

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

Joelson Lopes da Paixão

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA
NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

**Santa Maria, RS
2019**

Joelson Lopes da Paixão

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA NA REDE
DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

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

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Alzenira da Rosa Abaide

**Santa Maria, RS
2019**

Paixão, Joelson
AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA NA
REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA / Joelson
Paixão.- 2019.
147 p.; 30 cm

Orientadora: Alzenira da Rosa Abaide
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2019

1. Geração Distribuída 2. Geração Fotovoltaica 3. Rede
de Distribuição 4. Lógica Fuzzy 5. Método de Monte Carlo
I. da Rosa Abaide, Alzenira II. Título.

Joelson Lopes da Paixão

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA NA REDE
DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

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

Aprovado em 22 de fevereiro de 2019:



Alzenira da Rosa Abalde, Dr^a. (UFSM)
(Presidente/Orientadora)



Laura Lisiane Callai dos Santos, Dr^a. (UFSM)



Nelson Knak Neto, Dr. (URI)

**Santa Maria, RS
2019**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus tios Iolanda e Salvador, que infelizmente já não está entre nós para presenciar este momento. Ressalto aqui também o meu agradecimento por todo o carinho, apoio e pela acolhida nesses últimos 2 anos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo que tem proporcionado a mim durante a vida, pela família, amigos e oportunidades, força e determinação que sempre me deu para encarar os desafios.

Presto também o agradecimento aos meus pais por todos os ensinamentos dados ao longo da vida, pelo apoio emocional e financeiro e pelo suporte nas minhas decisões durante o período de realização deste trabalho.

Agradeço a professora Dr^a. Alzenira da Rosa Abaide, pelo acolhimento que tive e por toda competência, paciência e orientação fundamental no planejamento e concepção desta dissertação. Obrigado por toda confiança creditada em mim e pelos ensinamentos valiosos que ultrapassam o âmbito acadêmico, influenciando positivamente no meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Gostaria de deixar meu agradecimento especial ao Msc. Jordan Passinato Sausen, que foi meu colega de graduação e em parte do mestrado. É um grande amigo e companheiro que a vida trouxe, sempre com palavras amigas, confortantes e dispostos a ajudar no que fosse preciso. Minha imensa gratidão pela sua valiosa amizade.

A todos os professores do Centro de Estudos em Energia e Sistemas de Potência – CEESP, pelos ensinamentos, conhecimentos e experiências compartilhados durante o mestrado.

Aos colegas e amigos Dr. Moisés Machado dos Santos, Msc. Pedro Genaro Alves Filho e Msc. Jordan Passinato Sausen pela apresentação de artigos em congressos de âmbito internacional e nacional.

E também aos demais colegas do CEESP, pelos ensinamentos, ideias, e sugestões que de alguma forma ou outra contribuíram para o aprendizado e realização desse trabalho.

Aos funcionários do Departamento Municipal de Energia de Ijuí (DEMEI), em especial ao Marcelo Weber Fürmann, que constantemente disponibilizaram informações essenciais em relação à rede de distribuição de energia estudada no presente trabalho.

Aos meus amigos, pelo companheirismo, ombro amigo, palavras de motivação e apoio, e em especial a Carine H. Zanon pelos conselhos e incentivos.

Por fim, agradeço a todos aqueles que de alguma forma colaboraram para a realização desse trabalho.

"É paradoxal, porém verdadeiro, dizer que quanto mais sabemos, mais ignorantes nos tornamos no sentido absoluto, pois é somente através do esclarecimento que nos tornamos conscientes de nossas limitações. Precisamente um dos resultados mais gratificantes da evolução intelectual é a abertura contínua de novos e maiores prospectos"

— Nikola Tesla

RESUMO

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

AUTOR: Joelson Lopes da Paixão
ORIENTADORA: Dr^a. Alzenira da Rosa Abaide

As fontes que compõem a matriz energética global vêm se diversificando, devido ao surgimento de esforços para a substituição de fontes geradoras poluentes por fontes alternativas, tais como: a eólica, a fotovoltaica e a biomassa. No Brasil, a Resolução Normativa N° 482 de 2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), estabeleceu as condições gerais para o acesso da microgeração e minigeração distribuídas ao sistema elétrico de distribuição (SED) e o sistema de compensação de energia elétrica. A partir dessa resolução e de algumas políticas governamentais, a integração da Geração Distribuída Fotovoltaica (GDFV) no sistema elétrico começou a ser viabilizada e sua participação tende a aumentar nos próximos anos. Em 2015, a Resolução Normativa N° 482 foi alterada pela N° 687. Nesse cenário de expansão na instalação da GDFVs, é necessário estimar o seu potencial de entrada, bem como avaliar o impacto que causará no SED, para adequá-los e necessário e tornar os planejamentos mais confiáveis, refletindo na realidade do sistema. Desse modo, o objetivo desta dissertação é realizar a análise do comportamento da rede de uma distribuidora, no sul do Brasil, considerando a integração da GDFV na rede de distribuição. A modelagem dos elementos que compõem a rede, das cargas, das unidades de GDFV e as simulações, são realizadas no *software* OpenDSS. A avaliação da probabilidade e percentual de inserção de unidades de GDFV é feita através de um Sistema de Inferência *Fuzzy* (SIF). Esse SIF permite elaborar cenários de integração baseados na combinação de fatores que favorecem ou não a implantação da geração fotovoltaica (GFV), como: as tendências no setor elétrico (preço da energia), o custo dos Sistemas Fotovoltaicos (SFVs), quantidade de incentivos dados à GDFV, a atratividade da GDFV e o tempo de retorno do investimento. Para definir perfis diários de GFV, são utilizadas curvas típicas de geração, estratificadas por estação anual, obtidas a partir da aplicação do Método de Monte Carlo (MMC) a um conjunto de medições realizadas em um sistema de testes, de 1 kWp, instalado na região de estudo. Como a GFV é variável e de difícil previsão, as curvas de geração adotadas nas simulações contemplam os cenários com maior probabilidade de ocorrência. No estudo de caso, são realizadas simulações considerando a sazonalidade anual da GFV, com curvas de cargas típicas para consumidores residenciais, para os dias úteis e finais de semana. A partir das simulações são analisadas as curvas de cargas dos alimentadores, os perfis de tensão da rede, a energia consumida, as perdas no alimentador e aplicam-se métricas às curvas de carga. O estudo mostrou que as maiores variações nos níveis de tensão e no fluxo de potência ocorrem na primavera e no verão, pois a radiação solar média é mais intensa. Com elevados percentuais de penetração da GDFV (18% e/ou 25%), há períodos em que surge fluxo de potência reverso no alimentador e reduz-se o perfil de queda de tensão ao longo da rede. A GDFV também conseguiu atenuar os picos de cargas durante o dia, além de reduzir a energia total consumida e as perdas na rede. Não foram observados períodos de sobrecarga, subtensão ou sobretensão.

Palavras-chave: Geração Distribuída. Geração Fotovoltaica. Rede de Distribuição. Lógica *Fuzzy*. Método de Monte Carlo.

ABSTRACT

EVALUATION OF THE IMPACT OF PHOTOVOLTAIC MICROGENERATION IN THE ELECTRICITY DISTRIBUTION NETWORK

AUTHOR: Joelson Lopes da Paixão
ADVISOR: Dr^a. Alzenira da Rosa Abaide

The sources that make up the global energy matrix have been diversifying due to the emergence of efforts to replace polluting sources with alternative sources such as wind, photovoltaic and biomass. In Brazil, Normative Resolution No. 482 of 2012, of the National Electric Energy Agency (ANEEL), established the general conditions of access to microgeneration and mining distributed to the electricity distribution system (EDS) and to the energy compensation system power. Following this resolution and some government policies, the integration of the Dispersed Photovoltaic Generation (DPG) in the electric system began to be viable and its participation tends to increase in the next years. In 2015, Normative Resolution No. 482 was modified by No. 687. In this scenario of expansion of the DPG installation, it is necessary to estimate its potential for entry, as well as to assess the impact it will have on the EDS, to adapt it if necessary, and make planning more reliable, reflecting the reality of the system. Thus, the objective of this dissertation is to perform the analysis of the behavior of the network of a distributor, in the south of Brazil, considering the integration of the DPG in the distribution network. The modeling of the elements that compose the network, the loads, the DPG units and the simulations are performed in the OpenDSS software. The evaluation of the probability and percentage of insertion of the DPG units is done through a Fuzzy Inference System (FIS). This FIS allows the elaboration of integration scenarios based on the combination of factors that favor or not the implantation of photovoltaic generation (PG), such as trends in the electric sector (energy price), cost of PVS, attractiveness of the DPG and the time of return on investment. To define daily PG profiles, typical annual stratified generation curves obtained from the Monte Carlo Method (MCM) are used for a set of measurements performed on a 1 kWp test system installed in the study region. As the PG is variable and difficult to predict, the generation curves adopted in the simulations contemplate the scenarios with the highest probability of occurrence. In the case study, the simulations are performed considering the annual seasonality of the PG, with typical load curves for residential consumers on weekdays and weekends. From the simulations, feeder load curves, grid voltage profiles, power consumed, feeder losses and metrics are applied to the load curves. The study showed that the greatest variations in voltage and energy consumption levels occur in the spring and summer because the average solar radiation is more intense. With high percentages of DPG penetration (18% and/or 25%), there are periods in which reverse power flow occurs in the feeder and the network voltage drop profile is reduced. The DPG was also able to reduce peak loads during the day, as well as reduce the total energy consumed and the losses in the network. No overload, undervoltage or overvoltage were observed.

