

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CAMPUS CACHOEIRA DO SUL  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Stephanie Pastorelli Biasotto**

**DEFINIÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DOS ASPECTOS QUE  
INFLUENCIAM A DIFUSÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM  
CONSUMIDORES RESIDENCIAIS**

Cachoeira do Sul, RS  
2019

**Stephanie Pastorelli Biasotto**

**DEFINIÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DOS ASPECTOS QUE INFLUENCIAM A  
DIFUSÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM CONSUMIDORES  
RESIDENCIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup>. Laura Lisiane Callai dos Santos

Cachoeira do Sul, RS  
2019

**Stephanie Pastorelli Biasotto**

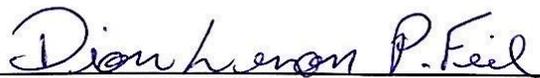
**DEFINIÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DOS ASPECTOS QUE INFLUENCIAM A  
DIFUSÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM CONSUMIDORES  
RESIDENCIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

**Aprovado em 12 de Dezembro de 2019:**



**Laura Lisiane Callai dos Santos, Dr<sup>a</sup>. (UFSM)**  
(Presidente/Orientadora)



**Dion Lenon Prediger Feil, Dr. (UFSM)**



**Paulo César Vargas Luz, Dr. (UFSM)**

Cachoeira do Sul, RS  
2019

## AGRADECIMENTOS

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

- à minha mãe Andrea, por ter me apoiado todos esses anos longe de casa, por sempre ter me incentivado a dar o meu melhor, a superar todos os obstáculos que apareceram de cabeça erguida e mesmo com muita saudade, não me deixar desistir dos meus sonhos;

- à minha família, avô, avós, tios, tias, primos e primas, que me ajudaram a concluir essa etapa da minha vida e entenderam a minha ausência;

- à professora Laura Lisiane Callai dos Santos que aceitou ser minha orientadora, pela colaboração, confiança e compreensão durante este trabalho;

- à coordenadora do Curso de Engenharia Elétrica do Campus de Cachoeira do Sul, Cristiane Cauduro Gastaldini, que me apoiou e me incentivou a estudar todos esses anos, e pela preocupação que teve por mim;

- aos meus colegas que me ajudaram no decorrer desses anos, agradeço à compreensão, amizade e parceria que tivemos;

- aos demais professores da Graduação de Engenharia Elétrica do campus de Cachoeira do Sul que contribuíram pela minha formação;

- às grandes e espero que duradouras amigas que fiz durante esses anos de graduação em Cachoeira do Sul, que também foram minha família e meus psicólogos nesse período, que sempre compreenderam minha ausência e me ajudaram em todo o decorrer de mais uma etapa da minha vida;

Enfim a todos àqueles que fazem parte da minha vida e que são essenciais para eu ser, a cada dia dessa longa jornada, uma pessoa mais forte e mais dedicada.

## RESUMO

### **DEFINIÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DOS ASPECTOS QUE INFLUENCIAM A DIFUSÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM CONSUMIDORES RESIDENCIAIS**

AUTORA: Stephanie Pastorelli Biasotto

ORIENTADORA: Laura Lisiane Callai dos Santos, Dr<sup>a</sup>. Eng.

Com a crescente demanda de energia elétrica e as diversas preocupações ambientais, aumento dos combustíveis fósseis e segurança energética, aumentou a preocupação de produção de energia a partir de fontes renováveis. Em 2002, foi criado pela lei nº 10.438 o PROINFA, que tem como objetivo aumentar a participação de fontes alternativas de energia. Em 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica publicou a Resolução Normativa (RN) nº 482, atualizada pela RN nº 687, que estabelece condições gerais para o acesso à microgeração e minigeração distribuída, incentivando a inserção de Geração Distribuída em consumidores residenciais de Baixa Tensão. A inserção de sistemas fotovoltaicos pelos consumidores residenciais é a mais difundida, porém sua utilização introduz um fator de incerteza no planejamento dos sistemas de distribuição de energia elétrica, pois a decisão de adquirir um sistema fotovoltaico depende de cada consumidor. Essas incertezas são barreiras, que podem ser classificadas em aspectos econômicos, sociais, técnicos, de gestão e políticos. Neste sentido, este trabalho apresenta uma proposta para a determinação da contribuição de cada aspecto, através do método multicritério Analytic Hierarchy Process (AHP) (técnica estruturada utilizada em situações complexas baseada na matemática e psicologia), considerando um modelo de previsão de difusão de sistemas fotovoltaicos que utiliza a técnica de dinâmica de sistemas e o modelo de Bass. Esse estudo apresenta propostas de políticas energéticas direcionadas aos aspectos econômicos (maior impacto), técnicos e políticos, pois possuem maior influência para o processo de difusão de acordo com a determinação pelo método AHP, segundo pesquisas realizadas com especialistas.

Palavras chave: Sistemas Fotovoltaicos; Geração Distribuída; Difusão; Analytic Hierarchy Process (AHP); Dinâmica de Sistemas; Políticas Energéticas.

## **ABSTRACT**

### **PROJECTION OF DIFFUSION OF PHOTOVOLTAICS SYSTEMS IN RESIDENTIAL CONSUMERS, USING THE MULTICRITERIA METHOD AHP FOR DECISION MAKING**

**AUTHOR:** Stephanie Pastorelli Biasotto  
**ADVISOR:** Laura Lisiane Callai dos Santos, Dr<sup>a</sup>. Eng.

With an increasing demand for electricity and the various concerns about the environment, increase of fossil fuels and energy security, increased the concern of producing energy from renewable sources. In 2002 was created by the Law nº 10.438 PROINFA, which aims to increase the participation of alternative energy sources. In 2012, the National Electric Energy Agency (ANEEL) published the Normative Resolution nº 482, updated by nº 687, which establishes general conditions for access to distributed microgeneration and minigeration, encouraging the insertion of Distributed Generation in Low Voltage residential consumers. The insertion of photovoltaic systems by residential consumers is the most widespread, but its use introduces an uncertainty factor in the planning of electricity distribution systems, since the decision to acquire a photovoltaic system depends on each consumer. These uncertainties are barriers that can be classified into economic, social, technical, management and political aspects. In this sense, this work presents a proposal for the determination of the contribution of each aspect, through the multicriteria method Analytic Hierarchy Process (AHP)( astructured technique used in complex situations based on mathematics and psychology), considering a diffusion prediction model of photovoltaic system that uses the technique of system dynamics and the model of Bass. This study proposals energy policies directed to the aspects economics (higher), technicols and politicals, as they have a greaterinfluence on the diffusion process according to the determination by the AHP method, based on research conducted with experts.

**Key-Words:** Photovoltaic Systems; Distributed Generation; Diffusion; Analytic Hierarchy Process; Dynamic Systems; Energy Policies.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Desenvolvimento e Instalação de Energia Fotovoltaica. ....	33
Tabela 2 – Escala numérica fundamental para utilização do método AHP. ....	38
Tabela 3 – Índice aleatório de consistência.....	39
Tabela 4 – Dados referentes às opções de restabelecimento de energia.....	42
Tabela 5 – Soma dos critérios de cada opção. ....	43
Tabela 6 – Ferramenta para Cálculo do Método AHP.....	49
Tabela 7 – Matriz de Comparação da Junção dos Resultados dos Especialistas analisados. ....	53
Tabela 8 – Peso dos Critérios dos Especialistas.....	54
Tabela 9 – Resultados obtidos pela análise dos cenários.....	59

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estágios do Processo de Difusão.....	16
Figura 2 – Distribuição dos Adotantes.....	17
Figura 3 – Curva de Adoção em formato de S. ....	18
Figura 4 – Processo de Modelagem utilizando a DS.....	24
Figura 5 – Representação dos Indicadores de Laços. ....	25
Figura 6 – Exemplo de conexão causal e de polaridade.....	25
Figura 7 – Exemplo de um diagrama de laço causal.....	26
Figura 8 – Simbologia utilizada no diagrama de estoque e fluxo. ....	27
Figura 9 – Adoção devido a influências externas e internas – Modelo de Bass.....	29
Figura 10 – Diagrama de estoque e fluxo do modelo.....	30
Figura 11 – Exemplo de hierarquia de critérios. ....	37
Figura 12 – Arquitetura da Metodologia Proposta. ....	46
Figura 13 – Metodologia da Definição dos Pesos de Cada Aspecto.....	48
Figura 14 – Adotantes de Sistemas Fotovoltaicos – Cachoeira do Sul.....	55
Figura 15 – Adotantes de Sistemas Fotovoltaicos – Cenário 1.....	56
Figura 16 – Adotantes de Sistemas Fotovoltaicos – Cenário 2.....	57
Figura 17 – Adotantes de Sistemas Fotovoltaicos – Cenário 3.....	58
Figura 18 – Sobreposição dos Cenários. ....	59

## LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

a – Contribuição na Tomada de Decisão do Aspecto Econômico  
AHP – Analytic Hierarchy Process  
ANP – Analytic Network Process  
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica  
b – Contribuição na Tomada de Decisão do Aspecto Gestão  
BT – Baixa Tensão  
c – Contribuição na Tomada de Decisão do Aspecto Político  
d – Contribuição na Tomada de Decisão do Aspecto Social  
DS – Dinâmica de Sistemas  
e – Contribuição na Tomada de Decisão do Aspecto Técnico  
EA – Estimacão Algébrica  
ELECTRE – Elimination et Choice Traduisant la Realit  
EMV – Estimativa por Máxima Verossimilhança  
FIT – Feed-in Tariff  
GD – Geração Distribuída  
MACBETH – Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique  
MQNL – Mínimos Quadrados não Lineares  
MQO – Mínimos Quadrados Ordinários  
PRODEEM – Programa para Desenvolvimento da Energia para Estados e Municípios  
PROINFA – Programa de Incentivo s Fontes Alternativas de Energia  
PROMOTHEE – Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations  
RN – Resolução Normativa  
SMART – Simple Multi Attribute Rating Technique

## SUMÁRIO

1.1.	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	11
1.2.	MOTIVAÇÕES E JUSTIFICATIVA.....	12
1.3.	OBJETIVOS.....	13
1.3.1.	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>13</b>
1.3.2.	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>13</b>
1.4.	CONTRIBUIÇÕES.....	14
1.5.	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	14
2.	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>16</b>
2.1.	DIFUSÃO DE INOVAÇÕES.....	16
2.2.	DIFUSÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	19
2.3.	DINÂMICA DE SISTEMAS.....	23
2.4.	POLÍTICAS ENERGÉTICAS.....	30
2.4.1.	<b>Políticas Energéticas no Brasil.....</b>	<b>31</b>
2.4.2.	<b>Políticas Energéticas no Mundo.....</b>	<b>32</b>
2.5.	MÉTODOS MULTICRITÉRIOS PARA TOMADA DE DECISÃO.....	34
2.5.1.	<b>Método Multicritério SMART.....</b>	<b>35</b>
2.5.2.	<b>Método Multicritério ELECTRE.....</b>	<b>35</b>
2.5.3.	<b>Método Multicritério MACBETH.....</b>	<b>36</b>
2.5.4.	<b>Método Multicritério PROMOTHEE.....</b>	<b>36</b>
2.5.5.	<b>Método Multicritério AHP.....</b>	<b>37</b>
2.5.6.	<b>Método Multicritério ANP.....</b>	<b>40</b>
2.5.7.	<b>Exemplo de utilização do Método AHP.....</b>	<b>41</b>
2.6.	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO.....	44
3.	<b>METODOLOGIA PROPOSTA.....</b>	<b>46</b>
3.1.	METODOLOGIA PARA A DIFUSÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS...47	47
3.2.	METODOLOGIA PARA DEFINIÇÃO DOS PESOS DE CADA ASPECTO...47	47
3.3.	ANÁLISE DA CONTRIBUIÇÃO DE CADA ASPECTO.....	49
3.4.	MODELAGEM DO SISTEMA.....	50
4.	<b>ESTUDO DE CASO E RESULTADOS.....</b>	<b>51</b>
4.1.	ANÁLISE DOS ESPECIALISTAS.....	51
4.2.	RESULTADOS DOS ESPECIALISTAS.....	53
4.3.	DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE CONSUMIDORES.....	54

4.3.1. Cenário 1 .....	56
4.3.2. Cenário 2 .....	57
4.3.3. Cenário 3 .....	58
4.4. PROPOSTAS DE POLÍTICAS ENERGÉTICAS .....	60
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>62</b>
5.1. OPORTUNIDADES DE TRABALHOS FUTUROS .....	63
5.2. PRODUÇÃO CIENTÍFICA .....	63
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>64</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>69</b>
APÊNDICE A.1 .....	69
APÊNDICE A.2 .....	69
APÊNDICE A.3 .....	70
APÊNDICE A.4 .....	70
APÊNDICE A.5 .....	71
APÊNDICE A.6 .....	71
<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>72</b>
APÊNDICE B.1 .....	72
APÊNDICE B.2 .....	72
APÊNDICE B.3 .....	73
APÊNDICE B.4 .....	73
APÊNDICE B.5 .....	73
APÊNDICE B.6 .....	74
<b>ANEXO A .....</b>	<b>75</b>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Nos últimos anos, devido a crescente demanda de energia elétrica, preocupações em relação aos aspectos ambientais, aumento do preço dos combustíveis fósseis, preocupação com a poluição causadora do efeito estufa, preocupações sobre segurança energética, a produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis tem recebido uma maior atenção (ISLAM, 2014). Sendo a energia fotovoltaica a de maior destaque no Brasil, devido a maior incidência de raios solares no país e melhor acesso à tecnologia relacionada (ANEEL, 2015).

No Brasil, em 2002, foi criado um programa de incentivo às fontes alternativas de energia, o PROINFA, pela lei nº 10.438, com o objetivo de aumentar a participação de fontes alternativas renováveis na produção de energia elétrica. Em 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou a Resolução Normativa (RN) nº 482 de 2012 (ANEEL, 2012), que estabelece as condições gerais para o acesso à microgeração e a minigeração distribuída, ou seja, pequenas centrais geradoras de energia elétrica, próximas aos centros consumidores, que visam incentivar a inserção de Geração Distribuída (GD) em consumidores de Baixa Tensão (BT). De acordo com a ANEEL (2015), as fontes renováveis de energia que podem ser utilizadas pelo consumidor são a solar, eólica, de biomassa e a hídrica.

A RN nº 482/12 da ANEEL possui maiores informações sobre as regras para a micro e minigeração possibilitando o consumidor brasileiro à gerar sua própria energia elétrica e fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade (ANEEL, 2015). Após essa RN foi criada a RN nº 687/15, diminuindo o processo burocrático para a inserção das centrais geradoras junto às concessionárias de energia elétrica. Essa resolução alterou a potência de geração, fazendo com que a microgeração distribuída passasse a ser uma central geradora de energia elétrica com potência instalada menor ou igual a 75 kW, e a minigeração distribuída uma central geradora de energia elétrica com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW, para fontes hídricas, ou menor ou igual a 5 MW, para cogeração qualificada ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectadas à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2015).

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

Com a inserção de sistemas fotovoltaicos pelos consumidores residenciais de BT, se introduz um fator de incerteza no planejamento dos sistemas de distribuição de energia elétrica, pois a decisão de adquirir um sistema fotovoltaico vai depender da deliberação de cada consumidor. Dessa forma é necessário que se investiguem quais as barreiras e quais os estímulos necessários para promover a utilização desse tipo de microgeração distribuída pelos consumidores. Conseqüentemente devem ser considerados fatores como a aceitação desses consumidores e seu comportamento em relação à adoção da nova tecnologia.

Considerando estas premissas, neste trabalho é apresentada uma proposta para a determinação dos pesos dos aspectos econômicos, sociais, técnicos, de gestão e políticos, apresentados no modelo de Santos (2018), onde foi realizada a previsão da difusão de sistemas fotovoltaicos em consumidores residenciais de BT, utilizando como ferramenta a Técnica de Dinâmica de Sistemas (DS), em conjunto com o modelo de Bass, onde são considerados esses cinco aspectos para a difusão dos sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo. Para a determinação da influência de cada aspecto será utilizado um método multicritério para tomada de decisão. Desse modo, são definidos os pesos de cada aspecto considerado, determinando a quantidade de consumidores residenciais de BT ano longo do tempo.

## 1.2. MOTIVAÇÕES E JUSTIFICATIVA

A inserção de sistemas fotovoltaicos pelos consumidores residenciais de BT é um fator de incerteza no planejamento dos sistemas de distribuição de energia elétrica, pois a decisão de aquisição de um sistema fotovoltaico depende de cada consumidor.

Dessa forma é necessário investigar quais são as barreiras e os estímulos necessários para promover a utilização desse tipo de microgeração distribuída e qual é a relevância de cada uma dessas barreiras e estímulos.

A proposta aplicada pode ser utilizada para formular políticas energéticas para fontes renováveis, também pode ser empregada pelas distribuidoras de energia elétrica para os estudos de planejamento dos sistemas de distribuição, considerando a inserção de sistemas fotovoltaicos pelos consumidores de BT.

### 1.3. OBJETIVOS

#### 1.3.1. Objetivo Geral

Como objetivo geral deste trabalho tem-se a determinação da contribuição de cada aspecto (econômico, social, gestão, político e técnico) que é relevante para a difusão de sistemas fotovoltaicos em consumidores de BT a partir de uma metodologia, que utiliza a técnica de dinâmica de sistemas e o modelo de Bass. Para a determinação da contribuição de cada aspecto é utilizado o método multicritério Analytic Hierarchy Process (AHP).

