficiência publicitária do grupo composto pelos inovadores e pela adoção dos imitadores caracterizados pela força da comunicação boca a boca.

Para difusão dos sistemas fotovoltaicos por exemplo, pode-se modelar $X_{(t)}$ em função de esforços econômicos, esforços técnicos e esforços regulatórios atribuindo a eles um coeficiente de peso conforme a necessidade do mercado obtém-se a equação (6).

$$X_{(t)} = (a \cdot EE_{(t)} + b \cdot ER_{(t)} + c \cdot ET_{(t)}) \quad (6)$$

Em que, $EE_{(t)}$ são esforços econômicos, $ER_{(t)}$ são os esforços regulatórios, $ET_{(t)}$ são os esforços técnicos, $a, b, e c$ são coeficientes de peso com características de *trade-off*, cujo somatório é sempre menor igual a 1, determinados ou estimados mediante análise de sensibilidade e consulta com profissionais da área. Todavia, podem ser estimados pelo método do Processo Analítico Hierárquico (*Analytic Hierarchy Process -AHP*) ou outras metodologias de análises multicritério de tomada de decisões complexas.

Substituindo a equação (6) na equação (5) tem-se a equação (7).

$$P_{(t)} = \left(p_{(t)} \cdot PA_{(t)} + \left(q_{(t-2)} \cdot PA_{(t)} \frac{Y_{(t)}}{m_{(t)}} \right) \right) \cdot (a \cdot EE_{(t)} + b \cdot ER_{(t)} + c \cdot ET_{(t)}) \quad (7)$$

Desse modo a equação (7) calcula a probabilidade de adoção da inovação fotovoltaica com uma abordagem mais detalhada, ou seja, em uma análise do tipo *bottom-up*, com casos regionalizados, desagregando os esforços do mercado em frear ou estimular uma maior propagação da projeção da difusão dos sistemas fotovoltaicos. A análise permite, perceber o fato de que a energia é uma construção social em suma não apenas técnica.

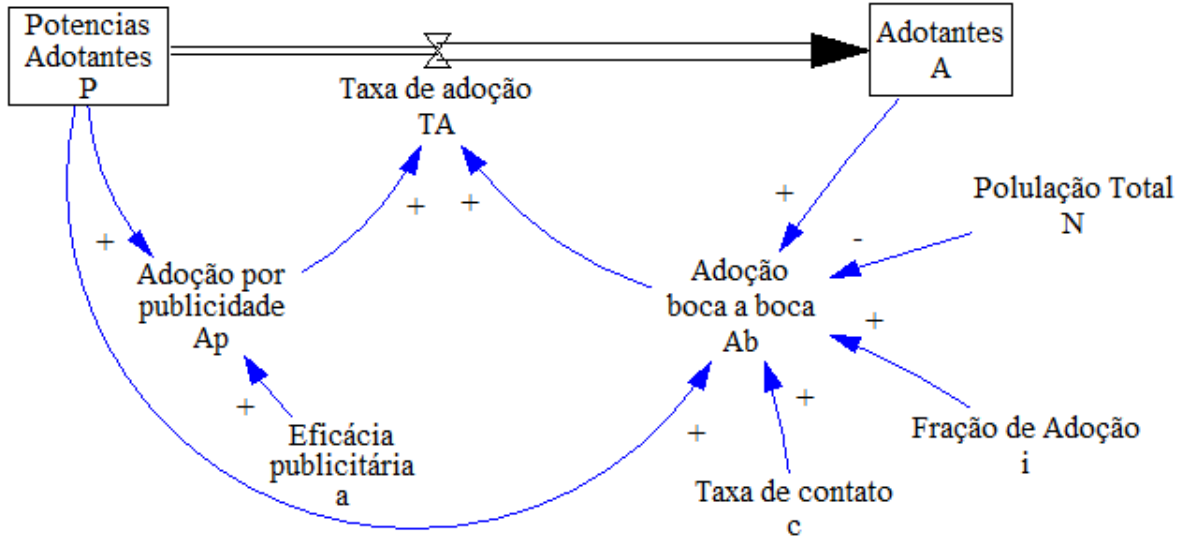
O modelo de Bass dependendo da análise articulada, permite fazer estudos menos complexos sem a necessidade de uma alta demanda de dados ao considerar apenas os coeficiente de inovação, coeficiente de imitação e o mercado potencial fixo, contudo, quando se considera a desagregação ponderando os esforços do mercado adquire-se uma maior precisão de análise para teste de diversos cenários, o que aumenta também a complexidade do modelo, logo a modelagem desse pela técnicas de DS pode ser tida como a ideal.

2.3.3.1. Modelo de Bass utilizando a Técnica de Dinâmica de Sistemas

A Figura 2.15 apresenta o modelo de Bass na forma de Dinâmica de Sistemas. Pode-se perceber que a taxa de adoção é composta pela adoção por publicidade (inovadores) e adoção

por propaganda boca a boca (imitadores). A taxa de adoção consome os Potenciais Adotantes e abastece os Adotantes.

Figura 2.15 – Modelo de Bass utilizando Dinâmica de Sistemas



Fonte: Adaptado de Sterman (2000).

Na Figura 2.15 a taxa de adoção total é a soma das adoções resultante de propaganda boca a boca e adoção por publicidade. Desse modo, a taxa de adoção é dada pela equação (8).

$$TA = Ap + Ab \quad (8)$$

Em que, TA é a taxa de adoção, Ap é adoção por publicidade, Ab é a adoção pela influência da comunicação boca a boca.

Sendo, a adoção por publicidade, dada conforme equação (9).

$$Ap = a \cdot P \quad (9)$$

Em que: a é o coeficiente da taxa de adoção pela eficácia publicitaria, P representa a parcela dos potenciais adotantes.

Onde a adoção pela propaganda boca a boca é dada conforme equação (10).

$$Ab = \frac{c \cdot i \cdot P \cdot A}{N} \quad (10)$$

Em que: c é a taxa de contato, i fração de adoção, ou seja, é a probabilidade de adoção dado um contato com o adotante, N é a quantidade da população total do sistema.

Dadas as equações (9) e (10) é reescrita a taxa de adoção é conforme equação (11).

$$TA = a \cdot P + \frac{c \cdot i \cdot P \cdot A}{N} \quad (11)$$

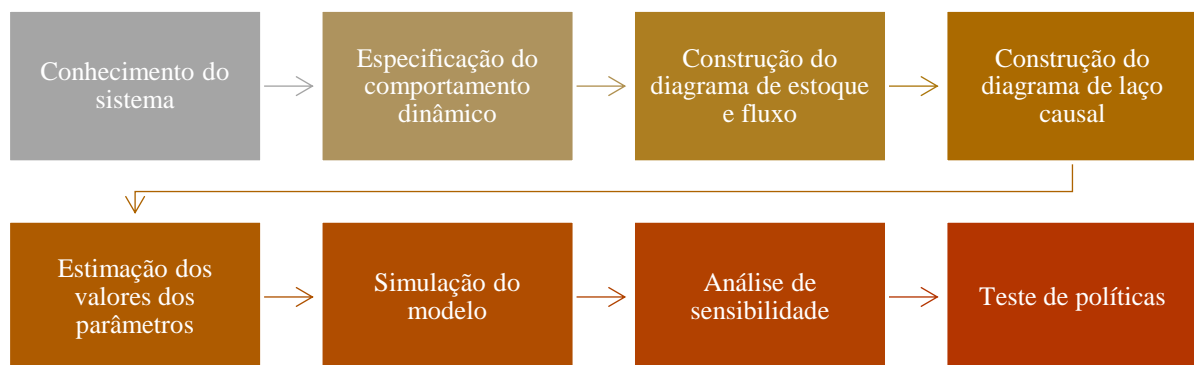
A determinação de a , c , e i é feita mediante contexto. Na seção 2.3.4 é apresentado o processo de modelagem para criar um modelo via dinâmica de sistemas.

2.3.4. O Processo de Modelagem

O processo de modelagem, construção e teste de um modelo envolve uma combinação de técnicas sendo um processo de tentativa e erro, Sterman (2000) realça que esta é a etapa mais complexa de um projeto sendo que modeladores experientes expendem mais no processo de modelagem e design que propriamente na execução.

A quantidade de passos a serem seguidos variam de autor, mas em regra geral, eles podem ser concentrados conforme abordagem da Figura 2.16, na qual contam 8 etapas para construir e testar um modelo usando a técnica de dinâmica de sistemas descritas por Andrew Ford (1999).

Figura 2.16 - Passos para a modelagem de um modelo via dinâmica de sistemas.



Fonte: Adaptado de Ford (1999).

Conforme Figura 2.16, são necessários oito passos para a modelagem via dinâmica de sistemas.

1º Passo - Conhecimento do sistema: este passo consiste na etapa fundamental de familiarização com o sistema, no intuito de obter maior conhecimento possível sobre o objetivo do modelo, identificar claramente as variáveis e palavras chaves mais importantes e fazer a delimitação do problema com os pros e contras de cada uma das variáveis delimitadas.

2º Passo - Especificação do comportamento dinâmico: esta etapa é provavelmente a mais importante no processo, em que se deve 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, o qual especifica o comportamento dinâmico em função do tempo.

3º Passo - Construção do diagrama de estoque e fluxo: esta etapa consiste na delimitação de cada tipo de variável que irá compor o modelo em que na construção dessa inicialmente deve-se definir as variáveis de estoque, após, adicionar os fluxos e, finalmente, as demais variáveis e constantes do modelo. O diagrama de estoque e fluxo deve conter a variável mostrada no modo de referência e nesta etapa também é realizada a modelagem matemática que corresponde a cada tipo de variável se é de entrada ou de saída.

4º Passo - 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.

Embora nesta modelagem sugerida por Ford (1999) a construção do diagrama de estoque e fluxo é definida primeiro e em segundo o diagrama de laço causal, esta não é uma sequência ou regra definitiva, para alguns projetistas pode ser interessante inverter esta sequência ficando a carga do modelador qual das duas etapas vêm primeiro.

5º Passo - Estimativa dos valores dos parâmetros: nesta etapa, é feita a estimativa dos valores de cada parâmetro do modelo e essas devem ser feitas 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 dependendo do sistema em estudo pode ser interessante tratar antes os dados.

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

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

8º Passo - Teste de políticas: o oitavo passo e última etapa do processo de elaboração de um modelo via DS têm a finalidade de avaliar o comportamento do sistema, variando as estimativas dos parâmetros associadas às variáveis políticas, que são as variáveis controladas pelo projetista criando cenários com diferentes políticas.

No presente trabalho é escolhida essa abordagem de 8 etapas descritas por Ford pelo detalhamento desta, entretanto em termos gerais poder-se-ia resumir a etapa de criação de modelo via DS em três principais e macro componentes: conhecimento pleno do sistema e delimitação do problema; formulação da dinâmica do sistema; e proposição de um modelo matemático para testar a dinâmica estabelecida. Com base nestes passos é formulado o modelo de difusão para projeção dos sistemas fotovoltaicos em consumidores comerciais, usando os aspectos técnicos, econômicos e regulatórios pela técnica de dinâmica de sistema e modelo de Bass.

2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O presente capítulo abordou, sobre uma breve explanação da teoria da difusão da inovação de Rogers, que foi um dos primeiros autores a explicar como uma nova inovação ou tecnologia se difunde em um meio social, sendo este o caso da difusão dos sistemas fotovoltaicos que é uma inovação da tecnologia solar para aproveitamento de geração de energia elétrica. O capítulo também apresenta as principais barreiras que os potenciais adotantes de sistemas fotovoltaicos enfrentam para adotar um sistema fotovoltaico em sua unidade consumidora. E por fim, é feita uma abordagem da teoria e modelagem do uso da técnica de dinâmica de sistemas juntamente com o modelo de Bass, que consiste em uma explicação matemática da teoria de inovações de Rogers, também é apresentado as 8 etapas utilizadas para a construção de um modelo via dinâmica de sistemas cujas etapas, serão utilizadas para a construção da metodologia do modelo proposto.

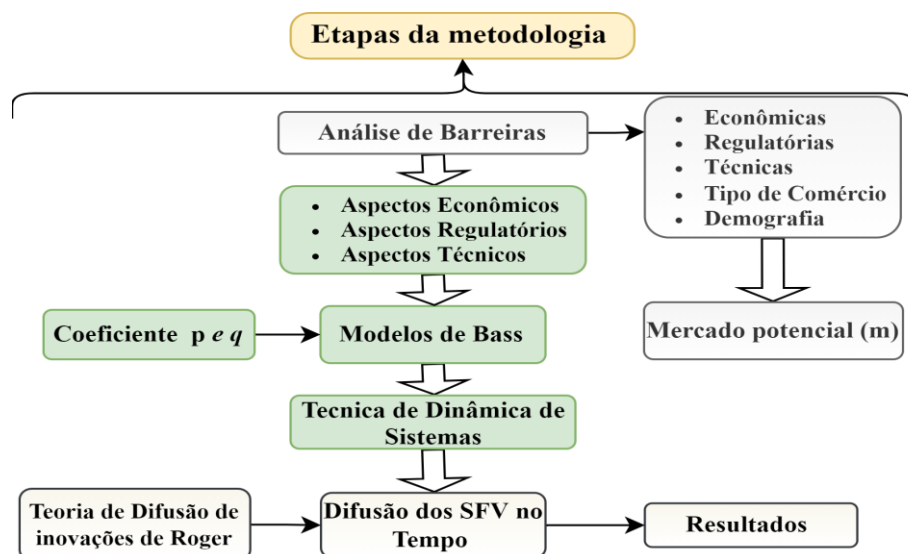
3. METODOLOGIA PROPOSTA

Para reduzir o impacto do aquecimento global e emissões atmosféricas locais e globais, o mercado de energia transita para a concordância de que se precisa urgentemente difundir a geração de energia elétrica a partir das tecnologias de fontes renováveis, principalmente a fotovoltaica (FV) como fonte de Geração Distribuída (GD), que possui a maior distribuição equitativa de aproveitamento e é apontada como a energia do futuro. Neste intuito, este capítulo apresenta uma metodologia para projeção da difusão de sistemas fotovoltaicos para consumidores comerciais do Grupo B, ou seja, consumidores atendidos pelo nível de tensão inferior a 2,3 kV. O modelo proposto, utiliza a técnica de Dinâmica de Sistemas (DS), fundamentada na teoria de difusão de inovações de Rogers, em conjunto com o modelo de Bass. O modelo avalia a propensão dos consumidores adotarem GDFV ao longo do tempo considerando três aspectos, regulatórios, econômicos e técnicos que alimentam o modelo de Bass juntamente aos coeficientes de imitação e inovação (p e q) advindos do próprio modelo de Bass, esse é modelado utilizando o software Vensim[®] da Ventana Systems.

3.1. ESTRUTURA DO MODELO E BARREIRAS

A construção do modelo proposto é esquematicamente representada na Figura 3.1, com as etapas de sua elaboração.

Figura 3.1 – Metodologia proposta para o desenvolvimento do modelo.



Fonte: do Autor.

A primeira etapa da metodologia mostrada na Figura 3.1, consiste na análise das barreiras que condicionam a decisão dos consumidores em adotar um sistema fotovoltaico, fazendo com que eles se tornem prossumidores de energia elétrica.

Para tal, são analisadas barreiras de caráter econômico, barreiras de caráter regulatório, barreiras de caráter técnico, barreiras advindas do tipo de comércio e as barreiras de origem demográfica. Todas as variáveis são analisadas em função do tempo podendo ser em cenários congelados ou não. A análise destas barreiras, permite perceber a subjetividade comportamental dos consumidores frente a inovação dos sistemas fotovoltaicos, e como isso afeta a sua decisão tornando possível a determinação do mercado potencial dessa inovação como referido no tópico 2.1.2., que trata da difusão dos sistemas fotovoltaicos, dessa revisão destacou-se as principais barreiras para difusão dos consumidores comerciais resumidas conforme Tabela 3.1 em três aspectos.

Tabela 3.1 - Principais barreiras e variáveis no processo da difusão dos sistemas fotovoltaicos.

Nº	Aspetos Regulatórios	Aspectos Técnicos	Aspectos Econômico
1	Política de incentivo <i>net metering</i>	Atratividade econômica	<i>Payback</i> descontado
2	Políticas de Baixa Tributação (PIS e COFINS)	Complexidade e, acesso a manutenção do SFV	Intenção de investimento
3	Imposto de importação	Estimativa da Tarifa do SFV durante sua vida útil	Valor Presente do sistema fotovoltaicos
4	Imposto ICMS	Melhoria da tecnologia fotovoltaica ¹¹	Valor Presente pelo uso Rede elétrica
5	Tarifa de compensação	Eficiência dos módulos	Tarifa da Rede Elétrica ¹²
6	Nova política de compensação Prevista pela ANEEL (Fio A, Fio B e outros encargos)	Vida útil do SFV	Custo do kWp em função do tempo
7	Políticas e outros programas de incentivo* ^{AT}	Demanda do estabelecimento	IRT- Índice de Reajuste Tarifário
8	Energia a compensar no sistema* ^{AT&AE}	Adoção dos SFV por outros consumidores	Financiamento para compra dos SFV
9		Falta de conhecimento	Custo de disponibilidade
10		Razão Social e/ou Preocupação Ambiental	Venda do excedente
11		Índice de desenvolvimento humano	Taxa mínima de atratividade
12		Radiação solar local	

¹¹ A Melhoria da tecnologia fotovoltaica refere-se à eficiência tecnológica.

¹² O modelo analisa a Tarifa da Rede Elétrica de forma agregada, deste modo mesmo consumidores aderentes à Tarifa Branca são modelados com o valor médio mensal em (kWh/mês).

13	Energia gerada pelo SFV
----	-------------------------

Fonte: do Autor.

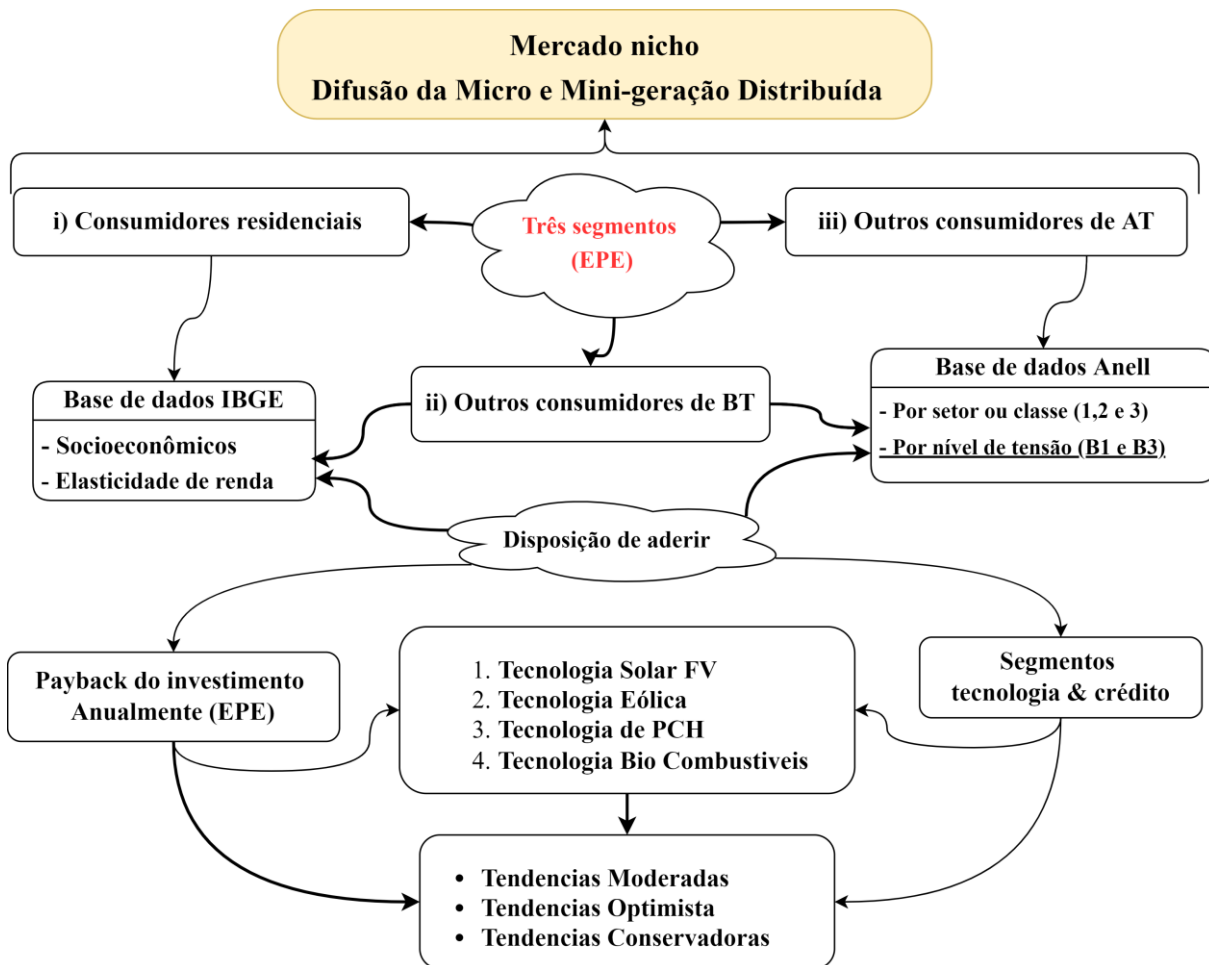
A Tabela 3.1, apresenta as barreiras referente aos três aspectos, regulatórios, técnicos e econômicos com base nestas que é feito a modelagem matemática e a interligação pela técnica de DS adicionando-as ao modelo de difusão de Bass juntamente aos coeficientes de inovação (p) e imitação (q) que em conjunto influenciarão na taxa de adoção dos sistemas fotovoltaicos.

Dando uma maior abrangência a estes critérios, por não ter uma regra definida, as variáveis supracitadas não são constantes, possuem uma retroalimentação, sendo necessárias modificações em resposta as rápidas mudanças globais.