Keywords: Dispersed Generation. Photovoltaic Generation. Distribution's Grid. Fuzzy Logic. Monte Carlo Method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Radiação solar média anual no Brasil.	19
Figura 2 – Potência instalada em SFVs na micro e minigeração distribuída.	20
Figura 3 – Estratificação da presença da GDFV por classe de consumo: (a) número de consumidores e (b) potência instalada.	21
Figura 4 – Participação percentual das fontes na matriz energética brasileira.	26
Figura 5 – Radiação solar média no Brasil durante cada estação do ano.	32
Figura 6 – Modelo conceitual dos aspectos que influenciam a posição competitiva da energia fotovoltaica no mercado de energia.	35
Figura 7 – Curva de Carga e GFV no dia 14 de julho (a partir do histórico do ano 2006).	38
Figura 8 – Curva do Pato Real e Projetada para o Sistema da Califórnia, entre 31 de Março de 2012 e 2020.	39
Figura 9 – Geração de energia elétrica por tipo de usina em 2018.	40
Figura 10 – Tipos de estimação da energia fotovoltaica.	47
Figura 11 – Técnicas utilizadas para a estimação da energia fotovoltaica gerada.	47
Figura 12 – Exemplo de processo de SMC.	53
Figura 13 – Processo de convergência da SMC.	54
Figura 14 – Metodologia proposta para o desenvolvimento do estudo.	59
Figura 15 – Curvas de carga semanais típicas (a) Dias Úteis, (b) Finais de Semana.	63
Figura 16 – Fluxograma da modelagem do alimentador no OpenDSS.	65
Figura 17 – SIF para determinar o percentual de entrada da GDFV.	66
Figura 18 – Subconjuntos da variável de entrada Preço da Energia Elétrica.	68
Figura 19 – Preço histórico dos MFVs do ano 1977 a 2015 em dólares por Watt.	69
Figura 20 – Subconjuntos da variável de entrada Custo dos SFVs.	70
Figura 21 – Subconjuntos da variável de entrada Políticas de Incentivo.	72
Figura 22 – Subconjuntos da variável de entrada Atratividade dos SFVs.	74
Figura 23 – Subconjuntos da variável Tempo de Retorno do Investimento.	75
Figura 24 – Curvas de adoção da inovação.	77
Figura 25 – Subconjuntos da Saída do SIF.	79
Figura 26 – Resumo das etapas seguidas na aplicação da SMC.	81
Figura 27 – Rede de Média Tensão do Demei.	88
Figura 28 – Alimentador Demei 314, modelado no OpenDSS.	89

Figura 29 – Saída do SIF, quando aplicadas condições desfavoráveis à GDFV.	90
Figura 30 – Saída do SIF, quando aplicadas condições bastante favoráveis à GDFV.	90
Figura 31 – Saída do SIF para o cenário atual.	91
Figura 32 – Verificação das frequências de ocorrência e absoluta para a variável em análise (GFV, às 12h10min).	93
Figura 33 – Curvas típicas de GFV para cada estação do ano.	95
Figura 34 – Fluxograma hierárquico do conjunto de simulações.	96
Figura 35 – Curvas do fluxo de potência e tensão diárias, na saída do AL, na primavera.	97
Figura 36 – Alimentador 314 com 25% de GDFV, às 13h00min.	98
Figura 37 – Perfil de tensão fase-neutro no alimentador, sem GDFV e com 25% de GDFV.	99
Figura 38 – Curvas do fluxo de potência e tensão diárias, na saída do AL, no verão.	100
Figura 39 – Curvas do fluxo de potência e tensão diárias, na saída do AL, no outono.	102
Figura 40 – Curvas do fluxo de potência e tensão diárias, na saída do AL, no inverno.	103
Figura 41 – Curvas do fluxo de potência e tensão diárias, na saída do AL, na primavera.	105
Figura 42 – Perfil de tensão fase-neutro no alimentador, sem GDFV e com 25% de GDFV.	106
Figura 43 – Curvas do fluxo de potência e tensão diárias, na saída do AL, no verão.	107
Figura 44 – Curvas do fluxo de potência e tensão diárias, na saída do AL, no outono.	109
Figura 45 – Curvas do fluxo de potência e tensão diárias, na saída do AL, no inverno.	110
Figura 46 – Níveis de tensão ao longo do alimentador no horário de carga máxima.	114
Figura 47 – Etapas de um Sistema de Inferência Fuzzy.	135
Figura 48 – Exemplo do processo de fuzzificação.	136
Figura 49 – Exemplo de SIF com controlador Mamdani.	137
Figura 50 – Exemplo de SIF com controlador Sugeno.	137
Figura 51 – Visão geral da caixa de ferramentas para os SIFs e seus recursos no Matlab.	139
Figura 52 – Formato genérico de algumas funções de pertinência, presentes no Matlab.	140
Figura 53 – Exemplo de parte da base de regras que regem o SIF.	143

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados das 50 rodadas de simulação.	94
Tabela 2 – Comparação das frequências real e simulada das 10 mil simulações.	95
Tabela 3 – Energia e perdas totais diárias na saída do AL, em um dia de primavera.	98
Tabela 4 – Métricas para a avaliação da entrada da GDFV na primavera.	99
Tabela 5 – Energia e perdas totais diárias na saída do AL, em um dia de verão.	100
Tabela 6 – Métricas para a avaliação da entrada da GDFV no verão.	101
Tabela 7 – Energia e perdas totais diárias na saída do AL, em um dia de outono.	102
Tabela 8 – Métricas para a avaliação da entrada da GDFV no outono.	102
Tabela 9 – Energia e perdas totais diárias na saída do AL, em um dia de inverno.	104
Tabela 10 – Métricas para a avaliação da entrada da GDFV no inverno.	104
Tabela 11 – Energia e perdas totais diárias na saída do AL, em um dia de primavera.	105
Tabela 12 – Métricas para a avaliação da entrada da GDFV na primavera.	107
Tabela 13 – Energia e perdas totais diárias na saída do AL, em um dia de verão.	108
Tabela 14 – Métricas para a avaliação da entrada da GDFV no verão.	108
Tabela 15 – Energia e perdas totais diárias na saída do AL, em um dia de outono.	109
Tabela 16 – Métricas para a avaliação da entrada da GDFV no outono.	110
Tabela 17 – Energia e perdas totais diárias na saída do AL, em um dia de inverno.	111
Tabela 18 – Métricas para a avaliação da entrada da GDFV no inverno.	111
Tabela 19 – Crescimento percentual de carga, com a GDFV, nos dias úteis.	114
Tabela 20 – Crescimento percentual de carga, com a GDFV, nos finais de semana.	116

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Quantidade de unidades consumidoras, por classe de consumo, no país.	26
Quadro 2 – Consumo percentual de eletricidade, por classe, no ano 2014 a 2017.	27
Quadro 3 – Diferentes métodos utilizados na predição da GFV.	45
Quadro 4 – Alguns trabalhos que utilizam o OpenDSS para a modelagem de SEDs.	49
Quadro 5 – Resumo das aplicabilidades da SMC em alguns trabalhos na literatura técnica. ...	56
Quadro 6 – Tarifas Médias por Classe de Consumo (R\$/MWh).	67
Quadro 7 – Funções e parâmetros dos subconjuntos fuzzy definidos para a variável Preço da Energia Elétrica.	68
Quadro 8 – Funções e parâmetros dos subconjuntos fuzzy definidos para a variável Custo dos SFVs.	70
Quadro 9 – Funções e parâmetros dos subconjuntos fuzzy definidos para a variável Políticas de Incentivos.	71
Quadro 10 – Funções e parâmetros dos subconjuntos fuzzy definidos para a variável Atratividade dos SFVs.	73
Quadro 11 – Funções e parâmetros dos subconjuntos fuzzy definidos para a variável Tempo de Retorno do Investimento.	74
Quadro 12 – Saída do Sistema de Inferência Fuzzy vs Penetração percentual da GDFV adotado.	92
Quadro 13 – Funções e parâmetros dos subconjuntos fuzzy definidos para a saída do SIF. ...	78
Quadro 14 – Pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV.	82
Quadro 15 – Características do alimentador estudado.	87
Quadro 16 – Fontes de potência flexíveis.	117
Quadro 17 – Consistências entre condições e conclusões de regras Fuzzy.	138

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
AL	Alimentador
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BIG	Banco de Informações de Geração
BT	Baixa Tensão
CF	<i>Capacity Factor</i> (Fator de Capacidade)
DEMEI	Departamento Municipal de Energia de Ijuí
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FAT	Fator de Atratividade
FV	Fotovoltaico(a)
GD	Geração Distribuída
GDFV	Geração Distribuída Fotovoltaica
GFV	Geração Fotovoltaica
GLD	Gerenciamento pelo Lado da Demanda
I	Corrente Elétrica
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
kV	Quilovolts
kW	Quilowatts
LR	<i>Load Range</i> (Faixa de Carga)
LRC	<i>Load Range Change</i> (Mudança na Faixa de Carga)
MFV	Módulo Fotovoltaico
MMC	Método de Monte Carlo
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> (Rastreador do Ponto de Máxima Potência)
MT	Média Tensão
ONS	Operador Nacional do Sistema
P	Potência Ativa
PDF	Função de Densidade de Probabilidade
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
RN	Resolução Normativa
RMNL	<i>Reduction in Maximum Net Load</i> (Redução na Carga Máxima da Rede)
SED	Sistema Elétrico de Distribuição

SEP	Sistema Elétrico de Potência
SFV	Sistema Fotovoltaico
SIF	Sistema de Inferência <i>Fuzzy</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
SMC	Simulação de Monte Carlo
STC	<i>Standard Test Conditions</i> (Condições Padrões de Teste)
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
1.1	CARACTERIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	17
1.2	OBJETIVOS.....	22
1.2.1	Objetivo Geral:	22
1.2.2	Objetivos Específicos:	22
1.3	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	23
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO	25
2.2	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	28
2.3	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	29
2.4	IMPACTOS DA GDFV NO SISTEMA ELÉTRICO	37
2.4.1	Métodos de predição da GDFV	42
2.5	<i>SOFTWARES</i> , FERRAMENTAS E MÉTODOS UTILIZADOS NO TRATAMENTO DA GDFV.....	48
2.5.1	Software OpenDSS	48
2.5.2	Lógica Fuzzy	50
2.5.3	Simulação de Monte Carlo	52
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	58
3	METODOLOGIA	59
3.1	MODELAGEM DA REDE DE MÉDIA TENSÃO– <i>SOFTWARE</i> OPENDSS.....	61
3.2	INSERÇÃO DA MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA – LÓGICA <i>FUZZY</i>	66
3.2.1	Modelagem das variáveis de entrada do SIF	67
3.2.2	Modelagem da base de regras do SIF	75
3.2.3	Modelagem da variável de saída do SIF	77
3.2.4	Saída do SIF - Defuzzificação	79
3.3	CURVAS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA – MÉTODO DE MONTE CARLO....	79
3.4	CRITÉRIOS E MÉTRICAS APLICADOS NA ANÁLISE DOS RESULTADOS	81
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	86

4	ESTUDO DE CASO E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	87
4.1	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA.....	87
4.2	SIMULAÇÕES E RESULTADOS PARA OS DIAS ÚTEIS	96
4.2.1	Estação da primavera	96
4.2.2	Estação do Verão	100
4.2.3	Estação do Outono	101
4.2.4	Estação do inverno	103
4.3	SIMULAÇÕES E RESULTADOS PARA OS FINAIS DE SEMANA	104
4.3.1	Estação da primavera	104
4.3.2	Estação do Verão	107
4.3.3	Estação do Outono	108
4.3.4	Estação do inverno	110
4.4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	112
4.4.1	Discussão dos Resultados para os Dias Úteis	112
4.4.2	Discussão dos Resultados para os Finais de Semana	115
4.4.3	Discussões Finais	117
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	119
5.1	CONCLUSÕES	119
5.2	TRABALHOS FUTUROS.....	122
5.3	TRABALHOS PUBLICADOS.....	123
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125
	APÊNDICE A – SISTEMA DE INFERÊNCIA FUZZY	135
	APÊNDICE B – ALGORITMO DO SISTEMA DE INFERÊNCIA FUZZY	143

1. INTRODUÇÃO

1.1 CARACTERIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Inserida na sociedade em meados do século XIX, a distribuição da energia elétrica que inicialmente era em corrente contínua, evoluiu para sistemas maiores baseados em corrente alternada. Dessa maneira, surgiram os primeiros sistemas elétricos de potência que atualmente se consolidaram sob a mesma estrutura primordial básica (ABB GROUP, 2012). Esses sistemas, de modo sucinto, em maioria correspondem a grandes blocos de geração centralizados, nos quais a energia gerada é transmitida por longas linhas de transmissão em alta tensão até os centros de carga. Nesses, a tensão é rebaixada para a média e a baixa tensão, e a energia elétrica chega aos consumidores pelos Sistemas Elétricos de Distribuição (SED). A topologia do sistema elétrico de potência se manteve a mesma no decorrer dos anos, embora gradativamente houvesse a inserção de novas tecnologias e a automação de muitos processos (KAGAN, OLIVEIRA e ROBBA, 2010).