#### 1.3.2. Objetivos Específicos

- 1- Realizar uma revisão sobre a difusão de sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo.
- 2- Revisar as barreiras que afetam a adoção dos sistemas fotovoltaicos por consumidores residenciais de BT.
- 3- Compreender o modelo de difusão de sistemas fotovoltaicos para consumidores residenciais de BT que utiliza técnica de Dinâmica de Sistemas. modelo de Bass e cinco aspectos que influenciam na decisão do consumidor em aderir um sistema fotovoltaico.
- 4- Fazer uma revisão dos métodos multicritério para tomada de decisão.
- 5- Analisar e avaliar o peso de cada aspecto (econômico, técnico, gestão, social e político) utilizando o método multicritério AHP, a partir de um estudo de sensibilidade.
- 6- Analisar e avaliar o comportamento da difusão de sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo considerando a contribuição de cada um dos aspectos considerados no modelo de difusão de sistemas fotovoltaicos para consumidores residenciais de BT.

#### 1.4. CONTRIBUIÇÕES

A principal contribuição desse trabalho está na determinação dos pesos de cada um dos cinco aspectos (econômico, social, técnico, gestão e político) que influenciam a adoção de sistemas fotovoltaicos pelos consumidores residenciais de BT, para que se possa determinar a quantidade de consumidores com GD ao longo do tempo. Desse modo, podem ser formuladas políticas energéticas para fontes renováveis e as concessionárias de energia elétrica podem utilizar essa quantidade de adotantes por ano para estudos de planejamento da expansão do sistema elétrico.

#### 1.5. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

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

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica que contextualiza a temática da difusão de inovações. É apresentada a difusão de sistemas fotovoltaicos nos consumidores residenciais de BT e as barreiras associadas à decisão do consumidor residencial em adquirir um sistema fotovoltaico. Apresenta os conceitos da técnica de DS, e o modelo a ser analisado. Contextualiza os métodos multicritérios para tomada de decisão, e apresenta um exemplo de utilização do método multicritério AHP.

No capítulo 3 é apresentado o modelo de metodologia proposta, a metodologia proposta é composta por quatro etapas. A primeira etapa é a utilização da metodologia de difusão de sistemas fotovoltaicos para consumidores residenciais de BT, considerando cinco aspectos que influenciam a decisão do consumidor em aderir um sistema fotovoltaico. A segunda etapa é a determinação da contribuição de cada um dos cinco aspectos utilizando o método AHP. A terceira etapa consiste na utilização do modelo de difusão juntamente com a determinação dos pesos de cada aspecto para a análise do sistema ao longo dos anos a fim de formular políticas energéticas e por fim, são apresentados os resultados obtidos.

O capítulo 4 apresenta as pesquisas realizadas com seis especialistas em sistemas fotovoltaicos, apresentando os aspectos de maior e menor influência e seus valores para cada um dos especialistas e também uma análise em conjunto

dos especialistas. Este capítulo também apresenta a determinação da quantidade de consumidores ao longo do tempo por meio de estudos de caso segundo os resultados obtidos pelos especialistas e também baseado em três cenários. O primeiro cenário é um cenário otimista, o segundo cenário é um cenário realista e o terceiro cenário é um cenário ideal. Após determinado os aspectos de maior e menor influência, é apresentadas políticas energéticas considerando os três aspectos de maior impacto na difusão de sistemas fotovoltaicos em consumidores residenciais de baixa tensão.

O capítulo 5 traz uma conclusão dos resultados obtidos dos especialistas, assim como uma síntese de cada um dos cenários analisados para a determinação da quantidade de consumidores utilizando a técnica de dinâmica de sistemas e o modelo de Bass, após determinado o peso de cada um dos aspectos que influenciam nesse modelo e também um resumo das políticas energéticas que serão de maior impacto para a difusão de sistemas fotovoltaicos.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a contextualização sobre a difusão dos sistemas fotovoltaicos para consumidores residenciais de BT, fazendo uma breve revisão sobre a difusão de inovações, também são apresentadas as barreiras relativas à adesão dos sistemas fotovoltaicos pelos consumidores.

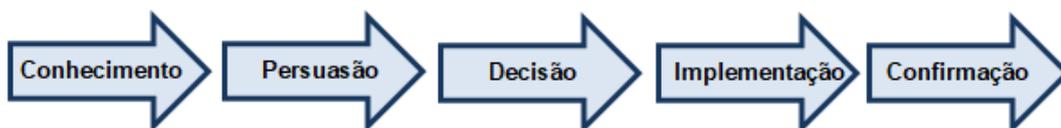
É apresentado o modelo de difusão de sistemas fotovoltaicos, a partir da técnica de dinâmica de sistemas, em conjunto com o modelo de Bass, apresentando a equação que leva em consideração o comportamento do sistema de difusão de sistemas fotovoltaicos residenciais, considerando cinco aspectos que contribuem para a difusão. São apresentados os métodos multicritérios para tomada de decisão, para a definição da contribuição dos aspectos da difusão, com maior ênfase no método AHP.

### 2.1. DIFUSÃO DE INOVAÇÕES

A difusão de inovações explica como é a trajetória de adoção de uma inovação ao longo do tempo por indivíduos ou organizações, de uma ideia, comportamento ou um objeto considerado novo pelo público, (ROGERS, 1983).

A decisão sobre uma inovação é um processo, podendo ser definidos em cinco estágios, classificados como: conhecimento, que ocorre quando o indivíduo tem sua primeira experiência com a existência da inovação, como ela atua ou funciona; persuasão, que ocorre quando o indivíduo forma uma opinião favorável ou desfavorável em relação à inovação; decisão, quando o indivíduo tem atitudes que o leva a adotar ou rejeitar a inovação; implementação, ocorre quando o indivíduo faz o uso da inovação e; confirmação, quando o indivíduo reforça a decisão tomada, podendo alterar sua decisão expondo sua opinião sobre a inovação (ROGERS, 1983). A Figura A demonstra esquematicamente o processo de decisão.

Figura A – Estágios do Processo de Difusão.



Fonte: Adaptado de ROGERS (1983).

Identidade de valores e conhecimento são condições que favorecem o processo de difusão de uma inovação, já as diferenças de valores e conhecimento são processos que dificultam a difusão de inovação (ROGERS, 1983). Os indivíduos de uma sociedade tendem a adotar uma invenção em tempos distintos, sendo classificados em categorias de adoção ao longo do tempo (ROGERS, 1983).

Os adotantes de uma inovação podem ser classificados em cinco diferentes segmentos, baseados na intenção de cada indivíduo: inovadores; adotantes iniciais; maioria inicial; maioria tardia; e retardatários. Cada classificação citada possui um conceito e atitude relacionados à obtenção da inovação (ROGERS, 1983).

Os inovadores são os indivíduos que buscam a adoção de novas ideias e dispositivos, possuem muita criatividade, dinheiro, energia e tempo, que gastam na busca de novas tecnologias. Processo que se inicia com um pequeno grupo de inovadores (ROGERS, 1983).

Os adotantes iniciais são as pessoas que ao ver os benefícios, começam a adotar uma nova ideia. São muitas vezes vistos como líderes, pessoas em vantagem, economicamente mais bem sucedidos, com mais contatos interpessoais e são pessoas que se mantêm informados (ROGERS, 1983).

Figura B – Distribuição dos Adotantes.



Fonte: Adaptado de ROGERS (1983).

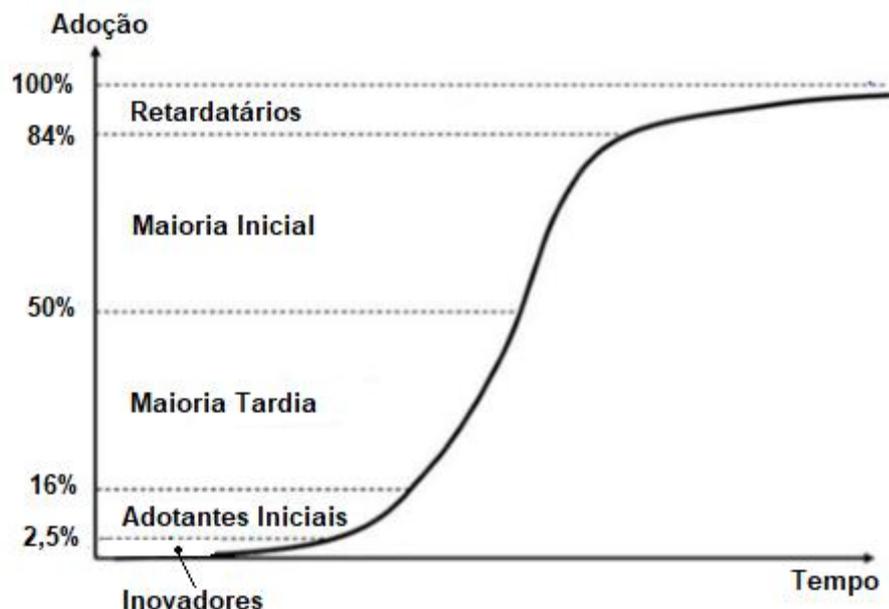
A maioria inicial são indivíduos que adotam uma inovação após uma prova sólida de benefícios, não são pessoas influenciáveis por mídia, ou modismo. São mais sensíveis ao custo dessas idéias, aos riscos que podem ter e a complexidade, procuram soluções simples e comprovada a sua utilização (ROGERS, 1983).

A maioria tardia são mais conservadores, não gostam de correr riscos e são desconfortáveis à adoção de novas ideias. São pessoas que buscam uma inovação quando estão ameaçados a ficarem defasados, seguindo padrões já estabelecidos (ROGERS, 1983).

Os retardatários são pessoas que veem alto risco na adoção de inovações, pois as inovações desafiam os paradigmas pré-estabelecidos por esse grupo de pessoas (ROGERS, 1983). Os adotantes de uma inovação, podem ser classificados dentro de uma curva de distribuição normal, como mostrado na Figura B que apresenta os diferentes tempos em que um indivíduo adota uma inovação ao longo do tempo, ilustrado em forma de Sino.

O sucesso da difusão de uma nova ideia é resultado da troca de informações por meio de redes interpessoais, ou seja, o primeiro adotante discute com os outros membros de um sistema, e esses membros passam a informação para outros dois pares e assim por diante, tendo um crescimento exponencial, até que todos já tenham pleno conhecimento dessa inovação (ROGERS, 1983). Esse processo resulta numa distribuição em forma de “S”, conhecida como curva S, ilustrada na Figura C, onde são mostrados os dados de forma acumulável.

Figura C – Curva de Adoção em formato de S.



Fonte: Adaptado de ROGERS (1983).

Ambas as curvas da Figura B e Figura C, são obtidas a partir da adoção de uma inovação ao longo do tempo por membros de um sistema social. Sendo que a curva em forma de sino, mostra o número de adotantes ao longo de cada ano, e a curva em forma de S mostra esses dados em uma base cumulativa de dados.

O processo de adoção de inovações, como tecnologias na área de energia renovável é complexo, pois existem vários fatores que necessitam ser analisados, como os aspectos tecnológicos, econômicos e sociais.

Pesquisas sobre a difusão de sistemas fotovoltaicos existem desde a década de 1980, sendo Katzman (1981) um dos precursores dessas pesquisas.

## 2.2. DIFUSÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

A difusão de sistemas fotovoltaicos pode ser considerada uma difusão de inovações, uma vez que a maioria da população brasileira ainda não aderiu aos sistemas fotovoltaicos residenciais. Essa difusão trará mudanças nos estudos de operação e planejamento dos sistemas de energia elétrica, pois além de consumirem, os consumidores ainda produzirão sua própria energia, termo conhecido como prosumidor.

O principal desafio para estudos de operação e planejamento dos sistemas elétricos é estimar o uso de consumidores residenciais de BT com sistemas fotovoltaicos, pois a decisão de aderir a um sistema fotovoltaico depende de alguns aspectos. Esses aspectos podem ser sociotécnicos, econômicos, de gestão, políticos, aspectos tecnológicos, de mercado, institucionais, regulamentares, pois limitam o impulso da GD, motivação, influência de outros adotantes, entre outros fatores.

Para estimar a difusão de sistemas fotovoltaicos, uma das alternativas seria por meio de pesquisas junto aos consumidores. Diversos países adotaram a estratégia de pesquisas junto aos consumidores, dentre eles estão, Países Baixos (JAGER, 2006), Reino Unido (FAIERS; NEAME, 2006), Austrália (SIMPSON; CLIFTON, 2015), Índia (REDDY; PAINULY, 2004), Japão (YAMAMOTO, 2015), Malásia (JAYARAMAN; PARAMASIVAN; KIUMARSIC, 2017) e Suécia (PALM, 2016).

Uma estratégia tomada pelo governo brasileiro para estimular a difusão de sistemas fotovoltaicos foi a introdução da política de pagamento da Tarifa *Feed-In*

(FIT). Caso a energia injetada na rede seja superior à consumida, cria-se um crédito de energia que não pode ser revertido em dinheiro, mas pode ser utilizado para abater o consumo da unidade consumidora nos meses subsequentes ou em outras unidades de mesma titularidade (desde que todas as unidades estejam na mesma área de concessão), com validade de 60 meses (ANEEL, 2015). Em relação à microgeração por fonte solar fotovoltaica, durante o dia, o excedente da energia gerada pela central é passada para a rede e durante a noite, a rede devolve a energia para a unidade consumidora e supre necessidades adicionais. Portanto, a rede funciona como uma bateria, armazenando o excedente até o momento em que a unidade consumidora necessite de energia proveniente da distribuidora (ANEEL, 2015).

A introdução da tarifa FIT e net metering viabilizou a introdução de sistemas fotovoltaicos no Brasil, pois há uma lucratividade envolvida, tornando-se de interesse para os consumidores de baixa renda. O net metering é um termo que se refere à política de compensação de energia elétrica, que consiste em um procedimento no qual o consumidor instala pequenos geradores em sua unidade e a energia gerada pelos equipamentos instalados é utilizada para descontar o consumo energético. Caso houver um saldo positivo, ou seja, a geração for maior do que o consumo é descontado em outra conta ou na fatura do mês subsequente.

Para participar do sistema de compensação de energia, é necessário que as produtoras sejam classificadas como micro gerador, de acordo com os critérios estabelecidos pela RN nº 687/2015 da ANEEL. Já a tarifa FIT trata-se de uma política voltada para o incentivo da adoção de fontes renováveis de energia, o valor da tarifa é estabelecido com base no custo de geração, dependendo da fonte e do tipo de instalação utilizada. Outros motivos de incentivo à aquisição de sistemas fotovoltaicos no Brasil são: elevadas tarifas residenciais, grande disponibilidade de recursos de radiação solar, redução internacional dos módulos solares (SANTOS, 2018).

Jannuzzi e Melo (2013) apresentam uma análise prospectiva de sistemas fotovoltaicos conectados em consumidores residenciais no Brasil, com o objetivo de avaliar cenários de difusão desta tecnologia até 2030, considerando mecanismos de políticas para promover o desenvolvimento da geração fotovoltaica conectada na rede. Os três mecanismos avaliados são: o esquema de compensação líquida de medição, tarifas FIT e subsídios diretos para instalações dos sistemas fotovoltaicos.

Os resultados da investigação mostram que a GD fotovoltaica tem boas oportunidades para o Brasil diversificar sua matriz energética, com potenciais benefícios econômicos e ambientais. No entanto, é claro que a ausência de objetivos de política energética, em longo prazo, para sistemas fotovoltaicos e a falta de mecanismos de suporte adicionais poderiam refletir em uma adoção ineficiente e incipiente desta tecnologia e a perda de seus benefícios potenciais.

Para haver a implementação de energia renovável no setor residencial, tem que se levar em consideração a intenção dos consumidores em adotar uma nova tecnologia. Essa decisão leva à algumas barreiras associadas à difusão dos sistemas fotovoltaicos, sendo cada uma de acordo com as incertezas de cada consumidor.

Algumas barreiras que determinam as decisões que os consumidores em adotar um sistema fotovoltaico residencial são a conveniência em usar a eletricidade diretamente fornecida pela concessionária, a falta de familiaridade com os sistemas fotovoltaicos e seus benefícios, falta de informação, a necessidade de manutenção, alto custo do sistema fotovoltaico, em muitos casos, a ausência de incentivo do governo, falta de técnicos e fornecedores adequados e espaço para instalação (Zhai; Williams, 2012; Jager, 2006). As barreiras para a adoção de sistemas fotovoltaicos também podem ser, a independência da distribuidora, campanhas de educação, discussão com outros adotantes, o aumento das tarifas energéticas, avanços tecnológicos, incentivos financeiros, interação social e preocupação ambiental (Zhai; Williams, 2012; Palm, 2016; Jager, 2006).

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

Nessa nota técnica (ANEEL, 2017), são feitas projeções para a difusão de micro e minigeração distribuída, no horizonte 2017-2024, utilizando a teoria da difusão de inovações de Rogers (1983) e também a metodologia empregada por Konzen (2014), com algumas adaptações.

Os estímulos para a adoção de sistemas fotovoltaicos podem ser, a influência de amigos, colegas, familiares, sendo crucial na tomada de decisão na compra de um sistema fotovoltaico. Ao comprar um sistema fotovoltaico, outra pessoa se

sentirá motivado, superará as incertezas que tivera e provavelmente adotará essa tecnologia (Rai; Reeves, 2016).

Os governos que desejam difundir a difusão de sistemas fotovoltaicos, geralmente oferecem incentivos, como subsídios, créditos fiscais e tarifas de feed-in, o que aumentam as vantagens de inserção de sistemas fotovoltaicos nas residências.

Consumidores com maior consumo médio anual de eletricidade possuem maior propensão em adoção desses sistemas, já as famílias de pessoas mais idosas estão menos inclinadas a adotar tecnologias de microgeração (Klinger, 2017; Willis et al, 2011).