A concepção do mercado nicho com base nas barreiras parte do princípio de que no Brasil o mercado da micro e mini geração distribuída é dividido em três principais seguimentos, diferenciados pelo mercado nicho de consumo: (i) consumidores residenciais, (ii) outros consumidores de Baixa Tensão (*BT*), e (iii) outros consumidores atendidos em Alta-Tensão (*AT*). Para o setor residencial, o mercado é levantado de acordo com características socioeconômicas dos domicílios e para as unidades consumidoras ii e iii pode ser seguido o mesmo princípio porém geralmente são levantadas através da base da ANEEL por setor e/ou por nível de tensão (EPE, 2019).

Esses fatores permitem saber a disposição de aderir, que por sua vez dependerá do *Payback* do investimento anual, seguimento tecnológico, e existência de crédito ou não, que irão reger a tendência do mercado. A representação da Figura 3.2 elucida essa interconexão para o mercado nicho.

Figura 3.2: Diagrama de representação do Mercado Nicho de GDs



Fonte: do Autor

Da Figura 3.2 os consumidores comerciais atendidos na baixa tensão estão contemplados, no item ii (outros consumidores de BT) que neste caso constitui o mercado nicho selecionado para o presente trabalho.

Para tendências futuras tal como apresentado na seção 2.2, além dos parâmetros já descritos as concessionárias deverão ter que adquirir uma vasta gama de conhecimentos técnicos relacionados às tecnologias digitais. Tais como, gerenciamento de incidentes causados pela ampla inclusão desses recursos na rede e prover respostas rápidas a demanda e contra invasores, no intuito de garantir a segurança dos dados de seus clientes. Contudo, no presente trabalho, pela baixa inserção destas tecnologias digitais seus impactos não serão aqui considerados, ficando como uma recomendação e oportunidade de trabalhos futuros.

A barreira advinda das tecnologias digitais não é considerada porque a tecnologia fotovoltaica ainda é nova no Brasil para os consumidores comerciais o que de acordo com a

literatura estudada os principais desafios podem ser atribuídos a falta ou má aplicação dos objetivos de política energética de longo prazo e mecanismos adicionais de apoio, considerando as incertezas envolvidas ao lidar com recursos energéticos distribuídos.

Assim, da Figura 3.1 foram definidas as principais barreiras que impactam a difusão dos sistemas fotovoltaicos e delimitação do mercado nicho categorizadas em três aspectos (econômicos, regulatórios e técnicos), que alimentam o modelo proposto usando a técnica de DS.

3.2. FORMULAÇÃO DO MODELO PELA TÉCNICA DE DINÂMICA DE SISTEMAS

As etapas para a elaboração de um modelo usando a DS foi apresentada no item 2.3.4 e o diagrama de blocos da Figura 2.16, apresentou a sequência dos oito passos para elaboração de um modelo com uso da DS. Neste trabalho é usada a mesma sequência de passo em conjunto com o modelo de Bass fundamentado na teoria de inovações de Rogers.

A primeira etapa da Figura 2.16 consiste no conhecimento do sistema, nesta foi feita o estudo sobre a difusão de inovações, apresentada no capítulo 2, bem como a determinação das barreiras associadas para a difusão de sistemas fotovoltaicos, as quais foram divididas em 3 aspectos, técnicos, econômico, e regulatórios, conforme apresentado na Tabela 3.1.

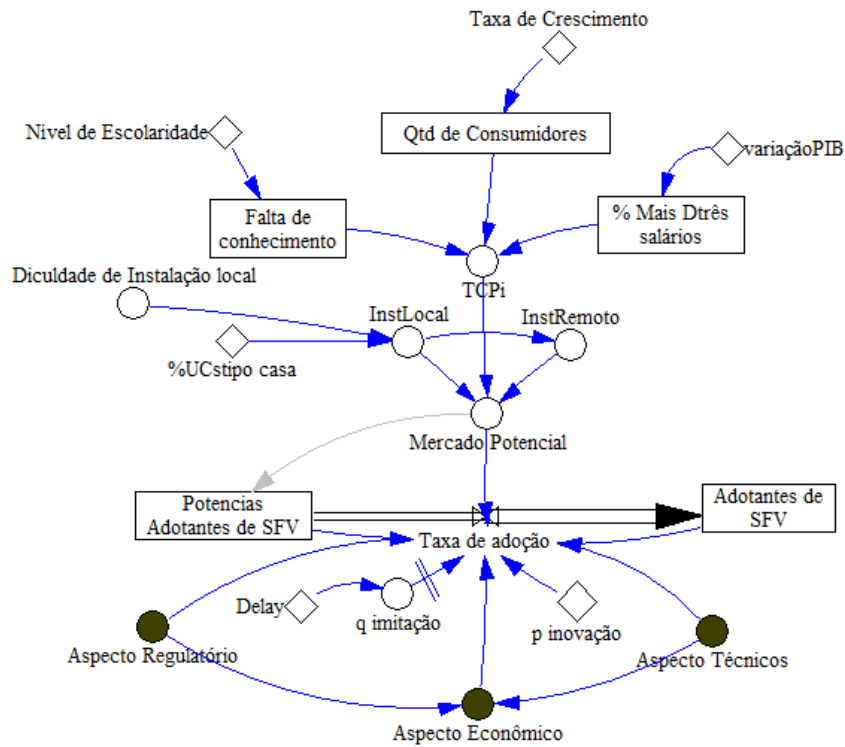
A segunda etapa consiste na especificação do comportamento dinâmico, no qual é especificado o crescimento em S por ser a difusão de uma inovação cujo comportamento, converge com a teoria de inovações de Rogers e do modelo de Bass discutido no capítulo 2.

A terceira etapa é a construção do diagrama de estoque e fluxo assim como toda a modelagem matemática do modelo proposto.

3.2.1. Diagrama de estoque e fluxo do modelo proposto

A Figura 3.3 apresenta o diagrama de estoque e fluxo da estrutura global do modelo proposto considerando os três aspectos.

Figura 3.3 – Estrutura global do diagrama de estoque e fluxo do modelo proposto.



Fonte: do Autor.

No modelo completo global da Figura 3.3 a variável “Taxa de adoção”, indica uma taxa 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 de Sistemas Fotovoltaicos”, onde os “Potenciais adotantes” são uma parcela dos Consumidores totais caracterizado como “Mercado Potencial” que é dada pelos prováveis consumidores com instalação remota e/ou local, por fim a taxa de adoção considera os aspectos “econômicos”, “regulatórios”, “técnicos”, e os coeficientes de “p inovação” e “q imitação”, o “Delay” é o tempo de atraso até o surgimento dos imitadores.

A análise dos 3 aspectos, é feita de maneira semelhante ao usado por Santos (SANTOS, 2018) em seu modelo de difusão para consumidores residenciais com cinco Aspectos, que foram variando de 0 a 1, sendo 0 a falta de políticas favoráveis ao respectivo aspecto e 1 a caracterização favorável das variáveis de entrada do aspecto, apesar da diferença no número de aspectos.

Deste modo, a taxa de adoção da quantidade de adotantes, com probabilidade de adoção ano a ano, é calculada conforme equação (12).

$$TA = p_{(t)} \cdot PA_{(t_0)} + q_{(t-t_x)} \cdot PA_{(t_0)} \cdot \frac{AD_{(t)}}{M_{(t)}} \cdot (a \cdot AE_{(t)} + b \cdot AR_{(t)} + c \cdot AT_{(t)}) \quad (12)$$

Em que TA é a “Taxa de Adoção”, $PA_{(t_0)}$ são os “Potenciais Adotantes” dos sistemas fotovoltaicos, $q_{(t-t_x)}$ é o “coeficiente de imitação” onde t_x é o *delay* que descreve o atraso de alguns anos no tempo, $AD_{(t)}$ são os “Adotantes” dos sistemas fotovoltaicos, $M_{(t)}$ é o “Mercado Potencial”, $AE_{(t)}$ é o “Aspecto Econômico”, $AR_{(t)}$ é o “Aspecto Regulatório”, $AT_{(t)}$ é o “Aspecto Técnico”.

Na equação (12) a, b, c são os “coeficientes de peso” com características de *trade-off* referentes a cada aspecto, sendo a soma destes coeficientes menor igual a 1, no modelo a vale 0,45, b vale 0,3 e c vale 0,25 que foram estimados mediante análise de sensibilidade em detrimento da opinião de profissionais da área. Todavia, conforme referido no capítulo anterior estes, podem ser terminados pelo método do Processo Analítico Hierárquico (*Analytic Hierarchy Process -AHP*) ou outras metodologias de análises multicritério de tomada de decisões complexas.

De acordo com a equação (12) e da Figura 3.3, é necessário realizar a modelagem da estimativa do mercado potencial, aspecto econômico, aspecto regulatório e aspecto técnico.

3.2.1.1. Estimativa do mercado potencial

O mercado total de potenciais consumidores comerciais é determinado pela soma da quantidade de unidades consumidoras urbanas e rurais, com diferentes taxas de crescimento. Empiricamente observa-se que a taxa do crescimento de estabelecimentos comerciais urbanos é maior que as rurais, assim sendo, pressupondo que o mercado potencial final irá depender majoritariamente da taxa de crescimento urbano optou-se pela utilização desta, descartando assim, a necessidade de separar os consumidores em urbanos e rurais.

Desse modo, o cálculo do “Mercado Potencial” final é dado pela equação (13).

$$M_{(t)} = (\alpha \cdot IL_{(t)} + \beta \cdot IR_{(t)}) * TCP_{i(t)} \quad (13)$$

Em que $IL_{(t)}$ é o percentual de unidades consumidoras com probabilidade de “instalação local”, $IR_{(t)}$ é o percentual de unidades consumidoras com a probabilidade de “Instalação

Remota” e $TCP_{i(t)}$ é o “Total de Consumidores Potenciais inicial”, α e β são coeficientes de *trade-off* com 0,75 e 0,25, respectivamente estimados conforme a disponibilidade de GD em 2021 por modalidade de instalação remota e local.

Sendo o percentual de instalações remotas dada pela equação (14).

$$IL_{(t)} = UCTC_{(t)\%} \cdot EP_{\%} \cdot D_{i(t)} \quad (14)$$

Em que $UCTC_{(t)\%}$ é o “Percentual de estabelecimento do Tipo casa”, $EP_{\%}$ é o “Percentual de estabelecimentos Próprios” e $D_{i(t)}$ é a “Dificuldade de Instalação local¹³”. A equação (14) pode ser substituída pelo percentual de estabelecimentos tipo casa e própria, multiplicado pela dificuldade de instalação local caso futuramente este valor esteja disponível em uma base de dados.

A dificuldade de instalação em função do tempo é dada conforme equação (15).

$$D_{i(t)} = 1 - D_{i(0)} \quad (15)$$

Obtido o percentual da quantidade de instalação locais, o percentual de instalação remotas é dado pela subtração do total conforme a equação (16).

$$\%IR_{(t)} = (1 - \%IL_{(t)}) \quad (16)$$

O $TCP_{i(t)}$ “Total de Consumidores Potenciais inicial” é obtido conforme equação (17).

$$TCP_{i(t)} = QtdC_{(t)} \cdot [TSm_{(t)} \cdot (1 + FC_{(t)})] \quad (17)$$

Em que $QtdC_{(t)}$ é a “Quantidade de Consumidores”, ou seja, a quantidade total de UCs pertencentes a região delimitada para pesquisa, $TSm_{(t)}$ é o percentual da população que recebe mais de 3 salários mínimos, $FC_{(t)}$ é a “falta de conhecimento”.

Sendo a quantidade de consumidores é obtida pela equação (18).

¹³ A dificuldade de instalação local é equivalente a Taxa de aprendizagem da tecnologia fotovoltaica, quando mais difundida for a tecnologia melhor será a taxa.

$$QtdC_{(t)} = QtdC_{(t_0)} + QtdC_{(t-1)} \cdot iTC \quad (18)$$

Em que iTC corresponde a taxa de crescimento das unidades consumidoras.

A quantidade de consumidores com renda superior a 3 salários mínimos em função do tempo é dada pela quantidade de consumidores com renda superior a 3 salários-mínimos no instante inicial, mais a multiplicação deste pela variação do PIB no instante atual conforme equação (19).

$$TSm_{(t)} = TSm_{(0)} + TSm_{(t-1)} \cdot iPIB_{(t)} \quad (19)$$

Em que $iPIB_{(t)}$ é a variação do PIB em função do tempo.

Sendo que, a falta de conhecimento em função do tempo, é dada pela falta de conhecimento no instante inicial menos a multiplicação deste no instante (t-dt) pela complexidade dos sistemas fotovoltaicos conforme equação (20).

$$FC_{(t)} = FC_{(t_0)} - Cp_{sfv}_{(t)} \cdot FC_{(t-dt)} \cdot N_E \quad (20)$$

Em que $Cp_{sfv}_{(t)}$ é a “complexidade de instalação dos sistemas fotovoltaicos” calculado conforme equação (21) e N_E é o “Nível de Escolaridade”.

$$Cp_{sfv}_{(t)} = \frac{AD_{(t)}}{M_{(t)}} + \frac{PA_{(t)}}{PA_{(t_0)}} - 0,3 \quad (21)$$

Onde os adotantes, e os potenciais adotantes de sistemas fotovoltaicos são obtidos pelas equações (22) e (23) respectivamente e 0,3 advém da modelagem e análise de sensibilidade do modelo.

$$AD_{(t)} = AD_{(t-dt)} + TA_{(t-dt)} \quad (22)$$

$$PA_{(t)} = M_{(0)} - TA_{(t)} \quad (23)$$

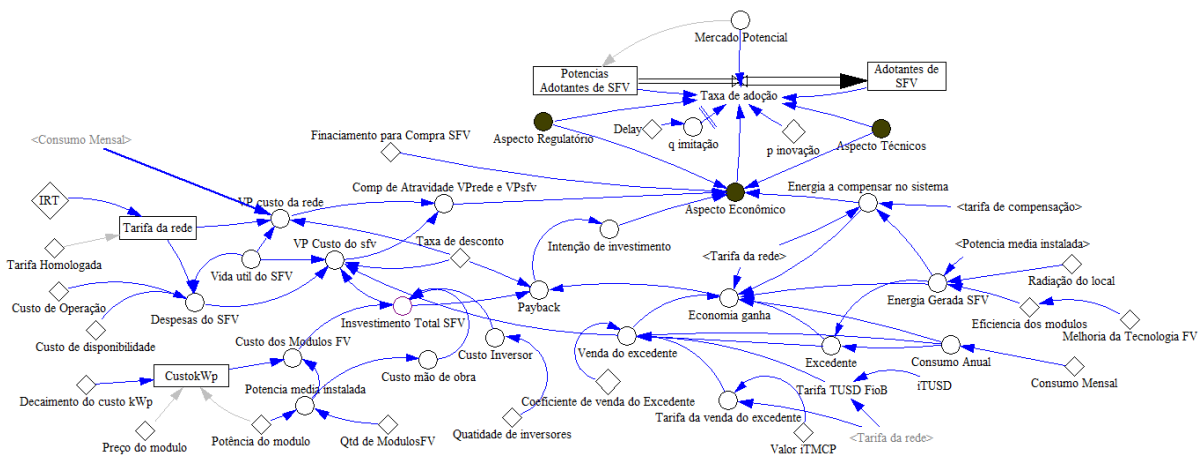
Definido os potenciais adotantes e o mercado potencial final, é modulado a formulação dos aspectos (econômico, técnico e regulatório) que em conjunto com os coeficientes de inovação e imitação determinam a parcela de potenciais adotantes que adotará a tecnologia

fotovoltaica conforme representação da estrutura global do diagrama de estoque e fluxo do modelo proposto da Figura 3.3.

3.2.1.2. Aspecto Econômico

O aspecto econômico é calculado pela soma do “financiamento” de compra de sistemas fotovoltaicos, mais o “comparador de atratividade dos SFV”, que compara o “valor presente do sistema fotovoltaico” pelo “valor presente do uso da rede” em um espaço de tempo equivalente a vida útil dos sistemas fotovoltaicos, “*payback* descontado”, “energia economizada” pelo prosumidor, mais a soma dos “aspectos regulatórios” e “técnicos”. Ao todo se destaca 6 principais variáveis de conexão direta, sendo cada uma destas composta por seus próprios parâmetros (Figura 3.4), a cada uma dessas 6 variáveis é atribuído um peso para que a soma destes, seja sempre igual a 1 conforme descreve a equação (24) e apresentado no diagrama de estoque e fluxo do aspecto econômico da Figura 3.4.

Figura 3.4 - Digrama de Estoque e Fluxo do Aspecto Econômico



Fonte: do Autor.

A Figura 3.4 apresenta o diagrama de estoque e fluxo do aspecto econômico e a equação (24) mostra a modelagem do cálculo geral do aspecto para os principais parâmetros de entrada do submodelo.

$$AE(t) = 0.2 \cdot Fi(t) + 0.2 \cdot C_{VP}(t) + 0.2 \cdot Ec(t) + 0.3 \cdot I_{pb}(t) + 0.05 \cdot AR(t) + 0.05 \cdot AT(t) \quad (24)$$

Em que $Fi_{(t)}$ é o “financiamento” para compra do sistemas fotovoltaicos, $C_{VP_{(t)}}$ é o “comparador” de atratividade entre o “VP do sistema fotovoltaico” e o “VP da rede”, $I_{pb_{(t)}}$ é a “Intenção de investimento” com base no tempo de retorno do investimento, $Ec_{(t)}$ é a energia economizada ou seja, a “Energia a compensar no sistema”.

- Financiamento para compra de sistemas fotovoltaicos:

O Financiamento para compra dos sistemas fotovoltaicos, é uma variável exógena, que depende de fatores externos, deste modo irá variar de 0 a 1, onde zero é a inexistência de financiamento e 1,0 a existência de financiamento.

- Comparador de atratividade dos SFV:

O comparador considera, o “VP do sistema fotovoltaico” que considera a “quantidade de módulos”, “Custo do inversor”, “Energia Gerada pelo modulo”, “Energia Compensada” e a “Venda de Energia Excedente” em cenários de teste; o “VP da rede” que considera, “Consumo do Estabelecimentos”, “Tarifa da companhia”, e “Tempo de Vida útil do SFV”; sendo este calculado conforme equação (25).

$$C_{VP_{(t)}} = se \left(-1 \cdot \frac{VP_{sfv_{(t)}} - VP_{rede_{(t)}}}{VP_{rede_{(t)}}} \right) \leq 0,0 \text{ senão, } \left(-1 \cdot \frac{VP_{sfv_{(t)}} - VP_{rede_{(t)}}}{VP_{rede_{(t)}}} \right) \quad (25)$$

Em que $VP_{sfv_{(t)}}$ é o “Valor presente do Sistema Fotovoltaico”, $VP_{rede_{(t)}}$ é o “Valor presente da tarifa da concessionária” em um período de 25 anos, que é o tempo estimado para um SFV.

Sendo o valor presente do Sistema Fotovoltaico determinado com base na equação (26).

$$VP_{sfv_{(t)}} = \frac{\left(IT_{sfv_{(t)}} + D_{sfv_{(t)}} + Vex_{(t)} \cdot Vutil_{sfv} \right)}{(1 + TMA)^{Vutil_{sfv}}} \quad (26)$$

Em que $IT_{sfv_{(t)}}$ é o “Investimento Total da instalação” do SFV, $D_{sfv_{(t)}}$ são “Despesas” com manutenção, operação e o pagamento de disponibilidade por conexão à rede da companhia de distribuição de energia elétrica, $Vex_{(t)}$ é o “Valor da venda de energia excedente”, $Vutil_{sfv}$ é o “tempo de vida útil dos SFV” e TMA é “taxa mínima de atratividade”.

Sendo o investimento total de instalação do sistema fotovoltaico, igual a soma do custo dos módulos fotovoltaicos, custo dos inversores, e o custo de instalação conforme equação (27).

$$IT_{sfv(t)} = C_{ModuloFV(t)} + C_{Inversor(t)} + C_{Instalação(t)} \quad (27)$$

Em que $C_{ModuloFV(t)}$ é o “Custo dos módulos fotovoltaicos”, $C_{Inversor(t)}$ é o “custo dos inversores” e $C_{Instalação(t)}$ é o “custo de instalação” do SFV.

Sendo o custo dos módulos fotovoltaicos calculado conforme equação (28).

$$C_{ModuloFV(t)} = CkWp(t) \cdot P_{MI(t)} \quad (28)$$

Em que $CkWp(t)$ é o “custo do quilowatt pico”, $P_{MI(t)}$ é a “potência média instalada” calculados conforme equação (29) e equação (30).

$$CkWp(t) = \frac{Prm_{(t_0)}}{Pm_{(0)}(kWp)} - (DkWp(t) \cdot CkWp_{(t-1)}) \quad (29)$$

$$P_{MI(t)} = Qtd_{modulos} \cdot Pm_{(0)}(kWp) \quad (30)$$

Em que $Prm_{(t_0)}$ é preço do módulo fotovoltaico, $Pm_{(0)}(kWp)$ é a “potência nominal do módulo”, $DkWp(t)$ é o “decaimento do custo do kWp” em função do tempo, $Qtd_{modulos}$ é a quantidade de módulos instalado.

O custo do inversor é dado pelo preço nominal por kWp, multiplicado pela quantidade de inversores, mais o valor nominal do inversor multiplicado pela troca do mesmo no ano n conforme equação (31).

$$C_{Inversor(t)} = P_{Inversor} \cdot (Qtd_{Inversores(kWp)} + TI_{(t=n)}) \quad (31)$$

Em que $P_{Inversor}$ é o “preço nominal de um inversor”, $TI_{(t=n)}$ é o “Preço pela troca de inversor” em um determinado ano n.

O custo de instalação ou custo de mão de obra é dado pelo Custo Base, de instalação de um kWp multiplicado pela potência média para instalar.

$$C_{Instalação(t)} = C_{base} \cdot P_{MI(t)} \quad (32)$$

Em que C_{base} é o “Custo Nominal de Instalação”, $P_{MI(t)}$ é a “potência média a instalar em kWp”.