Nos últimos anos os sistemas elétricos de potência (SEP) começaram a passar por transformações mais acentuadas. A conjuntura do sistema elétrico, que até então consistia em grandes gerações centralizadas, começa a dividir espaço com a entrada de pequenos sistemas de Geração Distribuída (GD). O fluxo de potência que era apenas em sentido unidirecional, da fonte para as cargas, passa a circular de modo bidirecional, das cargas para a fonte, e há diversificação da matriz energética (CGEE, 2012). O Brasil, por exemplo, possui uma matriz baseada em geração hidráulica e térmica, cuja atual expansão do sistema de geração vem agregando novas fontes de energia, de caráter limpo e renovável, tais como: a eólica, biomassa, biocombustíveis, fotovoltaica, entre outras (SANTOS, CANHA, *et al.*, 2015).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) expediu nos últimos anos diferentes resoluções relativas à descentralização do sistema elétrico, tornando proeminente o termo Gerenciamento pelo Lado da Demanda (GLD), o qual compreende iniciativas de regulamentação relacionadas à modalidade tarifária horária, bem como ao estabelecimento das condições de acesso da microgeração e minigeração distribuída ao SED e da criação do sistema de compensação de energia (SANTOS, 2014).

A ANEEL, em 17 de abril de 2012, publicou a resolução normativa nº 482, a qual tinha o propósito de reduzir as barreiras para a instalação da GD de pequeno porte. Essa resolução foi um dos primeiros passos para garantir que fontes renováveis de energia possam ser conectadas aos sistemas de distribuição, a partir do estabelecimento de faixas de potência

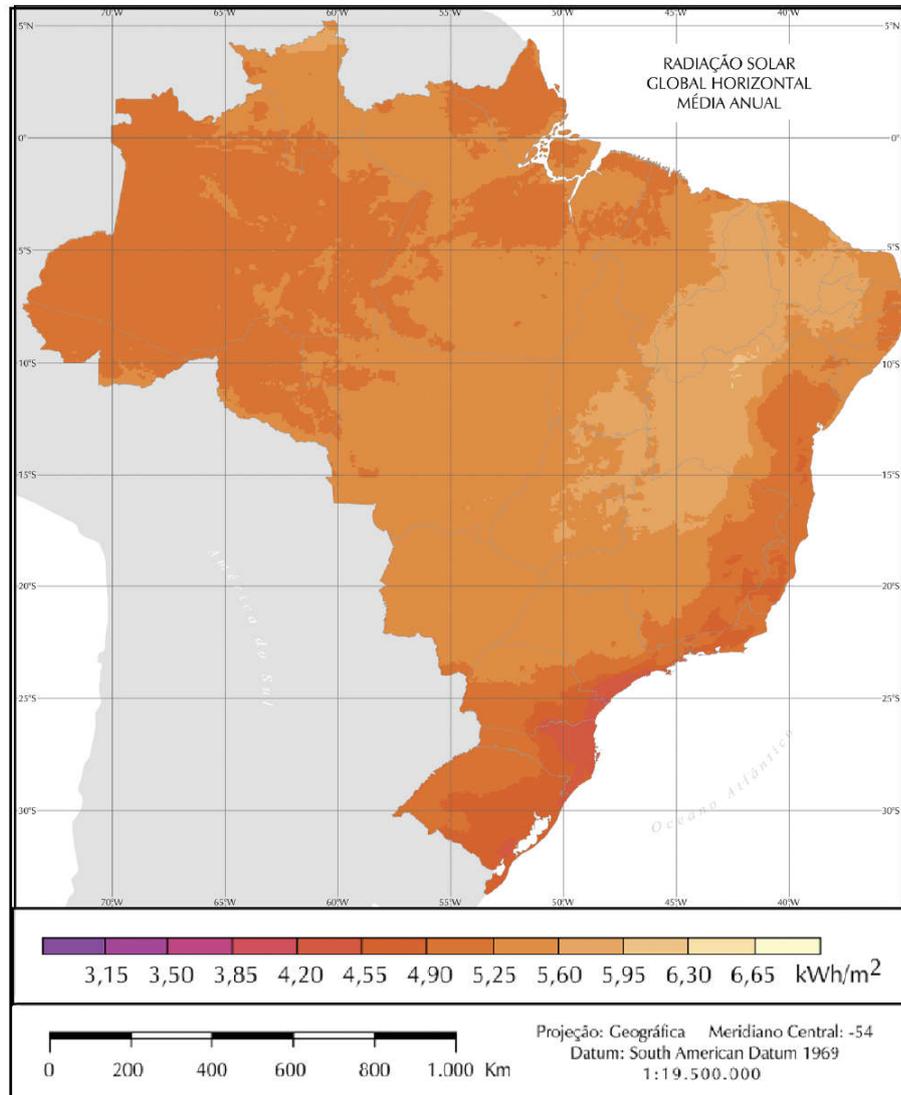
instalada correspondentes a cada modalidade, além de definir concomitantemente as regras sobre o sistema de compensação de energia (ANEEL, 2012). A base desta resolução não mudou, mas as classes de potência instalada e os prazos para a compensação dos créditos, gerados pela energia excedente injetada na rede, foram alterados pela resolução normativa nº 687/2015 (ANEEL, 2015).

Essas são algumas das primeiras iniciativas que vêm sendo tomadas para diversificar os sistemas elétricos. Tanto no Brasil quanto no exterior, políticas e incentivos estão sendo desenvolvidos para reduzir a participação de fontes poluentes na matriz energética, facilitar e viabilizar a integração da GD de pequeno e médio porte, além de promover uma automação inteligente das redes. Um dos países, a nível mundial, que atualmente é destaque e modelo na implantação destes novos conceitos é a Alemanha, a qual já possui boa parte de sua geração baseada em fontes fotovoltaicas (FERREIRA, KUNH, *et al.*, 2017).

Dentro dessa realidade o consumidor, que era visto apenas como uma carga passiva conectada à rede passa a ser classificado como um produtor e consumidor de energia simultaneamente, dando origem ao termo prosumidor ou *prosumer*, no inglês. Nesse contexto de descentralização do sistema elétrico, graças às resoluções emitidas, à flexibilização das regras para a entrada de GD e a consolidação da viabilidade econômica da implantação desses sistemas, a tendência é que uma parte da população se interesse em instalar sistemas de GD em suas residências (MACHADO, BORBA e MACIEL, 2016).

Outro fator estimulante à geração fotovoltaica (GFV) no Brasil é que o país conta com um grande potencial para aproveitamento da energia solar, permitindo que sistemas de aquecimento ou sistemas de GFV sejam instalados em telhados, para aproveitar essa fonte. Devido às tecnologias desenvolvidas, mesmo com os tímidos incentivos dados aos sistemas de geração alternativa, verifica-se que gradualmente vem aumentando a adesão da população à instalação de sistemas fotovoltaicos (SFVs) (SILVA, 2015). Esta exploração energética, no caso do Brasil, é alavancada pela presença de bons níveis de radiação solar durante o ano todo, conforme pode ser verificado na Figura 1. Nessa figura é apresentado o mapa solarimétrico brasileiro, o qual foi elaborado com base em dados de radiação solar coletados durante uma década de medições, entre os anos de 1995 e 2005 (PEREIRA, MARTINS, *et al.*, 2006).

Figura 1 – Radiação solar média anual no Brasil.

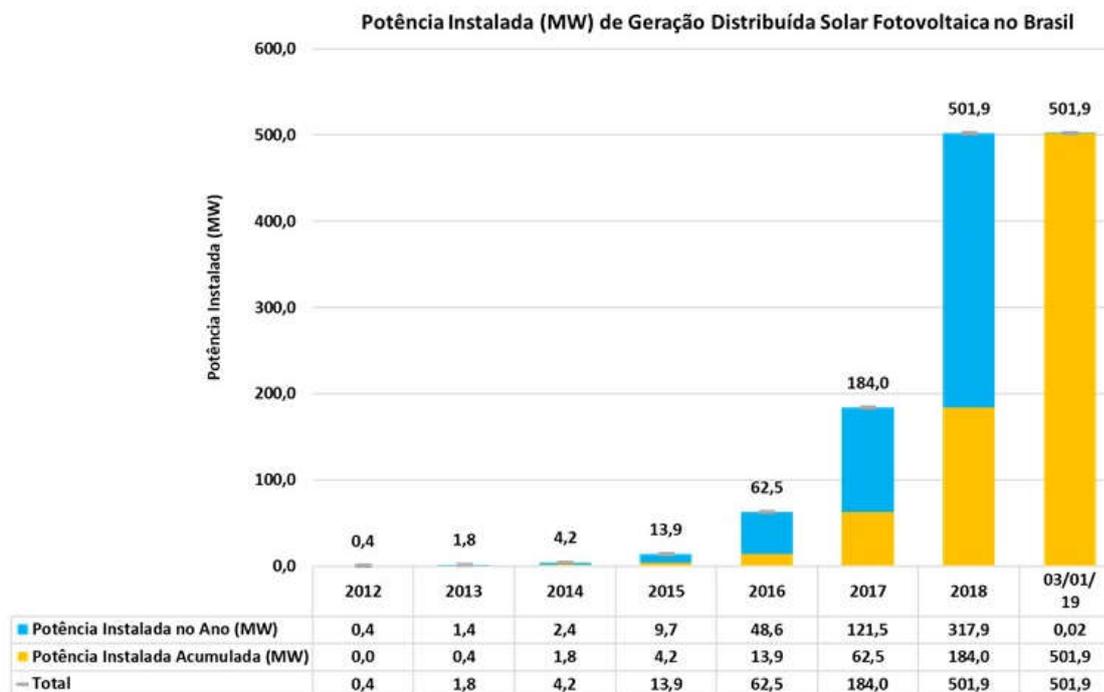


Fonte: Adaptado de: (PEREIRA, MARTINS, *et al.*, 2006).

A taxa de irradiação solar que chega à superfície terrestre depende de fatores, como a taxa de nebulosidade, a posição da Terra em relação ao Sol, o ângulo de incidência dos raios solares à superfície em questão, das coordenadas geográficas do ponto em observação, demais condições climatológicas, entre outros (CEPEL e CRESESB, 2014). A Figura 1 mostra que o território brasileiro apresenta excelentes taxas médias de irradiação solar anuais, na maioria dos estados a taxa de irradiação solar média é superior a 5 kWh/m².

De acordo com a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), no início de 2019, o Brasil atingiu a marca histórica de 500 megawatts (MW) de potência instalada em sistemas de microgeração e minigeração distribuída fotovoltaica em residências, comércios, indústrias, produtores rurais e prédios públicos, como dado na Figura 2.