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

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

Santos (2018) fez a previsão da difusão de sistemas fotovoltaicos considerando os aspectos econômicos, de gestão, políticos, sociais e técnicos. Estes aspectos são determinados através das barreiras associadas à decisão do consumidor em aderir um sistema fotovoltaico.

Para essa metodologia de previsão da difusão de sistemas fotovoltaicos em consumidores residenciais de BT apresentada em Santos (2018) é utilizado a técnica de Dinâmica de Sistemas, em conjunto com o modelo de Bass (Santos, 2018). A técnica de Dinâmica de Sistemas tem sido utilizada para se entender a estrutura de relações que conduzem o comportamento de um sistema, e também para entender o comportamento de um sistema ao longo do tempo, isto é, sua dinâmica. Os problemas tratados são bastante complexos do ponto de vista dinâmico, pois normalmente incluem entre seus elementos o ser humano, cujo

comportamento não é coisa simples de ser caracterizado através de modelos, (Vilella, 2005).

### 2.3. DINÂMICA DE SISTEMAS

A Dinâmica de Sistemas (DS) é um método que descreve, modela, simula e analisa dinamicamente problemas complexos e também em conjunto ou não de sistemas em relação a processos, informações, limites organizacionais e estratégias, ao longo do tempo. Tem como objetivo saber se o sistema é estável ou instável, se tende a oscilar, crescer, declinar, ou ao equilíbrio (SANTOS, 2018).

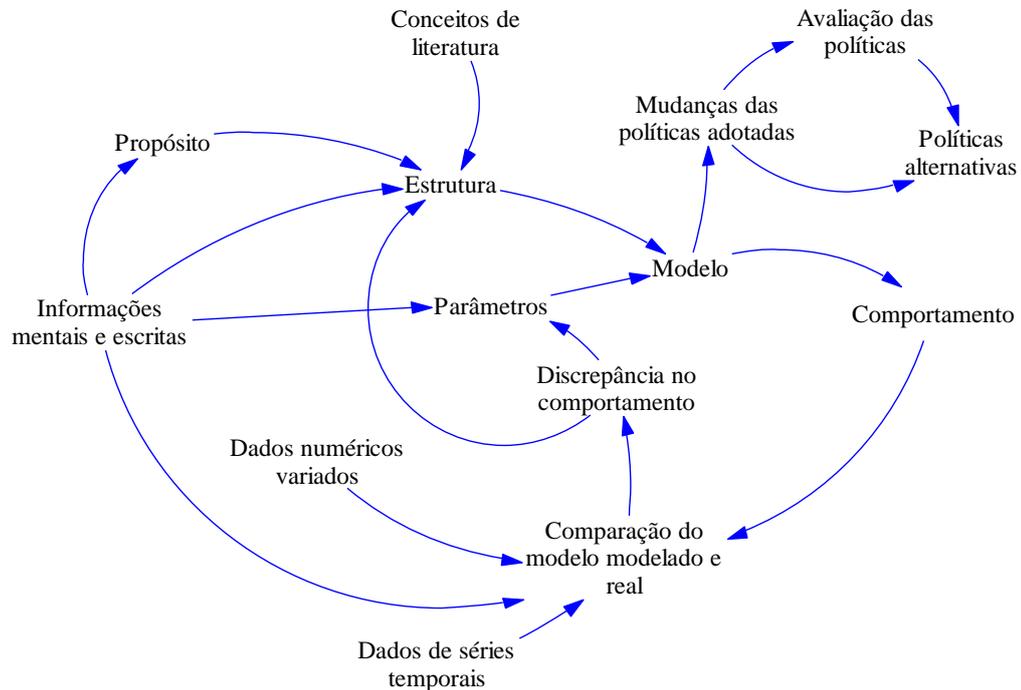
A DS consiste em pressupor que o comportamento de um sistema é causado, em grande parte, por sua própria estrutura. Desse modo, a estrutura do sistema precisa ser alterada para melhorar comportamentos indesejáveis no sistema (PRUYT, 2013).

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

A Figura D apresenta uma exemplificação do processo de modelagem dentro da DS, onde é demonstrado que após analisar o sistema e encontrar informações sobre o sistema, consegue-se criar um modelo com parâmetros determinados, levando em consideração o comportamento, mudanças e alternativas políticas, levando a uma comparação em relação ao sistema modelado e ao mundo real, com dados de séries temporais e numéricos.

As políticas de modificações poderão ser avaliadas pelo comportamento ou resposta do sistema. As políticas ou medidas adotadas são avaliadas para entender o impacto dentro do sistema. Esse processo é fundamental na modelagem para que se crie uma sequência lógica e consistente no desenvolvimento do modelo, (SANTOS, 2018).

Figura D – Processo de Modelagem utilizando a DS.



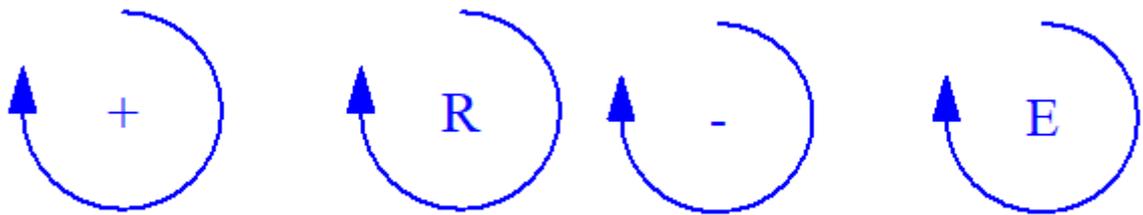
Fonte: STERMAN (2000).

A Figura D mostra que a partir das informações mentais e escritas é possível criar um modelo através da estrutura com parâmetros determinados. No modelo, que é função da estrutura e dos parâmetros, são criadas políticas de modificações que poderão ser avaliadas pelo comportamento ou resposta do sistema. As políticas ou medidas adotadas são avaliadas para entender o impacto dentro do sistema. Esse processo é fundamental na modelagem para que se crie uma sequência lógica e consistente no desenvolvimento do modelo. A realimentação é um dos conceitos fundamentais da DS. Na DS são usadas ferramentas de diagramação para capturar a estrutura dos sistemas, incluindo diagramas de laço causal e diagramas de estoque e fluxo (STERMAN, 2000).

Os diagramas de laço causal são uma ferramenta importante para representar a estrutura de realimentação dos sistemas. São variáveis conectadas por setas indicando quais são as influências entre as variáveis. É utilizado para: capturar rapidamente a hipótese de trabalho sobre as causas da dinâmica; obter e capturar os modelos mentais de indivíduos ou equipes; e elucidar as realimentações importantes que são responsáveis por um determinado problema (STERMAN, 2000).

Os laços causais mais importantes são evidenciados pelo indicador de laço, que mostra quando o laço é de realimentação positiva/reforço ou negativa/equilíbrio (STERMAN, 2000). Figura E representa os dois tipos de laços.

Figura E – Representação dos Indicadores de Laços.



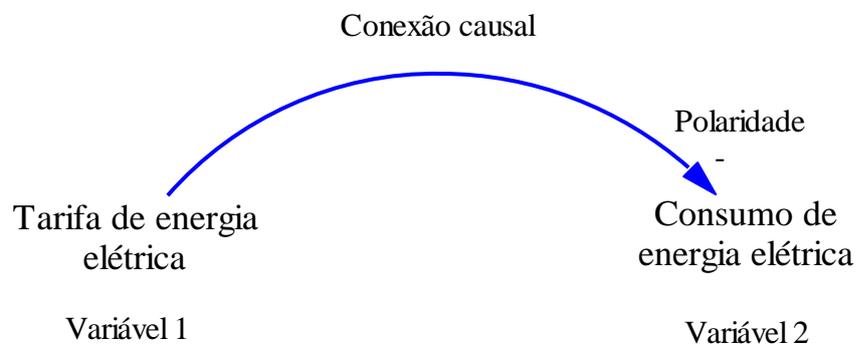
(a) Indicador de laço positivo ou de reforço

(b) Indicador de laço negativo ou de equilíbrio

Fonte: STERMAN (2000).

Cada conexão causal pode ser positiva (+) ou negativa (-). Como exemplo, a Figura F mostra a relação entre a tarifa de energia e o consumo.

Figura F – Exemplo de conexão causal e de polaridade.



Fonte: SANTOS (2018).

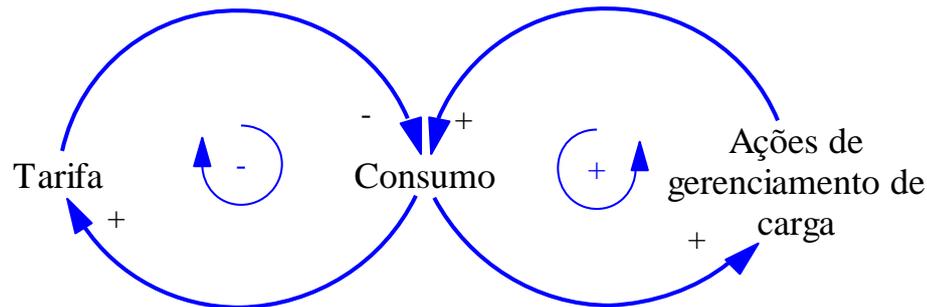
Uma conexão negativa, como apresentado na Figura F, significa que quando aumentar a tarifa de energia elétrica o consumo vai diminuir, se baixar o preço da tarifa o consumo vai aumentar.

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

A Figura G apresenta um exemplo de um diagrama de laço causal completo. No laço de reforço (+), quanto maior forem as ações de gerenciamento de carga

maior será o consumo de energia elétrica, e no laço de equilíbrio (-), quanto maior for a tarifa de energia elétrica menor será o consumo. Por outro lado, quanto maior for o consumo, maior a necessidade de geração, que levará ao despacho de fontes mais caras, e conseqüentemente ocasionará um aumento da tarifa (SANTOS, 2018).

Figura G – Exemplo de um diagrama de laço causal.



Fonte: SANTOS (2018).

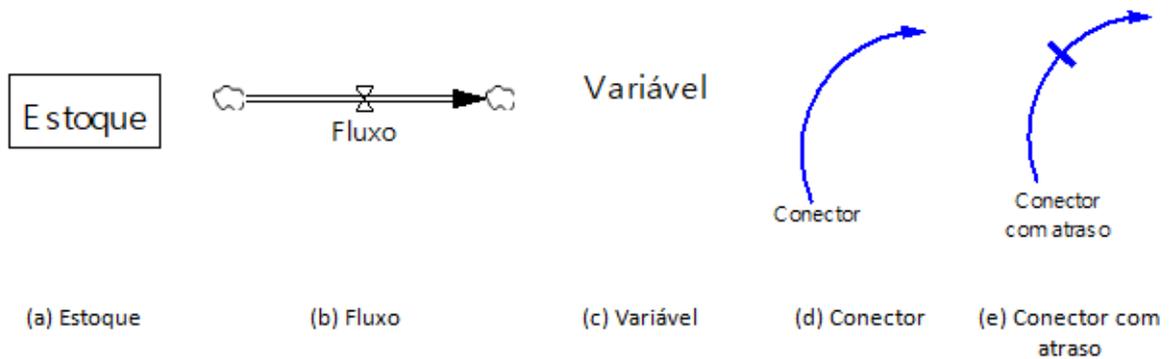
Os diagramas de laço causal são adequados para representar interdependências e processos de realimentação, esses diagramas são comumente utilizados para expor ideias, sendo limitado no que diz respeito à incapacidade de capturar o estoque e o fluxo de sistemas. Sendo usados efetivamente no início de um projeto de modelagem para capturar modelos mentais (STERMAN, 2000).

Os diagramas de laço causal são utilizados para representar qualitativamente as relações de causa e efeito que acontecem em um sistema complexo. Contudo, para representar um modelo quantitativamente são utilizados os diagramas de estoque e fluxo, os quais são semelhantes aos diagramas de laço causal, com a diferença de que as relações são expressas através de fórmulas lógico-matemáticas (STERMAN, 2000).

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

Os diagramas de estoque e fluxo utilizam quatro estruturas básicas na construção dos modelos: estoques, fluxos, conectores e auxiliares (STERMAN, 2000). A Figura H apresenta a simbologia utilizada no diagrama de estoque e fluxo.

Figura H – Simbologia utilizada no diagrama de estoque e fluxo.



Fonte: STERMAN (2000).

Os elementos básicos utilizados no diagrama de estoque e fluxo mostrados na Figura H são: estoque, tudo aquilo que se acumula no tempo, descrito de forma matemática pela Equação 1; fluxos, que conectam os estoques ou introduzem elementos que estão fora do ambiente do sistema, representados pelas nuvens Figura H (b). As nuvens funcionam como fontes de onde os elementos entram no sistema, também como coletor, ou ainda de onde os elementos saem do sistema. Tanto as fontes quanto os coletores possuem capacidade infinita, seja de fornecimento ou de recebimento (STERMAN, 2000). A Equação 1 descreve o cálculo matemático de estoque.

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

Onde  $E_t$  é o estoque,  $E_n$  representa o valor das entradas em qualquer tempo  $t_i$ ; entre o tempo inicial  $t_0$  e o tempo corrente  $t$ ,  $S_d$  representa o valor da saída em qualquer tempo  $t_i$ ; entre o tempo inicial  $t_0$  e o tempo corrente  $t$  e  $E_{t(t_0)}$  é o estoque inicial. De forma equivalente, mas através de derivada, a taxa líquida de mudança do estoque pode ser calculada como entradas menos saídas, Equação 2.

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

As taxas dos fluxos entre os estoques, ou entre os estoques e o ambiente, são reguladas pelas válvulas. Fatores que afetam as válvulas são provenientes de informações, tanto internas quanto externas aos sistemas. Eles podem controlar o sistema diminuindo a velocidade de transporte do fluxo, causando atrasos e aumentando a acumulação nos estoques. O contrário também pode acontecer

quando o fluxo é aumentado no sistema, causando uma redução rápida nos níveis dos estoques (STERMAN, 2000).

A variável, Figura H (c), possui seus valores baseados em outros componentes do sistema ou outras variáveis, representam valores constantes (variáveis constantes que são representadas por um losango) ou manipulam e convertem dados de entrada, através de cálculos auxiliares por intermédio de equações, gerando valores de saída para uso em outra variável (variáveis auxiliares que são representadas por um círculo).

O conector, Figura H (d), é utilizado para estabelecer relações existentes entre as variáveis do modelo, como se fossem os responsáveis por carregar informações de um elemento a outro, podendo ser essas informações, uma quantidade, uma constante, uma relação algébrica ou gráfica. O uso da simulação permite que se testem essas decisões, avaliando o impacto imediato e a médio e longo prazo.

O problema nos modelos de difusão é a explicação da origem dos adotantes iniciais de uma inovação, conforme apresentado na Figura B. Para resolução desse problema, o modelo de difusão de Bass assume que potenciais adotantes de uma inovação são influenciados por dois meios de comunicação: mídia de massa e boca a boca. Assim, considera que os adotantes de uma inovação compreendem dois grupos: um grupo é influenciado apenas pela comunicação de mídia de massa (influência externa) e o outro grupo é influenciado apenas pela comunicação boca a boca (influência interna). Frank Bass denominou o primeiro grupo de inovadores e o segundo grupo de imitadores (MAHAJAN; MULLER; BASS, 1990). Descrito conforme a Equação 3.

Considerando  $Y(t)$  como sendo o total acumulado no instante  $t$  de consumidores que já adquiriram um determinado produto em um mercado de  $d$  consumidores potenciais. Desse modo,  $P(t)$  corresponde à probabilidade de adoção no instante  $t$ , por um consumidor, conforme Equação 3 (BASS, 1969).

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

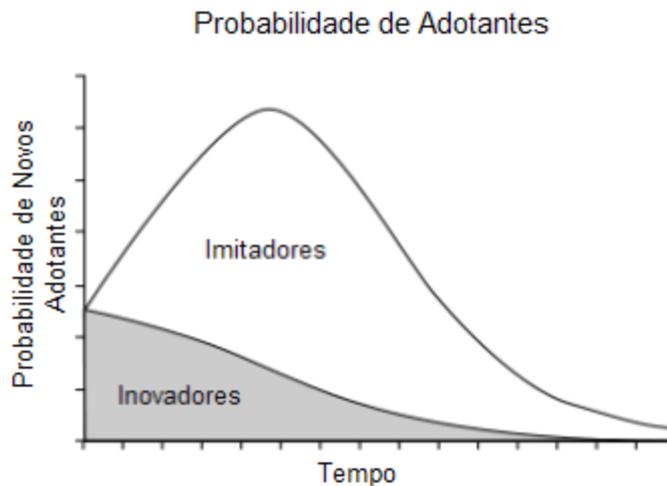
Onde  $P(t)$  é a probabilidade de adoção no instante  $t$ ,  $p$  é o coeficiente de inovação, que representa a influência externa ao processo de difusão,  $q$  é o coeficiente de imitação, que representa a influência interna ao processo de difusão,  $m$  é o mercado potencial final, ou seja, o número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

tecnologia dado tempo suficiente de difusão,  $Y(t)$  é o número acumulado de adotantes.

O segundo termo da Equação 3 irá crescer na medida em que aumentar a proporção de indivíduos no mercado que adotam o produto,  $Y(t)/m$ , e este crescimento será proporcional ao parâmetro  $q$ . O parâmetro  $q$  corresponde a uma força de contágio, por isso é conhecido por coeficiente de imitação (MAHAJAN; MULLER; BASS, 1990).

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

Figura I – Adoção devido a influências externas e internas – Modelo de Bass.