As despesas do sistema fotovoltaicos são calculadas conforme equação (33) e este correspondem as despesas totais de uso do sistema fotovoltaico ao longo de toda a sua vida útil.

$$D_{sfv(t)} = (C_{Rede} \cdot 12 \cdot T_{Rede(t)} + C\&Op) \cdot Vutil_{sfv} \quad (33)$$

Em que C_{Rede} é o “custo de disponibilidade” em kWh/mês, $C\&Op$ é o “custo de manutenção e operação anual”, $T_{Rede(t)}$ é a “tarifa de energia” e $Vutil_{sfv}$ é o “Tempo de vida útil do sistema fotovoltaico”.

Sendo a variável tarifa de energia calculada conforme equação (34).

$$T_{rede(t)} = \frac{T_{base(0)}}{1 - (ICMS + PIS + COFINS)} + T_{rede(t-dt)} \cdot IRT \quad (34)$$

Em que $T_{base(0)}$ é a “Tarifa Homologada pela ANEEL” sem os impostos”, IRT é o “Índice de Reajuste Tarifário” que corresponde a correção da tarifa em função do tempo.

A venda de excedente da energia gerada é calculada conforme equação (37).

$$Vex_{(t)} = \{Ex_{(t)} \cdot C_{Anual} \cdot (T_{VEx} - T_{TUSD})\} \cdot FR \quad (35)$$

Em que $Ex_{(t)}$ é o “percentagem de energia excedente gerada”, C_{Anual} é a “Consumo Anual de Energia”, T_{VEx} é o valor da “tarifa de energia elétrica” baseando no Preço de Liquidação Diferenças (PLD), T_{TUSD} é a “Tarifa de energia passa pela TUSD” Fio A, Fio B ou ambas, FR é o “Coeficiente de venda do Excedente” sendo 1 para venda de excedente e 0 para não.

Sendo a variável excedente calculada conforme equação (36).

$$Vex_{(t)} = \left(\frac{Eg_{(t)} - C_{Anual}}{C_{Anual}} \right) \quad (36)$$

Em que $Eg_{(t)}$ é a “Energia Gerada” anualmente pelo SFV, calculada pela equação (37).

$$Eg_{(t)} = P_{MI_{(t)}} \cdot E_{f_{(t)}} \cdot R_{(t)} \cdot 365 \quad (37)$$

Em que $E_{f_{(t)}}$ é a “Eficiência do módulo fotovoltaico”, e $R_{(t)}$ são os recursos solares em kWh/m²/dia, multiplicado pela quantidade de dias anuais.

O valor presente da rede, que corresponde ao valor total gasto pelo consumidor caso este permaneça na rede é calculado pela equação (38).

$$VP_{rede_{(t)}} = \frac{(D_{(t)} \cdot 12) \cdot T_{rede_{(t)}}}{(1 + TMA)^{Vutil_{sfv}}} \cdot Vutil_{sfv} \quad (38)$$

Em que $D_{(t)}$ é a “demanda mensal” em kWh.

- O Energia a compensar no sistema:

A energia a compensar é dada pela equação (39) e pela equação (40).

$$Ec_{(t)} = T_{rede_{(t)}} \cdot \left\{ \frac{Eg_{(t)} \cdot (1 - Fa)}{Eg_{(t)}} \right\} \cdot Tc_{(t)} \quad (39)$$

$$Tc_{(t)} = Net_{m_{(t)}} - \frac{TUSD + FioA + FioB + D_{encardos}}{T_{rede_{(t)}}} \quad (40)$$

Em que Fa é o “fator de perda de aproveitamento dos sistemas fotovoltaicos, $Tc_{(t)}$ é a “tarifa de compensação” em porcentagem do valor a compensar e $Net_{m_{(t)}}$ é “modelo de compensação *Net Metering*”.

- Intenção de investimento:

A intenção de investimento que calcula o percentual de mercado disposto a investir com base no valor do *payback* é dado conforme equação (41).

$$I_{pb_{(t)}} = e^{-SBP \cdot Payback_{(t)}} \quad (41)$$

Em que SBP é a “sensibilidade ao *payback*”, $Payback_{(t)}$ é o “tempo de retorno do investimento” calculado conforme equação (42).

$$Payback_{(t)} = - \frac{\ln \left\{ 1 - \frac{IT_{sfv_{(t)}} \cdot TMA}{Eganho_{(t)}} \right\}}{\ln \{ 1 + TMA \}} \quad (42)$$

Em que $IT_{sfv(t)}$ “Preço de instalação do sistema fotovoltaico”, TMA é a “taxa mínima de atratividade do investimento”, $Eganho_{(t)}$ é o “Ganho pela instalação de sistemas fotovoltaicos” que reflete o custo economizado pela instalação de SFV calculado pela equação (43).

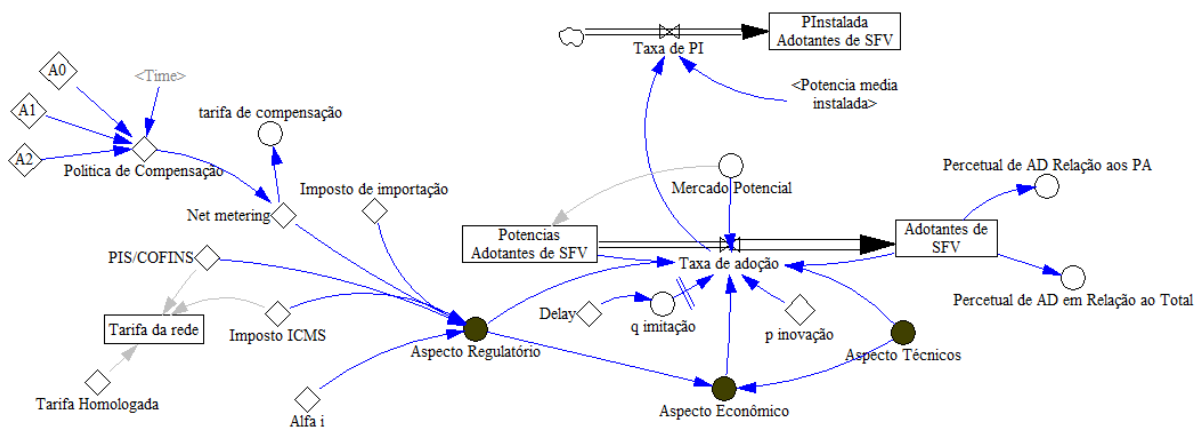
$$Eganho_{(t)} = Ec_{(t)} \cdot T_{rede(t)} \cdot (Eg_{(t)} - Ex_{(t)} \cdot C_{Anual}) + Vex_{(t)} \quad (43)$$

Deste modo, apresentas as equações das variáveis inerentes ao aspecto econômico são satisfeitas as condições para o cálculo da equação (24) restando a determinação dos aspectos regulatórios e técnicos.

3.2.1.3. Aspecto regulatório

O Aspecto Regulatório é determinado pela Tarifas ou política de incentivo “*Net Metering*” na qual intrinsecamente inclui as questões ambientais, Políticas de juros baixos na importação de sistemas fotovoltaicos e pelos tributos municipais e federais (PIS/COFINS e ICMS). A Figura 3.5 apresenta a estrutura do diagrama de estoque e Fluxo do aspecto regulatório.

Figura 3.5- Diagrama de estoque e fluxo do aspecto Regulatório



Fonte: do Autor

Sendo o aspecto regulatório calculado conforme equação (44).

$$AR_{(t)} = Net_{m(t)} \cdot 0.4 + (1 - I_p) \cdot 0.3 + [1 - (PIS + COFINS + ICMS)] \cdot 0.3 \quad (44)$$

Em que I_p é o “Imposto de importação”. A equação (45) calcula a modalidade de compensação *Net Metering* e $Tc_{(t-1)}$ é uma simplificação para a representação da mudança de regulamentação prevista pela ANEEL com a cobrança do (Fio A, Fio B e outros encargos).

$$Net_{m(t)} = Net_{m(0)} \cdot Tc_{(t-1)} \quad (45)$$

No modelo para simplicidade $Tc_{(t-1)}$ é chamada de Política de Compensação e ficando a cargo do modelador, porém como configuração base o modelo é desenhado com as alternativas A0 que corresponde ao modelo de compensação atual de 1 para 1, e na alternativa A1 caso seja implementada, a compensação seria de 1 para 0,72 e na alternativa A2 caso implementada, a compensação é de 1 para 0,6 conforme equação (46).

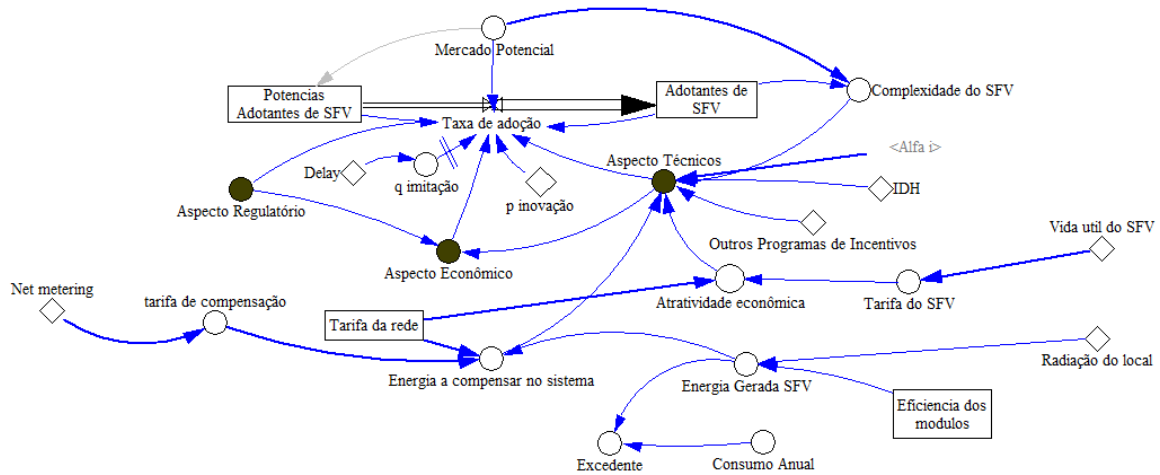
$$\begin{aligned} Tc_{(t-1)} = SE\{t < A0 + 1, 1, \\ SE[t \geq A0 + 1: \&t < A1 + 1, 0.72, \\ SE(t \geq A0 + 1: \&t \geq A1 + 1: \&t \leq A2 + 1, 0.6, 0)]\} \end{aligned} \quad (46)$$

As variáveis da Figura 3.5 do digrama de estoque fluxo exercem uma forte influência ao aspecto técnico ao garantir políticas solidas, a adição da variável “PI instalada Adotantes de SFV” (potência instalada dos adotantes de sistemas fotovoltaicos) e “Percentual de AD Relação aos PA” (Percentual de adotantes de SFV em relação aos PA) é adicionada ao submodelo pelo fato de que na prática certas políticas estão diretamente atreladas com o objetivo de atingir uma certa quantidade de adotantes ou potência instalada até a introdução de outra fase, o que influência decisivamente na avaliação do aspecto técnico.

3.2.1.4. Aspecto técnico

O Aspecto Técnico depende da qualidade dos sistemas fotovoltaicos que indiretamente está atrelada a “Eficiência dos Módulos fotovoltaicos”, “Energia do sistema fotovoltaico”, durabilidade ou “Tempo de vida útil do sistema fotovoltaico”, Exigência de manutenção associada a “Complexidade dos sistemas fotovoltaicos”, 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 microcrédito que afetam diretamente a “atratividade econômica“. A Figura 3.6 apresenta o digrama de estoque e fluxo aspecto técnico.

Figura 3.6 - Diagrama de Estoque e Fluxo do modelo aspecto técnico.



Fonte: do Autor.

Da Figura 3.6 a equação (47) modela a formulação do cálculo do aspecto técnico que é composta pela atratividade econômica, energia compensada, comparador de atratividade econômica, outros programas de incentivo, e pelo índice de desenvolvimento humano.

$$AT_{(t)} = 0.3 \cdot A_{Econ} + 0.2 \cdot Ec_{(t)} + 0.2 \cdot Cp_{sfv_{(t)}} + 0.2 \cdot OP_I + 0.1 \cdot IDH \quad (47)$$

Em que A_{Econ} é a “Atratividade econômica” entre a Tarifas do kWh do SFV instalado frente ao kWh da tarifa praticada pela distribuidora considerando um mesmo espaço de tempo com o sistema fotovoltaico, OP_I são “Outros programas de incentivos”, IDH é o “índice desenvolvimento humano”

Sendo a atratividade econômica calculada pela equação (48).

$$A_{Econ} = se \left\{ - \left(\frac{T_{sfv_{(t)}} - T_{rede_{(t)}}}{T_{rede_{(t)}}} \right) \leq 0, 0, \text{senão, } - \left(\frac{T_{sfv_{(t)}} - T_{rede_{(t)}}}{T_{rede_{(t)}}} \right) + 0,1 \right\} \quad (48)$$

Em que $T_{sfv_{(t)}}$ é a “Tarifa do SFV”, calculado conforme equação (49).

$$T_{sfv_{(t)}} = \frac{VP_{sfv_{(t)}}}{Eg_{(t)} \cdot Vutil_{sfv}} \quad (49)$$

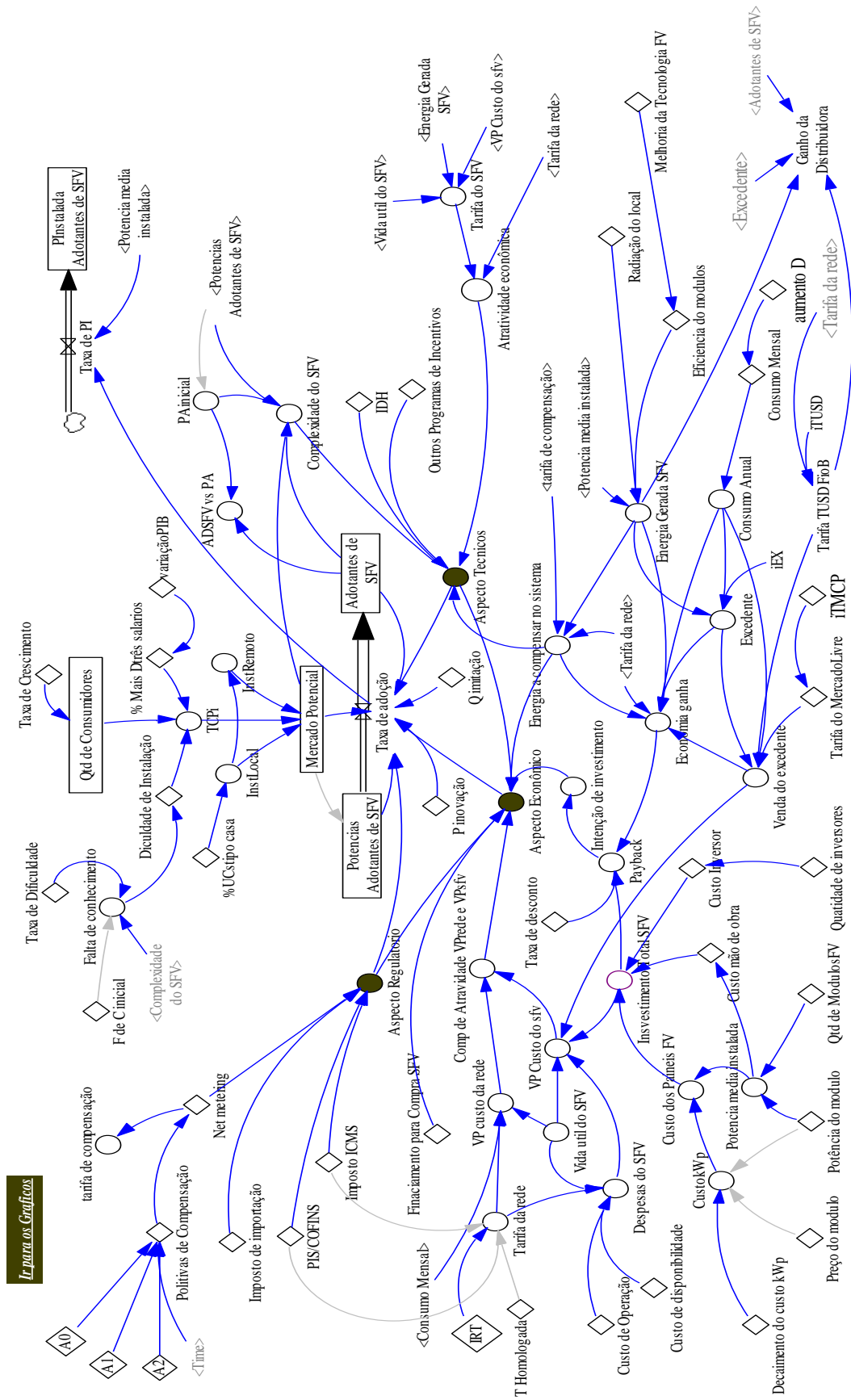
Da modelagem e formulação matemática de estimativa do mercado potencial e dos três aspectos (econômico, regulatório e técnico) é feita a junção destes submodelos para compor o modelo completo proposto.

3.2.1.5. Modelo completo

O modelo completo é delineado partindo da equação (12) e conforme apresentação da Figura 3.3, esse é desenhado e de modo geral concerne, na descrição e abertura das variáveis e/ou premissas que delimitam o cálculo da estimativa do mercado potencial, e dos 3 aspectos.

Na Figura 3.7 é apresentado o Modelo Completo Expandido, onde os círculos denotam as variáveis do tipo auxiliar que compõem a maioria das variáveis de saída do modelo, sendo estas geralmente variáveis do tipo endógenas mudando em função do tempo. Já os retângulos em forma de diamantes são as variáveis do tipo constante, que caracterizam as variáveis de entrada para alimentação do modelo, elas podem ser endógenas ou exógenas, porém, apenas uma minoria é endógena como é o caso do parâmetro de imitação. Vale ressaltar é com a alteração das variáveis de entrada que são criados os possíveis cenários de recomendação para os tomadores de decisão, por fim tem-se os retângulos e os *Rate* (Fluxo da taxa de entrada e saída) definidos na seção 2.3.2.

Figura 3.7 - Modelo Completo Expandido



Fonte: do Autor.

O modelo completo também estima a taxa da potência média instalada pelos adotantes e a potência acumulada determinada conforme equação (50) e equação (51) respectivamente.

$$iPI_{(t)} = TA \cdot \frac{PMI_{(t)}}{1000} \cdot 2,5 \quad (50)$$

$$PI_{(t)} = PI_{(t-1)} + iPI_{(t-1)} \quad (51)$$

Em que $iPI_{(t)}$ é a “Taxa da potência instalada” e $PI_{(t)}$ é a “Potência Instalada” pelos adotantes de SFV.

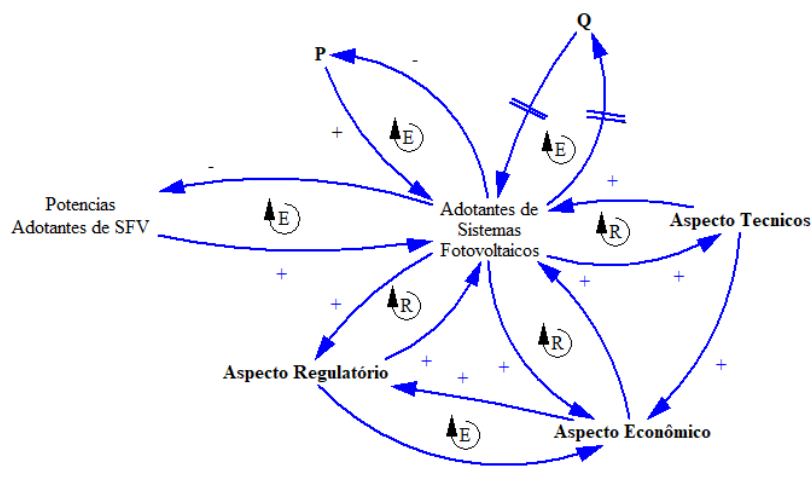
Realizada a etapa 3 de construção dos diagramas de fluxo e estoque a próxima etapa, e 4ª etapa para elaboração de um modelo via DS é a construção do diagrama de laço causal conforme apresentado na Figura 2.16.

3.2.2. Diagrama de laço causal do modelo proposto

O diagrama de laços causal é construído pela relação de todas as variáveis do modelo para mostrar de forma implícita a relação de causa e efeito entre elas ao estabelecer as hipóteses causais pela interdependência delas.

A Figura 3.8 apresenta o macro diagrama de laço causal do modelo essa é uma captura global da estrutura do sistema na qual, os aspectos irão caracterizar o comportamento do sistema especificando a existência de problemas ou não gerando eventos causais aos adotantes de SFV. E nessa é possível perceber que que a estrutura do sistema gerida pelos diferentes aspectos irá condicionar o comportamento do sistema gerando diferentes taxa de adoção dos SFV.