Figura 2 – Potência instalada em SFVs na micro e minigeração distribuída.

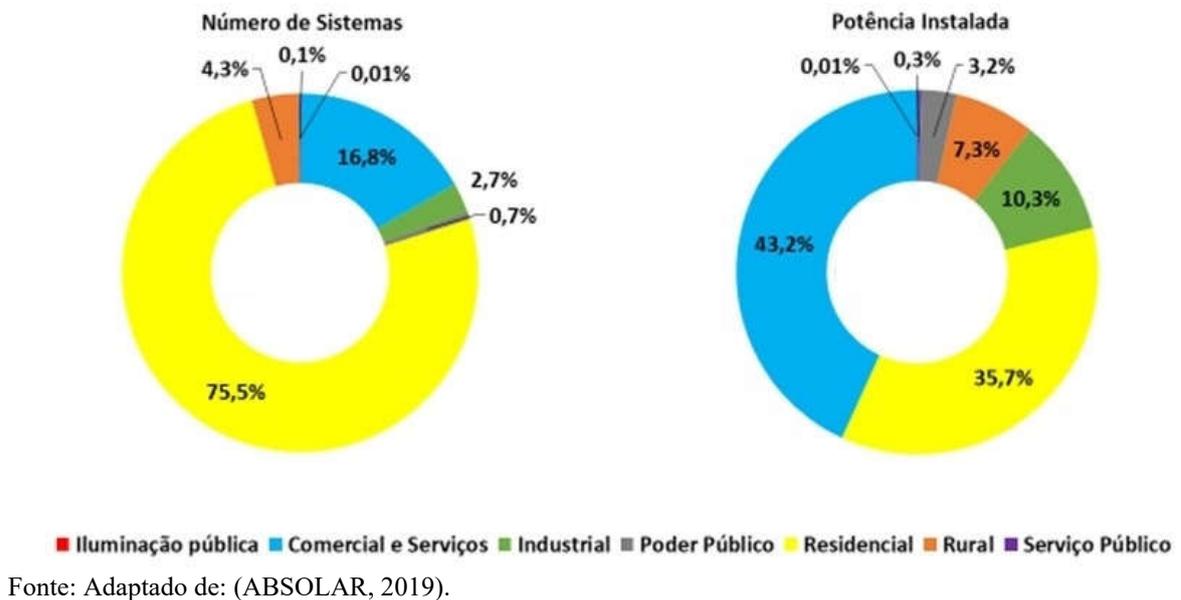


Fonte: (ABSOLAR, 2019).

Para acompanhar a evolução da microgeração e minigeração distribuídas fotovoltaica nos estados brasileiros, a ABSOLAR desenvolveu um Ranking Nacional Solar Fotovoltaico, que compara as potências instaladas em cada unidade da federação. Atualmente, o Estado de Minas Gerais é o único a ultrapassar a marca de 100 MW e lidera o ranking nacional, com 21,80% da potência instalada no país, seguido pelo Rio Grande do Sul (15,7%), São Paulo (12,2%), Paraná (6,1%) e Santa Catarina (5,4%) (ABSOLAR, 2019).

Em quantidade de SFVs instalados, Figura 3, os consumidores residenciais lideram a lista, representando 75,5% do total. Em seguida, aparecem as empresas dos setores de comércio e serviços (16,8%), consumidores rurais (4,3%), indústrias (2,7%), poder público (0,7%) e outros tipos, como serviços públicos (0,1%) e iluminação pública (0,01%). Enquanto que, em termos de potência instalada, os consumidores dos setores comerciais e de serviços lideram no uso da energia fotovoltaica, com 43,2% da potência instalada no país, seguidos por consumidores residenciais (35,7%), indústrias (10,3%), consumidores rurais (7,3%), poder público (3,2%) e outros tipos, como serviços públicos (0,3%) e iluminação pública (0,01%) (ABSOLAR, 2019).

Figura 3 – Estratificação da presença da GDFV por classe de consumo: (a) número de consumidores e (b) potência instalada.



Conforme avalia Sauaia (2017), as boas taxas de insolação no Brasil e a popularização das tecnologias empregadas nos SFVs, devem propiciar o crescimento da adoção dessa fonte de geração no cenário nacional. De acordo com estudo realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), baseado nos níveis de irradiação solar no país, na área disponível de telhados para instalação de SFVs e na eficiência da conversão do recurso solar em eletricidade, verificou-se que o potencial fotovoltaico brasileiro, para residências, é de 230%. Isto é, a geração que pode ser extraída dos SFVs é maior que dobro do consumo residencial atual (ROSA e GASPARIN, 2016).

A entrada da GD pode acarretar mudanças ao SED, tais como: variações dos níveis de tensão, reversão no fluxo de potência, afetar na vida útil dos componentes da rede, alterar os níveis de energia consumida e perdas no alimentador (ABDELSAMAD, MORSI e SIDHU, 2015; HASHEMINAMIN, AGELIDIS, *et al.*, 2015; PETINRIN e SHAABANB, 2016). Dessa maneira, os planejamentos de expansão, ampliação e melhorias na rede precisarão ser repensados, pois os métodos tradicionais que não consideram essa realidade ficarão obsoletos (ANDRADE, TORQUATO e FREITAS, 2015). Assim, a proposta deste trabalho é focada no estudo da entrada da geração distribuída fotovoltaica (GDFV), com enfoque na distribuição, pois é nesse segmento que os SFVs vêm ganhando maior participação, onde existe maior

probabilidade de serem instalados e que não se tem controle sobre as taxas de entrada, nem a previsão exata do tamanho e local de instalação dos SFVs.

Com base nisso, o presente trabalho tem por objetivo avaliar o comportamento dos perfis de carga e tensão no alimentador, transformadores, totais de energia e perdas e a aplicação de métricas às curvas de carga. A modelagem completa da rede atual (rede sem integração da GDFV), cargas, unidades de GFV e simulações será conduzida no *software* OpenDSS. No modelo da rede, considerar-se-á a inserção da GDFV, cuja estimativa percentual da participação será realizada através de um sistema de inferência *Fuzzy*, baseado em variáveis sócio-técnicas, políticas e econômicas, que podem indicar cenários mais propícios ou desfavoráveis à instalação de SFVs.

Os perfis de GFV serão estimados com base em curvas típicas de geração, estratificadas sazonalmente. Tais curvas serão obtidas a partir de um conjunto de medições realizadas em um SFV, construído para testes, localizado na região de estudo. Esse sistema possui 1 kWp de potência instalada e o histórico de geração é datado dos anos de 2016 a 2017. A partir desse banco de dados, serão estimados perfis típicos de GFV por meio da aplicação do Método de Monte Carlo (MMC).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral:

- Avaliar o impacto da inserção da microgeração fotovoltaica na rede de distribuição de energia elétrica.

1.2.2 Objetivos Específicos:

- Modelar, no *software* OpenDSS, a rede e as curvas de carga de um alimentador, em uma cidade piloto, com base no banco de dados do SED e em curvas de carga típicas;
- Modelar diferentes cenários de penetração de GDFV com base em variáveis sócio-técnicas, políticas e econômicas, através do sistema de inferência *Fuzzy*, que relaciona o comportamento das variáveis de entrada com um percentual de penetração dos SFVs;
- Estimar curvas típicas de GFV, por estação anual, com base em medições reais da GFV, em uma região piloto, através do MMC;

- Analisar a influência dos diferentes níveis de inserção de GDFV nas curvas de carga do alimentador, bem como o conseqüente impacto no perfil de tensão da rede;
- Verificar como a entrada da GDFV altera os patamares de energia e perdas diárias no alimentador. Além de aplicar métricas, difundidas na literatura, para analisar como a GFV altera o formato da curva de carga diária.

1.3 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

As principais contribuições desse trabalho são:

- Desenvolvimento de uma metodologia, baseada na lógica *fuzzy*, para estimar a probabilidade de penetração da GDFV na distribuição, para a classe B1;
- Estimação de curvas típicas de GFV, por estação anual;
- Simulação e análise dos impactos causados em um alimentador, tipicamente residencial, quando há diferentes níveis de integração da GDFV;
- Análise do aumento da rampa de carga, ao final do dia, com a integração da GDFV.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para alcançar os objetivos propostos, o presente trabalho está dividido em 5 capítulos, incluindo este introdutório.

O capítulo 2 apresenta a composição da matriz energética nacional no que tange as diferentes fontes participantes, e é feita uma apreciação do potencial brasileiro para a GDFV. O capítulo apresenta uma revisão na literatura atual em termos de GD, com ênfase na GFV. Aborda-se a resolução normativa nº 687/2015, a qual está em vigência e estabelece regras relacionadas ao acesso da GD aos sistemas elétricos e o funcionamento do sistema de compensação. Discutem-se os principais aspectos, as incertezas relacionadas e os novos cenários surgidos no setor elétrico devido à presença da GDFV, além de apresentar artigos que empregam metodologias e/ou técnicas correlatas a esse trabalho.

O capítulo 3 apresenta a metodologia proposta para o desenvolvimento desse trabalho e apresenta também uma explanação geral sobre as ferramentas utilizadas para o seu desenvolvimento. Assim, é feita uma abordagem sobre o *software* OpenDSS, o qual é utilizado na modelagem e simulações da rede modelada. Também é abordada a lógica *Fuzzy*,

a qual possibilita estimar cenários de integração da GDFV, a partir de fatores externos, como o preço dos SFVs e tempo de retorno do investimento. Também é discutido o MMC, utilizado para a modelagem de curvas típicas diárias de GFV. Por fim são apresentadas métricas que possibilitam avaliar como a GDFV influencia no comportamento das curvas de carga diárias.

No capítulo 4 é apresentada a modelagem da rede piloto utilizada no OpenDSS, bem como as simulações de cenários considerando diferentes perfis de geração de energia fotovoltaica em conjunto com distintos percentuais de inserção da GDFV. No capítulo são realizadas as avaliações pertinentes aos resultados obtidos, considerando diferentes níveis de penetração de SFVs em todas as estações anuais, nos dias úteis e finais de semana. Portanto, é realizada a avaliação das curvas de carga no alimentador, análises de pontos críticos, possíveis problemas surgidos na rede, mudanças no fluxo de potência, comportamento de tensão ao longo do alimentador, medição da energia e das perdas diárias.