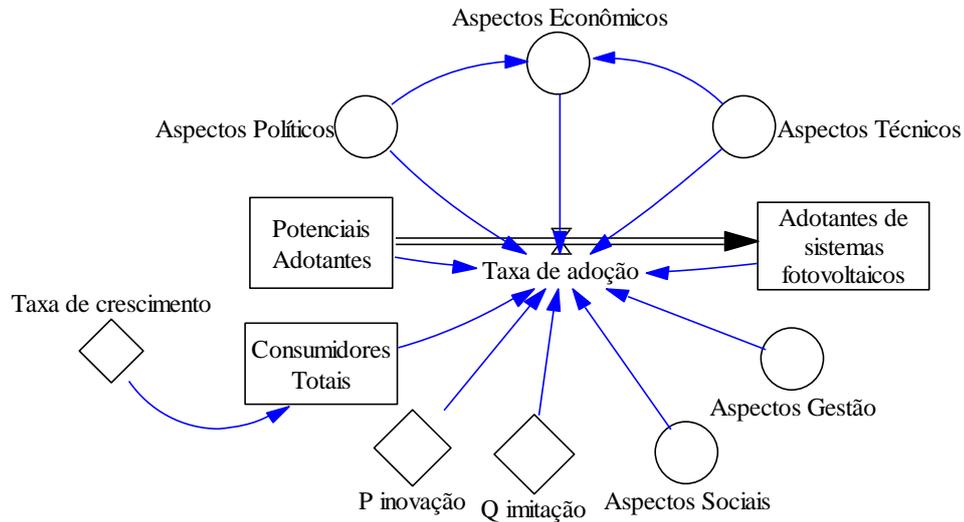
Fonte: Adaptado de Mahajan; Muller; Bass (1990).

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

Santos (2018) construiu a estrutura global do diagrama de estoque e fluxo do modelo para projeção da difusão de sistemas fotovoltaicos, em consumidores residenciais de BT, Figura J, onde foram considerados cinco aspectos (“econômico”, “gestão”, “político”, “social” e “técnico”) e os dois coeficientes do modelo de Bass:

“inovação (p)” e “imitação (q)”. Cada um dos aspectos, bem como as duas variáveis do modelo de Bass, podem variar de 0 a 1.

Figura J – Diagrama de estoque e fluxo do modelo.



Fonte: SANTOS (2018).

A Equação 4 descreve a forma matemática do modelo de Santos (2018), representando os aspectos considerados na difusão e os respectivos pesos de cada aspecto considerado.

$$TA_{(t)} = p_{(t)} \cdot PA_{(t)} + q_{(t-2)} \cdot PA_{(t)} \cdot \frac{ASF_{(t)}}{CT_{(t)}} \cdot (a \cdot AE_{(t)} + b \cdot AG_{(t)} + c \cdot AP_{(t)} + d \cdot AS_{(t)} + e \cdot AT_{(t)}) \quad (4)$$

Onde TA seria a taxa de adoção, PA os potenciais adotantes, ASF os adotantes de sistemas fotovoltaicos, CT os consumidores totais, AE os aspectos econômicos, AG os aspectos de gestão, AP os aspectos políticos, AS os aspectos sociais e AT os aspectos técnicos.

Este trabalho apresenta propostas de políticas energéticas a partir da determinação da contribuição de cada um dos aspectos utilizando métodos multicritérios para tomada de decisão.

## 2.4. POLÍTICAS ENERGÉTICAS

Com a determinação da contribuição de cada uma das barreiras no processo de difusão de sistemas fotovoltaicos em consumidores residências de BT é possível formular políticas energéticas para incentivar novos consumidores para a aquisição

dessa tecnologia. Assim, é apresentado as políticas energéticas no Brasil e no Mundo.

A política energética é uma estratégia em que os governos decidem abordar as questões de desenvolvimento de energia juntamente com o consumo da indústria para sustentar seu crescimento, incluindo a distribuição de energia, produção e consumo. Os atributos dessa política podem incluir legislação, tratados internacionais e incentivos ao investimento, logo, desempenha um papel vital para mitigar os impactos do aquecimento mundial e crise de disponibilidade da demanda de energia (EPD, 2013).

#### **2.4.1. Políticas Energéticas no Brasil**

No Brasil, foi aprovada em 2012 a RN Nº 482, que se caracteriza pelo Sistema de Compensação de Energia Elétrica, na qual o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade (ANEEL, 2016). Porém, o excedente de energia não é comprado com contrapartida monetária. O que ocorre é o aproveitamento do excedente de energia como crédito para o usuário, num sistema de compensação.

Em 2015, foi aprovada a Lei Nº 13.169 (BRASIL, 2015) que isenta o Programa de Integração Social (PIS) e a Contribuição para Financiamento da Seguridade Social (COFINS) sobre a energia injetada na rede.

O Brasil conta com um programa de incentivo energético, o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), que é baseado em ações de estímulo à GD renovável. O objetivo do Programa é a ampliação da geração distribuída de energia elétrica com fontes renováveis em residências, instalações industriais e comerciais, escolas técnicas, universidades, hospitais e edifícios públicos (MME, 2015).

As ações propostas pelo no programa contam com a criação e expansão de linhas de crédito e financiamento de projetos de sistemas de GD no setor financeiro; incentivo à indústria de componentes e equipamentos com foco no desenvolvimento produtivo, tecnológico e inovação no setor industrial; fomento à capacitação e formação de recursos humanos para atuar na área de geração distribuída (estima-se a criação de até 30 postos de trabalho a cada 1 MW instalado); atração de

investimentos nacionais, internacionais e de tecnologias competitivas para energias renováveis (MME, 2015). Até 2030, o programa prevê investimento de 100 bilhões de reais, adesão de 2,7 milhões de unidades consumidoras e geração de 48 milhões de megawatts-hora (MWh) (MME, 2015).

Outro programa de incentivo brasileiro é o Programa para o Desenvolvimento da Energia para Estados e Municípios (PRODEEM). Seu objetivo principal é colaborar para o “desenvolvimento integrado de comunidades não atendidas pelos sistemas convencionais de energia, utilizando as fontes energéticas renováveis, economicamente viáveis e ambientalmente saudáveis” (CEPEL, 1996, p.2). Entre 2004 e 2009 foram instalados 2.046 sistemas fotovoltaicos no Brasil através do programa (ELETROBRÁS, 2009). O programa Construcard da Caixa Econômica Federal (CEF) é uma linha de crédito que, além do financiamento de casas, também financia a compra de equipamentos para geração própria de energia renovável, como a eólica e a solar fotovoltaica (CEF, 2016). Mesmo com a disponibilidade de incentivo financeiro, ainda é pouco disseminada a prática de adquirir energia limpa e segura no país.

O país possui alguns planos de incentivo, como o Plano Decenal de Energia (PDE) da EPE. No PDE, as renováveis deverão representar perto de 86% em 2024. Em relação à capacidade instalada de energia solar, espera-se que chegue a 8.300 MW no mesmo período (EPE, 2015). No Brasil, de acordo com a EPE, tem-se uma previsão de capacidade instalada de energia renovável ser alta em 2024, porém, na sua maioria, por fonte hídrica. Como esta fonte encontra-se com problemas por conta dos impactos ambientais, uma revisão para aumento significativo das outras fontes (solar e eólica) seria uma oportunidade.

#### **2.4.2. Políticas Energéticas no Mundo**

É possível observar um forte progresso tecnológico e um grande crescimento no desenvolvimento e instalações fotovoltaicas não só no Brasil, mas em todo o mundo, devido à redução dos custos dessa fonte, ocasionada pelos programas de incentivo para a geração fotovoltaica (A CARTA DO SOL, 2011).

Desde a crise do petróleo na década de 1970, houve um forte aumento da demanda energética, ocasionando em uma necessidade de mudança dos sistemas

de energia para acompanhar o crescimento da economia (BETTAGLINI et al, 2009). A Tabela 1 mostra o desenvolvimento e instalação de energia fotovoltaica mundial.

Tabela 1 – Desenvolvimento e Instalação de Energia Fotovoltaica.

<b>Ano</b>	<b>EUA (MW)</b>	<b>Europa (MW)</b>	<b>Japão (MW)</b>	<b>Mundial (MW)</b>
2000	140	150	250	1000
2010	3000	3000	5000	14000
2020	15000	15000	30000	70000
2030	25000	30000	72000	140000

Fonte: Adaptado de Solangi et al (2011).

Nos Estados Unidos da América (EUA) foi adotado mecanismos de padrão de renovação nos 28 estados. É exigida uma percentagem de energias renováveis a energia produzida, como solar, eólica, geotérmica e biomassa. A maioria dos objetivos políticos visa facilitar a diversificação da geração de eletricidade, reduzir a dependência do estado em relação aos combustíveis fósseis, bem como, aumentar a implantação de energias renováveis e assim, diminuir a redução das emissões de carbono no meio ambiente (CARLEY, 2009).

O setor energético solar nos EUA incentiva, há mais de 8 anos, crédito fiscal de investimento (MENDONÇA, 2009). Milhões de americanos estão aproveitando os benefícios de possuir um sistema distribuído para gerar energia elétrica através da energia solar. De acordo com Mendonça (2009), a utilização de políticas de investimento dos créditos fiscais pode resultar em um aumento significativo anual de energia solar fotovoltaica e instalações solares térmicas.

A Alemanha é a líder mundial na instalação de sistemas de energia solar fotovoltaica. O governo investe fortemente na utilização deste tipo de energia, incentivando o uso através de uma remuneração constante para a energia produzida. O país tem quase a mesma capacidade de geração de energia solar que todas as outras nações do mundo juntas. Além disso, o país pretende, até 2020, cortar em 40% as emissões de gases estufa. Assim, calcula-se que o investimento para o sistema fotovoltaico entre 2009 e 2021, seja de aproximadamente 30 bilhões de euros (BHANDARI, 2009).

Segundo EPE (2012) o governo alemão assegura tarifas-premio favoráveis ao investimento pelos consumidores nessas instalações. Os subsídios ao investimento

existem em diferentes regiões da Alemanha e se tornam cada vez mais atraentes ao consumidor. Para financiar o custo da mudança energética do país para uma matriz renovável, o preço de cada quilowatt-hora passou de 3,59 para 5,30 centavos de euro no ano de 2013, (DW BRASIL, 2013).

Na China, o crescimento econômico nas últimas duas décadas foi desenfreado, o que implicou a emissões de carbono no meio ambiente. Diante disto, fez-se necessário a utilização e aplicação do sistema de energia solar, trazendo então grandes benefícios ambientais e econômicos. O potencial de energia solar na China é muito alto e centenas de fábricas produzem milhões de equipamentos fotovoltaicos (LIU, 2010).

A lei de energia renovável, aprovada em 2005 no país, permitiu uma nova etapa para o desenvolvimento da energia renovável, onde o governo chinês formulou uma série de políticas e leis para incentivar o seu uso. Subsídios do governo para alavancar a competitividade da produção de painéis; redução ou isenção de impostos, gerando assim motivação, entusiasmo, segurança e vantagens por parte do governo para os investidores o que o tem produzido um forte investimento na área, foram algumas políticas de incentivo criadas pelo governo chinês (WANG, 2010). Nesse sentido, para Wang (2010) o alto custo da geração da energia fotovoltaica é a maior barreira a ser enfrentada, e com isso são necessárias mudanças, bem como políticas que estimulem a grande e rica capacidade de produção do país.

## 2.5. MÉTODOS MULTICRITÉRIOS PARA TOMADA DE DECISÃO

A Tomada de Decisão é um processo de sistema complexo que utiliza relações de natureza objetiva e subjetiva. Sendo que a objetividade é um processo decisório, porém a subjetividade estará presente, pois uma tomada de decisão é realizada por pessoas.

Os Métodos Multicritérios para Tomada de Decisão consistem em diversos métodos e ferramentas computacionais. Alguns dos principais métodos são: Simple Multi Attribute Rating Technique (SMART); Elimination Et Choice Traduisant la Réalité (ELECTRE); Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique (MACBETH); Preference Ranking Organization Method for Enrichment

Evaluations (PROMOTHEE); Analytic Hierarchy Process (AHP); e Analytic Network Process (ANP) (MUSSOI, 2012).

### **2.5.1. Método Multicritério SMART**

O método SMART é um método multicritério simples e prático, as principais etapas desse método são: identificar o decisor ou grupo de decisores; identificar as alternativas de ação viáveis; identificar os critérios que são relevantes para a tomada de decisão; atribuir valores para cada critério, a fim de medir o desempenho das alternativas neste critério; determinar o peso de cada critério, a fim de definir seu grau de importância para o decisor; determinar o desempenho global de cada alternativa através da média ponderada dos valores atribuídos a cada alternativa; estabelecer um ranque das pontuações globais das alternativas e executar uma análise de sensibilidade, a fim de verificar a robustez das pontuações das alternativas para a tomada de decisão final (MUSSOI, 2012).

Esse método é geralmente aplicado em situações onde uma determinada ação, para obter um dado resultado, é tida como certa, não permitindo interdependências entre os critérios, é um método extremamente prático, rápido e confiável (MUSSOI, 2012).

### **2.5.2. Método Multicritério ELECTRE**

O método ELECTRE utiliza uma métrica de relações de troca na comparação par a par das alternativas, em cada um dos critérios, baseando-se nos conceitos de concordância, discordância e valores limites. O decisor pode expressar preferência, indiferença ou incomparabilidade entre os pares de alternativas ou critérios. O método inicia com a determinação do desempenho das  $m$  alternativas em relação aos  $n$  critérios, através da definição de uma matriz de decisão. A partir desta matriz, é determinada a matriz de decisão ponderada, por meio da normalização da matriz de decisão e multiplicação pelos pesos dos critérios. Os pesos dos critérios são definidos pelo decisor. Para cada par de alternativas  $p$  e  $q$ , o conjunto de critérios é dividido em dois subconjuntos distintos: conjunto de concordância e conjunto de discordância (MUSSOI, 2012).

No entanto, o método ELECTRE pode ser incapaz de identificar a melhor alternativa, uma vez que o sistema de preferências não é necessariamente completo, além de não proporcionar uma forma de obtenção dos pesos dos critérios e não permitir avaliar a sensibilidade dos resultados de forma automática (KABLI, 2009; MUSSOI, 2012).

### **2.5.3. Método Multicritério MACBETH**

O método MACBETH é uma abordagem interativa multicritério de apoio à tomada de decisão, que usa julgamentos semânticos qualitativos para mensurar a atratividade relativa das alternativas, através de comparação par a par. As categorias semânticas de comparação das alternativas são classificadas em: diferença muito fraca, fraca, moderada, muito forte e extrema diferença. A partir das comparações semânticas das alternativas, constrói-se uma matriz semântica com a resposta dos decisores. Com base na classificação semântica, uma escala de 0 a 6 é adotada para a conversão das categorias semânticas, onde 0 representa nenhuma diferença de atratividade e 6 indica uma diferença (MUSSOI, 2012).

### **2.5.4. Método Multicritério PROMOTHEE**

O método PROMETHEE, é baseado em uma generalização da noção de critério, constitui uma família de métodos para auxílio à tomada de decisão, com base nas relações de preferência e no melhoramento da ordem de dominância das alternativas (BRANS e VINCKE, 1985). Esse método parte da definição de um peso para cada critério, estabelecido pelo decisor, o qual aumenta com a importância do critério.

Os métodos PROMETHEE são mais adequados para problemas com vários critérios de difícil quantificação e que envolvam grupos de decisores com especializações, percepções e julgamentos divergentes, visto que envolvem processos matemáticos complexos e muitos julgamentos (MUSSOI, 2012).

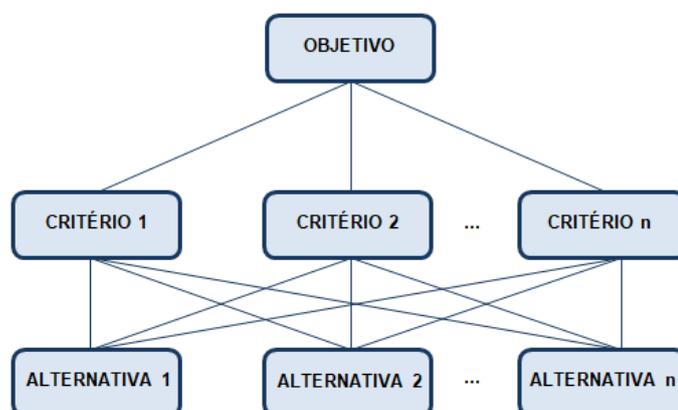
### 2.5.5. Método Multicritério AHP

O método AHP, proposto por Saaty (2008), é uma técnica estruturada, baseada em matemática e psicologia, para a tomada de decisão em ambientes complexos em que diversas variáveis ou critérios são considerados para a priorização e seleção de alternativas ou projetos.

Esse método envolve três fases para resolver o problema de decisão: decomposição, o princípio da decomposição pede a construção de uma rede hierárquica para representar um problema de decisão, representando o topo o objetivo global e os mais baixos níveis representam os critérios, subcritérios e alternativas; julgamentos comparativos, solicita-se aos participantes do grupo de decisão a construção da matriz de comparação em cada hierarquia comparando pares de critérios e subcritério, é apresentado nessa etapa uma balança de valores que variam de 1 (mesma importância) a 9 (extremamente forte importância) para expressar a preferência de cada componente do grupo de discussão; síntese de prioridades, é a fase de calcular um peso composto para cada alternativa baseada em preferências derivadas da matriz de comparação (SAATY, 2008).

A realização da avaliação de um problema através da metodologia AHP se inicia pela decomposição do problema em uma hierarquia de critérios mais facilmente analisáveis e comparáveis de modo independente, como mostrado na Figura K.

Figura K – Exemplo de hierarquia de critérios.



Fonte: Adaptado de SAATY (2008).

A partir da construção dessa hierarquia lógica, Figura K, as alternativas são avaliadas por comparação duas a duas, dentro de cada critério. Essas comparações trazem os valores de importância de cada critério, podendo ser considerados critérios qualitativos e também, simultaneamente, quantitativos.