Figura 3.8 - Macro diagrama de laço causal do modelo global (com os três aspectos)

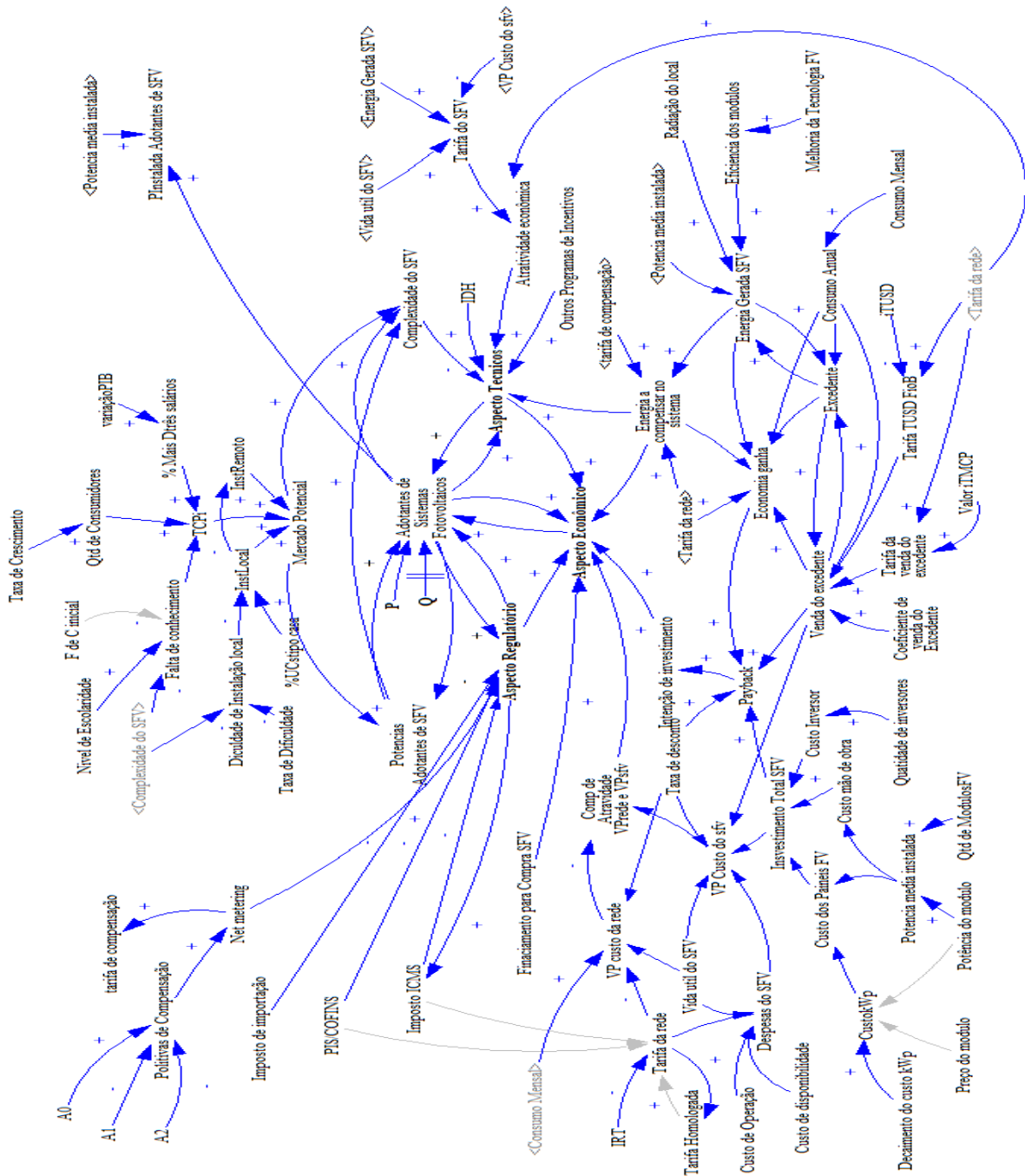


Na Figura 3.8, a variável central são os “Adotantes de sistemas fotovoltaicos”. Verifica-se a contribuição dos “Aspectos Econômicos”, “Aspectos Técnicos”, “Aspectos Regulatórios”, e “Potenciais Adotantes”. Todas essas variáveis apresentam uma contribuição positiva para os “Adotantes de sistemas fotovoltaicos”. A realimentação negativa do diagrama se dá pelos “Potenciais adotantes”, dado que com o aumento dos “Adotantes de sistemas fotovoltaicos” se diminui os “Potenciais adotantes” que conseqüentemente diminui os “Adotantes de sistemas fotovoltaicos”. Os “Adotantes de sistemas fotovoltaicos” tem uma influência positiva em relação a cada um dos aspectos.

Na Figura 3.9 é apresentado o diagrama de laço causal do modelo completo, com todos os seus laços e variáveis.

Após a elaboração dos diagramas de estoque e fluxo e do diagrama de laço causal é extraído as variáveis ou métricas que alimentam o modelo as variáveis de entradas.

Figura 3.9 - Diagrama de laço causal do modelo completo



Fonte: do Autor

3.3. CRITÉRIOS E MÉTRICAS APLICADOS NA DETERMINAÇÃO DAS PREMISSAS

3.3.1. Parâmetros de entrada do modelo

As variáveis de entrada caracterizam os parâmetros ou premissas necessárias para rodar o modelo, o planejador e/ou agente operador precisa determiná-las previamente para então

executar a simulação. Para simplificação, essas estão representadas ou divididas de acordo com o mercado potencial, os 3 aspectos e coeficientes do modelo de Bass descritos conforme a Tabela 3.2, onde a primeira coluna tem a descrição do parâmetro e a segunda coluna a variável inerente ao parâmetro o qual a variável exerce influência direta.

Tabela 3.2 - Variáveis de Entrada do modelo

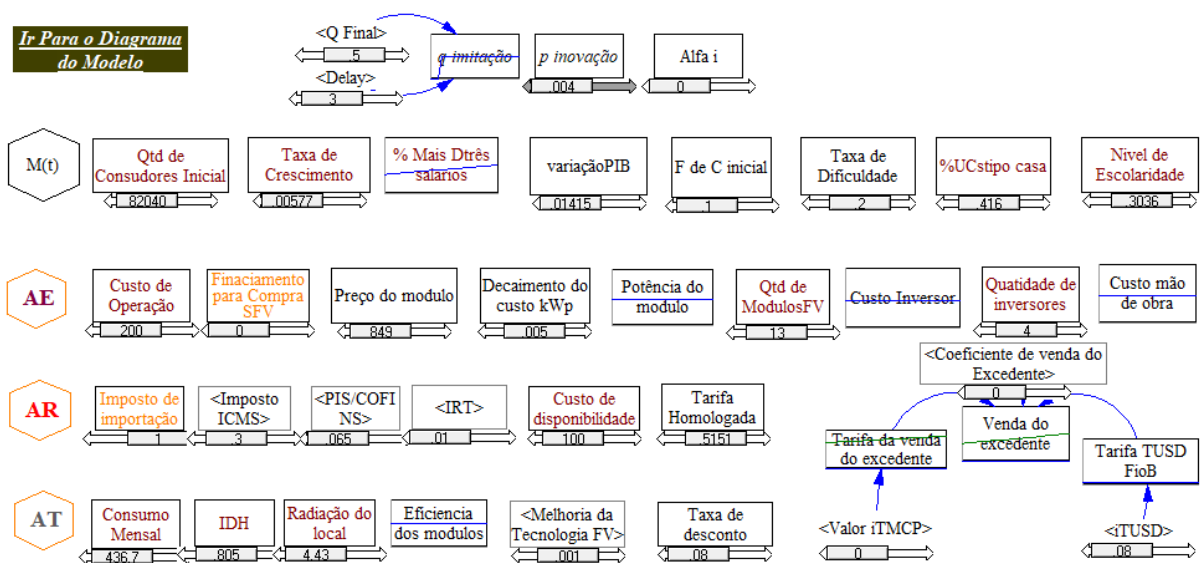
id	Parâmetros Gerais	Variável
1	Número de Cidades	Mercado Potencial
2	Quantidade de Consumidores (Dmnl)	
3	Taxa de Crescimento de UCs (%)	
4	UCs com Mais de três salários mínimos (%)	
5	Variação do PIB (%)	
6	Falta de Conhecimento inicial (%)	
7	Nível de escolaridade (Dmnl)	
8	Dificuldade de instalação (%)	
9	UCs tipo Casa & Própria (%)	
10	Tarifa Homologada (R\$/kWh)	AE
11	Índice de Reajuste Tarifário (IRT) (%)	
12	Financiamento para compra SFV (%)	
13	Preço do módulo FV (R\$)	
14	Decaimento do custo kWp (%)	
15	Potência do módulo (kWp)	
16	Quantidade de módulos (Dmnl)	
17	Custo nominal do Inversor (R\$/kWp)	
18	Quantidade de Inversores (Dmnl)	
19	Custo da Mão de Obra (R\$/kWp)	
20	TMA (%)	
21	Custo de Operação (R\$/Ano)	AR
22	Custo de Disponibilidade (kWh)	
23	Tarifa da venda do excedente (R\$/kWh)	
24	Políticas de compensação (%)	
25	Impostos de importação (%)	
26	ICMS (%)	
27	PIS/COFINS (%)	AT
28	Outros Programas de incentivo	
29	Demanda (kWh/mês)	
30	Índice de Desenvolvimento Humano (IDH)	
31	Radiação do local (kWh/m ² /dia)	
32	Vida útil do sistema (Anos)	
33	Eficiência do modulo fotovoltaico (%)	
34	Melhoria da Tecnologia FV (% / Ano)	Do Modelo de Bass
35	<i>Delay</i>	
36	Coeficiente de inovação (p)	
37	Coeficiente de imitação (q)	

Fonte: do Autor.

Na Tabela 3.2 é possível identificar todos os parâmetros de entradas que serão necessários para rodar o modelo. É possível verificar que parte dessas variáveis são subjetivas a análise do planejador, o que permite fazer simulação de diferentes cenários alternando as mesmas, e sugere a possível metodologia de obtenção destes dados, auxiliando assim, a estimação prévia de todas as variáveis especificadas.

A Figura 3.10 apresenta uma visão prévia de como é a representação destes parâmetros ao rodar o modelo no software Vensim, conforme a Figura 3.7, nesta vê-se que cada uma das variáveis tem um número associado ou gráfico, que corresponde ao valor atual do parâmetro no primeiro ano. Vale lembrar que essas variáveis estão interligadas entre si no modelo completo pela técnica de dinâmica de sistemas, logo sua saída tem uma variação em função do tempo.

Figura 3.10: Variáveis de Entrada Vistas no Software Vensim



Fonte: do Autor.

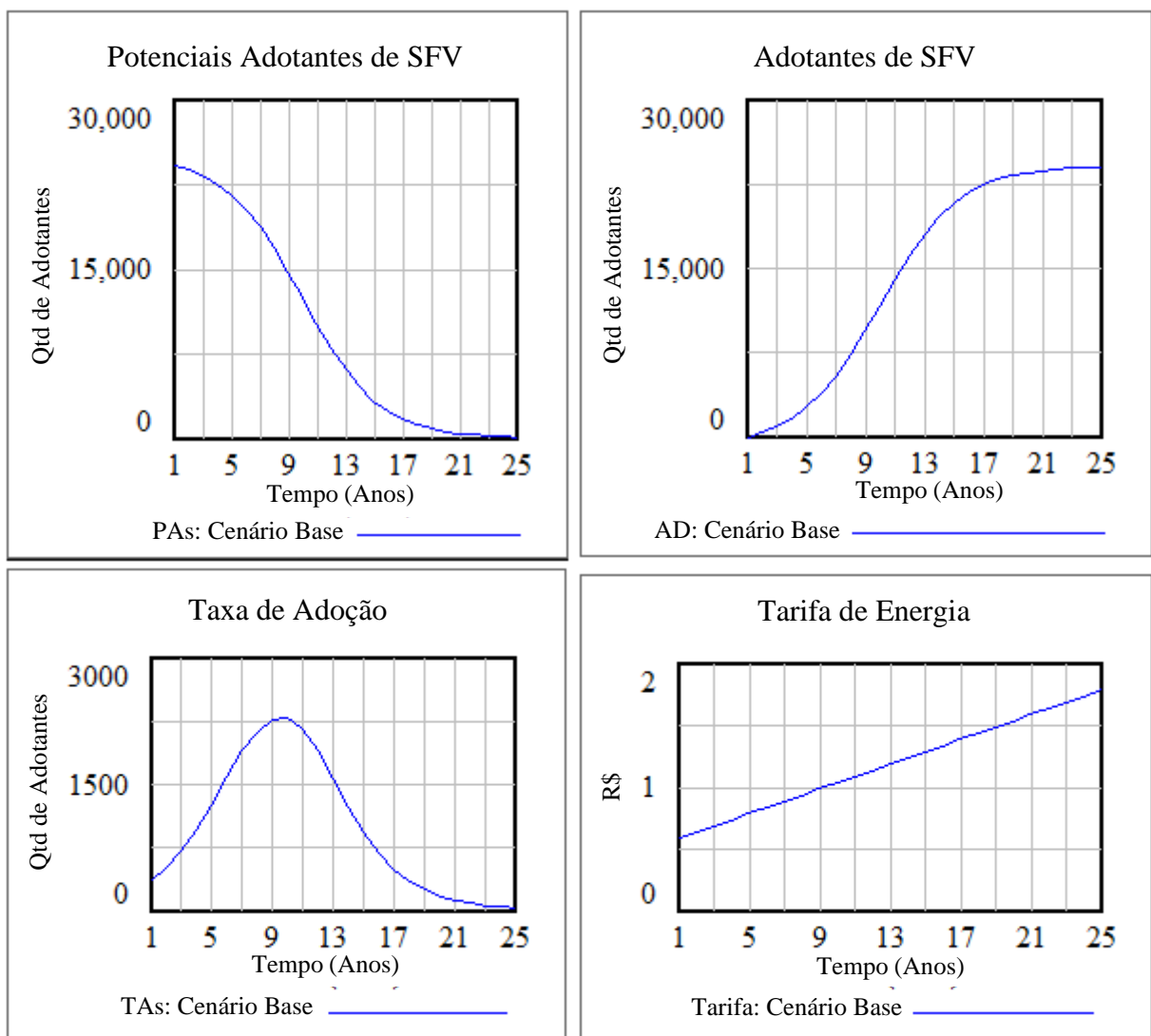
Por fim, como variáveis de entrada do modelo de Bass, tem-se os coeficientes de imitação (q) e inovação (p), onde o coeficiente de inovação que representa a parcela da população inovadora será sempre inferior, devido as influências externas e internas.

A variação de cada um dos parâmetros de entrada irá produzir uma alteração as variáveis de saída, que representam os resultados do modelo após a introdução dos parâmetros conforme a necessidade da simulação.

3.3.2. Parâmetros de saída do modelo

Usando o software Vensim® e entrando com valores hipotéticos, para determinação das variáveis de saídas do modelo completo, obteve-se os resultados da Figura 3.11 como uma representação ideal de crescimento de uma curva em S para os adotantes e uma curva em forma de sino para a taxa de adoção e a quantidade de potenciais adotantes decai proporcionalmente a quantidade de adotantes.

Figura 3.11: Variáveis de saída do modelo vistas no Software Vensim.



Fonte: do Autor.

Da Figura 3.11, “Tempo (Anos)” é o tempo da simulação em unidade de ano, e “Qtd de Adotantes” representa unidades numéricas normalmente adimensionais que podem ser substituídos por uma sigla a desejo do modelador “Cenário Base” representa a simulação do

atual que também pode ser substituída ou adicionada de outros. A versão do software Vensim utilizada não dispõem de tradução em português para as unidades básicas inerentes ao sistema como o padrão do software.

O objetivo do trabalho é a criação do modelo de difusão dos SFV ou o estudo de implementação de novas políticas de incentivo a geração fotovoltaica. Neste intuito a quantidade de adotantes, a taxa de adoção e a variação da tarifa de energia da Figura 3.11, são tidas como as principais variáveis de saída do modelo. Todavia, conforme representação desta, todas as variáveis do modelo completo, Figura 3.7, podem ser analisadas, mediante a necessidade do planejador.

O modelo completo da Figura 3.7 desenvolvido é composto por dois leiautes, o primeiro contempla a visão geral da Figura 3.10 e da Figura 3.11 embora apresentadas como duas figuras distintas essas estão no mesmo leiaute, representando as variáveis de entrada e os gráfico das variáveis de saída, o segundo leiaute é composto pelo diagrama de estoque fluxo conforme apresentado no modelo da Figura 3.7. A divisão é feita para dar um melhor entendimento e praticidade de uso ao analisar cenários.

3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O capítulo apresenta a descrição da metodologia utilizada para construção do modelo proposto, e nela são expostas todas as etapas assim como a forma de obtenção das premissas utilizadas, cumprindo o objetivo principal do trabalho de criar um modelo de projeção da difusão da Geração Distribuída fotovoltaica para micro consumidores comerciais conectados à rede de baixa tensão, via dinâmica de sistemas e modelo de Bass considerando os aspectos técnicos, econômicos e regulatórios. Possibilitando deste modo a realização da próxima etapa que é a simulação do modelo.

4. DESENVOLVIMENTO PRÁTICO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo é apresentada a aplicação prática, e a execução da etapa 5 estimativas dos valores dos parâmetros, etapa 6 simulações do modelo no Software Vensim®, etapa 7 análises de sensibilidade e a etapa 8 testes de políticas para avaliar o comportamento do sistema, conforme apresentado na seção 2 e segundo especificação da Figura 2.16 que mostra as etapas para elaboração de um modelo via DS.

4.1. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Para contextualizar e validar o modelo proposto, apresentado na Figura 3.7, é realizado inicialmente um estudo de caso no estado do Rio Grande do Sul, Brasil, na região de concessão da atual Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica (CEEE-D) Equatorial Energia, que atende 72 municípios do estado. A projeção é feita para os consumidores comerciais do Grupo B. Dos 72 municípios, o número foi reduzido selecionando os municípios estrategicamente mediante localização e que possuíam acima de 20 consumidores comerciais (urbanos e rurais) do Grupo B com SFV até o primeiro semestre de 2021, o que resultou em 12 cidades apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Quantidade de consumidores comercial do grupo B da região selecionada.

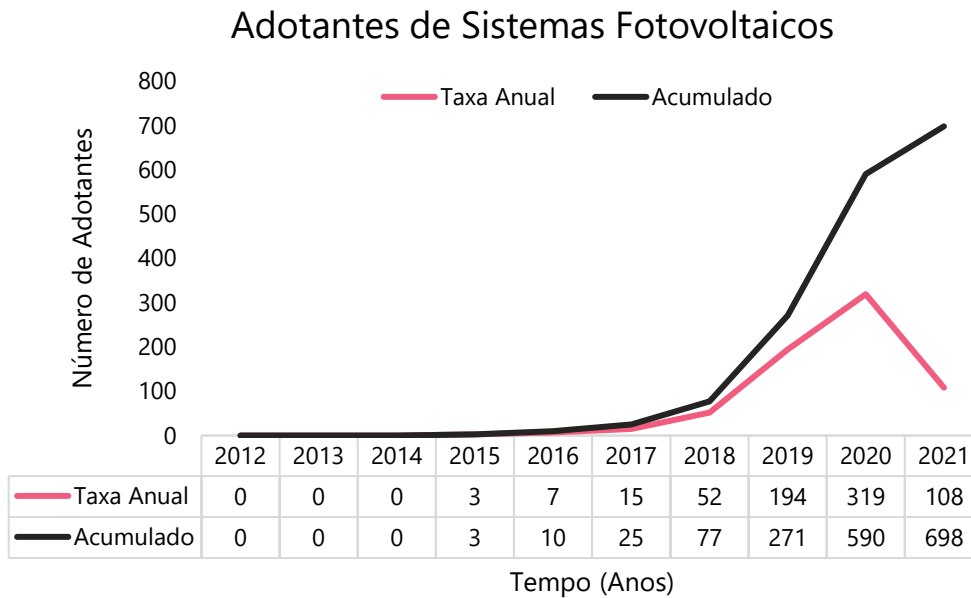
ID	Cidades	Quantidade de UCs comerciais (1º semestre de 2020)	Quantidade de UCs com SFV (julho de 2021)	Potência Instalada (MWp)
1	Bagé	3.629	36	0,64
2	Camaquã	1.998	49	0,77
3	Canguçu	1.138	21	0,33
4	Guaíba	2.319	21	0,52
5	Osorio	2.135	35	0,71
6	Pelotas	12.844	143	2,57
7	Porto alegre	82.040	232	4,54
8	Rio grande	6.352	28	0,41
9	Santo Antônio da patrulha	1.474	45	0,90
10	São Lourenço do sul	1.253	35	0,65
11	Tramandaí	2.606	18	0,41
12	Viamão	4.129	35	0,78
Total Geral		121.917	698	13,24

Fonte: Adaptado de SISGD (2021) e do Consumo registrado pela CEEE (2020).

O número real da quantidade de adotantes de SFV para as 12 cidades, Tabela 4.1, é apresentado em função do tempo na Figura 4.1. Nessa, embora o Brasil tenha instituído a

modalidade de incentivo *net metering* em 2012, os primeiros adotantes aparecem apenas em 2015, mostrando um *delay* de 3 anos no tempo de adoção até o aparecimento dos primeiros adotantes na região.

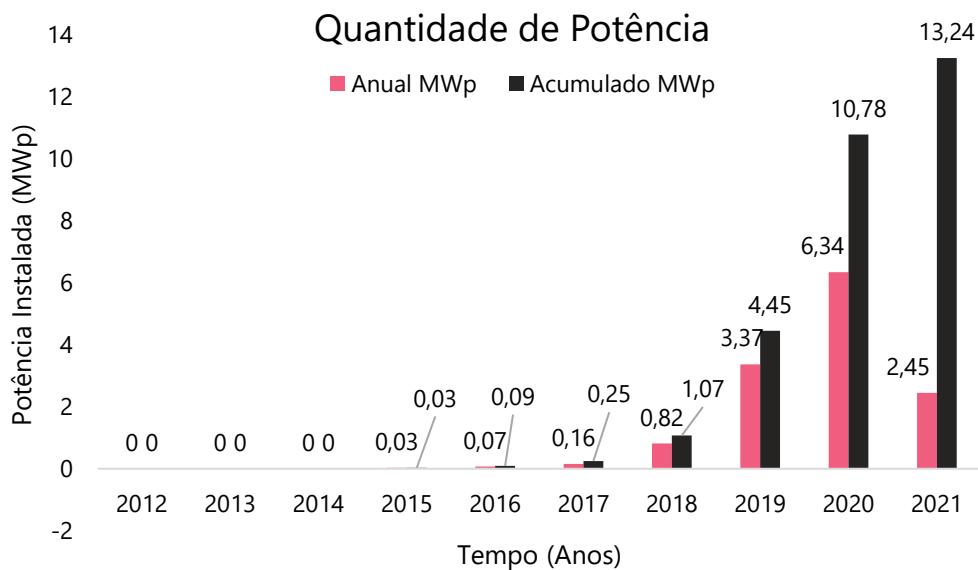
Figura 4.1- Número real de adotantes de sistemas fotovoltaicos no tempo.