No capítulo 5 são apresentadas as considerações finais sobre o trabalho desenvolvido, algumas sugestões de trabalhos futuros e uma lista dos artigos relacionados ao tema, publicados no decorrer do curso de mestrado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

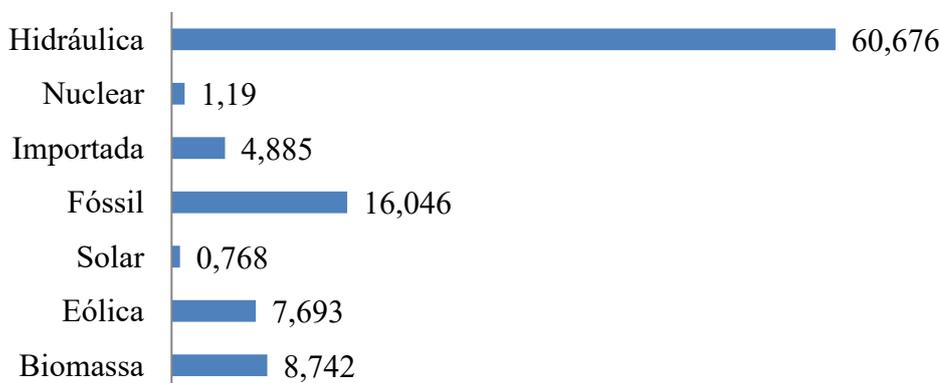
Este capítulo tem como objetivo apresentar uma síntese da pesquisa realizada sobre o atual setor elétrico brasileiro, a matriz energética e a normatização brasileira vigente no que diz respeito à microgeração e à minigeração distribuída. Também é apresentada uma revisão acerca da GD em geral, com ênfase na energia fotovoltaica, de maneira a abordar os potenciais, as barreiras, o desenvolvimento tecnológico e os desafios a serem superados para consolidação dessa fonte no setor elétrico.

Além disso, essa revisão também discute os estudos que vêm sendo desenvolvidos mundialmente sobre a GFV, no âmbito dos impactos de inserção desses sistemas na distribuição de energia elétrica; técnicas para a previsão da geração, abrangendo métodos de modelagem, previsão e avaliação do montante de energia gerada. Ao final do capítulo são apresentadas as últimas considerações acerca do que foi pesquisado.

2.1 SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

Toda a estrutura física do setor elétrico, bem como as entidades, agência regulamentadora e demais órgãos vinculados ao Ministério de Minas e Energia (MME), operam em prol do desenvolvimento energético do país, assegurando o fornecimento de eletricidade aos consumidores. O Brasil ainda tem maior parte de sua geração de energia elétrica dependente apenas de duas fontes: hidráulica e térmica; sendo que a primeira tem 60,67% de participação, com grande parte proveniente de grandes usinas hidrelétricas, e a segunda 16,05%, preponderantemente baseada na queima de combustíveis fósseis (ANEEL, 2018). Na Figura 4 é apresentado o percentual de participação de cada fonte na geração de energia elétrica.

Figura 4 – Participação percentual das fontes na matriz energética brasileira.



Fonte: (ANEEL, 2018).

A geração proveniente de fontes hídricas, embora seja limpa e renovável, apresenta alguns impactos ambientais e sociais grandes, como o alagamento de grandes áreas e a remoção de famílias das áreas de construção da barragem. Além dos impactos causados durante a construção das hidrelétricas, tem-se também que geralmente estes empreendimentos são distantes dos centros de carga e assim demandam longas linhas de transmissão para o transporte da energia (EPE, 2016). Outro fator motivador da diversificação da matriz energética é a segurança e autonomia energética da nação (CGEE, 2012).

Um país com poucas fontes de energia fica mais suscetível a ataques externo-terroristas em detrimento a países com diversas fontes. Outro agente motivador desse processo é no que tange à mitigação dos riscos ao meio ambiente e seres vivos pela substituição da geração nuclear por fontes renováveis (CGEE, 2012). Ainda existe a necessidade de expandir o SEP para atender à crescente demanda energética. No Quadro 1 é mostrado um levantamento, para os últimos quatro anos, da quantidade de unidades consumidoras conectadas no sistema elétrico.

Quadro 1 – Quantidade de unidades consumidoras, por classe de consumo, no país.

	2014	2015	2016	2017	$\Delta\%$ (2017/2016)	Part. % (2017)
Brasil	77.171	79.107	80.624	82.464	2,3	100,0
Residencial	66.007	67.746	69.277	70.907	2,4	86,0
Industrial	574	549	536	528	-1,4	0,6
Comercial	5.566	5.689	5.689	5.754	1,1	7,0
Rural	4.279	4.366	4.365	4.499	3,1	5,5
Poder público	561	568	560	573	2,5	0,7
Iluminação	88	93	96	99	3,2	0,1

	2014	2015	2016	2017	$\Delta\%$ (2017/2016)	Part. % (2017)
pública						
Serviço público	84	87	91	95	4,5	0,1
Consumo Próprio	14	10	9	9	2,4	0,0

Fonte: (EPE, 2018).

A classe residencial é a que possui o maior número de unidades consumidoras, o que pode ser um fator de estímulo a maior inserção da GDFV nessa classe, nos centros de consumo. Por enquanto, a residencial também é a classe que apresenta o maior número de SFV já instalados (75,5% do total, que está próximo a 50 mil unidades) (ABSOLAR, 2019). O Quadro 2 apresenta um comparativo entre os percentuais de consumo de energia por classe de consumo nos anos de 2014 a 2017 (EPE, 2018).

Quadro 2 – Consumo percentual de eletricidade, por classe, no ano 2014 a 2017.

	2014	2015	2016	2017	$\Delta\%$ (2017/2016)	Part. % (2017)
Brasil	474.823	465.708	461.780	467.161	1,2	100
Residencial	132.302	131.190	132.872	134.368	1,1	28,8
Industrial	179.106	169.289	165.314	167.398	1,3	35,8
Comercial	89.840	90.768	87.873	88.292	0,5	18,9
Rural	25.671	25.899	27.266	28.136	3,2	6,0
Poder público	15.355	15.196	15.096	15.052	-0,3	3,2
Iluminação pública	14.043	15.333	15.035	15.443	2,7	3,3
Serviço público	15.242	14.730	14.969	15.196	1,5	3,3
Próprio	3.265	3.304	3.355	3.277	-2,3	0,7

Fonte: (EPE, 2018).

No Quadro 2 é possível observar que, com as melhorias ocorridas na qualidade de vida e na distribuição da renda, a população passou a solicitar serviços e segmentos comerciais mais sofisticados. Desta forma, os setores comerciais e residenciais tiveram incremento em participação no consumo total de energia elétrica de 2014 para 2017. No mesmo período, houve retração no setor industrial, diminuindo assim sua participação no consumo total de energia elétrica. A classe residencial é a que apresenta o maior potencial para a inserção de unidades de GDFV. Além de apresentar majoritariedade na quantidade de consumidores, também vem passando por gradual crescimento na evolução de carga.

2.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A GD é uma forma de aproveitamento de pequenos potenciais elétricos, que pode ser entendida como a geração descentralizada de energia elétrica a partir de fontes diversas, tais como: vento, biomassa, luz solar e o biodiesel. Atualmente, essa forma de geração de eletricidade vem ganhando espaço considerável em diversos países, uma vez que ela apresenta muitos benefícios à população e ao meio ambiente (GARNI e AWASTHI, 2017).

Ao descentralizar a geração de energia, a GD pode postergar ou tornar desnecessária a construção de grandes e onerosos empreendimentos de expansão. Alguns países, como a Alemanha, são referência nesse novo conceito, pois vêm substituindo sua matriz energética que, até então, era baseada em combustíveis fósseis por fontes limpas descentralizadas. Ganhando destaque a GFV, como uma das fontes mais exploradas e com fortes incentivos governamentais para a sua implantação (CAMPOS, NETO, *et al.*, 2016).

Dentro deste novo conceito, o consumidor que possui fontes de GD em sua propriedade, pode diminuir suas despesas com energia elétrica e/ou até ceder a energia remanescente para a concessionária local (ANEEL, 2012). Na GD são utilizados alguns conceitos, tais como: fontes alternativas de energia, fontes renováveis de energia e cogeração. Assim, fontes alternativas correspondem a fontes não utilizadas comumente para a geração de energia elétrica, como células combustíveis, GFV e eólica, biomassa, entre outros. Já fontes renováveis são as que não utilizam a queima de combustíveis fósseis para produção de eletricidade. Enquanto que a cogeração corresponde a produção simultânea de trabalho mecânico (utilizado para geração elétrica) e de calor (utilizado para aquecimento) a partir de uma única fonte primária (SANTOS, 2014).

Considerada uma importante ferramenta para a consolidação da GD no Brasil, a RN nº 687 entrou em vigor em 1º de março de 2016 com o objetivo de alterar a RN nº 482 de 2012, a qual versava sobre a geração distribuída em mini e microgeração, além de mudar aspectos dos Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST). Nas mudanças apresentadas, foi criada uma nova classificação por faixa de potência das unidades consumidoras com GD, assim, classifica-se como microgeração unidades geradoras com potência instalada de até 75 kW; compreendem a minigeração aquelas unidades consumidoras com potência instalada maior que 75 kW e menor ou igual que 3 MW para geração hídrica, e menor ou igual que 5 MW para as demais formas de geração (ANEEL, 2015).

Além disso, foi definido que os custos referentes às melhorias na rede devido à inserção da GD só devem ser rateados entre a concessionária e o cliente quando houver instalação de minigeração (ANEEL, 2016). Os custos de melhorias na rede devido à implantação da microgeração são de responsabilidade da distribuidora e os excedentes de energia (diferença entre a geração e o consumo) são cedidos em forma de empréstimo gratuito à concessionária, a qual compensa em forma de créditos de energia que devem ser consumidos em até 60 meses pela mesma propriedade ou por outras unidades consumidoras pertencentes ao mesmo proprietário. Os créditos expirados serão revertidos em prol da modicidade tarifária, sem que o consumidor faça jus a qualquer forma de compensação após esse prazo. Esse sistema de compensação não se aplica a consumidores livres ou especiais (ANEEL, 2015).

De acordo com a potência que será instalada na unidade de GD, existe uma série de requisitos mínimos que devem ser atendidos e equipamentos necessários, como, por exemplo: elementos de desconexão e de interrupção; transformador de acoplamento; proteções de sub e sobretensão, sub e sobrefrequência, contra desequilíbrio de corrente, contra desbalanço de tensão, sobrecorrente direcional com restrição de tensão; relé de sincronismo; anti-ilhamento e medição (ANEEL, 2015).

2.3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

O aproveitamento da radiação solar como fonte de energia é bastante antigo e por muito tempo a fonte tem sido utilizada no aquecimento de água. Apenas em 1839 que foi observado o efeito fotovoltaico pela primeira vez. A descoberta é atribuída ao físico francês, Edmond Becquerel, que verificou que placas metálicas de platina ou prata, mergulhadas em eletrólito, produziam uma pequena diferença de potencial quando expostas à luz (VALLÊRA e BRITO, 2006).

Desde os primeiros experimentos, evolução da tecnologia para o uso de junções com semicondutores, até chegar aos modelos de células fotovoltaicas comercializadas atualmente; houve grande evolução na tecnologia, no que tange aos processos de fabricação, materiais empregados e no rendimento da conversão da radiação solar em eletricidade. O aprimoramento nas tecnologias aplicadas na construção dos painéis fotovoltaicos permitiu que estes se tornassem economicamente viáveis e começassem a ganhar representatividade no mercado da geração de eletricidade (CEPEL e CRESESB, 2014).