Para realizar essas comparações, é necessário classificar em uma escala de números a importância de cada critério, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Escala numérica fundamental para utilização do método AHP.

Escala Numérica	Grau de Importância
1	Mesma Importância
3	Moderada
5	Forte
7	Muito Forte
9	Extremamente Forte
2,4,6,8	Valores Intermediários

Fonte: Adaptado de SAATY (2008)

A partir da estimativa realizada, com base na escala numérica, é construída uma matriz de comparação ou julgamento, de dimensão  $n \times n$ , para os  $n$  critérios em avaliação, conforme a Equação 5.

$$M = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (5)$$

$M$  representa a matriz de comparação dos critérios,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_n$  indicam o número de critérios de avaliação,  $i$  e  $j$  são os índices dos critérios avaliados par a par e  $a_{ij}$  é o grau de importância do critério  $i$  sobre o critério  $j$ .

Os termos da matriz de julgamentos indicam o quanto um critério de uma linha é mais importante que um critério de uma coluna. Como regra geral, assume-se que a diagonal principal representa a própria avaliação do critério  $C_i$ , possuindo o valor igual a um,  $a_{ii} = 1$ , e nos demais julgamentos a relação de reciprocidade  $a_{ji} = 1 / a_{ij}$  (SAATY, 2008).

Após a determinação da matriz de comparações, calcula-se o autovetor da matriz, para se definir a prioridade ou peso de cada critério. A partir do autovetor, pode-se calcular o peso de cada critério analisado, de acordo com a Equação 6.

$$W_i = \frac{(\prod_{j=1}^n a_{ij})^{1/n}}{\sum_{i=1}^n (\prod_{j=1}^n a_{ij})^{1/n}} \quad (6)$$

Onde  $W_i$  é o peso do critério  $i$ ,  $i$  e  $j$  são os índices dos critérios avaliados para a par,  $a_{ij}$  é o grau de importância do critério  $i$  sobre o critério  $j$  e  $n$  é o número de critérios. O somatório dos valores dos pesos dos critérios analisados deve ser igual a 1, ou seja, 100%.

Como fora dito, a metodologia AHP é uma metodologia objetiva e subjetiva, uma vez que a solução tem base em opiniões de especialistas, o que pode acarretar em inconsistências nos julgamentos realizados. Essas inconsistências podem ocorrer devido à complexidade do sistema, ou por pouca experiência do especialista em relação ao tema abordado.

Devido essa diferença de opinião, ou inexperiência que pode aparecer, o método AHP traz um indicador de consistência de julgamento, como mostrado na Equação 7.

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (7)$$

Em que  $RC$  é a razão de consistência e expressa a aceitação do julgamento do decisor,  $IC$  é o índice de consistência e  $IR$  é o índice aleatório de consistência.

O valor do índice aleatório de consistência ( $IR$ ) pode ser determinado diretamente através da aplicação da Tabela 3.

Tabela 3 – Índice aleatório de consistência.

Número	IR
2	0
3	0,52
4	0,89
5	1,11
6	1,25
7	1,35
8	1,40
9	1,45
10	1,49
11	1,52
12	1,54
13	1,56
14	1,58
15	1,59

Fonte: Adaptado de SAATY, OZDEMIR (2003) e SAATY, TRAN (2007).

O índice de consistência (IC) expressa o quanto a matriz se distancia de uma matriz de consistência. Este índice pode ser determinado pela Equação 8.

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n - 1)} \quad (8)$$

Onde IC é o índice de consistência,  $\lambda_{\max}$  é o autovalor dos critérios analisados e n é o número de critérios.

O autovalor ( $\lambda_{\max}$ ) é calculado através da Equação 9, conforme Pamplona (1997).

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n W_i \times K_i \quad (9)$$

Em que  $\lambda_{\max}$  é o autovalor,  $W_i$  é o peso do critério i,  $K_i$  é o somatório da coluna da matriz de comparação e n é o número de critérios.

Considera-se admissível uma razão de consistência (RC) menor que 0,10 (10%). Para valores de RC maiores que 10%, as avaliações do especialista não são consideradas suficientemente sensíveis e precisas (PAMPLONA, 1997).

Caso utilize-se mais de um especialista para julgamento dos critérios, a integralização dos resultados dos especialistas em apenas uma matriz de julgamento é realizada através da Equação 10 (LOPES, 2014).

$$\bar{a}_{ij} = \prod_{e=1}^{ne} (a_{ije})^{1/ne} \quad (10)$$

Em que a variável e é o índice do especialista, ne é o número de especialistas, i e j são os índices dos critérios e  $a_{ije}$  é o grau de importância do critério i em relação a j.

#### 2.5.6. Método Multicritério ANP

O ANP é um método multicritério para tomada de decisão, proposto por Saaty (1996), a partir do sucesso obtido das aplicações do AHP aos problemas de tomada de decisão. Este método foi proposto com a finalidade de atenuar a restrições da estrutura hierárquica do método AHP, de forma a permitir a consideração de interdependências entre critérios. Baseado na obtenção de

relações de preferência, o AHP assume uma relação de cima para baixo (*top-down*) entre os elementos da hierarquia. Já o método ANP permite inter-relacionamentos mais complexos entre os níveis de decisão, uma vez que este não requer uma estrutura estritamente hierárquica.

O método ANP permite uma modelagem precisa de ambientes complexos e possibilita a manipulação de situações usuais de interdependências, especialmente nos problemas que envolvem cenários com falta de informações. No entanto, o ANP é pouco transparente e compreensível para os decisores, uma vez que a estrutura de rede necessita um processo de julgamento das preferências com muitas comparações e envolve operações matemáticas mais complexas que as do método AHP.

Comparando os métodos multicritérios mais utilizados, elegeu-se o Método AHP para base da ferramenta de apoio na determinação da contribuição dos cinco aspectos que influenciam a adoção dos consumidores residenciais de BT de sistema fotovoltaico. As barreiras e estímulos para a difusão de sistemas fotovoltaicos são classificadas como problemas com múltiplos critérios definidos tanto quantitativos como qualitativamente, com isso, o método mais apropriado é o método AHP. Deste modo, para um melhor entendimento do método é apresentado um exemplo de utilização do mesmo.

### **2.5.7. Exemplo de utilização do Método AHP**

Para uma melhor compreensão de como é aplicado o método AHP, é mostrado um exemplo didático de aplicação desse método. Este exemplo consiste em uma utilização do método AHP em situações de contingência, restabelecendo a energia em tempo real, para a melhoria dos índices de continuidade e qualidade de energia nas redes de distribuição, através de um restabelecimento mais ágil e confiável, por meio de chaves telecomandadas (SILVA, et al, 2010).

O problema do exemplo possui as seguintes características:

- Objetivo: Qual opção de restabelecimento de energia utilizar dentre as opções possíveis.

- Critérios: Restabelecer a energia para o número máximo de consumidores (C1); Realizar o número mínimo de comutação para as transferências de carga (C2); Minimizar o número de consumidores interrompidos por ano (C3).

- Alternativas: Opção 1; Opção 2; Opção 3.

A partir da estimativa dos especialistas é possível construir uma matriz representando os julgamentos para cada critério, de acordo com a definição e os valores apresentados na Tabela 2. Pela matriz representada na Equação 11 é possível observar que C1 possui uma estimativa de forte importância em relação a C2 e C1 é três vezes melhor que C3.

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} C1 & C2 & C3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} C1 \\ C2 \\ C3 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 5 & 3 \\ 1/5 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/2 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (11)$$

O vetor  $W_i$  da Equação 6 representa o grau de importância relativa de cada critério, assim o resultado é mostrado na Equação 12.

$$W = \begin{matrix} C1 \\ C2 \\ C3 \end{matrix} \begin{pmatrix} 0,6571 \\ 0,1963 \\ 0,1466 \end{pmatrix} \quad (12)$$

De acordo com a matriz  $W$  mostrada na Equação 12, a prioridade dos critérios é respectivamente C1, C2 e C3.

Suponha que para o restabelecimento da energia em uma rede de distribuição, existam duas alternativas distintas de manobra. Para a tomada de decisão, deseja-se que a solução seja aquela que minimize tanto o número de chaves operadas como o de consumidores interrompidos e maximize o número de consumidores transferidos, sendo estes critérios avaliados de acordo com a estimativa do grau de importância de cada critério. Para demonstrar a aplicação do método na tomada de decisão, serão consideradas três opções de restabelecimento, mostradas na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados referentes às opções de restabelecimento de energia.

<b>Opção</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>
1	14000	3	1800
2	9000	2	2300
3	1200	2	2500

Fonte: Adaptado de SILVA, et al (2010)

Para os critérios serem avaliados analiticamente, é necessário normalizá-los. Para os critérios que devem ser maximizados, utiliza-se a Equação 13, para os critérios que devem ser minimizados, utiliza-se a Equação 14. Onde  $C_n$  é o elemento analisado do critério  $i$ ,  $C_i$  é o elemento pertencente ao critério  $i$  e  $C$  é o elemento a ser normalizado.

$$C_n = \frac{C}{\max(C_i)} \quad (13)$$

$$C_n = \frac{\min(C_i)}{C} \quad (14)$$

Feito isso, multiplica-se os valores normalizados pelos valores dos pesos do autovetor  $W$  e por fim, soma-se os valores dos critérios de cada opção, como mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 – Soma dos critérios de cada opção.

<b>Opção</b>	<b>C1n.W1</b>	<b>C2n.W2</b>	<b>C2n.W2</b>	<b>Soma</b>
<b>1</b>	1.0,657	0,67.0,196	1.0,146	0,934
<b>2</b>	0,64.0,657	1.0,196	0,78.0,146	0,730
<b>3</b>	0,85.0,657	1.0,196	0,72.0,146	0,86

Fonte: Adaptado de SILVA, et al (2010).

A decisão a ser tomada é pela opção 1, pois possui o maior valor, o que representa que a opção melhor atende aos critérios definidos, tanto qualitativamente (estimativa de especialistas) quanto quantitativamente (número de consumidores transferidos, número de chaves operadas e número de consumidores interrompidos).

O AHP tem um resultado numérico direto e pode ser utilizado em qualquer tomada de decisão, onde o decisor seja capaz de comparar as opções, segundo critérios previamente estabelecidos (JORDÃO; PEREIRA, 2006).

O método multicritério para tomada de decisão escolhido para o trabalho foi o método AHP, pois possui uma técnica de julgamento de critérios mais concisa, levando em consideração opiniões de especialistas e estudos prévios, é um método simples e confiável. Permite a utilização de dados qualitativos e/ou quantitativos mensuráveis, sendo estes tangíveis ou intangíveis, na análise de critérios. Tem sido

mundialmente utilizado para auxiliar os processos de decisão considerando os mais diversos fins, indo da análise do terrorismo (feita para a Agência de Controle de Armas e Desarmamento) até à disposição de recursos em questões governamentais (JORDÃO; PEREIRA, 2006).

Para a determinação dos pesos dos cinco aspectos, mostrados na Figura J, aspectos econômicos (a), aspectos de gestão (b), aspectos políticos (c), aspectos sociais (d), e aspectos técnicos (e), estabelecido pela Equação 4, será utilizado o método AHP.

## 2.6. CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Existe uma crescente importância no que diz respeito à microgeração residencial, para atender à demanda e também pela preocupação ambiental por parte da população. Os processos de tomada de decisão dos consumidores são o foco de pesquisas, pois o sistema fotovoltaico residencial não é previamente planejado pelas distribuidoras de energia elétrica, sendo assim, determinadas por tomada de decisão descentralizada dos consumidores.

Há vários modelos distintos para prever a difusão de sistemas fotovoltaicos em consumidores residenciais. Neste trabalho, é considerado o trabalho de Santos (2018) onde foi realizada a difusão dos sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo, utilizando a técnica de DS em conjunto com o modelo de Bass, considerando cinco aspectos que influenciam na decisão do consumidor em aderir um sistema fotovoltaico, onde é determinada a equação da taxa de adotantes ao longo do tempo.

Para a determinação da contribuição dos pesos dos aspectos para previsão da difusão de sistemas fotovoltaicos em consumidores residenciais de BT é necessário a utilização de Métodos Multicritérios para Tomada de Decisão. Assim o método AHP foi escolhido para determinar os índices da Equação 4 proposta por Santos (2018).

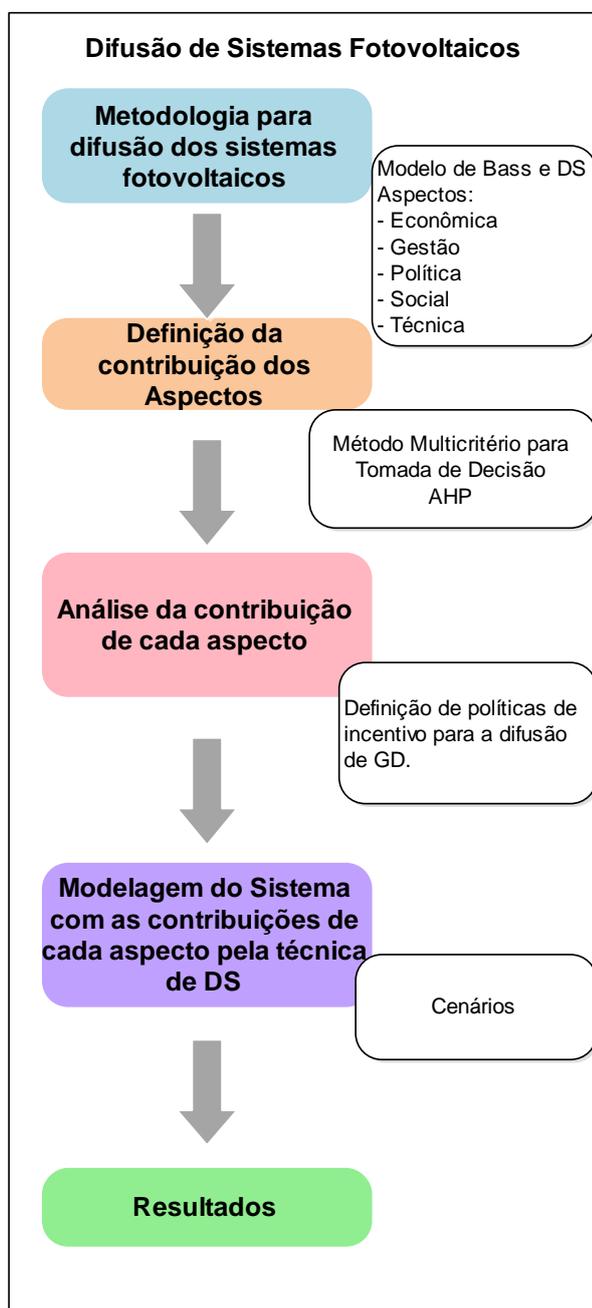
O presente capítulo apresentou a revisão bibliográfica sobre a difusão de inovações, difusão de sistemas fotovoltaicos, sobre a dinâmica de sistemas, apresentou também um resumo dos métodos multicritérios para a tomada de decisão, explicando e exemplificando o método multicritério AHP, e por fim apresentou as políticas energéticas existentes no Brasil e no Mundo. Essa revisão

bibliográfica servirá de base para a metodologia proposta, apresentada no próximo capítulo.

### 3. METODOLOGIA PROPOSTA

Na Figura L é apresentada a arquitetura da metodologia proposta para a determinação dos pesos dos cinco aspectos (econômico, gestão, político, social e técnico) para a difusão de sistemas fotovoltaicos em consumidores residenciais de BT.

Figura L – Arquitetura da Metodologia Proposta.



Fonte: Autor.

Analisando a Figura L a metodologia deste trabalho está definida em cinco etapas. Primeiramente é utilizado o modelo de difusão de sistemas fotovoltaicos proposto por Santos (2018), utilizando a técnica de dinâmica de sistemas em conjunto com o modelo de Bass considerando os cinco aspectos de difusão. Com esse modelo é analisado a contribuição de cada um dos cinco aspectos utilizando métodos multicritérios. Após, é feita a modelagem do sistema proposto por Santos (2018) com as contribuições de cada um dos aspectos para a determinação da quantidade de adotantes de sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo a partir de análises para diferentes cenários.

### 3.1. METODOLOGIA PARA A DIFUSÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

A primeira etapa da metodologia proposta, conforme a Figura L, é a utilização do sistema representado pelo modelo de Santos (2018), o qual consiste na difusão de sistemas fotovoltaicos, apresentado na Figura J. Essa proposta utiliza o modelo de Bass em conjunto com a técnica de DS, considerando cinco aspectos (econômicos, gestão, político, social e técnico) que influenciam na adoção de sistemas fotovoltaicos pelos consumidores residenciais de BT.

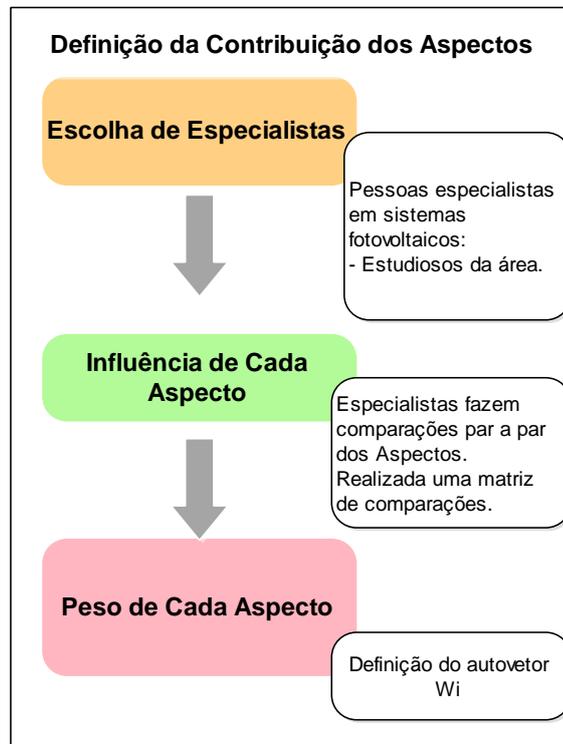
A partir desse modelo são definidas as contribuições dos cinco aspectos (econômico, de gestão, político, social e técnico), Equação 4, utilizando o método AHP. Para isso é utilizada a metodologia para a definição dos pesos de cada aspecto.