Fonte: Adaptado de SISGD (2021).

A Figura 4.2, apresenta a quantidade de potência média instalada por cada ano nessas cidades assim como a potência média acumulada até o primeiro semestre de 2021.

Figura 4.2-Quantidade de Potência real Instalada da região selecionada.



Fonte: Adaptado de SISGD (2021).

Definida a região de estudo, o próximo passo é a determinação dos valores dos parâmetros para as 12 cidades selecionadas que corresponde a etapa 5 da execução de um modelo via DS apresentado conforme Figura 2.16.

4.1.1. Determinação dos valores dos parâmetros

A determinação dos parâmetros é realizada com base nas variáveis de entrada do modelo completo da DS, mostrada na Tabela 3.2. Os valores foram definidos, estimados e calibrados conforme mostra a Tabela 4.2 que apresenta a média algébrica para as dozes cidade selecionadas, valores nominais dessas premissas por cidade estão disponíveis no Anexo A, Tabela A.6.1.

Tabela 4.2 – Valor das Premissas para as 12 cidades.

id	Parâmetros Gerais de Entrada	Valor	Referencial
1	Número de Cidades	12	Registro da CEEE-D (2019)
2	Quantidade de Consumidores (Dmnl)	121.917	Registro CEEE-D (2019)
3	Taxa de Crescimento de UCs (%)	0,767%	Cálculo Geométrico adaptado do IBGE (2010-2020)
4	UCs com Mais de três salários-mínimos (%)	42,81%	Censo IBGE (2010)
5	Variação do PIB (%)	1,415%	Determinado do (“PIB Total - Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul”, 2021)
6	Falta de Conhecimento inicial (%)	10,00%	Análise de sensibilidade
7	Nível de escolaridade (Dmnl)	21,95%	Censo IBGE (2010)
8	Dificuldade de instalação (%)	20,00%	(EPE, 2021)
9	UCs tipo Casa & Própria (%)	64,87%	Censo IBGE (2010)
10	Tarifa Homologada (R\$/kWh)	R\$ 0,51754	Resolução Homologatória ANEEL N° 2.640/2019 (CEEE-D, 2020)
11	Índice de Reajuste Tarifário (IRT) (%)	1,3% a.a.	Análise de sensibilidade
12	Financiamento para compra SFV (%)	0 (sem financiamento) ou 1 (com financiamento)	-
13	Preço do modulo FV (R\$)	R\$ 849,00	Consulta de Mercado (PORTAL-SOLAR, 2018)
14	Decaimento do custo kWp (%)	1,50%	Registro adaptado de (NREL, 2018)
15	Potência do Modulo (kWp)	0,330	Consulta de Mercado
16	Quantidade de Módulos (Dmnl)	13	Calculado com base no consumo
17	Custo nominal do Inversor (R\$/kWp)	2000	Consulta de Mercado (PORTAL-SOLAR, 2018)

id	Parâmetros Gerais de Entrada	Valor	Referencial
18	Quantidade de Inversores (Dmnl)	4	Calculado com base na Potencial média a instalar
19	Custo da Mão de Obra (R\$/kWp)	R\$ 1.200,00	Estimativa do valor de mercado
20	TMA (%)	8% a.a.	Estimativa do valor de mercado (EPE, 2021)
21	Custo de Operação (R\$/Ano)	R\$ 200,00	Estimativa do valor de mercado
22	Custo de Disponibilidade (kWh)	100,00	EPE (2021)
23	Tarifa da venda do excedente (R\$/kWh)	Cenários	Mercado de Curto prazo/ outros mercados
24	Políticas de compensação (%)	<i>Net metering</i>	Regulamentação Prevista pela ANEEL (Fio A, Fio B e outros encargos)
25	Impostos de importação (%)	0 (sem financiamento) ou 1 (com financiamento)	-
26	ICMS (%)	30,00%	Resolução Homologatória ANEEL N° 2.640/2019 (CEEE-D, 2020)
27	PIS/COFINS (%)	6,50%	Resolução Homologatória ANEEL N° 2.640/2019 (CEEE-D, 2020)
28	Outros Programas de incentivo	Varição de 0 a 1, sendo 0 sem programas de incentivo para adoção da GDFV e 1 com incentivo	-
29	Demanda (kWh/mês)	432,93	Registro CEEE-D (2019)
30	Índice de Desenvolvimento Humano (IDH)	0,725	Censo IBGE (2010)
31	Radiação do local (kWh/m ² /dia)	4,39	Registro do (CRESESB, 2017)
32	Vida útil do sistema (Anos)	25	Conforme Tecnologia Fotovoltaica (CANADIAN-SOLAR INC, 2017)
33	Eficiência do modulo fotovoltaico (%)	85,48%	Conforme Tecnologia Fotovoltaica (CANADIAN-SOLAR INC, 2017)
34	Melhoria da Tecnologia FV (% / Ano)	0,10%	IEA, Kozen (2014)
35	<i>Delay</i>	3	SISGD (2021)
36	Coefficiente de inovação (p)	0,0009795	Análise de sensibilidade
37	Coefficiente de imitação (q)	0,750100	Análise de sensibilidade

Fonte: Autor

Da Tabela 4.2, os coeficientes de inovação (p) e o de imitação (q), são obtidos e calibrados a partir da curva de adotantes da Figura 4.2., e os valores ficaram bem próximos aos valores dos coeficientes utilizados pela EPE na metodologia 4MD no seu cenário de baixa

penetração, analogamente, os resultados obtidos são simulados para cenários de baixa penetração.

Um coeficiente de inovação de 0,00099795 mostra que para a tecnologia dos SFV o grupo de inovador é bastante restrito apesar dos incentivos governamentais, reiterando implicitamente um maior peso ao coeficiente de imitação ou a comunicação boca a boca na difusão, principalmente na atualidade pela grande influência da mídia digital.

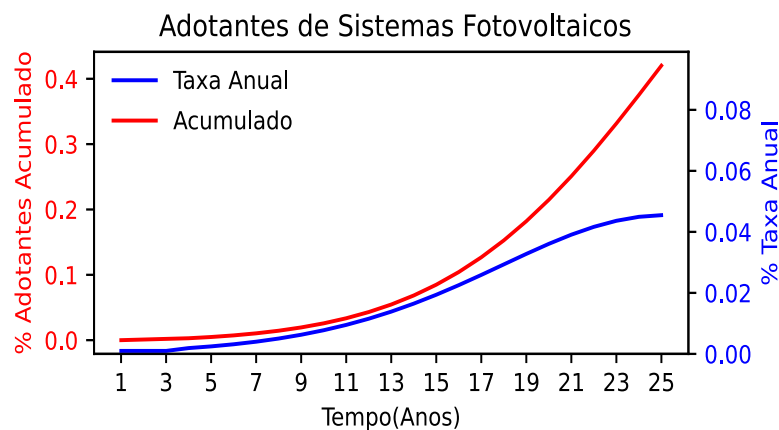
Com as premissas delimitadas se segue para a etapa 6 e etapa 7 que consiste na simulação do modelo e análise de sensibilidade para as 12 cidades.

4.1.2. Simulação do modelo e análise de sensibilidade

A simulação e análise de sensibilidade do modelo proposto, Figura 3.7, é realizada com o objetivo de verificar se os resultados são compatíveis a curva de crescimento proposto por Rogers e se os resultados são sensíveis às alterações dos parâmetros de entrada, que é uma das metas do processo de elaboração, para confirmar a consistência do modelo. Se o modelo mantiver o comportamento base é chamado de robusto, quando ele gera o mesmo padrão geral, apesar das grandes incertezas nos valores dos parâmetros de entrada.

Dessa forma, rodando a simulação base no Vensim com os valores dos parâmetros de entrada, Tabela 4.2, obteve-se que das 121.917 UCs comerciais que corresponde ao total das 12 cidades, 29.250 UCs, ou seja 23,99% das UCs são delimitadas como PAs, isso no ano 1. Desses PAs até o ano 25 um total de 12.290 UCs se tornaria adotante de SFV, o que corresponde a 42,02% dos PAs. A Figura 4.3 apresenta as curvas de adotantes em percentual de adoção ao longo do tempo em um horizonte de 25 anos.

Figura 4.3 – Difusão normal e acumulada dos SFV em função do tempo no cenário base.



Da Figura 4.3, a curva de adotantes acumulados e a taxa de adoção estão tendendo de acordo com o modelo de referência de Bass, cumprindo deste modo a etapa 6 da simulação do modelo, de alcançar a consistência em relação ao modelo de referência, todavia para a simulação seria necessário mais que 25 anos para maturação do mercado total e formação de uma curva em forma de S completa.

Em continuação, com a simulação base é realizada a análise de sensibilidade que é arranjada alterando os valores dos parâmetros de entrada, Tabela 4.2, a variação dos valores é feita variando as principais premissas do modelo para valores percentuais superior ou inferior ao base.

O resultado da adoção com a variação de cada variável ou premissa é apresentado conforme Tabela 4.3, os valores são extraídos no último ano da simulação no ano 25.

Tabela 4.3- Análise de sensibilidade

Variável	Variação	Quantidade de adotantes
Sobredimensionamento	Valor Base	12.290
	+50%	10.760
	+100%	9.837
UCs com Mais de três salários-mínimos (%)	+10%	11.500
	-10%	13.160
Variação do PIB (%)	+10%	11.500
	-10%	13.160
Dificuldade de instalação (%)	+30%	11.820
	-30%	12.760
UCs tipo Casa & Própria (%)	+30%	14.170
	-30%	10.410
Índice de Reajuste Tarifário (IRT) (%)	+30%	12.570
	-30%	12.020
Financiamento para compra SFV (%)	Sem	12.290
	Com	17.870
Preço do modulo SFV (R\$)	-20%	12.730
	-40%	13.230
Impostos de importação (%)	Com	12.290
	Sem	17.380
ICMS (%)	Com	12.550
	Sem	12.290
PIS/COFINS (%)	Atual	12.290
	isenção	12.240
Outros Programas de incentivo	Com	15.400
	Sem	12.290
Demanda (kWh/mês)	+50%	14.950
	-50%	8.478
Coeficiente de inovação (p)	0,00088	11.490
	0,00097 (base)	12.290
	0,00107	13.030

Fonte: do Autor.

A variação é aleatória para valores possíveis no intuito de capturar as incertezas nos valores dos parâmetros de entrada para verificação do comportamento do modelo, levando em consideração que na etapa 5 da determinação dos valores dos parâmetros alguns podem ser conhecidos com precisão perfeita (100%), outros podem ter uma precisão de 10% e outros podem ser totalmente desconhecidos dependendo do sistema.

A Tabela 4.3 apresenta na última coluna os resultados da análise de sensibilidade e com esses é possível, verificar que o comportamento desses é consistente as alterações efetuadas em relação a variável selecionada, satisfazendo o alcance da robustez do modelo. Os parâmetros que apresentam uma maior sensibilidade são: financiamento, isenção de impostos de importação, outros programas de incentivo, variação da faixa salarial, aumento de demanda, sobredimensionamento excessivo e o coeficiente de inovação.

Os resultados da Tabela 4.3 atendem de maneira indireta a oitava etapa e última para elaboração de um modelo via DS que é o teste de políticas que visa avaliar o comportamento do sistema variando os parâmetros associados as variáveis políticas que são controladas pelo projetista.

Deste modo, para uma maior ênfase a etapa 8, dois estudos de casos são realizados, o primeiro consiste na criação de quatro cenários com diferentes políticas de teste de projeção da difusão em um horizonte de 25 anos, que por sua vez é o prazo restante do contrato de concessão da CEEE-D Equatorial Energia, e o segundo estudo de caso é feito particularmente a cidade de Tramandaí pelo seu perfil, pois se pretende testar o comportamento da adoção em um cenário que se estabeleceria a venda da energia excedente dos prosumidores.

4.2. ESTUDO DE CASO I

O estudo de caso por cenário consiste na implementação prática do modelo proposto, Figura 3.7, e é tido como uma continuação da última etapa aos passos para a modelagem de um modelo via DS, conforme proposto por Ford, Figura 2.16.

Para o estudo são utilizadas as mesmas 12 cidades da etapa de análise de sensibilidade. Quatro cenários de projeção da difusão em um horizonte de 25 anos são propostos e apresentados na Tabela 4.4 com as premissas a considerar em cada cenário.

Tabela 4.4 - Cenários analisados

Cenários	Variáveis
Cenário 1	Políticas Atuais de compensação <i>Net metering</i> a compensação da energia injetada na rede se dá por todas as componentes da TUSD e da TE
Cenário 2	No ano 12 termina a Política Atual de incentivo <i>Net metering</i> o prossumidor começaria a pagar por toda a TUSD, e as componentes da TE incidiriam sobre a diferença entre a energia consumida e a energia injetada na rede, de maneira que a TUSD continuaria incidindo sobre toda a energia consumida da rede.
Cenário 3	No ano 13 termina a Política Atual de incentivo <i>Net metering</i> e começa a cobrança da parcela B da TUSD (FioB), e no ano 21 é acrescido a parcela A da TUSD (FioA) para os prossumidores. as componentes referentes ao Transporte (Fio A e Fio B) incidiriam sobre toda a energia consumida da rede. As demais parcelas da tarifa continuariam incidindo sobre a diferença entre a energia consumida e a energia injetada na rede
Cenário 4	Considerando todos os aspectos favoráveis a adoção

Fonte: do Autor.

De acordo com a Tabela 4.4, no cenário 1 é considerado como política de incentivo a modalidade atual de instalação dos SFV dado pelo sistema de compensação *Net Metering* que estabelece uma compensação de 1 para 1, no qual a principal crítica recaí ao fato de que a rede da Distribuidora funciona como uma bateria 100% eficiente, uma política relativamente vantajosa para o prossumidor, que não precisa arcar com os custos e encargos pelo uso da rede de distribuição.

A modalidade ou política de incentivo *Net metering* dessa forma implementada, a longo prazo e em um cenário de alta penetração de geração distribuída FV, poderia ocasionar perdas técnico-financeiras para a distribuidora, e estudos sugerem causalidades bem mais críticas, podendo chegar um processo conhecido como “espiral da morte”¹⁴, que de maneira sucinta a distribuidora se tornaria insustentável financeiramente até falir completamente.

Logo, os cenários 2 e 3 são usados neste estudo no intuito de teorizar políticas de incentivo a GDFV no qual a distribuidora teria um ganho mínimo advindo pelo pagamento da TUSD mediante contexto, o que se enquadra também ao novo Marco Legal da GD que visa estabelecer novos modelos de negócio em GD com a Lei 14.300/2022, aprovada em 7 de janeiro de 2022.

Neste intuito, no cenário 2 é considerado que no ano 12 termina a Política Atual de incentivo *Net metering* e o prossumidor começaria a pagar por toda a tarifa da TUSD, e as componentes da TE incidiriam apenas sobre a diferença entre a energia consumida e a energia injetada na rede, de maneira que a TUSD continuaria incidindo sobre toda a energia consumida

¹⁴O estudo de Castaneda et al (2017) na Colômbia concluiu que uma espiral da morte para concessionárias é possível quando ocorrem alguns ciclos viciosos de incentivos sem remuneração adequada de toda cadeia de distribuição.

da rede, do ponto de vista teórico este o cenário para ideal para as concessionárias, porém, em termos práticos isso encareceria o sistema.

No cenário 3 é considerado que no ano 13 termina a Política Atual de incentivo *Net metering* e começa a cobrança da parcela B da TUSD (FioB), e no ano 21 é acrescido a parcela A da TUSD (FioA) para os prosumidores. As componentes referentes ao Transporte (Fio A e Fio B) incidiriam sobre toda a energia consumida da rede. As demais parcelas da tarifa continuariam incidindo sobre a diferença entre a energia consumida e a energia injetada na rede.

O pagamento da parcela A e B é realizado conforme a análise das mudanças regulatórias previstas pela ANEEL em seu Relatório de Análise de Impacto Regulatório nº 004/2018 (disponível em ANEEL (2018b)), ao visar considerar a cobrança do Fio A, Fio B e outros encargos, o que irá refletir consideravelmente no perfil dos adotantes. já que a compensação passará a ser menor que os 100% atuais. A mesma discussão também está sendo feita pelo projeto de lei PL5829, que após veto suas considerações estão contempladas na Lei 14.300/2022.

Por fim, o cenário 4 é hipotético, nele são considerados que todos os aspectos são iguais a 1 ou seja todas as políticas do mercado favorecem a instalação de sistemas fotovoltaicos.

Para todos os cenários os coeficientes de inovação são iguais a 0,0009795 e o coeficiente de imitação igual a 0,7501, os resultados são obtidos rodando o modelo, Figura 3.7, no Vensim.

4.2.1. Caso I: Resultados

O conjunto das 12 cidades, Tabela 4.1, até o ano de 2020, tinha em torno de 121.917 UCs comerciais, desse total de unidades consumidoras, considerou-se que 20% das unidades apresentavam dificuldades para instalar um SFV, 42,81% desses consumidores tem renda superior a 3 salários-mínimos e 64,87% dos estabelecimentos são do tipo casa e própria definidos com base nos estabelecimentos residências por falta de uma base de dados comercial. Tal como apresentado na Tabela 4.2 com todos os parâmetros das premissas utilizadas para simulação na análise de sensibilidade.

Alimentado o modelo proposto, Figura 3.7, conforme as variáveis de entrada, Tabela 4.2, e implementando mudança das mesmas segundo a necessidade dos cenários especificados, Tabela 4.4, determinou-se que no ano 1 os PAs da tecnologia FV seriam de 29.250 UCs ou 23,99% do total (121.917), a Tabela 4.5 apresenta a quantidade de adotantes por cenário extraídos no ano 25, último ano da simulação.

Tabela 4.5 - Adotantes de Sistemas Fotovoltaicos para o caso I

Cenários	PA	Adotantes	Em relação aos PA (%)	Em relação ao Total (%)
Cenário 1	29.250	12.290	42,02%	10,08%
Cenário 2	29.250	8.329	28,48%	6,83%
Cenário 3	29.250	9.843	33,65%	8,07%
Cenário 4	29.250	29.113	99,53%	23,88%

Fonte: do Autor.

A Tabela 4.5 exhibe os resultados da quantidade de adotantes de cada cenário e o seu percentual a partir dos PAs assim como, o percentual de adotantes em relação ao total de consumidores. Essa mostra que em 25 anos haveria aproximadamente 12.290 UCs adotantes de SFV comerciais, que corresponde a 42,02% em relação à quantidade de PAs (29.250), ou 10,08% em relação ao total das UCs (121.917), isso para o cenário 1 que praticamente representaria o cenário atual existente regido pela modalidade de incentivo com a política *Net Meeting*, sem considerar mudanças regulatórias previstas.

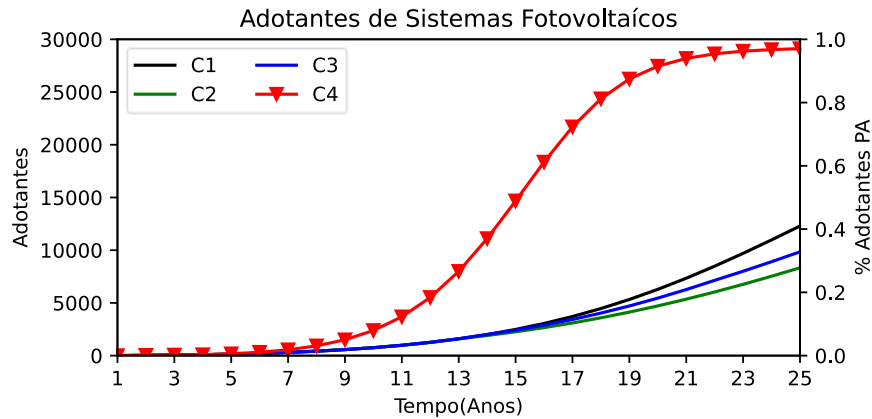
Como esperado, o Cenário 4, por possuir todos os aspectos iguais a 1, apresenta os melhores resultados, com 99,53% de adotantes em relação aos PA e 23,88% em relação ao total de consumidores, embora muito improvável de acontecer.

O cenário 3 apresenta uma quantidade de adotantes moderada, sendo este o cenário com a política de implementação futura mais provável de acontecer tendo em vistas as mudanças regulatórias previstas.

O resultado de cada cenário, Tabela 4.5, foi obtido rodando o modelo completo, Figura 3.7, no software Vensim, que determina a estimativa de novos consumidores com SFV, no horizonte de 25 anos, a seguir as principais variáveis de saída do modelo proposto, Figura 3.7, em função do tempo, na qual:

A Figura 4.4 apresenta a quantidade acumulada de adotantes de SFV ao longo do tempo no horizonte de 25 anos.

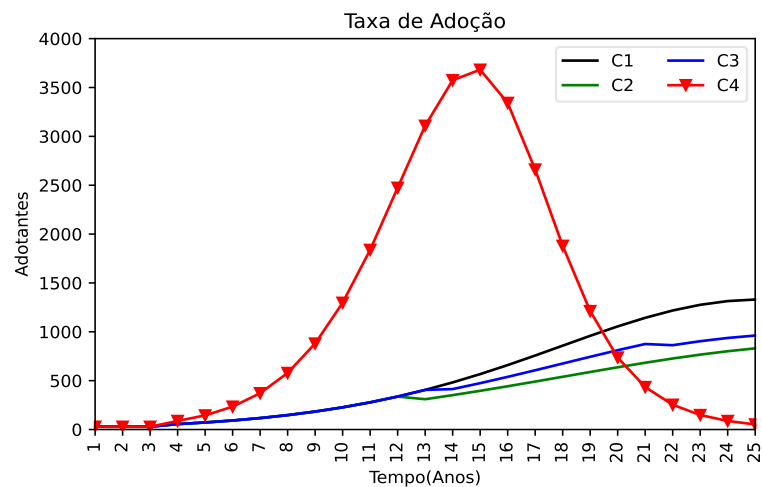
Figura 4.4 – Quantidade de adotantes Acumulado de SFV ao longo do tempo no horizonte de 25 anos caso I.