Os principais tipos de SFVs existentes são: os sistemas isolados (*off-grid*), os sistemas híbridos e os sistemas interligados à rede (*on-grid*). Os sistemas isolados correspondem àqueles instalados para alimentação de cargas isoladas ou em regiões em que ainda é difícil o acesso à eletricidade, como regiões despovoadas, desertas ou interiores do país. Os sistemas híbridos são geralmente do tipo fotovoltaico-diesel, e possuem características semelhantes aos sistemas isolados. Contudo, estes apresentam a vantagem de ter o diesel como fonte substituta em períodos de baixa ou nenhuma GFV. Também há sistemas híbridos do tipo eólico-fotovoltaico, hídrico-fotovoltaico, dentre outros (SANTOS, 2014).

Já os sistemas conectados à rede ou *on-grid* correspondem aos SFVs que estão sincronizados com a rede elétrica da concessionária de energia local. Esta modalidade de geração passou a ser possível no Brasil a partir de 2012, com a publicação da RN nº 482; e apresenta como vantagem um melhor aproveitamento da energia fotovoltaica gerada, uma vez que a parcela não consumida na propriedade é injetada na rede de distribuição. Assim, as perdas nesses sistemas ficam limitadas às perdas nos inversores e no cabeamento, pois toda a energia gerada é aproveitada.

Conforme o tipo e a aplicação dada ao sistema fotovoltaico instalado, são determinados os elementos necessários para sua implementação. Por exemplo, existem SFVs utilizados para alimentar cargas em corrente contínua, para alimentar cargas em corrente alternada e sistemas com e/ou sem armazenamento de energia. Dependendo da aplicação, alguns elementos podem ser ou não desprezados. No caso de sistemas isolados, para alimentar cargas em corrente contínua, os inversores e a medição bidirecional são desnecessários. Em sistemas conectados à rede, o armazenamento em baterias e consequentemente os controladores de carga, podem ser dispensados, uma vez que o excedente de energia é inserido na rede elétrica local.

De maneira geral, um SFV é composto por um conjunto gerador, um bloco condicionador da potência e, opcionalmente, um bloco armazenador. Os elementos, necessários para a instalação de um SFV, são dependentes da configuração do sistema e das demais aplicabilidades que se deseja ter. Neste trabalho, os SFVs considerados serão do tipo *on-grid*, conectados à rede elétrica. Portanto, os principais componentes de um SFV genérico são: os módulos fotovoltaicos, os condutores, os inversor(es) e os dispositivos de proteção, seccionamento e medição (CEPEL e CRESESB, 2014).

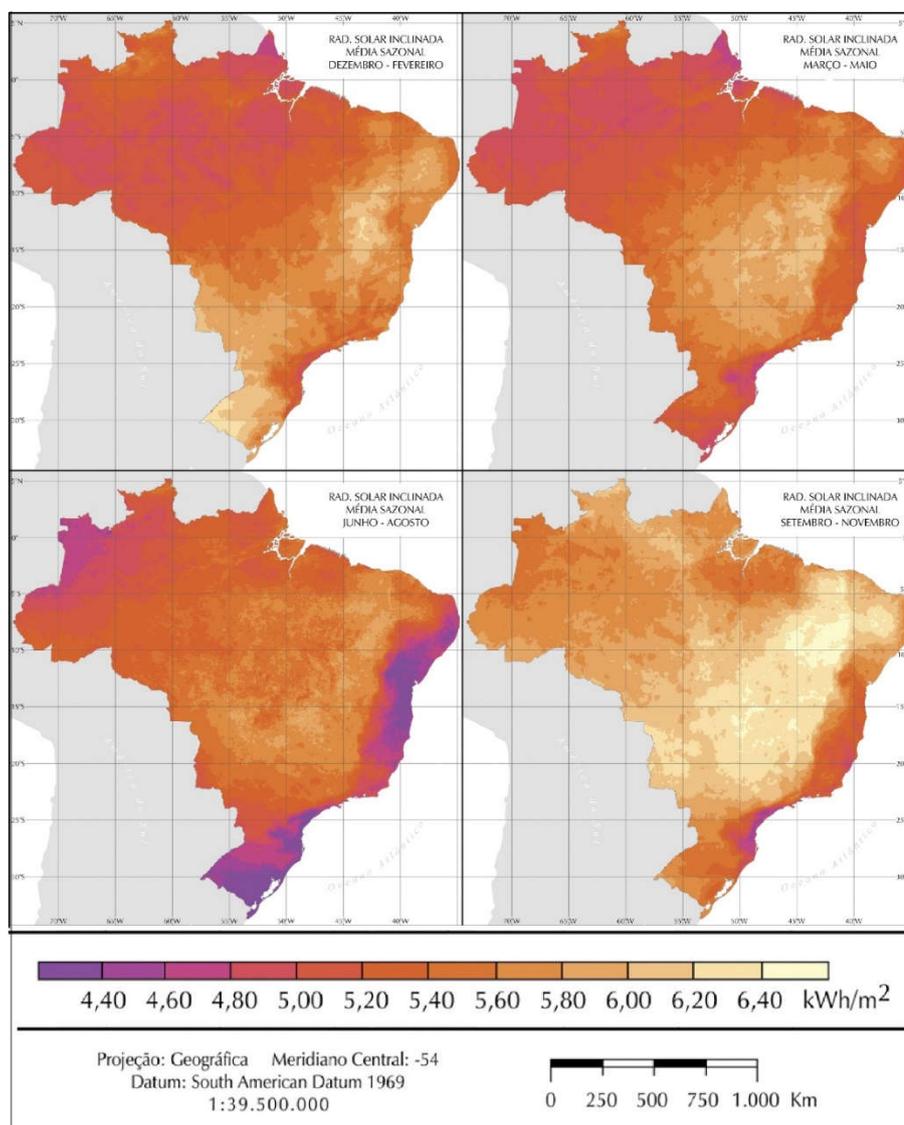
Uma das fontes mais difundidas e que tem ganhado mercado de eletricidade é a fotovoltaica, devido às facilidades e vantagens que apresenta (SAMPAIO e GONZÁLEZ,

2017; KONGEN, 2014). Conforme discutem Sampaio e González (2017, p. 591), além das aplicações sincronizadas à rede elétrica (*on-grid*) os SFVs também são utilizados em satélites, sistemas de bombeamento de água, naves espaciais, estações de monitoração meteorológicas, radares eletrônicos, dessalinização de água e telecomunicações.

Características como a geração de energia no local da carga, o desenvolvimento de novas tecnologias de células fotovoltaicas, o tempo de vida útil dos painéis, as boas taxas anuais de irradiação solar no Brasil e a contínua redução no custo geral dos SFVs são alguns dos fatores que contribuem para uma crescente presença nacional da GDFV (SAUAIA, 2017; FERREIRA, KUNH, *et al.*, 2017).

As taxas médias de irradiação anual no Brasil são bastante elevadas, graças à localização tropical do país. A partir de séries de medições da radiação é possível confeccionar gráficos (mapas solarimétricos) que representam a taxa de irradiação solar média no Brasil, de acordo com cada estação do ano. Para elucidar as variações anuais da irradiação, na Figura 5, são mostradas as taxas de irradiação médias sazonais, dadas em kWh/m² (PEREIRA, MARTINS, *et al.*, 2006).

Figura 5 – Radiação solar média no Brasil durante cada estação do ano.



Fonte: Adaptado de: (PEREIRA, MARTINS, *et al.*, 2006).

De modo geral, observa-se que todo o território nacional apresenta condições favoráveis à instalação de SFVs, sendo que a região nordeste é a que se destaca, apresentando as melhores condições gerais e taxas médias de irradiação solar superiores a 5,5 kWh/m². Conforme Figura 5, os maiores valores de radiação solar são observados na região da divisa entre o estado da Bahia e do Piauí, com taxas de irradiação da ordem dos 6,5 kWh/m². Enquanto que as menores taxas foram verificadas em localidades no estado de Santa Catarina, com irradiações médias de 4,25 kWh/m².

Os valores globais de irradiação solar incidentes em qualquer região do território brasileiro são superiores aos verificados em muitos países da união europeia (PEREIRA, MARTINS, *et al.*, 2006). Na Europa e nos EUA, desde 1980, têm-se investido em P&D para

a produção, na manufatura e na geração de empregos, aliados ao desenvolvimento da GFV (CAMILO, UDAETA, *et al.*, 2017). Na Alemanha, há um forte interesse em substituir fontes termelétricas (nucleares), por fontes renováveis (FERREIRA, KUNH, *et al.*, 2017).

De modo que o governo realiza esforços para a criação de trabalho, como a formação de projetistas, instaladores, vendedores, indústrias de SFVs e a criação de políticas de incentivos (CAMPOS, NETO, *et al.*, 2016). Essas nações conseguiram pioneiramente se destacar por meio de investimentos governamentais em pesquisa, desenvolvimento do mercado de produção, comercialização e implantação dos SFVs. E também, pela criação e adoção de políticas que visam o incentivo e encorajamento da população na adoção de geração renovável.

Há também a criação de financiamentos governamentais para a implantação de usinas de matriz limpa, com estabelecimento regras de redução gradual do preço pago pela energia ao longo do tempo, como maneira para auxiliar na amortização do investimento inicial (CAMILO, UDAETA, *et al.*, 2017). A adoção de práticas para consolidar e ajudar na disseminação das fontes renováveis é essencial para que estas ganhem cada vez mais participação no setor energético. Cada país vem adotando políticas que facilitam a disseminação dos SFVs. Conforme pontua Emrah Karakaya (2015), os desafios que a GFV precisa vencer para adentrar efetivamente no mercado de eletricidade são: barreiras técnico-sociais, barreira de gerenciamento, barreiras econômicas e barreiras políticas.

A tarifa de incentivo (*Feed-in*) é um dos incentivos mais relevantes à GD, pois este método visa, basicamente, promover o uso de fontes renováveis de energia por meio de contratos de geração de energia elétrica com base no custo de operação. Assim, paga-se um valor maior por kWh gerado de fontes renováveis, tendo em vista que é uma fonte mais cara que a energia nuclear ou hidrelétrica. Esse incentivo foi implantado pelos governos em vários países, e não pelos órgãos reguladores, pois se trata de política pública voltada para a diversificação da matriz energética, com o uso de fontes renováveis. Tais tarifas normalmente são garantidas por um período determinado, 10 a 20 anos, que seria o tempo necessário para permitir o desenvolvimento das fontes alternativas, com conseqüente redução de custos (ANEEL, 2010).

Já o sistema de compensação (*Net Metering*) consiste na medição do fluxo de energia em uma unidade consumidora dotada de pequena geração, por meio de medidores bi-direcionais. Dessa forma, registra-se o valor líquido da energia no ponto de conexão, ou seja, se a geração for maior que a carga, o consumidor recebe um crédito em energia ou em

dinheiro na próxima fatura. Caso contrário, o consumidor pagará apenas a diferença entre a energia consumida e a gerada (ANEEL, 2010). Esses créditos de energia, no caso do Brasil, são válidos por 60 meses (ANEEL, 2015).