### 3.2. METODOLOGIA PARA DEFINIÇÃO DOS PESOS DE CADA ASPECTO

Para a determinação do peso de cada aspecto considerado no sistema, é utilizado o método multicritério AHP. Primeiramente deve ser escolhidos especialistas que trabalham, estudam ou que utilizam sistemas fotovoltaicos.

Escolhido os especialistas, eles devem determinar a influência de cada aspecto em relação ao outro, por exemplo, qual a influência do aspecto econômico em relação ao aspecto de gestão. Os valores de cada comparação par a par dos aspectos são colocados em uma matriz de comparação, onde são feitas análises dos critérios, para a definição do peso de cada um dos aspectos. A metodologia para a determinação dos pesos dos aspectos é mostrada na Figura M.

Figura M – Metodologia da Definição dos Pesos de Cada Aspecto.



Fonte: Autor.

Os especialistas deverão utilizar a Matriz de Comparações da Tabela 6 para o preenchimento da hierarquia de cada critério a ser analisado. Para melhor compreensão da matriz, os especialistas devem preencher os valores analisados nos espaços em branco, fazendo a comparação par a par de cada critério, levando em consideração que os critérios da linha têm maior influência em comparação com o critério da coluna. A Tabela 6 apresenta a ferramenta de preenchimento e comparação de cada um dos aspectos pelos especialistas para cálculo do método AHP.

Tabela 6 – Ferramenta para Cálculo do Método AHP.

**MATRIZ DE COMPARAÇÕES DE CADA ASPECTO**

	AE	AG	AP	AS	AT
AE	1	x	y	z	w
AG	1/x	1	f	g	h
AP	1/y	1/f	1	r	s
AS	1/z	1/g	1/r	1	k
AT	1/w	1/h	1/s	1/k	1

Fonte: Autor.

Para melhor compreensão do preenchimento da Tabela 6, os especialistas fazem comparações par a par dos aspectos podendo fazer uma análise inversa, preenchendo apenas os espaços que estão em branco, com valores de acordo com a Tabela 2, ou seja, comparando a primeira linha com a segunda coluna, aspecto econômico em relação ao aspecto de gestão, caso o especialista tenha a opinião de que o aspecto de gestão possui um grau de importância muito forte em relação ao aspecto econômico, deve ser preenchido o valor 1/7 e não 7, pois o aspecto de maior relevância na análise é sempre o da linha a ser analisada. Os espaços em colorido são preenchidos automaticamente, sendo o inverso do que foi analisado.

A partir dos dados coletados pela matriz de comparações de cada aspecto é possível calcular o autovetor,  $W_i$ , por meio da Equação 6. Os valores obtidos por  $W_i$  são os valores finais de cada um do aspecto, ou seja, o peso que cada aspecto possui para a determinação da difusão de sistemas fotovoltaicos em consumidores residenciais de Baixa Tensão conforme os coeficientes “a”, “b”, “c”, “d” e “e” da Equação 4. Lembrando que a soma dos autovalores do autovetor  $W_i$  têm que ser iguais a 1.

### 3.3. ANÁLISE DA CONTRIBUIÇÃO DE CADA ASPECTO

A terceira etapa da metodologia proposta, Figura L, consiste na análise da contribuição de cada aspecto, ou seja, é determinada a importância de cada aspecto para a definição de políticas energéticas de incentivo a GD, considerando a opinião de especialistas na área. Cada especialista escolhido deverá preencher a matriz de comparação, Figura M, de acordo com suas experiências na área.

### 3.4. MODELAGEM DO SISTEMA

É realizado também uma modelagem do sistema proposto por Santos (2018), Figura J, junto aos pesos encontrados na segunda etapa da metodologia proposta, Figura L, para cada um dos cinco aspectos, determinando a quantidade de consumidores com sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo.

Foram realizadas simulações utilizando o modelo da Figura J para diferentes cenários, obtendo, desse modo, a quantidade de consumidores com sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo, considerando os domicílios de Cachoeira do Sul, no Rio Grande do Sul.

## 4. ESTUDO DE CASO E RESULTADOS

Este capítulo apresenta, os resultados das comparações realizadas pelos especialistas em sistemas fotovoltaicos. A partir dessas comparações, é obtido os valores dos pesos de cada aspecto (econômico, social, de gestão, técnico e político). As comparações individuais de cada especialista são colocadas em uma única matriz de comparação a fim de aprimorar a análise dos coeficientes da Equação 4, de acordo com o método multicritério AHP. Com essa matriz resultante, é obtido os pesos finais de cada aspecto do modelo da Figura J. Esse modelo com os pesos é simulado no software VENSIM (VENSIM, 2019) para diferentes cenários (otimista, realista e ideal).

Por fim, é apresentado propostas de políticas energéticas segundo os aspectos de maior influência com base nos resultados dos especialistas.

### 4.1. ANÁLISE DOS ESPECIALISTAS

De acordo com a Figura M, foi feita uma pesquisa com seis especialistas, sendo estes docentes da Universidade Federal de Santa Maria que possuem um nível de compreensão considerável para a análise da difusão de sistemas fotovoltaicos. Cada estudioso propôs sua opinião baseada em seus conhecimentos na área de sistemas fotovoltaicos e com isso foi montada uma matriz de comparações para a definição dos autovetores de cada matriz que são utilizados para hierarquizar os aspectos de maior e menor influência para o processo de difusão.

No Apêndice A, está representado a matriz de comparação proposta por cada um dos especialistas e no Apêndice B, estão representadas os vetores  $W_i$  calculados com os pesos dos aspectos de cada especialista. No apêndice A.1, está representada a matriz de comparação proposta pelo especialista 1. A partir dessa matriz de comparação é calculado pela Equação 6, o peso de cada aspecto. No Apêndice B.1, está representada a tabela do autovetor da matriz de comparação, representando o peso de cada aspecto para este especialista. Para o especialista 1 o aspecto de maior relevância é o aspecto econômico e o aspecto de menor relevância, o aspecto social.

No apêndice A.2, está representada a matriz de comparação proposta pelo especialista 2. A partir dessa matriz de comparação é calculado pela Equação 6, o peso de cada aspecto. No Apêndice B.2, está representada a tabela do autovetor da matriz de comparação, representando o peso de cada aspecto para este especialista. Para o especialista 2 o aspecto de maior relevância é o aspecto econômico e o aspecto de menor relevância, o aspecto de gestão.

No apêndice A.3, está representada a matriz de comparação proposta pelo especialista 3. A partir dessa matriz de comparação é calculado pela Equação 6, o peso de cada aspecto. No Apêndice B.3, está representada a tabela do autovetor da matriz de comparação, representando o peso de cada aspecto para este especialista. Para o especialista 3 o aspecto de maior relevância é o aspecto social e o aspecto de menor relevância, o aspecto de gestão.

No apêndice A.4, está representada a matriz de comparação proposta pelo especialista 4. A partir dessa matriz de comparação é calculado pela Equação 6, o peso de cada aspecto. No Apêndice B.4, está representada a tabela do autovetor da matriz de comparação, representando o peso de cada aspecto para este especialista. Para o especialista 4 o aspecto de maior relevância é o aspecto político e o aspecto de menor relevância, o aspecto social.

No apêndice A.5, está representada a matriz de comparação proposta pelo especialista 5. A partir dessa matriz de comparação é calculado pela Equação 6, o peso de cada aspecto. No Apêndice B.5, está representada a tabela do autovetor da matriz de comparação, representando o peso de cada aspecto para este especialista. Para o especialista 5 o aspecto de maior relevância é o aspecto econômico e o aspecto de menor relevância, o aspecto de gestão.

No apêndice A.6, está representada a matriz de comparação proposta pelo especialista 1. A partir dessa matriz de comparação é calculado pela Equação 6, o peso de cada aspecto. No Apêndice B.6, está representada a tabela do autovetor da matriz de comparação, representando o peso de cada aspecto para este especialista. Para o especialista 6 o aspecto de maior relevância é o aspecto econômico e o aspecto de menor relevância, o aspecto técnico.

As análises feitas pelos especialistas 1, 2, 3, 4 e 5 tiveram uma razão de consistência (RC) menor do que 10%, o que implica que os valores propostos foram mais sensíveis e mais precisos. Já a análise do especialista 6 teve um RC de

0,38032, ou seja mais de 38%, fazendo com que a análise seja imprecisa. A matriz de comparação do especialista 6 não foi considerada no trabalho.

Pode-se observar que para 3 dos 5 especialistas considerados, o aspecto econômico tem maior peso, assim como para 3 dos 5 especialistas o aspecto com menor peso é o aspecto de gestão.

Como foram obtidos relevâncias e valores diferentes para cada análise de especialista foi utilizada a Equação 10 para determinar o resultado dos pesos de cada aspecto, pois foi levado em consideração o julgamento de mais de um especialista.

#### 4.2. RESULTADOS DOS ESPECIALISTAS

Para um resultado mais amplo e levando em consideração cada uma das análises dos especialistas 1, 2, 3, 4 e 5, foi montada uma nova matriz de acordo com a Equação 10, mostrada na Tabela 7.

Tabela 7 – Matriz de Comparação da Junção dos Resultados dos Especialistas analisados.

<b>MATRIZ COM OS RESULTADOS DOS ESPECIALISTAS</b>					
	AE	AG	AP	AS	AT
AE	1	4,473708	2,35216	2,91369	2,267933
AG	0,223528	1	0,5	0,72478	0,315479
AP	0,425142	2	1	1,39765	0,72478
AS	0,343207	1,37973	0,71548	1	0,518569
AT	0,44093	3,169786	1,37973	1,92839	1

Fonte: Autor.

A matriz de comparação de todos os especialistas considerados válidos para o trabalho resultou em uma tabela de pesos de cada critério como mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 – Peso dos Critérios dos Especialistas.

Peso dos Aspectos (Wi)	
AE	0,40319273
AG	0,08290233
AP	0,16753475
AS	0,12190524
AT	0,22446496

Fonte: Autor.

Com a junção de todos os resultados, pode-se observar que o aspecto de maior importância para os especialistas é o Aspecto Econômico, seguido do Aspecto Técnico, Aspecto Político, Aspecto Social e por último, o aspecto de menor importância o Aspecto de Gestão. Pode-se dizer que segundo os especialistas, o aspecto econômico é quase cinco vezes mais relevante em relação ao aspecto de gestão.

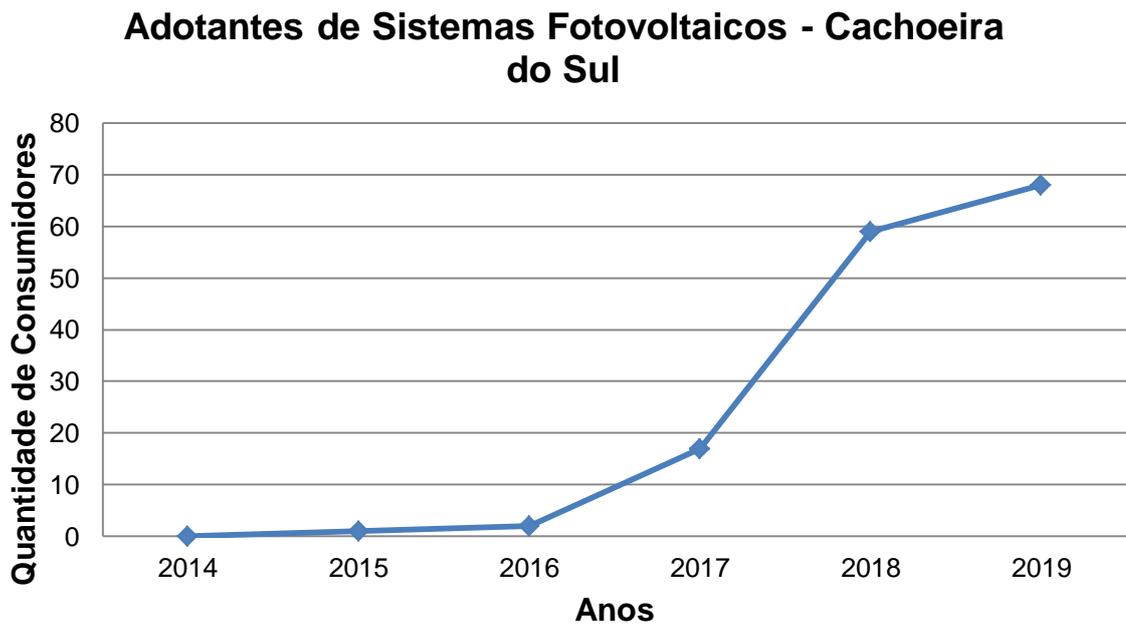
Os resultados obtidos pelo autovetor da matriz de comparação dos resultados dos especialistas, Tabela 8, é possível determinar o valor de cada coeficiente da Equação 4 proposta pelo modelo de Santos (2018). Sendo assim o valor para o coeficiente “a” é 0,40319273, para “b” 0,08290233, “c” 0,16753475, “d” 0,12190524 e para o coeficiente “e” 0,22446496.

#### 4.3. DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE CONSUMIDORES

Para a próxima etapa da metodologia proposta, Figura L, é realizada a modelagem do diagrama da Figura J, com os valores dos pesos de cada um dos aspectos, conforme Tabela 8. Para essa modelagem e análise do sistema, é considerado para coeficiente de inovação, um valor igual a 0,015 e para o coeficiente de imitação, um valor igual a 0,5. O valor dos coeficientes de imitação e inovação correspondem aos valores apresentados pelo modelo de Santos (2018). O valor de Consumidores totais é de 28649, esse valor corresponde à quantidade de consumidores residenciais em 2018, na Cidade de Cachoeira do Sul, dados obtidos pela Fundação de Economia e Estatística do Estado do Rio Grande do Sul (FEE, 2018).

Com esses dados, é analisado o sistema em três diferentes cenários. O primeiro cenário é um cenário hipotético, otimista. O segundo cenário é um cenário realista, baseado nos dados de consumidores de sistemas fotovoltaicos obtidos pela ANEEL, como mostrado na Figura N.

Figura N – Adotantes de Sistemas Fotovoltaicos – Cachoeira do Sul



Fonte: ANEEL (2018).

O terceiro cenário analisado é um cenário ideal, levando em consideração uma projeção de 50 anos para que os adotantes de sistemas fotovoltaicos se igualem à quantidade de consumidores totais.

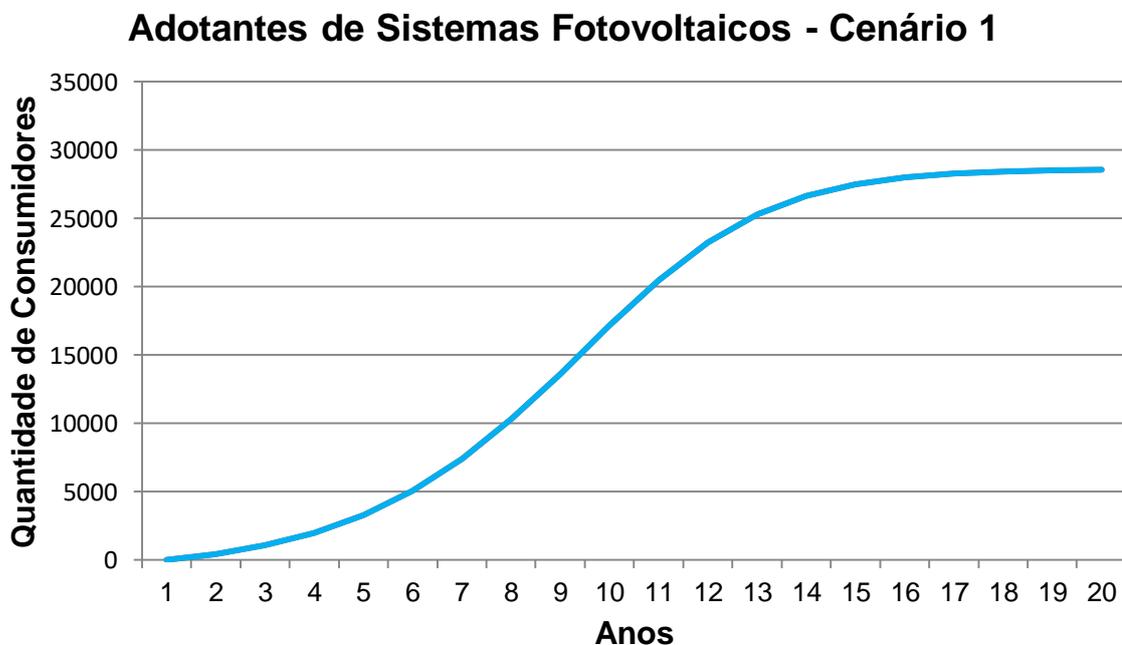
A partir dos dados dos últimos 5 anos da quantidade de consumidores residenciais em Cachoeira do Sul, foi realizado uma média da taxa de crescimento para a definição do valor da taxa de crescimento do modelo da Figura J. Com isso, o valor encontrado é uma taxa de crescimento de 0,9906% ao ano. Em todos os cenários analisados o ano 0 é o ano 2014, pois apenas a partir de 2015, a cidade de Cachoeira do Sul teve seu primeiro consumidor com sistemas fotovoltaicos residencial.