Fonte: do Autor.

Na sequência a Figura 4.5 apresenta a taxa anual desses adotantes, que compõem a quantidade acumulada de adotantes dos SFV, Figura 4.4, ao longo do tempo no mesmo horizonte de 25 anos.

Figura 4.5 - Quantidade Anual de Adotantes de SFV em função do tempo caso I.

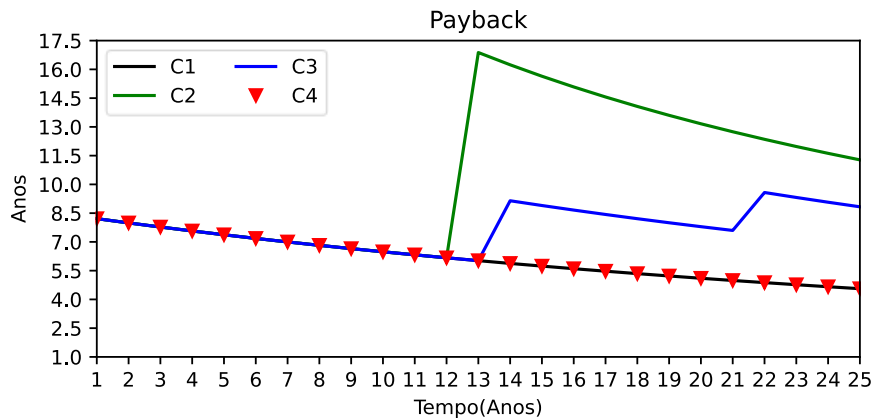


Fonte: do Autor.

Pela análise das curvas de crescimento, Figura 4.4 e Figura 4.5, da adoção para cada cenário, percebe-se pouca diferença nos primeiros anos. Mostrando que a difusão de SFV tem um prazo de maturação, normalmente onde se estabelecem os inovadores (2,5%) e os adotadores (13,5%), conforme o modelo de Bass e teoria de Rogers. Também se percebe que a curva do cenário 4 obedece ao modelo de referência proposto por Rogers, de um crescimento em S, e um crescimento em forma de sino na distribuição normal devido a maior quantidade de incentivos a adoção.

A Figura 4.6, apresenta o *Payback*, que representa o tempo de retorno do investimento ao longo do tempo.

Figura 4.6 - Tempo de Retorno em cada cenário caso I.



Fonte: do Autor.

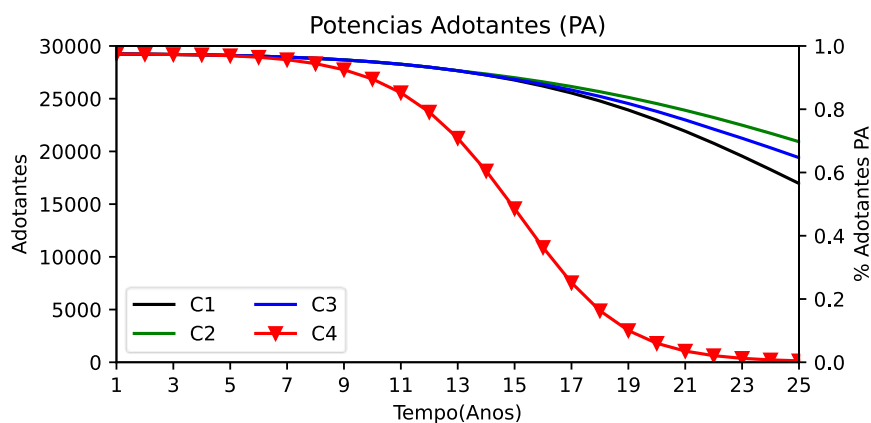
Da Figura 4.6 a curva em azul do *payback* que corresponde ao cenário 3 apresenta duas quebra no tempo de retorno, de 6,02 para 9,15 anos, do ano 13 ao 14 e de 7,60 para 9,58 anos do ano 21 ao 22 como resultado da diminuição dos incentivos garantido pelo *Net Metering*, significando que do ano 14 em diante os novos adotantes teriam um tempo de retorno de investimento maior em relação aos que adotaram na política anterior pelo início da cobrança da TUSD FioB, o que se repete no ano 21 quando é cobrado a TUSD FioB acrescido do da TUSD FioA.

Este mesmo efeito pode ser observado na curva de taxa de adoção, Figura 4.5, que apresenta uma queda relativa comparado a curva de outros cenários.

Já a curva verde do *payback*, ou seja, o cenário 2 apresenta quase o mesmo comportamento do cenário 3, porém o tempo de retorno do investimento a partir do ano 13, é relativamente superior.

A Figura 4.7 mostra a curva correspondente ao estoque dos PAs de SFV.

Figura 4.7 - Quantidade do estoque dos PAs em função do tempo caso I.



Fonte: do Autor.

Na Figura 4.7, o estoque de adotantes de SFV acumulado reduz proporcionalmente ao aumento de adotantes mostrado na Figura 4.4. Do mesmo modo, o cenário 2 apresenta a menor queda de PAs, se conclui que esse é o cenário mais crítico dos estudados. No Anexo B Figura B.2 constam o resto das variáveis de saída do modelo em função do tempo vistas no display do Vensim.

4.3. ESTUDO DE CASO II

O estudo de caso II é executado para difusão de SFV de consumidores comerciais considerando cenários de difusão, adotantes com potência instalada maior que a requerida, considerando dois casos A e B: com 54,77% e outro com 106,36% de excedentes, que são convertidos em energia para venda, os sub-cenários são construídos variando a tarifa de venda do excedente. Entretanto, a simulação dos cenários bases é realizada unicamente com excedente de 20,03% em ambos os casos A, B e não há venda de excedente.

Neste estudo o prossumidor pode vender a energia excedente gerada, tendo em vista que, no atual cenário, a geração de excedente não é remunerada e que o prossumidor pode reter os créditos por até 5 anos para compensar, podendo até chegar à não compensação. A venda de energia acabaria sendo uma alternativa e surgiria como um novo modelo de negócio ao sistema atual, o que traria uma maior liquidez ao prossumidor e provável aumento na velocidade da adoção de GD. Para análises iniciais foram propostas quatro tarifas de venda descritas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Premissas com valor de venda do Excedente para cada cenário.

Cenários	Tarifa da Venda (R\$/kWh)	Valor em relação a tarifa do Mercado Cativo (R\$ 0,7008)	Relação ao Teto do Mercado de Curto Prazo (PLD)
C_Base			
C_1	R\$ 0,2275	32,50%	40,0%
C_2	R\$ 0,3413	48,70%	60,0%
C_3	R\$ 0,4550	64,90%	80,0%
C_4	R\$ 0,5688	81,20%	100,0%

A Tabela 4.6 apresenta os valores sugeridos da venda do excedente. Uma observação é que os adotantes de sistemas fotovoltaicos ao se tornarem prossumidores sem a venda de excedentes têm a tendência de aumentar a carga a fim de atingir o total de compensação, o chamado efeito rebote. Já em um ambiente em que ocorre a venda do excedente, não haverá manifestação do efeito rebote, pois o cliente buscaria economizar para obter o maior retorno que neste caso, seria financeiro.

No entanto, sem o ressarcimento adequado desta energia, o tempo de retorno do investimento tende a ser alto, o que resultaria em baixa adoção da tecnologia fotovoltaica.

Na simulação dos cenários, a tarifa de venda do excedente é calculada em relação à tarifa do Mercado de Curto Prazo (PLD) pois é a mais indicada para esse tipo de transação. Contudo, pela volatilidade deste mercado, o valor é aprisionado em relação à tarifa cativa e essa, por sua vez, varia em função do tempo, conforme equação (34) usada no modelo de difusão proposto, Figura 3.7. É considerado em cada cenário o pagamento da TUSD FioB ao custo de 8,0% da tarifa da rede da concessionária. Para o valor da tarifa, também seria possível considerar a aplicação de tarifa binômica para esses prossumidores o que, na prática, seria o cenário mais adequado no contexto do mercado de distribuição de energia. Entretanto, como o modelo considera um valor médio a analogia utilizada é aceitável.

As variáveis de entrada, Tabela 3.2, que caracterizam os parâmetros ou premissas necessárias utilizadas para rodar o modelo de difusão são apresentadas conforme Tabela 4.7. Todos os parâmetros dessa são estimados para os consumidores comerciais de baixa tensão (B3), para a cidade de Tramandaí, que dispõem de 2.606 UCs comerciais pertencentes à área de concessão da CEEE-D Equatorial Energia.

Tabela 4.7 – Premissas utilizadas para as simulações Tramandaí caso II.

id	Parâmetros Gerais de Entrada	Valor	Referencial
1	Número de Cidades	1	Registro da CEEE-D (2019)
2	Quantidade de Consumidores (Dmnl)	2.606 UCs	Registro CEEE-D (2019)
3	Taxa de Crescimento de UCs (%)	0,50%	25% do valor calculado pelo Cálculo Geométrico do Censo 2010 e estimativa 2020 (IBGE)
4	UCs com Mais de três salários-mínimos (%)	46,90%	Censo 2010-IBGE
5	Variação do PIB (%)	1,415%	atlassocioeconomico.rs.gov.br
6	Falta de Conhecimento (%)	5,00%	Análise de sensibilidade valor superestimado
7	Dificuldade de instalação (%)	20,00%	EPE (2019)
8	UCs tipo Casa & Própria (%)	68,00%	Censo 2010-IBGE
9	Tarifa Homologada (R\$/kWh)	R\$ 0,51754	Resolução Homologatória ANEEL N° 2.640/2019
10	Índice de Reajuste Tarifário (IRT) (%)	0,01% a.a.	Análise de sensibilidade
11	Financiamento para compra SFV (%)	0	-
12	Preço do módulo FV (R\$)	R\$ 849,00	Estimativa do valor de mercado (2019)
13	Decaimento do custo kWp (%)	0,50%	IEA
14	Potência do Módulo (kWp)	0,330	Consulta de Mercado
15	Quantidade de Módulos (Dmnl)	-	Calculado com base no consumo
16	Custo nominal do Inversor (R\$/kWp)	2000	Estimativa do valor de mercado (2019)
17	Quantidade de Inversores (Dmnl)	Variando com base na Potencial média a instalar	-
18	Custo da Mão de Obra (R\$/kWp)	R\$ 1.200,00	Estimativa do valor de mercado
19	TMA (%)	8% a.a.	Estimativa do valor de mercado
20	Custo de Operação (R\$/Ano)	R\$ 200,00	Estimativa do valor de mercado
21	Custo de Disponibilidade (kWh)	100kWh	EPE (2021)

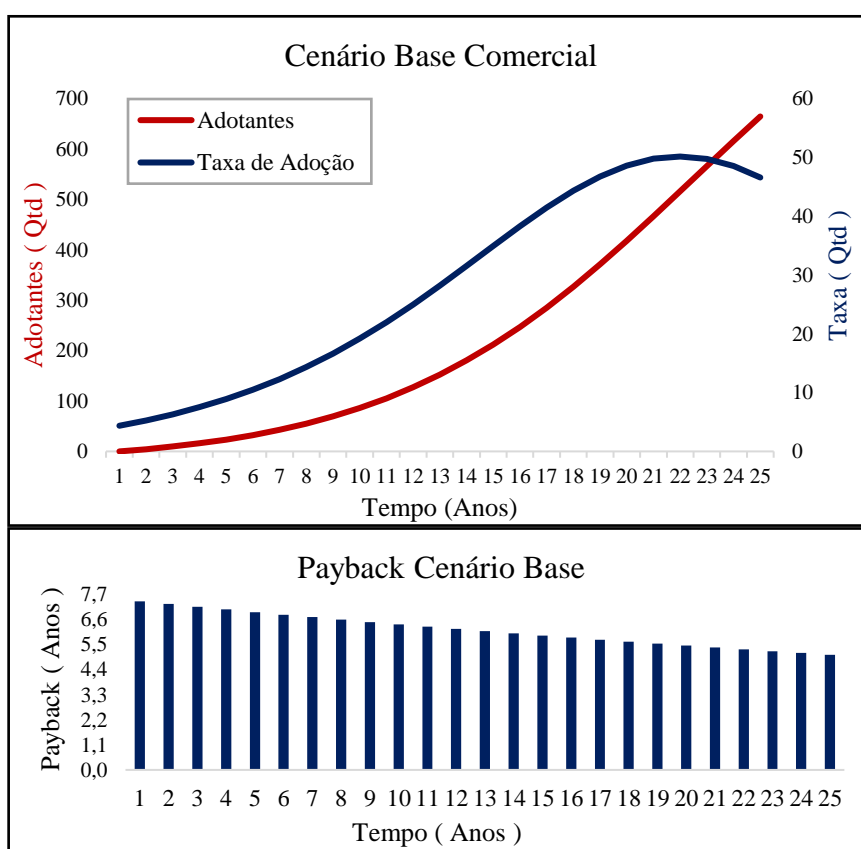
id	Parâmetros Gerais de Entrada	Valor	Referencial
22	Tarifa da venda do excedente (R\$/kWh)	-	-
23	Políticas de compensação (%)	Net metering	Regulamentação Prevista pela ANEEL (Fio A, Fio B e outros encargos)
24	Impostos de importação (%)	0	-
25	ICMS (30%)	30,00%	Resolução Homologatória ANEEL Nº 2.640/2019
26	PIS/COFINS (%)	6,50%	-
27	Outros Programas de incentivo	0	-
28	Demanda (kWh/mês)	451,04	Consumo Observado pela companhia (CEEE,2019)
29	Índice de Desenvolvimento Humano (IDH)	0,719	Censo 2010-IBGE
30	Radiação do local (kWh/m ² /dia)	4,52	Conforme Tecnologia Fotovoltaica
31	Vida útil do sistema (Anos)	25	Conforme Tecnologia Fotovoltaica
32	Dificuldade de instalação (%)	20%	Conforme Tecnologia Fotovoltaica
33	Eficiência do módulo fotovoltaico (%)	85,48%	Conforme Tecnologia Fotovoltaica
34	Nível de escolaridade (Dmnl)	22,00%	Conforme Tecnologia Fotovoltaica
35	Melhoria da Tecnologia FV (% / Ano)	0,10%	IEA
36	Coefficiente de inovação (p)	0,004	Da metodologia 4MD cenário B (EPE,2020)
37	Coefficiente de imitação (q)	0,5	Da metodologia 4MD cenário B (EPE,2020)

Fonte: do Autor.

O valor dos coeficientes p e q utilizado na presente simulação, está superestimado, não refletindo o real contexto de difusão dos SFV da cidade de Tramandaí, cujo processo de difusão observado é relativamente inferior, conforme consta na base de dados da ANEEL no Sistema de Registro de Geração Distribuída (SISGD), que registrou até julho de 2021, apenas 105 UCs com SFV, dos quais 80,95% são residenciais, 17,14% comerciais, 0,95% indústrias e 0,95% para o poder público.

Aplicando os cenários, com o valor da venda de excedentes de energia gerada pelos prossumidores, em conjunto com as variáveis de entrada supracitadas na Tabela 4.7, utilizadas para alimentar o modelo de difusão. Considerando inicialmente que se dispõem de um total de 2.606 UCs e aplicando os cenários de venda de excedente, Tabela 4.6, obteve-se os resultados para ambos os casos A e B mediante contexto. Inicialmente é apresentado a seguir, o resultado para o cenário Base de ambos com 20,03% de excedente sem venda os valores são exibidos conforme Figura 4.8.

Figura 4.8 – Quantidade de adotantes do Cenário Base com 20,03% de excedente caso II Tramandaí.



Fonte: do Autor.

Na sequência os resultados do Caso A que considera UCs com instalação de 54,77% de excedente gerado e o Caso B considerando que as UCs instalariam 106,36% de excedente sendo em ambos aplicando a venda desse excedente gerado.

4.3.1.1. Caso A com 54,77% de excedente em UCs comerciais

Para o caso A, da Tabela 4.7 tem-se que o consumo médio das instalações é 451,04 kWh/mês, o que equivale a um consumo anual de 5.412,47 kWh/ano, ou seja, para que o prosumidor gere um excedente de 54,77%, são necessários 18 módulos fotovoltaicos de 330 Wp, isso corresponde à uma potência nominal instalada de 5,94 kWp, gerando aproximadamente 8.376,88 kWh/ano.

Simulando o modelo no software Vensim, e entrando com valores especificados para determinação das variáveis de saídas do modelo completo da difusão, Figura 3.7, obteve-se 1.092 UCs como PAs no ano zero. Desses PAs a Tabela 4.8 apresenta os principais resultados, nela é possível verificar que, no cenário A Base das 1.092 UCs tidas como PAs, 665 UCs ou 60,89% dos PAs que corresponde a 25,52% do mercado total (2.606 UCs) se tornariam adotantes, já o restante dos cenários apresenta um crescimento menor ou maior na quantidade de adotantes, mediante variação da tarifa de venda do excedente, sendo que, no cenário 4 com a maior tarifa de venda de energia excedente exhibe os melhores resultados com 68,43% dos PAs ou 28,67% do mercado total se tornando prosumidores.

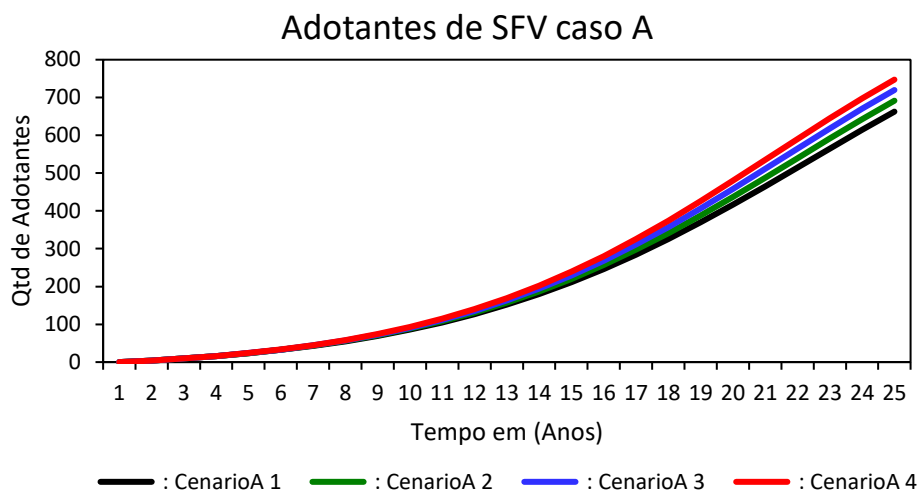
Tabela 4.8 - Resumo da quantidade de Adotantes de SFV em cada cenário de venda de excedente Caso A Tramandaí.

Cenários A	PA	Adotantes	Em relação aos PA (%)	Em relação ao Total (%)	Valor do Excedente
Cenário A Base	1.092	665	60,89%	25,52%	20,03%
Cenário A1	1.092	663	60,68%	25,43%	54,77%
Cenário A2	1.092	692	63,33%	26,54%	54,77%
Cenário A3	1.092	720	65,91%	27,62%	54,77%
Cenário A4	1.092	747	68,43%	28,67%	54,77%

Fonte: do Autor.

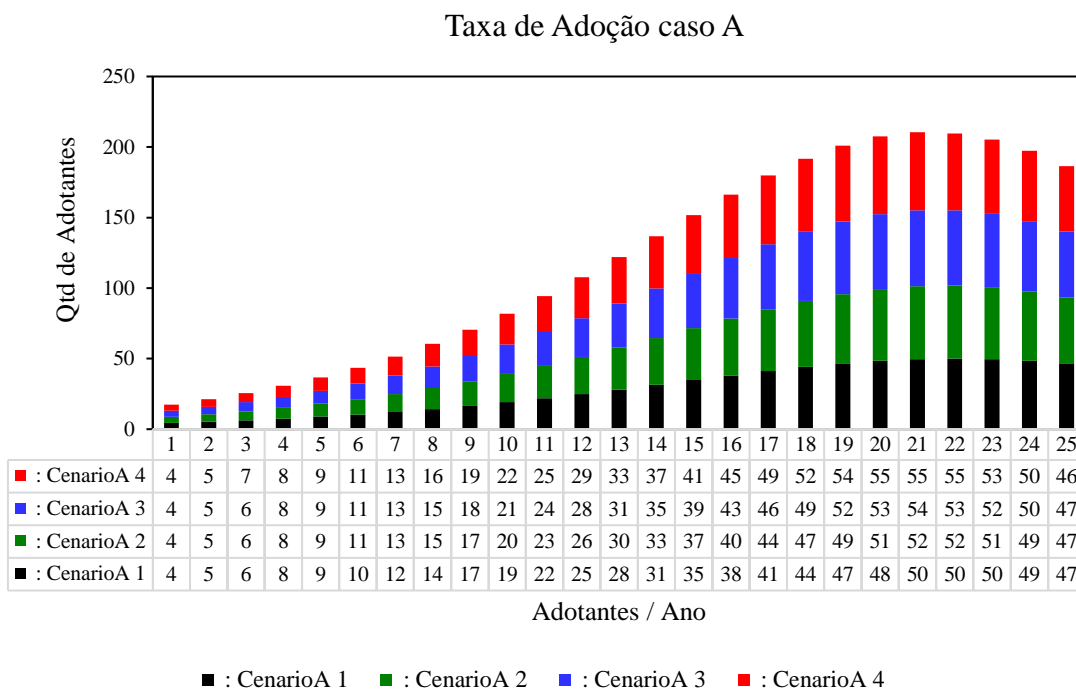
Na Figura 4.9 são mostradas as curvas de crescimento dos adotantes do cenário A1 ao A4 em função do tempo, que neste estudo foi definido para um horizonte de 25 anos.