No Brasil, o valor a ser compensado pelo microgerador inclui taxas federais e estaduais, tal como: PIS, COFINS e ICMS (CAMILO, UDAETA, *et al.*, 2017). Durante os últimos anos, o Brasil desenvolveu alguns programas, embora modestos, para alavancar a geração de energia elétrica a partir da conversão fotovoltaica (ROSA e GASPARIN, 2016).

Conforme concluem Camilo, Udeata, *et al.*, (2017), não basta apenas a preocupação acerca da distribuição de energia e da viabilidade do projeto para a consolidação da GD. É preciso também ser dada atenção sobre como os formuladores de políticas poderiam incentivar a produção local dos componentes de um SFV (células, módulos, inversores, entre outros). Com eles poder-se-ia quebrar a dependência da importação de materiais/tecnologias e trazer para dentro de próprio mercado todo o ciclo de produção, pesquisa e experiência pessoal.

Mesmo com os crescentes avanços tecnológicos e havendo a presença de incentivos é interessante avaliar os demais fatores que determinam se uma tecnologia fotovoltaica é competitiva ou não no mercado de eletricidade. Sampaio e González (2017), desenvolveram um modelo conceitual que consiste em 4 fatores, como mostra a Figura 6. A partir deste modelo, pode-se dizer que o sucesso de cada tecnologia depende do atendimento simultâneo dos fatores: eficiência, custo, vida útil e sustentabilidade. Se um tipo de célula só atende dois fatores, como por exemplo, custos competitivos e uma eficiência razoável, essa célula adentrará apenas em mercados de nicho muito específicos, a menos que os outros parâmetros também estejam otimizados.

Figura 6 – Modelo conceitual dos aspectos que influenciam a posição competitiva da energia fotovoltaica no mercado de energia.



Fonte: Adaptado de: (SAMPAIO e GONZÁLEZ, 2017).

Obtendo um equilíbrio entre os 4 fatores os SFVs se tornam mercadologicamente viáveis. Usinas fotovoltaicas, de geração em larga escala, ainda não são financeiramente competitivas com as demais fontes de geração limpa. Por exemplo, outras fontes de geração alternativa, como parques eólicos e a geração por meio da biomassa são mais atrativas economicamente e têm maior participação na matriz energética brasileira. Conforme evidenciado por ANEEL (2018), o Brasil possui apenas 85 empreendimentos de GFV centralizada atualmente em operação, uma vez que necessita de leilões de energia específicos para alavancar sua disseminação (FERREIRA, KUNH, *et al.*, 2017).

No Brasil, o desenvolvimento das fontes alternativas é mais recente, pois o país conta com condições favoráveis para geração de eletricidade, como a grande presença de rios com bom potencial para a geração hidráulica. No entanto, no decorrer dos anos, vem-se entendendo que por razões de sustentabilidade, preservação ambiental, aumento na demanda por eletricidade, é necessário investir mais em fontes energéticas limpas (ROSA e GASPARIN, 2016).

Algumas políticas e práticas foram e vêm sendo desenvolvidas para estimular a entrada de SFVs no território nacional. Conforme Silva (2015) e Rosa e Gasparin (2016) resumem, criaram-se programas como: a Venda direta a consumidores, Descontos nas Tarifas

TUST e TUSD, Programa de apoio ao desenvolvimento tecnológico da indústria de semicondutores, Redução no imposto de renda, Condições diferenciados de financiamentos pela Caixa Econômica Federal e pelo BNDES, Fundo clima, Inova energia, Programas de fomento a projetos de P&D, criação do Sistema de compensação de Energia (SILVA, 2015; BNDES, 2018).

A nação, que ainda figura no cenário internacional como economia emergente, não dispõe integralmente de tecnologias e demais recursos para se desenvolver e alavancar a indústria, para a produção dos equipamentos que compõem os SFVs. Embora o Brasil disponha de condições climáticas fortemente atrativas para a exploração fotovoltaica, os SFVs ainda demandam de um olhar mais atento do governo e da adoção de medidas econômicas e políticas que facilitem o acesso e à difusão da GDFV (ROSA e GASPARIN, 2016). Conforme aponta a literatura técnica sobre esse assunto, é preciso superar as barreiras para efetivar a participação da GFV no setor elétrico (PAINULY, 2001).

Mesmo com as dificuldades existentes, observa-se que a GFV vem ganhando força e participação no mercado na forma de GD em residências, indústrias e comércios. É importante ressaltar que a inserção de SFVs continua expandindo fortemente, de certa forma, impulsionada pelos aumentos nas contas de energia elétrica, que no ano de 2018, o reajuste alcançou a taxa de 30%, em algumas concessionárias (ASSESSORIA DE IMPRENSA DA ANEEL, 2018).

Espera-se que a participação da GDFV na geração continue crescendo com a popularização dos SFVs, desenvolvimento de painéis mais eficientes e a implementação de políticas que viabilizem e estimulem a implantação. A incorporação da geração descentralizada a partir de fontes renováveis, como a GFV, apresenta novas características ao sistema elétrico. A GDFV agrupa aspectos ecologicamente positivos como: a geração de energia limpa e sustentável, à redução do consumo de energia elétrica proveniente de matriz fóssil, redução na conta de energia elétrica para os consumidores e um potencial incentivo à substituição de veículos com combustão interna por VEs (VITHAYASRICHAREON, MILLS e MACGILL, 2016).

Paralelamente aos benefícios, a entrada, ainda incipiente, dos sistemas distribuídos de geração, nos atuais sistemas elétricos, traz novos paradigmas a serem compreendidos e trabalhados pelas distribuidoras e planejadores. De forma genérica, pode-se abordar e classificar as questões inerentes à GDFV sob dois vieses. Um deles voltado ao desenvolvimento, trabalho e pesquisa para encontrar métodos eficientes de avaliação dos

impactos que a penetração da GDFV causa na rede (AGALGAONKAR, PAL e JABR, 2014). É um segundo viés voltado ao desenvolvimento de métodos ou técnicas acurados para estimar o montante de energia gerado, proveniente da GDFV (BHOLA e BHARDWAJ, 2016).

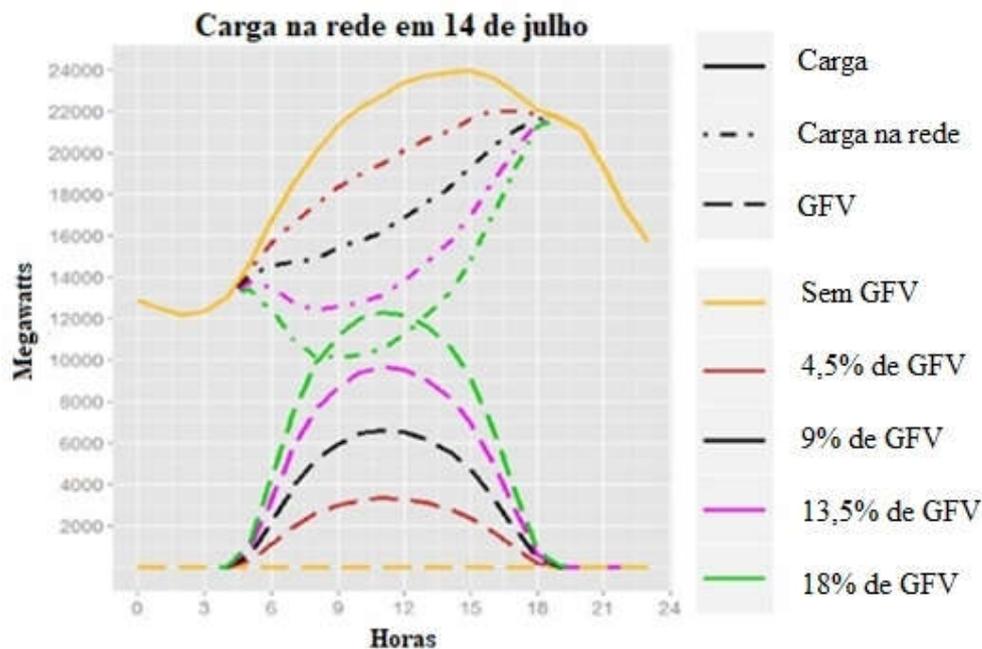
2.4 IMPACTOS DA GDFV NO SISTEMA ELÉTRICO

No SED surgem algumas mudanças com a entrada da GDFV, como o consumo da energia gerada no local de geração e o excedente desta injetado diretamente na rede elétrica da concessionária (WIDÉN, WÄCKELGÅRD, *et al.*, 2010). Como a GFV depende diretamente das condições do tempo, que são bastante incertas e imprevisíveis, com altas taxas de penetração da GDFV elevam-se as preocupações da concessionária (ROSENKRANZ, MARTINEZ-ANIDO e HODGE, 2016). A presença de painéis FVs nas unidades consumidoras conectadas à rede faz com que o consumo geral de energia das unidades consumidoras diminua, de modo que cabe à concessionária avaliar essa redução de consumo para estimar com maior precisão a demanda a ser contratada nos leilões de energia (MACHADO, BORBA e MACIEL, 2016).

Além disso, também é necessária a preocupação com as demais condições da rede para comportar a GDFV, a qual pode influenciar nos níveis de tensão, no carregamento de transformadores, no fluxo de potência, demandar adequações na rede, entre outros. De modo geral, observa-se que a GD consegue contribuir na melhoria dos níveis de tensão e reduz a taxa de perdas no sistema (MACHADO, BORBA e MACIEL, 2016).

Em Rosenkranz, Martinez-Anido e Hodge (2016) é feita uma avaliação de como a entrada dos SFVs modifica as curvas de carga de um sistema baseado na geração térmica. Em períodos de alta GFV, os geradores térmicos, que correspondem a maior fonte de geração elétrica, têm participação menor no montante de energia gerado. No entanto, no momento em que a GFV cessa, toda a carga passa a ser novamente alimentada pela geração fóssil (ROSENKRANZ, MARTINEZ-ANIDO e HODGE, 2016). Essa transição exige das termoelétricas uma resposta rápida à demanda, pois em um período de poucas horas pode variar drasticamente, formando um contorno, denominado por muitos autores de ‘curva do pato’, como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Curva de Carga e GFV no dia 14 de julho (a partir do histórico do ano 2006)¹.



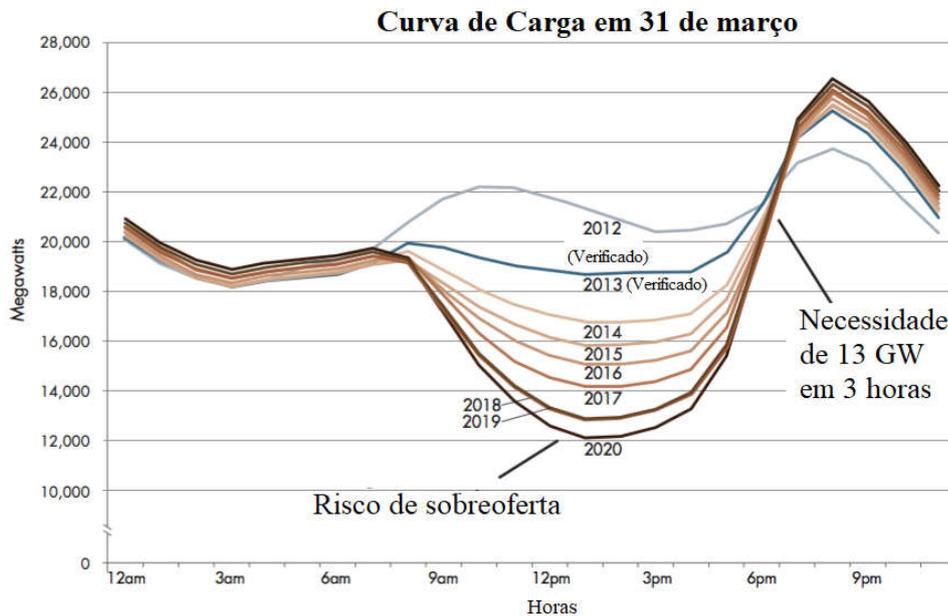
Fonte: Adaptado de: (ROSENKRANZ, MARTINEZ-ANIDO e HODGE, 2016).