Nas análises dos cenários foi considerado o modelo completo proposto por Santos (2018), Anexo A. Esse modelo corresponde ao diagrama de estoque e fluxo do modelo completo para a difusão de sistemas fotovoltaicos.

### 4.3.1. Cenário 1

Para o primeiro cenário analisado foram considerados que todos os aspectos do modelo possuem valores iguais a um. Esse cenário é um cenário otimista, porém não é o que acontece na realidade, pois não existe a possibilidade de todos os aspectos assumirem seu valor máximo ao mesmo tempo. Desse modo, a Figura O apresenta a curva de adoção dos sistemas fotovoltaicos para o cenário 1, ao longo de 20 anos.

Figura O – Adotantes de Sistemas Fotovoltaicos – Cenário 1.



Fonte: Autor.

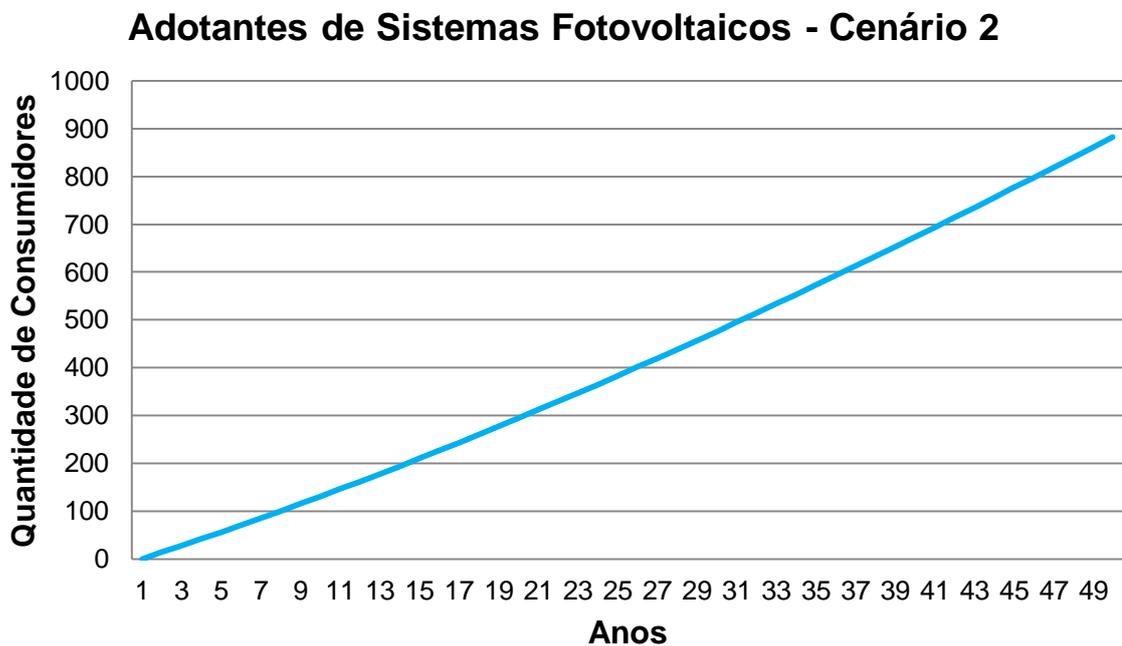
Ao analisar a Figura O, pode-se observar que, para uma análise otimista, em 20 anos, a partir de 2014, 28583 consumidores da cidade de Cachoeira do Sul possuirão sistemas fotovoltaicos, esse valor é correspondente a 99,76% da quantidade de consumidores totais na cidade nesse ano.

Em 2020 a taxa de adoção para o cenário 1 é de 8,142% na cidade de Cachoeira do Sul.

### 4.3.2. Cenário 2

Esse cenário é um cenário realista, sendo modelado a partir dos dados dos últimos 5 anos de adoção de sistemas fotovoltaicos em Cachoeira do Sul, e feita uma projeção com base nesses dados. Para o segundo cenário analisado foi considerado que os aspectos do modelo variam seus valores. Sendo esses 0,045 para os aspectos econômicos, 0,035 para os aspectos técnicos, 0,03 para os aspectos políticos, 0,045 para os aspectos sociais e 0,003 para os aspectos de gestão. Esses valores são correspondentes ao comportamento do sistema de difusão proposto por Santos (2018) encontrado no Anexo A. Desse modo, a Figura P apresenta a curva de adoção dos sistemas fotovoltaicos para o cenário 2 ao longo de 50 anos.

Figura P – Adotantes de Sistemas Fotovoltaicos – Cenário 2.



Fonte: Autor.

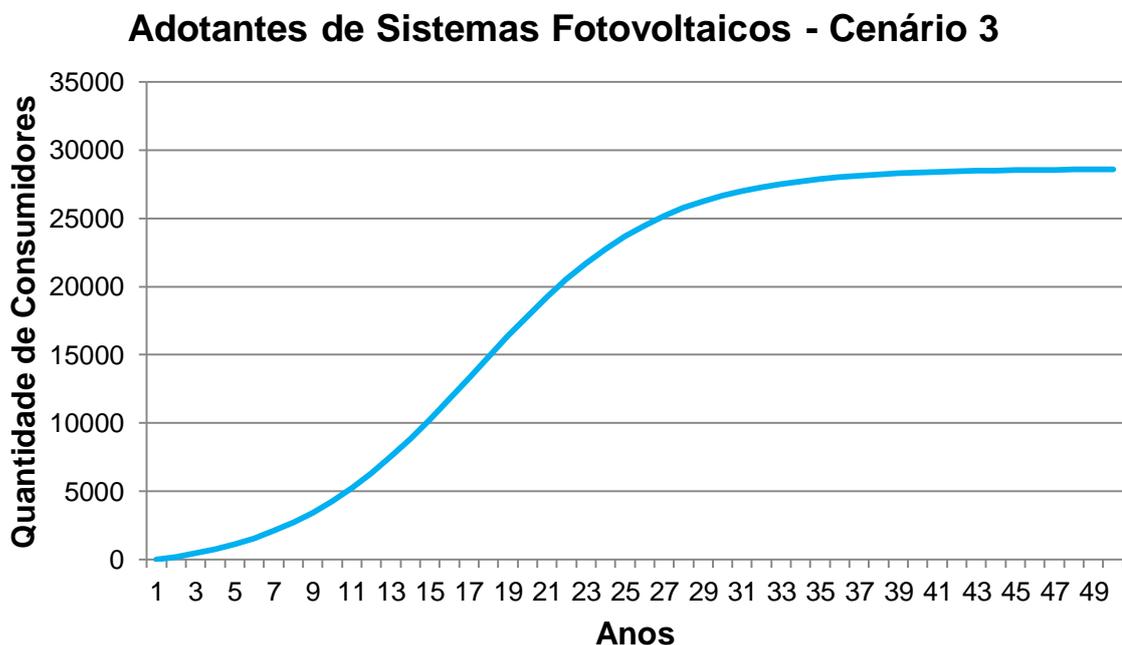
Ao analisar a Figura P pode-se observar que em 50 anos 883 consumidores residenciais de Cachoeira do Sul possuirão sistemas fotovoltaicos. Isso equivale a 30,81% da quantidade total de consumidores na cidade.

Em 2020, a taxa de adoção para o cenário 2 é de 0,051% na cidade de Cachoeira do Sul.

### 4.3.3. Cenário 3

Para o terceiro cenário analisado foi considerado que os aspectos do modelo variam seus valores. Sendo esses 0,65 para os aspectos econômicos, 0,45 para os aspectos técnicos, 0,5 para os aspectos políticos, 0,15 para os aspectos sociais e 0,1 para os aspectos de gestão, conforme anexo A. Esse cenário é um cenário ideal, foi modelado a partir dos dados dos últimos 5 anos e feita uma projeção com base nesses dados. Desse modo a Figura Q apresenta a curva de adoção dos sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo para o cenário 3 ao longo de 50 anos.

Figura Q – Adotantes de Sistemas Fotovoltaicos – Cenário 3.

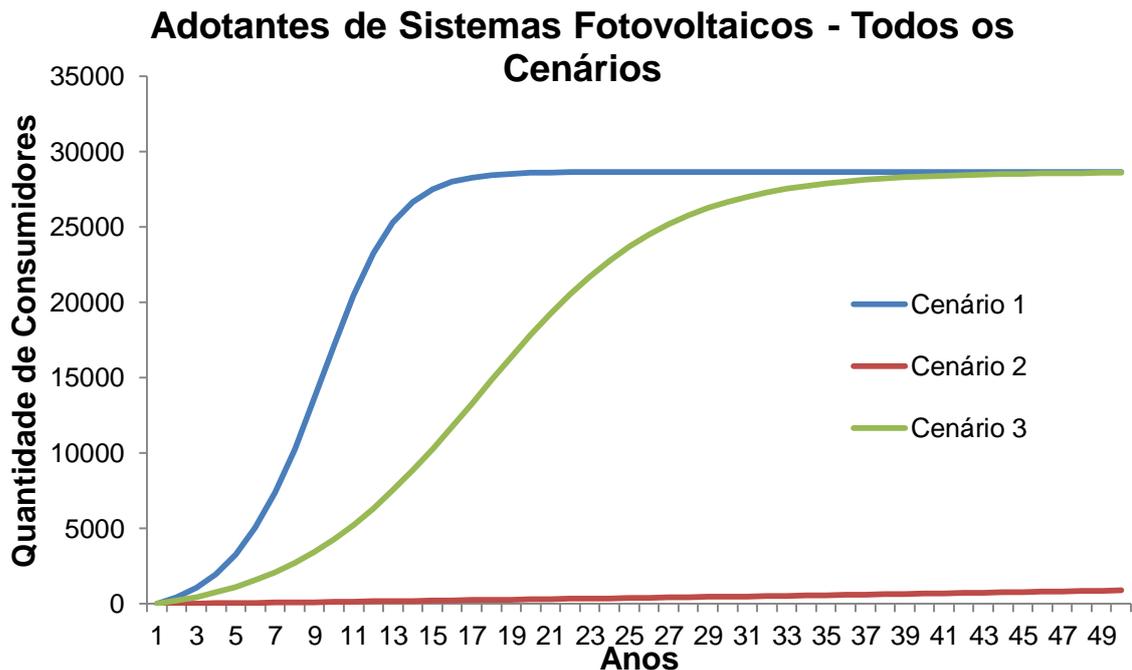


Fonte: Autor.

Ao analisar a Figura Q, pode-se observar que em 50 anos os adotantes de sistemas fotovoltaicos igualará à quantidade de consumidores totais, ou seja, em 2064, todos os consumidores da cidade de Cachoeira do Sul possuirão sistemas fotovoltaicos

Os Cenários 1, 2 e 3 mostram diferentes comportamentos que o modelo pode ter. Com base nos resultados obtidos em cada cenário, a Figura R e a Tabela 9 mostram, de forma sintetizada, todos esses dados, a modo de comparação entre os cenários.

Figura R – Sobreposição dos Cenários.



Fonte: Autor.

Tabela 9 – Resultados obtidos pela análise dos cenários.

Cenários	Descrição	Conclusão
Cenário 1	Todos os Aspectos iguais a 1. Cenário Otimista.	No ano 20 o número de adotantes corresponde a 99,76% dos potenciais adotantes e em 2020 8,14% dos Consumidores Totais terão sistemas fotovoltaicos.
Cenário 2	Cenário Realista, conforme ANEEL (2018).	No ano 50 o número de adotantes corresponderá a 30,81% dos potenciais adotantes e em 2020 0,051% dos Consumidores Totais terão sistemas fotovoltaicos.
Cenário 3	Cenário Ideal. Projeção de 50 anos para igualar adotantes aos consumidores totais	No ano 50 o número de adotantes corresponde a 100% dos potenciais adotantes e em 2020 4,608% dos Consumidores Totais terão sistemas fotovoltaicos.

Fonte: Autor.

Pela análise da Figura R e da Tabela 9, pode-se perceber que o melhor cenário analisado, cenário 1, ocorre quando todos os aspectos são iguais a 1. Nesse cenário, no ano 20, 28583 consumidores (99,76% dos consumidores totais) se tornam adotantes de sistemas fotovoltaicos. No cenário 2, mesmo com poucos incentivos para compra dos sistemas fotovoltaicos, o número de adotantes, no ano 50, corresponde a 30,81% dos potenciais adotantes, isto ocorre, pois ainda é muito recente a difusão de sistemas fotovoltaicos residenciais na cidade de Cachoeira do Sul, então a projeção é baseada nos últimos cinco anos deixando o sistema com uma projeção pouco satisfatória. No cenário 3, é considerado um cenário ideal, com projeção de adotantes iguais aos consumidores totais no ano 50.

O modelo foi simulado para o cenário 1 ao longo de 20 anos e para os demais cenários ao longo de 50 anos, pois para o cenário 1, em 20 anos já obteve um resultado satisfatório.

O objetivo da simulação do modelo foi satisfatório, pois os resultados encontrados nos cenários são próximos ao proposto. Após a análise do modelo ao longo do tempo, são mostradas propostas de políticas energéticas para os aspectos de maior influência a partir dos resultados da pesquisa realizada com especialistas.

#### 4.4. PROPOSTAS DE POLÍTICAS ENERGÉTICAS

A etapa seguinte da metodologia proposta, Figura L, é apresentar políticas energéticas de acordo com os resultados obtidos, a partir da análise dos especialistas.

Baseado nos resultados obtidos da pesquisa com os especialistas, de acordo com o peso de cada um dos aspectos da Tabela 8, foi possível concluir que, os aspectos de maior influência na tomada de decisão para a taxa de adoção de sistemas fotovoltaicos em consumidores residências é o Aspecto Econômico, seguido do Aspecto Técnico, e do Aspecto Político.

Para propor políticas energéticas é necessário, primeiramente, compreender quais são as barreiras de cada um dos aspectos considerados. Santos (2018) descreve detalhadamente quais são essas barreiras.

De acordo com Santos (2018), o que determina as barreiras para o aspecto Econômico são: VPL do sistema fotovoltaico; VPL da rede; financiamento para compra dos sistemas fotovoltaicos; custo de uma inovação diminui com o tempo;

Payback; tarifa; e salário do consumidor. Para o aspecto técnico, as barreiras são: qualidade dos sistemas fotovoltaicos; complexidade dos sistemas fotovoltaicos; energia do sistema fotovoltaico; empresas que trabalham com sistemas fotovoltaicos; radiação solar local; dificuldade de instalação; quantidade de módulos fotovoltaicos; durabilidade; exigência de manutenção; e demanda. Já para o aspecto político, as barreiras encontradas são: situação política; situação econômica; Políticas de subsídio para compra de sistemas fotovoltaicos; Políticas de juros baixos para compra de sistemas fotovoltaicos; Imposto de importação; Tarifas feed-in; Net Metering e Questões ambientais.

Agora que já são conhecidas as barreiras de cada um dos aspectos, pode-se determinar as políticas para cada um a fim de difundir os sistemas fotovoltaicos em consumidores residenciais de Baixa Tensão.

Em relação ao aspecto econômico para a difusão, é necessário demonstrar a partir de dados concretos que após um período específico o valor investido em sistemas fotovoltaicos retornará, ou seja, o valor que foi investido será pago em um determinado tempo e após esse tempo só haverá lucros para o investidor de sistemas fotovoltaicos, isso é o chamado retorno de investimento ou Payback. De acordo com algumas empresas de energia solar o retorno se dá entre 5 e 8 anos, podendo acontecer até mesmo antes desse período, o que é uma grande vantagem para o consumidor que, após esse período, apenas lucrará com o investimento. Em relação ao valor inicial do investimento, alguns bancos fazem financiamento para as pessoas que procuram esse tipo de investimento residencial.

Levando em consideração os aspectos técnicos da difusão, é necessário melhorar os estudos dos sistemas fotovoltaicos para que a qualidade seja melhor, assim como melhorar a durabilidade dos sistemas.

Para o aspecto político, a melhor política seria aumentar os subsídios para a compra, diminuir os impostos de importação e melhorar a divulgação e aumentar os ganhos de Tarifa Feed-in e Net metering.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma revisão bibliográfica sobre difusão de sistemas fotovoltaicos, aliado à esse assunto foi feita uma revisão da difusão de inovações, técnica de dinâmica de sistemas, métodos multicritérios para tomada de decisão e políticas energéticas.

Foi apresentada uma metodologia proposta, que consistiu em utilizar o modelo proposto por Santos (2018) que utiliza a técnica de dinâmica de sistemas em conjunto com o modelo de Bass, considerando cinco aspectos (econômicos, sociais, técnicos, políticos e de gestão), relevantes para a difusão de sistemas fotovoltaicos. Esse modelo é representado por uma equação que possui coeficientes para cada aspecto, que são as contribuições que cada aspecto possui. Para definir esses pesos foi utilizado o método multicritério para tomada de decisão AHP. Para utilizar esse método foi realizado pesquisas junto a seis especialistas da área de sistemas fotovoltaicos, onde cada especialista comparou cada aspecto par a par, preenchendo uma matriz de comparações. Para calcular os autovetores da matriz de comparações, foi considerado apenas as análises dos especialistas 1, 2, 3, 4 e 5, pois a análise do especialista 6 não foi precisa. Com isso, foi montada uma matriz de comparação com todos as análises dos especialistas e calculado o autovetor da matriz. Os autovalores do autovetor dessa matriz são os pesos, contribuições, de cada aspecto do modelo proposto por Santos (2018).