Figura 4.9 - Quantidade acumulada de adotantes de SFV em função do tempo caso A Tramandaí.



A seguir a Figura 4.10, apresenta a quantidade ano a ano de adotantes em função do tempo para cada cenário do A1 ao A4, ou seja, corresponde a taxa de adoção de novos adotantes no cenário de venda excedente A1 ao A4, inicialmente a taxa é relativamente baixa e cresce à medida que a tecnologia se difunde, no mercado potencial, dado pelos PAs e a partir do ano 21/22 vai decaindo naturalmente, lhe conferindo o formato de sino.

Figura 4.10 - Quantidade Anual de Adotantes de SFV em função do tempo caso A Tramandaí.

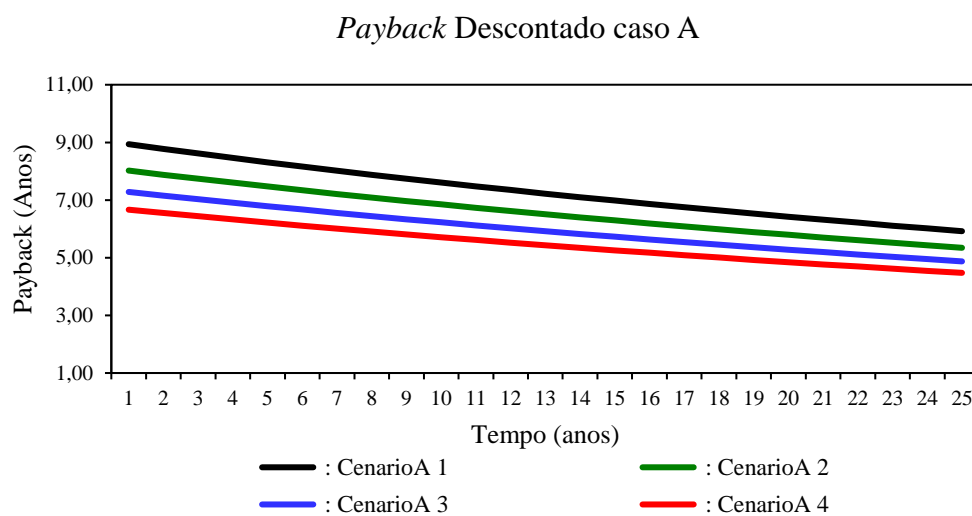


Fonte: do Autor.

Da Figura 4.9 e Figura 4.10, o cenário A1 apresenta menor taxa de adoção anual, isso porque o aumento do excedente encarece o preço de instalação total do SFV, o que pode ser melhor percebido, na Figura 4.11, que apresenta o tempo de retorno, que no cenário A1 é superior quando comparado a outros cenários, o que reduz a quantidade de adotantes devido ao longo período do retorno do investimento feito. Por outro lado, o cenário 4 teve maior quantidade pelo seu reduzido tempo de retorno, resultado da garantia da venda de excedente por uma tarifa superior.

A Figura 4.11, representa o tempo de retorno do investimento. Percebe-se que, no cenário A1, com uma tarifa da venda de excedente baixa o tempo de retorno é bem próximo de 9 anos, neste caso, em particular pela baixa quantidade de excedente declarada, a diferença entre cenários é reduzida, entretanto, quando comparado ao cenário A4, o tempo de retorno cai para 6,75 anos, queda explicada pelo valor da venda da energia excedente que é de 81,2% do valor da tarifa cativa, ou 100% do valor da tarifa teto do mercado de curto prazo (PLD teto).

Figura 4.11 - Tempo de Retorno em cada cenário caso A Tramandaí.



Fonte: do Autor.

Deste modo, para o caso A percebe-se que, a venda de excedente melhora significativamente a atratividade do investimento em geração fotovoltaica com potência instalada maior que a requerida, para isso é conveniente um segundo teste com aumento no valor de excedente para verificar se o comportamento.

4.3.1.2. Caso B com 106,36% de excedente em UCs comerciais

De igual modo ao caso A, da Tabela 4.7 se tem que o consumo médio das instalações é 451,04 kWh/mês, o que equivale a um consumo de 5.412,47 kWh/ano, assim sendo, para que o prossumidor gere um excedente de 106,36%, são necessários 24 módulos fotovoltaicos com potência nominal de 330 Wp, que corresponderia a uma potência instalada de 7,92 kWp, o que geraria aproximadamente 11.169,17 kWh/ano.

A quantidade de PAs permanece a mesma de 1.092 UCs no ano zero, logo tem-se como resultado a Tabela 4.9 com o resumo da difusão correspondente a cada cenário do valor da tarifa de venda da energia excedente, com exceção do caso Base.

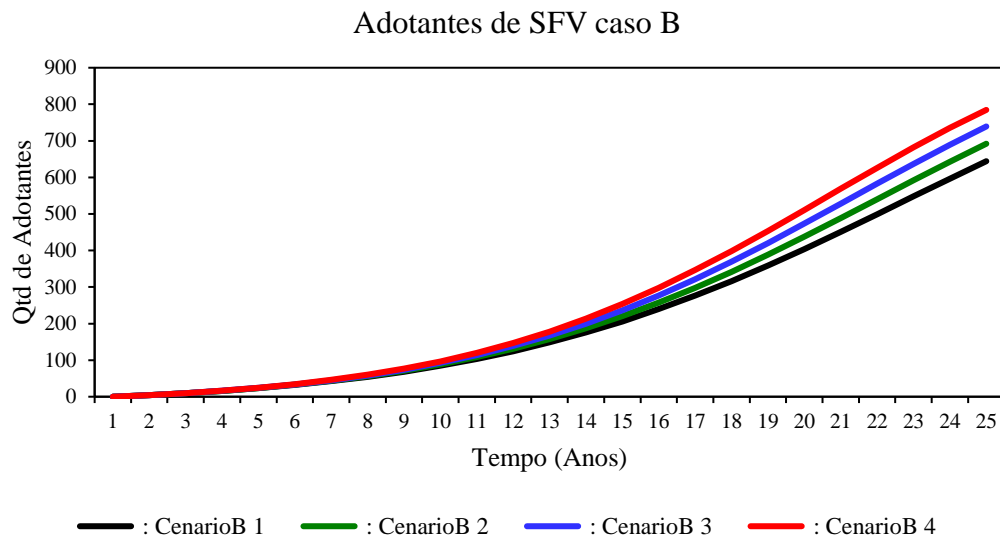
Tabela 4.9 - Resumo da quantidade de Adotantes de SFV em cada cenário de venda de excedente caso B Tramandaí.

CenáriosB	PA	Adotantes	Em relação aos PA (%)	Em relação ao Total (%)	Valor do Excedente
Cenário B Base	1.092	665	60,89%	25,52%	20,03%
Cenário B1	1.092	644	59,00%	24,72%	106,36%
Cenário B2	1.092	692	63,37%	26,56%	106,36%
Cenário B3	1.092	739	67,70%	28,37%	106,36%
Cenário B4	1.092	785	71,85%	30,11%	106,36%

Fonte: do Autor.

A Figura 4.12 apresenta a curva de difusão da quantidade de adotantes acumulados para o horizonte de 25 anos nos cenários B1 ao B4, cujos valores estão resumidos na Tabela 4.9 no último ano da simulação.

Figura 4.12 - Quantidade acumulada de adotantes de SFV em função do tempo caso B Tramandaí.

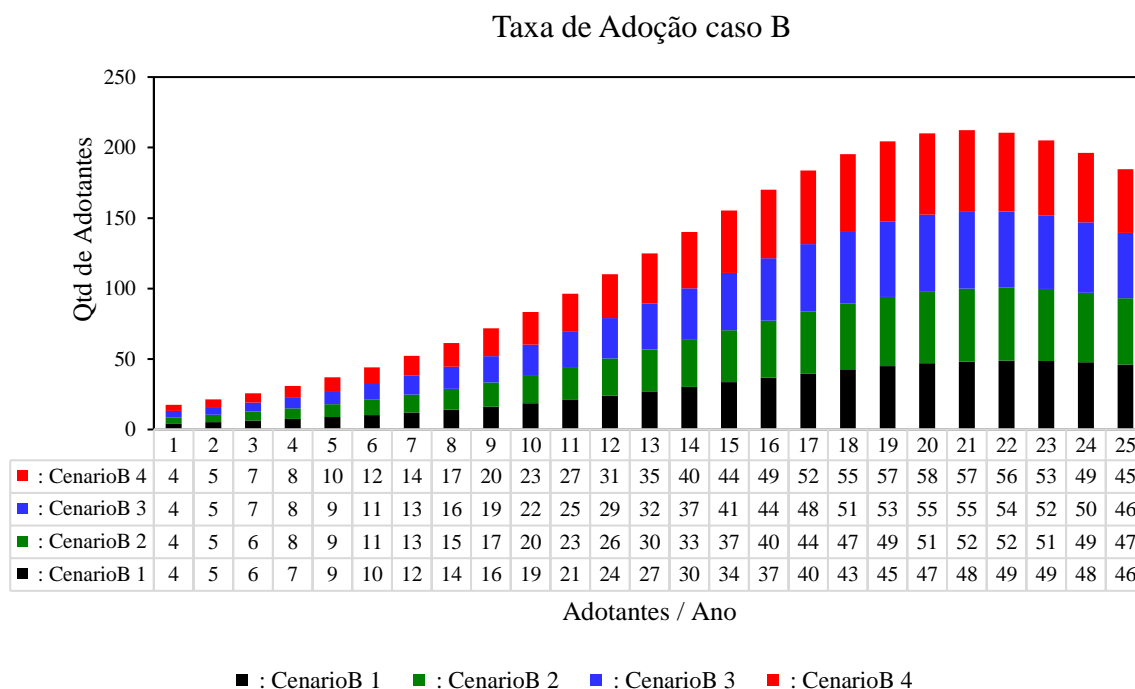


Fonte: do Autor.

Conforme Tabela 4.9, e da Figura 4.12, observa-se que a dinâmica de resultados obtidos é bem semelhante ao caso A, onde os cenários com a maior tarifa de venda de excedente garantem uma maior atratividade, resultando em uma quantidade maior de adotantes.

Entretanto, ao comparar os cenários A1 e B1, observa-se que a quantidade de adotantes cai de 25,43% do total do mercado potencial para 24,72% deste, já do cenário A2 e B2 ocorre apenas um ligeiro aumento de 26,54% para 26,56% ou seja +0,02% do caso A2 ao B2 respectivamente. A vantagem de sobredimensionar para venda de energia só é verificada a partir do cenário B3, sendo a maior diferença encontrada no cenário B4 com 30,11% de adotantes em relação à quantidade total de unidades consumidoras. A Figura 4.13 apresenta a taxa de adoção ao longo do tempo.

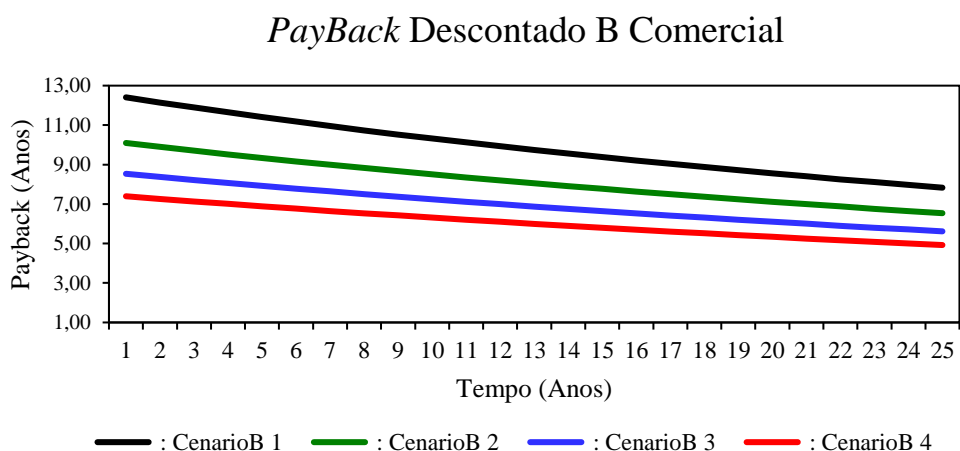
Figura 4.13 - Quantidade Anual de Adotantes em função do tempo caso B Tramandaí.



Fonte: do Autor.

O tempo de retorno do investimento é mostrado na Figura 4.14, a partir desta é possível observar que o aumento de excedente sem uma recompensa justa encarece o sistema, o que teoricamente inviabiliza o investimento, o que pode resultar na redução da quantidade de adotantes final. Uma observação a ser denotada é que o tempo de retorno vai decaindo pela melhoria da tecnologia, e pela influência da quantidade de adotantes.

Figura 4.14 - Tempo de Retorno de cada cenário caso B Tramandaí.



Fonte: do Autor.

Na Figura 4.14 o cenário B1, apresenta o pior tempo de retorno com *Payback* estimado em quase 13 anos no ano 1, com o tempo ele decai chegando a 7,83 anos no ano 25, porém ainda superior aos outros cenários. Enquanto isso, no cenário B4 de maior adoção, ao comparar com o cenário A4, o tempo de retorno do investimento é parecido, mostrando que valeria apenas instalar potência maior para reduzir o tempo de retorno, sem mencionar que o ato em si abriria um leque de possibilidade, já que parte deste retorno é auferido monetariamente e não apenas com abatimento da conta de luz, como ocorre na modalidade *Net Metering*.

Deste modo, conclui-se que em ambos os experimentos a difusão das UCs com venda de excedente, apesar da atratividade da venda o aumento do número de painéis fotovoltaicos sem o ressarcimento adequado, piora o tempo de retorno do investimento, o que resultaria em baixa adoção da tecnologia fotovoltaica. Portanto, a não ser que seja considerada uma tarifa para venda do excedente de no mínimo 50% do valor da tarifa do Mercado Cativo ou próxima do valor teto da tarifa do Mercado de Curto Prazo, não é atrativo para um prosumidor possuir instalações com produção elevada de excedente.

4.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES DO MODELO PROPOSTO

Pelas análises apresentadas o modelo exhibe ótima consistência e seus resultados podem ser utilizado contando que sejam tidas em conta as devidas considerações. Recomenda-se o seu uso para teste de novas políticas a serem implementadas por órgãos legisladores, pela praticidade desse e versatilidade do Vensim que se caracteriza como uma das vantagens do uso da técnica de dinâmica de sistema que é ideal para análise de sistemas complexos.

No modelo, as variáveis como tipo de estabelecimento, taxa de crescimento das UCs comerciais, renda mensal ou faixa salarial dos estabelecimentos foram calculados com base em estabelecimentos residenciais, considerando que a legislação brasileira permite a instalação compartilhada, na qual o estabelecimento a ser compensado não necessita estar instalado no mesmo local, as considerações são tidas como aceitáveis. Porém, para estimações e projeções futuras caso se tenha estes dados disponíveis a substituição trará um maior ganho as simulações.

Por outra, é necessário a atenção de que, todo modelo de planejamento ou modelagem oferece suas limitações por esta razão o principal pormenor para o uso da técnica de dinâmica de sistema é o conhecimento do sistema e da problemática a ser estudada. No presente trabalho um dos principais objetivos é analisar o comportamento dos micros consumidores comerciais frente à decisão de aderir a uma inovação de SFV. Através de consulta à literatura não foi achado um banco de dados com registros completos das instituições comerciais, realçando o

discorrido na seção 2.2.3, ao aborda na Figura 2.9, sobre evolução dos modelos de projeção de energia na qual se destaca o custo das informações para minimizar as distorções nos modelos de projeção e/ou previsão de energia. Por isso, a importância de pioneirismo do presente trabalho, para futuros estudos no intuito do uso do modelo, e contribuições relevantes aos estudos de planejamento.

De modo geral, pela análise das curvas de crescimento, da adoção para cada cenário estudado, percebe-se pouca diferença nos primeiros anos, como caracterização do prazo de maturação da inovação, normalmente onde se estabelecem os inovadores (2,5%) e em projeções de elevado crescimento também os adoradores (13,5%). Se percebe de igual modo que, a curva do Cenário 4 do estudo I obedece ao modelo de referência proposto por Everett Rogers de um crescimento em S, devido à maior quantidade de incentivos.

Por sua vez, no estudo II os cenários em ambos os casos apresentam um aumento de adotantes em relação ao cenário base, o que é explicado pela redução do tempo de *payback* ocasionado pela venda do excedente gerado.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos se mostram satisfatório para todos os cenários estudados. Evidenciam que a difusão dos sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo depende de diversos fatores e políticas definidas, como por exemplo: o preço dos sistemas fotovoltaicos, a tarifa de energia elétrica, os incentivos com taxa de serviço e impostos de importação para adoção de SFV, e a adoção por outros consumidores que está intimamente relacionado ao coeficiente de imitação (q) do modelo de Bass.

As curvas de difusão obtidas nos resultados estão de acordo com a curva de difusão das inovações do modelo de referência de crescimento em S, sendo que a curva do cenário 4 do estudo de caso I é claramente representado em forma de S para a distribuição acumulada e em forma de sino na distribuição normal. Demonstrando como os incentivos podem acelerar a adoção, atingindo a quase totalidade dos potenciais adotantes em 20 anos. Para os demais cenários, com menos incentivos, o modelo permaneceu robusto, respondendo a todas as mudanças de parâmetros, mas apresentando um comportamento mais contido de adoções, em que se levaria muito mais de 25 anos para se atingir a saturação do mercado.

O resultado do estudo de caso II no contexto de aplicação do modelo de negócio ou política que buscava estabelecer a venda de excedentes de energia gerada pelos prosumidores aos agentes da distribuição de energia, mostrou que em ambos os experimentos a venda de energia excedente traria uma maior atratividade que resultaria em uma quantidade maior de prosumidores com GDFV, sem mencionar que o ato em si abriria um leque de possibilidade, já que parte deste retorno seria auferido monetariamente, e não apenas com abatimento da conta de luz, como ocorre na modalidade *Net Metering*.

No entanto, sem o ressarcimento adequado desta energia, o tempo de retorno do investimento tende a ser alto, o que resultaria em baixa adoção da tecnologia fotovoltaica. Deste modo, conclui-se que a não ser que seja considerada uma tarifa para venda do excedente de no mínimo 50% do valor da tarifa do Mercado Cativo ou próxima do valor teto da tarifa do Mercado de Curto Prazo, não é atrativo para um prosumidor possuir instalações com produção elevada de excedente.

Assim sendo, a metodologia mostra ser uma ferramenta versátil e útil que pode ser utilizada pelos distribuidores de energia e instituições de planejamento para analisar os possíveis tipos de incentivos à implantar para instalação de SFV, assim como ponderar políticas

para cada cidade, levando em consideração os aspectos relacionados à decisão do consumidor em aderir, fatores esses que envolvem muitas incertezas.

Portanto, como visto na fundamentação teórica a aplicação de políticas funcionais em sistemas dinâmicos e complexos requer mais do que ferramentas técnicas e modelos matemáticos. É necessário fazer planejamento simulando diferentes cenários de crescimento, o que auxiliaria em avaliar outras problemáticas como o impacto econômico-financeiro ou problemas de natureza técnica que os SFV podem carrear às redes de distribuição de energia elétrica presentemente e no futuro.

5.1. TRABALHOS FUTUROS

Verificou-se pelo presente estudo que as instalações comerciais estão geralmente situadas em espaço de localização próximos um dos outros, o que em prática resulta em um sobrecarregamento de um mesmo alimentador ou linha de distribuição. Logo, para futuros trabalhos recomendasse estudar o impacto da difusão concentrada no espaço da rede de distribuição de energia elétrica e associar essa problemática no entendimento da variável verticalização e seu impacto na difusão de consumidores de instalação local e remota usando o modelo econômico desagregado;

Outros estudos podem ser:

- Estudo para definição e criação de um banco de dados com registros mais específicos das instituições comerciais para minimizar as distorções nos modelos de projeção de energia. Ou uma Pesquisa de mercado com os proprietários dos estabelecimentos em relação a visão destes na adoção e o efeito de que a maioria dos estabelecimentos comerciais são alugados.
- Os modelos causais são um tipo de instrumento eficaz para se iniciar a discussão de uma situação-problema ao representar qualitativamente as relações de causa e efeito (origem do problema e consequências) que ocorrem em um sistema complexo, logo, seria interessante acoplar os modelos causais a fase inicial dos problemas de engenharia para análise qualitativa a problemática e após fazer a análise quantitativa empregando outras linguagens para ganhar maior velocidade nas simulações, reprodutibilidade, automação e flexibilidade.

5.2. TRABALHOS REALIZADOS

Durante o mestrado, foram desenvolvidos os seguintes trabalhos e publicações:

- Uso do modelo proposto para análise e simulação de modelo de negócios hipotéticos em estudo no projeto de Pesquisa intitulado **Valoração dos impactos da geração distribuída no equilíbrio econômico-financeiro da distribuidora com proposição de novos modelos de negócio e mudança regulatória nacional**, coordenado pelo Prof. Dr. Mauricio Sperandio. O projeto está registrado no SIE sob o número 052950.
- CBQEE 2021– XIV Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica
Título do Trabalho: Avaliação do FP e Sobretensões Devido à Difusão de Geração Distribuída Fotovoltaica em um Alimentador.
Autores: Mauricio Sperandio, Gustavo Mores de Lazari, Hilquias S. E. Chiquete, Fernando Schmidt, Laura Callai dos Santos, Rafael Ney.
Data/Local: 29 de agosto a 01 de setembro de 2021. Foz do Iguaçu-PR, Brasil.
Situação: Publicado, DOI: 10.17648/cbqee-2021-130542.
- SBSE 2022 - IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos
Título do Trabalho: Projeção da difusão de sistemas fotovoltaicos em consumidores comerciais de baixa tensão considerando cenário com venda de excedente da geração.
Autores: Hilquias S. E. Chiquete, Laura L.C. Santos, Mauricio Sperandio, Gustavo M. Lazari, Rafael C. Ney.
Data/Local: 10 a 13 de julho de 2022. Santa Maria- RS, Brasil.
Situação: Submetido.
- CLADE 2021- “IV Congreso de las Américas de Distribución Eléctrica”
Título do Trabalho: “*proyección de la difusión de sistemas fotovoltaicos para consumidores del grupo B*”.
Autores: Hilquias S. E. Chiquete, Laura L.C. Santos, Mauricio Sperandio, Rafael C. Ney.
Local: Buenos Aires, Argentina.