Os valores de cada coeficiente da equação proposta pelo modelo de Santos (2018), com base nos resultados obtidos pela análise dos especialistas, foi de 0,40319273 para “a”, para “b” 0,08290233, “c” 0,16753475, “d” 0,12190524 e para o coeficiente “e” 0,22446496. Esses valores correspondem à influência dos aspectos econômicos, de gestão, políticos, sociais e técnicos, respectivamente. Com os resultados de cada um dos especialistas conclui-se que os aspectos de maior influência na difusão de sistemas fotovoltaicos em consumidores residenciais de baixa tensão foram os aspectos econômicos (40,32%), seguido do aspecto técnico (22,45%) e em seguida o aspecto político (16,75%). O aspecto de gestão (8,3%) foi o aspecto de menor influência.

Com os valores obtidos de cada um dos aspectos foi feita uma modelagem do sistema proposto por Santos (2018) ao longo do tempo, analisada em três cenários,

um cenário otimista, um cenário real e cenário ideal. Para o cenário 1 no ano 20, 28583 consumidores (99,76% dos consumidores totais) se tornam adotantes de sistemas fotovoltaicos. No cenário 2, mesmo com poucos incentivos para compra dos sistemas fotovoltaicos, o número de adotantes no ano 50 corresponde a 30,81% dos potenciais adotantes, isto ocorre, pois ainda é muito recente a difusão de sistemas fotovoltaicos residenciais na cidade de Cachoeira do Sul, então a projeção é baseada nos últimos cinco anos deixando o sistema com uma projeção pouco satisfatória. No cenário 3, é considerado um cenário ideal, com projeção de adotantes iguais aos consumidores totais no ano 50, chegando a 4,608% de Taxa de adoção em 2020.

Para melhorar o processo de difusão foi proposto algumas políticas de incentivo, com base nos aspectos de maior relevância para melhorar a difusão. Com isso é necessário demonstrar quando o consumidor terá o Payback, melhorar os estudos dos sistemas fotovoltaicos para que a qualidade seja melhor, assim como a melhorar a durabilidade dos sistemas e aumentar os subsídios para a compra, diminuir os impostos de importação e melhorar a divulgação e aumentar os ganhos de Tarifa Feed-in e Net metering.

## 5.1. OPORTUNIDADES DE TRABALHOS FUTUROS

A difusão dos sistemas fotovoltaicos possui diversas oportunidades para trabalhos futuros:

- Análise do efeito da difusão dos sistemas fotovoltaicos no sistema de transmissão na cidade de Cachoeira do Sul;
- Análise do efeito da difusão dos sistemas fotovoltaicos na operação e no planejamento da expansão dos sistemas de distribuição.

## 5.2. PRODUÇÃO CIENTÍFICA

Durante a realização do trabalho, foi realizada apresentação do mesmo na Jornada Acadêmica Integrada da Universidade Federal de Santa Maria do ano de 2019.

## REFERÊNCIAS

ABOLHOSSEINI S; HESHMATI A. The main support mechanisms to finance renewable energy development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 40, p. 876 - 885, 2014.

A CARTA DO SOL. Relatório técnico. **Subsídios para o planejamento da promoção da energia solar fotovoltaica no brasil**. rio de janeiro, 19 de agosto de 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa nº 482/2012**. 2012a. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>> Acesso em: 8 de mai. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa nº 687/2015. 2015b**. Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 8 mai. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Nota Técnica nº 0056/2017-SRD/ANEEL. 2017. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/documents/656827/15234696/Nota+T%C3%A9cnica\\_0056\\_PROJE%C3%87%C3%95ES+GD+2017/](http://www.aneel.gov.br/documents/656827/15234696/Nota+T%C3%A9cnica_0056_PROJE%C3%87%C3%95ES+GD+2017/)>. Acesso em: 08 mai. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Unidades Consumidoras com Geração Distribuída** Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/gd\\_estadual\\_detalhe.asp?uf=RS](http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/gd_estadual_detalhe.asp?uf=RS)> Acesso em: 12 de nov. 2019.

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

BATTAGLINI, A.; LILLIESTAM, J.; HAAS, A., PATT, A. Development of SuperSmart Grids for a more efficient utilisation of electricity from renewable sources. **Journal of Cleaner Production**, v.17, 2009.

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

BRANS, J. P.; VINCKE, P. **A preference ranking organization method (The PROMETHEE method for multiple criteria decision-making)**. *Management Science*, v. 31, p. 647-656, 1985.

BRASIL. Lei nº 13.169, de 06 de outubro de 2015. **Diário Oficial [da República Federativa do Brasil]**. Brasília, DF, nº 192, 7 out. 2015. Seção 1.

CARLEY S. State renewable energy electricity policies: na empirical evaluation of effectiveness. **Energy Policy**, v. 37, n. 8, p. 3071-81, 2009.

CEF - CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. **Construcard Caixa**. Disponível em: < <http://www.caixa.gov.br/voce/cartoes/casa/construcard/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 18 de agosto de 2019.

CEPEL – CENTRO DE PESQUISA DE ENERGIA ELÉTRICA. **Energia para as Comunidades Isoladas**. Informe PRODEEM. Rio de Janeiro. 1996.

DW BRASIL. Disponível em:<<http://www.dw.de/produ%C3%A7%C3%A0-energia-solar-na-alemanha-baterecorde-em-2012/a-16492873>> . Acesso em: 18 de Agosto de 2019.

ELETROBRÁS, 2009. **Relatório da Administração da Eletrobrás, 2009**. Disponível em: <<http://www.eletronbras.com/elb/main.asp?Team=%7BBC80BD9D-8497-49C8-BD52-61B9626EA294%7D>> . Acesso em: 18 de agosto de 2019.

EPD. **Energy policy definition**. Disponível em: < <http://www.tutorvista.com/ks/energy-policy-definition;2013>> . Acesso em Agosto de 2019.

EPE (Empresa de pesquisa energética)/ Nota técnica - **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira**. Rio de Janeiro. Maio de 2012.

BHANDARI R, STADLER I. Grid parity analysis of solar photovoltaic systems in Germany using experiences curves. **Solar Energy**, v. 83, n. 9, p. 1634 – 44, 2009.

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

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2024**. Brasília. 2015.

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

FUNDAÇÃO DE ECONOMIA E ESTATÍSTICA – FEE. Dados abertos. Disponível em: <<http://dados.fee.tche.br/>>. Acesso em: 14 nov. 2019.

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

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

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

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

JORDÃO, B. M. C.; PEREIRA, S. R. **A Análise Multicritério Na Tomada De Decisão – O Método Analítico Hierárquico de T. L. Saaty**. 2006. 14 p. Trabalho – Departamento de Engenharia Civil, Instituto Politécnico de Coimbra, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, 2006.

KABLI, M. R. **A Multi-Attribute Decision Making Methodology for Selecting New R&D Projects Portfolio with a Case Study of Saudi Oil Refining Industry** . [s.l.] University of Nottingham , 2009.

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

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

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

LIU, L. Q.; WANG, Z. X.; ZHANG, H. Q.; XUE, Y. C. Solar energy development in china- a review. **Renewable sustainable energy rev**, v. 14, p. 301-11, 2010.

WANG, Q. Effective policies for renewable energy – the example of China's wind power- lesson for China's photovoltaic power. **Renewable Sustainable Energy Rev**, v. 14, n. 2, p. 702-12, 2010.

LOPES, G. S. **Reconfiguração de Redes de Distribuição em Situações de Contingências Considerando Operação Ilhada de PCH** . [s.l.] Universidade Federal de Santa Maria, 2014.

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

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **ProGD Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica: Ações De Estímulo à Geração Distribuída, com Base em Fontes Renováveis**. Brasília. 2015.

MUSSOI, F. L. R. **Modelo de Decisão Integrado para a Priorização Multiestágio de Projetos de Distribuição Considerando a Qualidade da Energia Elétrica**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

PALM, A. Local factors driving the diffusion of solar photovoltaics in Sweden: a case study of five municipalities in an early market. **Energy Research & Social Science**, v. 14, p. 1 - 12, 2016.

PAMPLONA, E. O. **Contribuição para a Análise Crítica do Sistema de Custos ABC Através da Avaliação de Direcionadores de Custos**. [s.l.] Pós-Graduação da FGV/EAESP, 1997.

PRUYT, E. Small System Dynamics Models for Big Issues: Triple Jump towards Real-World Complexity, TU Delft Library, 2013.

RAI, V.; REVEES, D. Cale.; MARGOLIS, R. Overcoming barriers and uncertainties in the adoption of residential solar PV. **Renewable Energy**, v. 89, p. 498 - 505, 2016.

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

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

SAATY, T. L. Decision Making with The Analytic Hierarchy Process. Pittsburgh, PA, USA: Inderscience Enterprises Ltd, v 1, 2008.

SANTOS, L. L. C. dos. **Projeção da Difusão de Sistemas Fotovoltaicos em Consumidores Residenciais de Baixa Tensão**. 2018. 138 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, 2018.

SILVA, P. A. S. da. et al. **Aplicação do Método AHP Para a Tomada de Decisões Multicriteriais no Restabelecimento Automático de Energia**. In: Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, 2010. Alegrete, RS, 2010.

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

SOLANGI, K.H.; ISLAM, M.R.; SAIDUR, R.; RAHIM, N.A.; FAYAZ, H. A review on global solar energy policy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 2149-2163, 2011.

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

VENSIM. Disponível em: <<http://vensim.com/>>. Acesso em: 15 nov. 2019.

Villela, P. R.C. **Introdução à Dinâmica de Sistemas**. 2005. 59 p. Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2005.

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

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

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

## APÊNDICE A

### APÊNDICE A.1.

Figura A. 1 – Matriz de Comparação do Especialista 1.

#### MATRIZ DE COMPARAÇÕES DE CADA ASPECTO

	AE	AG	AP	AS	AT
AE	1	7	8	9	5
AG	0,1429	1	2	1	0,125
AP	0,125	0,5	1	2	0,5
AS	0,1111	1	0,5	1	0,2
AT	0,2	8	2	5	1

Fonte: Autor.

### APÊNDICE A.2.

Figura A. 2 – Matriz de Comparação do Especialista 2.

#### MATRIZ DE COMPARAÇÕES DE CADA ASPECTO

	AE	AG	AP	AS	AT
AE	1	8	6	5	3
AG	0,125	1	0,25	0,3333	0,5
AP	0,1667	4	1	0,3333	0,2
AS	0,2	3	3	1	0,25
AT	0,3333	2	5	4	1

Fonte: Autor.

## APÊNDICE A.3.

Figura A. 3 – Matriz de Comparação do Especialista 3.

**MATRIZ DE COMPARAÇÕES DE CADA ASPECTO**

	AE	AG	AP	AS	AT
AE	1	4	1	0,33	2
AG	0,25	1	0,5	0,20	0,2
AP	1	2	1	1	1
AS	3	5	1	1	3
AT	0,5	5	1	0,3333	1

Fonte: Autor.

## APÊNDICE A.4.

Figura A. 4 – Matriz de Comparação do Especialista 4.

**MATRIZ DE COMPARAÇÕES DE CADA ASPECTO**

	AE	AG	AP	AS	AT
AE	1	2,00	0,50	7,00	1,00
AG	0,5	1	0,25	6,00	0,25
AP	2	4	1	8,00	1,00
AS	0,1429	0,1667	0,125	1	0,13
AT	1	4	1	8	1

Fonte: Autor.

## APÊNDICE A.5.

Figura A. 5 – Matriz de Comparação do Especialista 5.

**MATRIZ DE COMPARAÇÕES DE CADA ASPECTO**

	AE	AG	AP	AS	AT
AE	1	4	3	2	2
AG	0,25	1	0,5	0,5	1
AP	0,3333	2	1	1	2
AS	0,5	2	1	1	2
AT	0,5	1	0,5	0,5	1

Fonte: Autor.

## APÊNDICE A.6.

Figura A. 6 – Matriz de Comparação do Especialista 6.

**MATRIZ DE COMPARAÇÕES DE CADA ASPECTO**

	AE	AG	AP	AS	AT
AE	1	9	9	7	9
AG	0,1111	1	7	6	8
AP	0,1111	0,1429	1	5	8
AS	0,1429	0,1667	0,2	1	7
AT	0,1111	0,125	0,125	0,1429	1

Fonte: Autor.

## APÊNDICE B

### APÊNDICE B.1.

Tabela B. 1 – Pesos dos Aspectos para o Especialista 1.

<b>Peso dos Aspectos (Wi)</b>	
AE	0,596812
AG	0,063992
AP	0,07157
AS	0,050665
AT	0,216961

Fonte: Autor.

### APÊNDICE B.2.

Tabela B. 2 – Pesos dos Aspectos para o Especialista 2.

<b>Peso dos Aspectos (Wi)</b>	
AE	0,521754
AG	0,048903
AP	0,075087
AS	0,1193
AT	0,234956

Fonte: Autor.

### APÊNDICE B.3.

Tabela B. 3 – Pesos dos Aspectos para o Especialista 3.

<b>Peso dos Aspectos (Wi)</b>	
AE	0,209156
AG	0,059576
AP	0,197462
AS	0,368061
AT	0,165745

Fonte: Autor.

### APÊNDICE B.4.

Tabela B. 4 – Pesos dos Aspectos para o Especialista 4.

<b>Peso dos Aspectos (Wi)</b>	
AE	0,220437
AG	0,106872
AP	0,343163
AS	0,030788
AT	0,298741

Fonte: Autor.

### APÊNDICE B.5.

Tabela B. 5 – Pesos dos Aspectos para o Especialista 5.

<b>Peso dos Aspectos (Wi)</b>	
AE	0,386554
AG	0,102362
AP	0,188777
AS	0,204724
AT	0,117583

Fonte: Autor.

## APÊNDICE B.6.

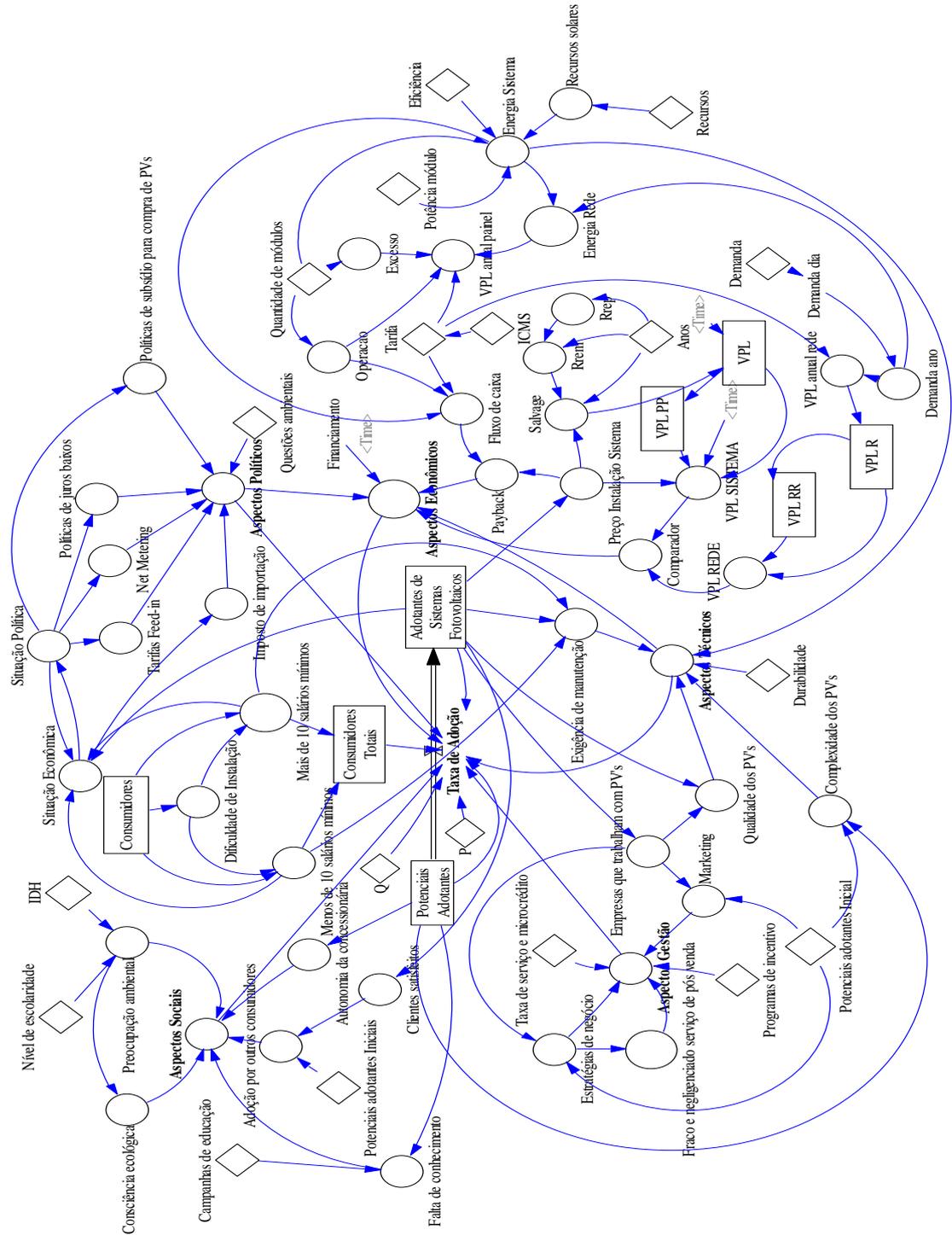
Tabela B. 6 – Pesos dos Aspectos para o Especialista 6.

<b>Peso dos Aspectos (Wi)</b>	
AE	0,600294
AG	0,224501
AP	0,09939
AS	0,055128
AT	0,020687

Fonte: Autor.

ANEXO A

Figura A.A. 1 – Diagrama de Estoque e Fluxo do Modelo Completo.



Fonte: Santos (2018).