Situação: Submetido e aceito, porém devido aos protocolos causados pela COVID-19 o trabalho foi transferido ao “*Congreso Internacional de Distribución Eléctrica (CIDEL)*” em setembro de 2022 na Argentina.

6. ANEXOS

ANEXO A:

Tabela A.6.1-Anexo A: Premissas utilizadas para as simulações.

ID	Cidades	Tipo de Consumidor	IDH	Nível de escolaridade	Qdt Consumidores Total	Taxa de Crescimento	Variação PIB	Mais de 3 salários-mínimos %	Qtd Atual de GD	Consumo Total (kWh/mês)	Demanda (kWh/mês)	Demanda Anual (kWh/ano)	Recursos solares (kWh/m ² /dia)	Potência dos módulos (kWp)
1	Bagé	B3	0,740	24,06%	3.629	0,41%	1,42%	35,87%	36	1.565.809,00	431,47	5177,65	4,53	0,330
2	Camaquã	B3	0,697	16,22%	1.998	0,61%	1,42%	32,42%	49	851.961,00	426,41	5116,88	4,30	0,330
3	Canguçu	B3	0,650	10,26%	1.138	0,57%	1,42%	20,47%	21	447.209,00	392,98	4715,74	4,35	0,330
4	Guaíba	B3	0,730	28,67%	2.319	0,34%	1,42%	47,95%	21	1.066.865,00	460,05	5520,65	4,46	0,330
5	Osorio	B3	0,751	24,29%	2.135	1,31%	1,42%	47,68%	35	1.089.760,00	510,43	6125,11	4,30	0,330
6	Pelotas	B3	0,739	25,03%	12.844	0,47%	1,42%	42,09%	143	5.053.905,00	393,48	4721,80	4,26	0,330
7	Porto Alegre	B3	0,805	30,36%	82.040	0,58%	1,42%	66,08%	232	35.827.955,00	436,71	5240,56	4,43	0,330
8	Rio Grande	B3	0,744	26,23%	6.352	0,76%	1,42%	45,34%	28	2.423.441,00	381,52	4578,29	4,37	0,330
9	S.Antonio da Patrulha	B3	0,717	17,73%	1.474	0,88%	1,42%	38,93%	45	734.854,00	498,54	5982,53	4,44	0,330
10	S.Lourenço do Sul	B3	0,687	13,43%	1.253	0,12%	1,42%	44,79%	35	469.042,00	374,34	4492,02	4,35	0,330
11	Tramandaí	B3	0,719	22,00%	2.606	2,43%	1,42%	46,90%	18	1.175.407,00	451,04	5412,47	4,52	0,330
12	Viamão	B3	0,717	25,06%	4.129	0,72%	1,42%	45,19%	35	1.809.242,00	438,18	5258,15	4,41	0,330
	Média	B3	0,725	21,95%	121.917	0,7673%	1,42%	42,81%	698	52.515.450,00	432,93	5195,15	4,39	0,330

Continuação do Anexo A

Qtd Módulos Necessários	Qtd de Inversores	Energia Gerada (KWh/ano)	Excedente (KWh)	Potencial nominal de GD a instalar kWp	Tarifa da Distribuidora(kWh)	ICMS	Operação/manutenção	Inversor	Preço médio de Instalação	Preço do modulo	Dificuldade de instalação	q	p	UCs tipo Casa & Própria (%)	Verticalização
13	4	6.063,35	17%	4,29	R\$ 0,517539	30,00%	R\$ 200,00	R\$ 2.000,00	R\$ 6.769,22	R\$ 849,00	80,00%	0,5	0,004		7,12%
13	4	5.755,50	12%	4,29	R\$ 0,517539	30,00%	R\$ 200,00	R\$ 2.000,00	R\$ 6.769,22	R\$ 849,00	80,00%	0,5	0,004		4,10%
12	4	5.374,55	14%	3,96	R\$ 0,517539	30,00%	R\$ 200,00	R\$ 2.000,00	R\$ 6.769,22	R\$ 849,00	80,00%	0,5	0,004	77,27%	2,66%
14	5	6.428,86	16%	4,62	R\$ 0,517539	30,00%	R\$ 200,00	R\$ 2.000,00	R\$ 6.769,22	R\$ 849,00	80,00%	0,5	0,004		7,52%
16	5	7.083,69	16%	5,28	R\$ 0,517539	30,00%	R\$ 200,00	R\$ 2.000,00	R\$ 6.769,22	R\$ 849,00	80,00%	0,5	0,004		4,71%
12	4	5.263,35	11%	3,96	R\$ 0,517539	30,00%	R\$ 200,00	R\$ 2.000,00	R\$ 6.769,22	R\$ 849,00	80,00%	0,5	0,004		17,71%
13	4	5.929,50	13%	4,29	R\$ 0,517539	30,00%	R\$ 200,00	R\$ 2.000,00	R\$ 6.769,22	R\$ 849,00	80,00%	0,5	0,004	41,60%	43,66%
12	4	5.399,26	18%	3,96	R\$ 0,517539	30,00%	R\$ 200,00	R\$ 2.000,00	R\$ 6.769,22	R\$ 849,00	80,00%	0,5	0,004	68,17%	9,13%
15	5	6.857,18	15%	4,95	R\$ 0,517539	30,00%	R\$ 200,00	R\$ 2.000,00	R\$ 6.769,22	R\$ 849,00	80,00%	0,5	0,004		1,58%
11	4	4.926,67	10%	3,63	R\$ 0,517539	30,00%	R\$ 200,00	R\$ 2.000,00	R\$ 6.769,22	R\$ 849,00	80,00%	0,5	0,004		1,02%
13	4	6.049,97	12%	4,29	R\$ 0,517539	30,00%	R\$ 200,00	R\$ 2.000,00	R\$ 6.769,22	R\$ 849,00	80,00%	0,5	0,004	72,42%	1,74%
13	4	5.902,73	12%	4,29	R\$ 0,517539	30,00%	R\$ 200,00	R\$ 2.000,00	R\$ 6.769,22	R\$ 849,00	80,00%	0,5	0,004		1,81%
13	4	5.919,55	13,88%	4,32	R\$ 0,517539	30,00%	R\$ 200,00	R\$ 2.000,00	R\$ 6.769,22	R\$ 849,00	80,00%	0,5000	0,0040	64,87%	8,56%

ANEXO B: Outras principais variáveis de saída do modelo proposto.

Figura B.1 – Variáveis de saída vistas no Software Vensim estudo de Caso I.

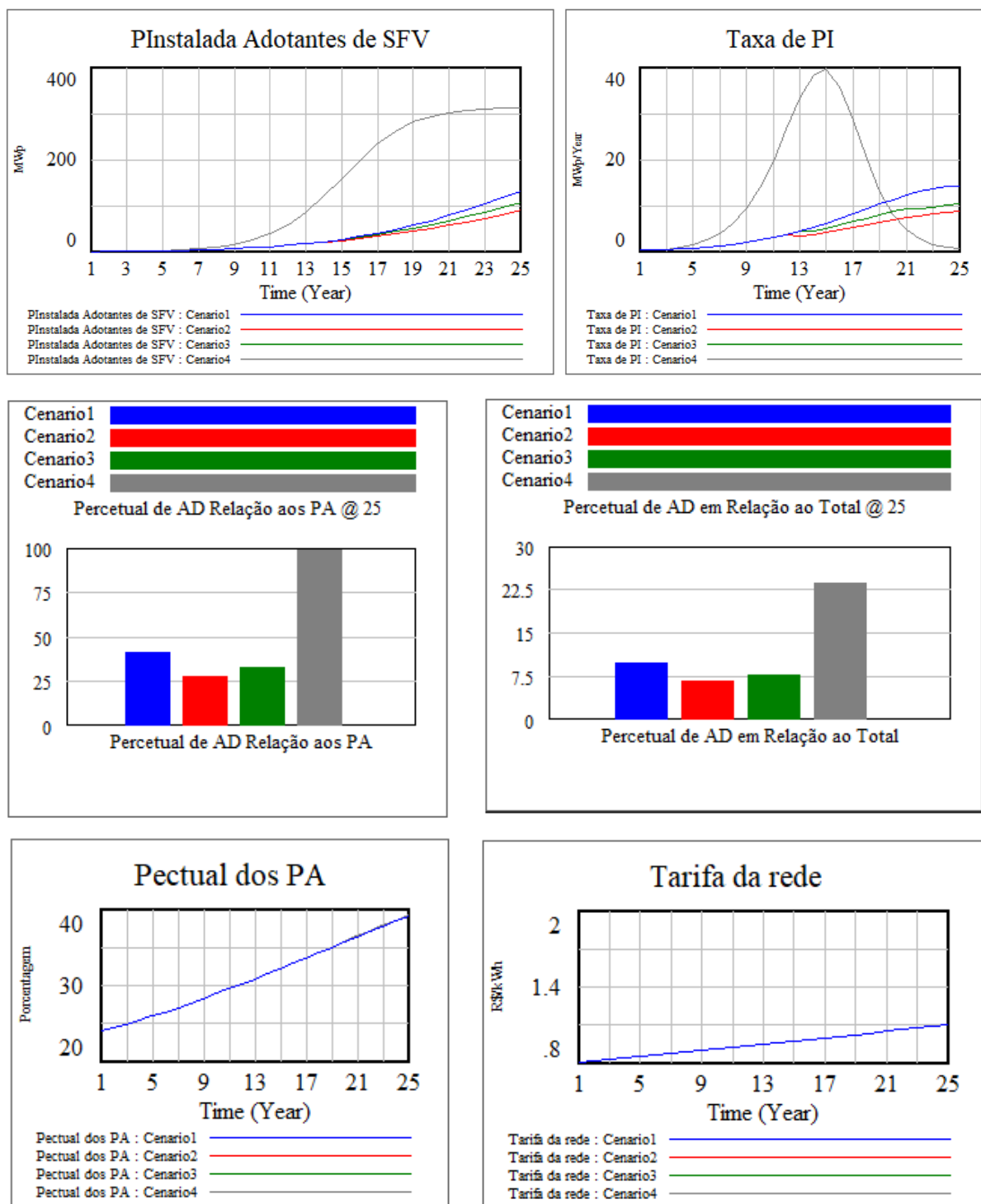
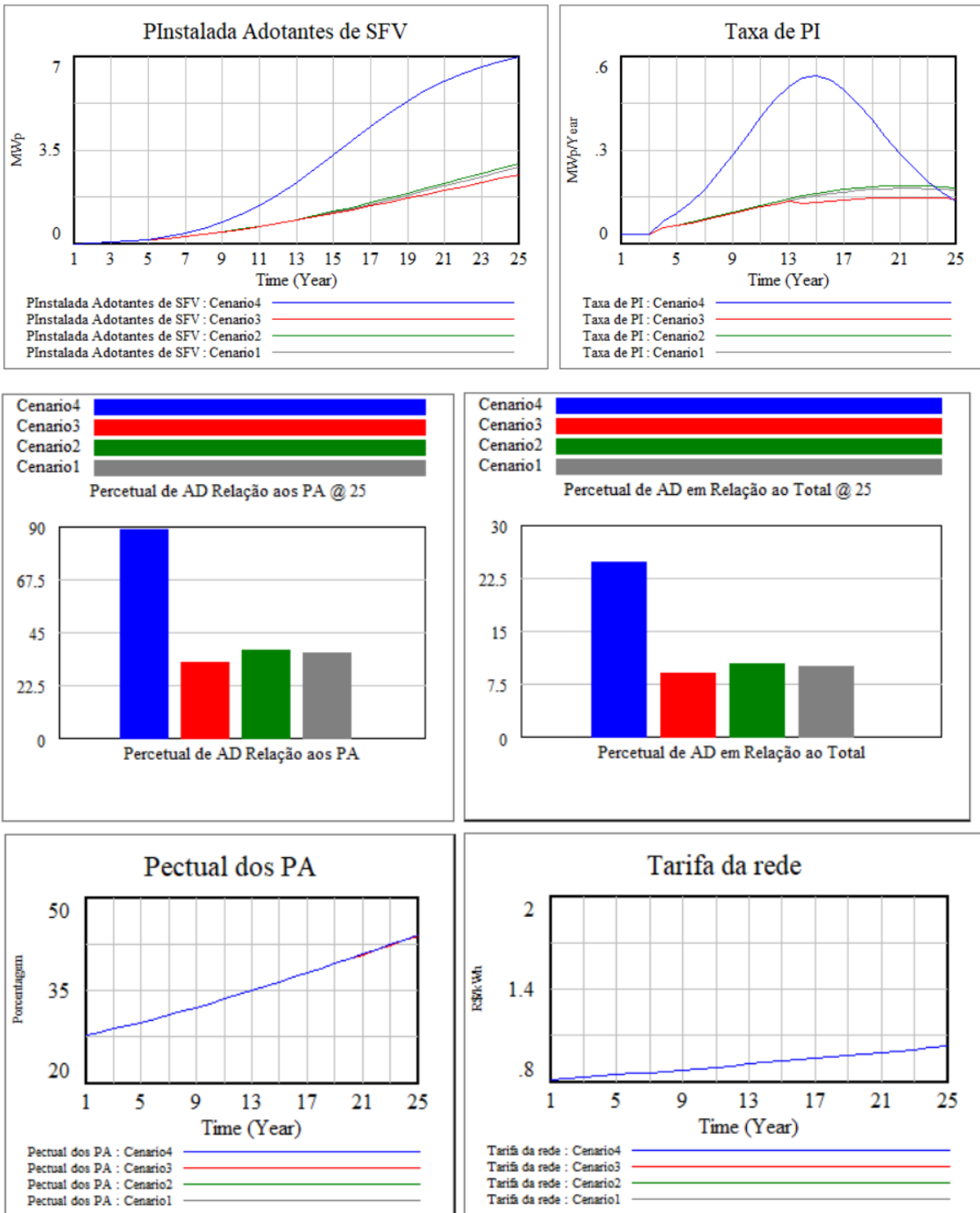


Figura B.2 - Variáveis de saída vistas no Software Vensim para Tramandaí estudo de Caso II



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL. **Cadernos Temáticos ANEEL|Micro e Minigeração distribuída**. 2. ed. Brasil: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2016.

ANEEL. **Nota Técnica nº 0056/2017-SRD/ANEEL**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2017.

ANEEL. **Geração Distribuída**. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>>. Acesso em: 30 jul. 2020a.

ANEEL. **Revisão das regras aplicáveis à micro e minigeração distribuída-Resolução Normativa nº 482/2012**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2018b.

ANEEL. **Geração Distribuída: Planilha de dados SISGD**. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiaZjM4NjM0OWYtN2IwZS00YjViLTllMjItN2E5MzBkN2ZlMzVkIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>>. Acesso em: 17 jun. 2021.

ASLANI, A.; MOHAGHAR, A. Business structure in renewable energy industry: Key areas. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 27, p. 569–575, 1 nov. 2013.

BAJAY, S. et al. **Geração distribuída e eficiência energética Reflexões para o setor elétrico de hoje e do futuro**. 1ª edição ed. Campinas-SP: International Energy Initiative, 2018.

BASS, F. M. A new product growth for model consumer durables. **Management science**, v. 15, p. pp.215-227, 1969.

BURGER, S. P.; LUKE, M. Business models for distributed energy resources: A review and empirical analysis. **Energy Policy**, v. 109, p. 230–248, 1 out. 2017.

CANADIAN-SOLAR INC. **Canadian Solar Datasheet- MaxPower CS6U-P EN**, 2017.

CASTANEDA, M. et al. Myths and facts of the utility death spiral. **Energy Policy**, v. 110, p. 105–116, 1 nov. 2017.

CASTRO, N. J. DE; DANTAS, G. **Experiências Internacional em Geração Distribuída: Motivações, Impactos e Ajustes**. Rio de Janeiro: Publit, 2018.

CEEE-D. **Tarifas e Custos — Portal CEEE**. Disponível em: <<https://www.cee.com.br/a-cee/tarifas-e-custos>>. Acesso em: 10 nov. 2020.

COSTA, H. L. DA. **Dinâmica de Sistemas – Vensim PLE**, 2004.

CRESESB. **Potencial Solar SunData**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em: 15 nov. 2020.

EPE. **Estudos de Longo Prazo: Recursos Energéticos Distribuídos, Documento de Apoio ao PNE 2050**. Brasil: Empresa de Pesquisa Energetica, 2019.

EPE. **NOTA TÉCNICA EPE DEA-SEE 010/2020-Modelo de Mercado da Micro e Minigeração Distribuída (4MD): Metodologia-Versão PDE 2030**. Brasil: Empresa de Pesquisa Energetica, 2020.

EPE. **NOTA TÉCNICA DEA EPE DEA-SEE 009/2021 - Modelo de Mercado da Micro e Minigeração Distribuída (4MD): Metodologia – Versão PDE 2031. Empresa de Pesquisa Energética**, p. 26, 2021.

FIGUEIREDO, J. C. B. DE. **MODELO DE DIFUSÃO DE BASS: UMA APLICAÇÃO PARA A INDÚSTRIA DE MOTOCICLETAS NO BRASIL. Revista Gestão Industrial**, 2012.

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

GARCEZ, C. G. Distributed electricity generation in Brazil: An analysis of policy context, design and impact. **Utilities Policy**, v. 49, p. 104–115, 1 dez. 2017.

GARLET, T. B. et al. Paths and barriers to the diffusion of distributed generation of photovoltaic energy in southern Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 111, p. 157–169, 1 set. 2019.

IBGE. **Cidades Rio Grande do Sul Censo 2010**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/pesquisa/23/27652?detalhes=true>>. Acesso em: 30 out. 2021.

IEA. **Do we need to change our behaviour to reach net zero by 2050? – Analysis - IEA**. Disponível em: <<https://www.iea.org/articles/do-we-need-to-change-our-behaviour-to-reach-net-zero-by-2050>>. Acesso em: 2 nov. 2021.

JANNUZZI, G. D. M.; SWISHER, J.; REDLINGER, R. **PLANEJAMENTO INTEGRADO DE RECURSOS ENERGÉTICOS: oferta, demanda e suas interfaces**. 2. ed. Campinas: IEI Brasil, 2018. v. único

KONZEN, G. **Difusão de sistemas fotovoltaicos residenciais conectados à rede no Brasil: uma simulação via modelo de Bass**. São Paulo: Dissertação (Mestrado em Ciências) - USP, 2014.

LEI Nº 14.300 DE 06 DE JANEIRO DE 2022. . 2022, p. D.O.U de 07/01/2022, pág. nº 4.

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

NREL. **Cost-Reduction Roadmap for Residential Solar Photovoltaics (PV), 2017–2030**. U.S: National Renewable Energy Laboratory, 2018.

PIB Total - Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/pib-total>>. Acesso em: 10 out. 2021.

PORTAL-SOLAR. **Quanto Custa para Instalar Energia Solar - Portal Solar - Tudo sobre Energia Solar Fotovoltaica**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/quanto-custa->

para-instalar-energia-solar.html>. Acesso em: 16 jun. 2021.

REDDY, S.; PAINULY, J. P. Diffusion of renewable energy technologies-barriers and stakeholders' perspectives. **Renewable Energy**, v. 29, n. 9, p. 1431–1447, 1 jul. 2004.

RICHTER, M. Business model innovation for sustainable energy: German utilities and renewable energy. **Energy Policy**, v. 62, p. 1226–1237, 1 nov. 2013.

ROGERS, E. M. **Diffusion of Innovations: Fifth Edition**. 5. ed. New York, USA: The Free Press. Kindle Edition, 2003.

ROGERS, E. M.; SINGHAD, A.; QUINLAN, M. M. Diffusion of innovations. In: **A chapter in Stacks D. and Salwen M. ed. An integrated approach to communication theory and research**. 2. ed. New York, USA: [s.n.]. p. 26.

SANTOS, L. L. DOS. **PROJEÇÃO DA DIFUSÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM CONSUMIDORES RESIDENCIAIS DE BAIXA TENSÃO**. Santa Maria (RS): (Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, 2018.

SANTOS, L. L. C. DOS; 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.

SDS. **Home for Systems Thinkers and Dynamic System Modelers**. Disponível em: <<https://systemdynamics.org/>>. Acesso em: 17 set. 2021.

STEPHENSON, G. **The Somewhat Flawed Theoretical Foundation of the Extension Service**. Disponível em: <<https://archives.joe.org/joe/2003august/a1.php>>. Acesso em: 15 set. 2021.

STERMAN, J. D. **Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World**. 1. ed. Boston: Jeffrey J. Shelsfud, 2000. v. 1

STERMAN, J. D. **Business Dynamics, System Thinking and Modeling for a Complex World**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/44827001_Business_Dynamics_System_Thinking_and_Modeling_for_a_Complex_World>. Acesso em: 15 jul. 2021.

TOLMASQUIM, M. T. et al. Strategies of electricity distributors in the context of distributed energy resources diffusion. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 84, n. May, p. 106429, 2020.

WANG, W.; YU, N.; JOHNSON, R. A model for commercial adoption of photovoltaic systems in California. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 9, n. 2, p. 025904, 1 mar. 2017.

ZHANG, M.; ZHANG, Q. Grid parity analysis of distributed photovoltaic power generation in China. **Energy**, v. 206, p. 118165, 1 set. 2020.