Na Figura 7 observa-se que à medida que a penetração de SFVs aumenta, a carga na rede diminui consideravelmente, de modo que a retomada de carga se torna bastante intensa ao final do dia. Sabe-se que o volume de geração térmica não pode variar bruscamente, cada tecnologia (Turbinas a vapor de carvão, Turbinas a vapor a gás e a óleo, Ciclo combinado a gás) tem uma determinada taxa de subida até atingir sua capacidade plena de geração. Assim, é necessário ter uma previsão eficaz da GFV para garantir que as termoeletricas estarão prontas para atender a demanda do sistema quando não houver GFV (ROSENKRANZ, MARTINEZ-ANIDO e HODGE, 2016).

Em outro estudo, realizado no sistema elétrico da Califórnia, é reforçado que a crescente penetração da GFV pode impor uma variação muito severa na curva de carga em poucas horas, ao final da tarde, como mostra a Figura 8 (CASTRO, CASTRO, *et al.*, 2018).

¹ Os dados utilizados são do Operador independente do sistema, região da Nova Inglaterra (ISO – NE), nos EUA.

Figura 8 – Curva do Pato Real e Projetada para o Sistema da Califórnia, entre 31 de Março de 2012 e 2020.



Fonte: Adaptado de: (CASTRO, CASTRO, *et al.*, 2018).

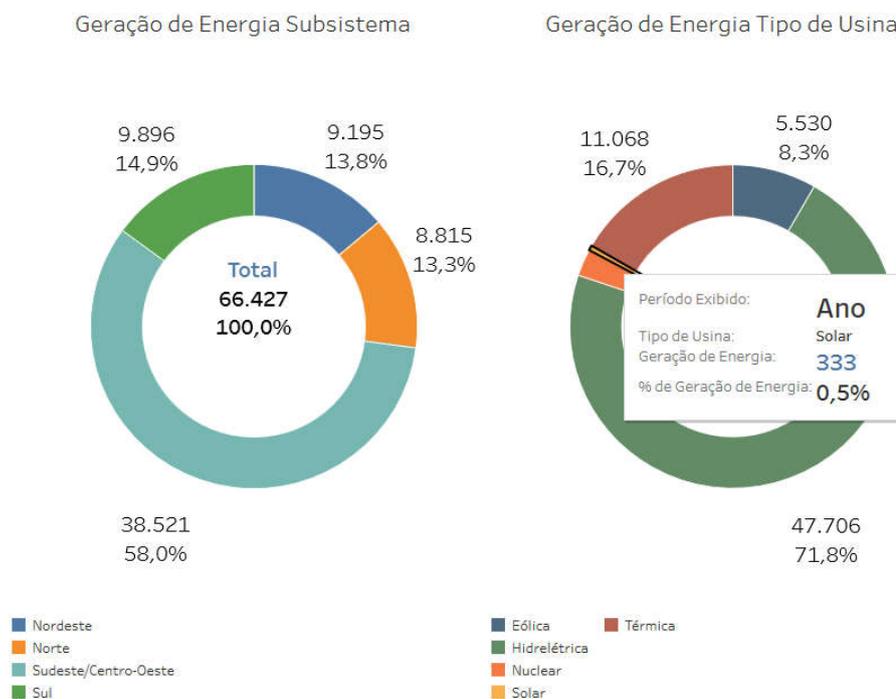
Na Figura 8 é observado que a curva de carga se modifica, acentuando-se o formato de curva do pato ano a ano, e chegaria a valores críticos no ano de 2020, com uma rampa de aumento de carga de, aproximadamente, 13 GW em apenas três horas. A partir do comportamento verificado na Figura 8, destacam-se dois desafios decorrentes do fenômeno da curva do pato. O primeiro deles é a carga líquida reduzida na metade do dia, também chamado de risco de geração excessiva de energia. O possível problema é que a carga líquida se reduza a um montante que o operador do sistema precise desligar usinas com baixa flexibilidade de operação. Em outras palavras, a GDFV atinge um valor muito elevado a ponto de ser necessário desligar usinas projetadas para terem poucas interrupções na operação (CASTRO, CASTRO, *et al.*, 2018).

O outro desafio que a curva do pato traz é a rápida necessidade de retomada de carga, conforme a GFV diminui e o pico da carga se aproxima. Essa retomada requer usinas flexíveis, que possam começar a gerar energia elétrica rapidamente, e fontes de armazenamento, que permitam utilizar a energia armazenada enquanto um número maior de usinas entra em operação (CASTRO, CASTRO, *et al.*, 2018). O conceito de curva do pato também é abordado por Sun, Tian e Jia (2017), que avaliam as implicações da entrada de gerações eólica e fotovoltaica na distribuição, em termos da flexibilidade do sistema,

propondo a inserção de fontes flexíveis para suprir as rampas de carga quando cessa a geração da GD.

No caso brasileiro, a saída de GFV, por volta das 17h00min, demandaria que outras fontes como, por exemplo, a hidráulica e/ou a eólica apresentassem capacidade e flexibilidade para atender a rampa de carga. Sabe-se que o percentual de participação da energia fotovoltaica ainda é pequeno no Brasil. Conforme mostram os dados do Operador Nacional do Sistema (ONS), no ano 2018, a GFV gerou apenas 0,5% da geração de energia média, com potência média de geração de 333 MW, conforme dado na Figura 9. No último mês de 2018, no Brasil, a capacidade percentual instalada em usinas FV atingiu a marca de 1,1% do total (ONS, 2019).

Figura 9 – Geração de energia elétrica por tipo de usina em 2018.



Fonte: (ONS, 2019).

Acomodar a crescente geração de energia fotovoltaica envolve aceitá-la quando e onde estiver disponível. Para integrar níveis mais elevados de geração variável, os sistemas elétricos precisam garantir que os operadores da rede tenham acesso a fontes de flexibilidade, como resposta à demanda flexível, previsões melhoradas no dia-a-dia ou recursos de armazenamento de energia. Melhorar a interconexão nas áreas de equilíbrio vizinhas também pode proporcionar maior flexibilidade para os operadores de rede (ROSENKRANZ, MARTINEZ-ANIDO e HODGE, 2016).

A GDFV, em muitos casos observados na literatura, traz contribuições ao SED (PHAYOMHOM, CHAITUSANEY, *et al.*, 2015). Nos pontos de conexão dos SFVs à rede, tem-se observado o aumento nos níveis de tensão durante o dia e redução na potência drenada da rede, uma vez que os SFVs alimentam localmente às cargas (GADO, 2015). De modo geral, há uma avaliação positiva em relação a inserção dos SFVs na distribuição (DARUI, PIOTROWSKI, *et al.*, 2017). No alimentador, os níveis de tensão são pouco afetados pela GFV. No entanto, dependendo da potência de GD instalada, os níveis de tensão na barra de conexão podem exceder os limites máximos (PINTO, CALADO, *et al.*, 2015). Assim, é necessária uma avaliação criteriosa nas condições da rede, para que se possa administrar a GFV em cada caso, garantindo benefícios a todos.

Darui, Piotrowski, *et al.* (2017) discutem como a GDFV reduz diariamente o consumo de energia, alterando a curva de carga líquida na rede. Em SFVs dimensionados para o autoconsumo, observa-se que a entrada da GDFV não acarreta em gastos adicionais aos SEDs, tais como troca de transformadores e/ou recondutoramento. Em dias úteis, a GFV pode ser capaz de suprir a demanda de energia, enquanto que em finais de semana, devido a baixa na demanda, o SFV pode injetar potência na rede da distribuidora.

Os incentivos dados à integração de fontes limpas e renováveis são importantes para o incremento da sua participação na atual matriz de energia. A associação de diferentes fontes, como a geração eólica em complemento a GFV pode ser uma alternativa interessante à expansão da geração. No caso da geração a partir de SFVs, por melhores que sejam os níveis de irradiação no local, essa fonte está limitada a gerar energia apenas durante o dia e apresenta redução na geração conforme variação das estações do ano, seja por sombreamento nos painéis, aumento de temperatura ou acúmulo de poeira, entre outros (MAGHAMI, HIZAM e GOMES, 2014).

Portanto, verifica-se que a combinação dessas duas fontes pode ser uma boa alternativa para a expansão, substituindo a geração baseada em fontes poluentes por fontes renováveis (LAVE e ELLIS, 2017). Um estudo realizado no estado do Novo México – EUA traz a avaliação dos potenciais das fontes fotovoltaica e eólica, além da carga demandada; durante as 24 horas do dia, em um horizonte anual. A comparação entre a GFV, eólica e os dados de carga mostrou que a fonte fotovoltaica estava ligeiramente correlacionada com a carga, enquanto o vento estava menos correlacionado (e negativamente). Embora isso possa sugerir que somente a energia fotovoltaica teria maior capacidade em deslocar a geração convencional, foi visto através de análises adicionais que a combinação entre as duas fontes

pode ser mais efetiva. A otimização das combinações mostrou a importância da inclusão destas fontes na matriz de geração, para grandes capacidades de inserção da geração renovável (LAVE e ELLIS, 2017).

2.4.1 Métodos de predição da GDFV

Integrar a GDFV aos atuais sistemas de distribuição, ampliando a participação das energias renováveis na matriz energética, implica trabalhar com métodos para a predição da energia fotovoltaica injetada na rede elétrica e conhecer o comportamento da rede com diferentes níveis de GFV, para que se tenha uma operação segura e confiável (SAUAIA, 2017).

Com a popularização dos sistemas de geração distribuída ao redor do mundo, observa-se que os sistemas elétricos estão se tornando cada vez mais diversificados (SCOLARI, SOSSAN e PAOLONE, 2018). Essa diversificação, resultante da entrada de pequenos e médios sistemas de geração distribuídos, apresenta novas questões a serem pensadas. Tais questões são referentes à acomodação da energia injetada na rede, ao planejamento para a compra de energia nos leilões e aos investimentos que precisam ou não ser realizados. À medida que cresce a participação e a dependência das fontes alternativas na composição de energia, torna-se mais necessário o uso de métodos que sejam capazes de prever o montante de energia proveniente de alternativas que será gerado (BHOLA e BHARDWAJ, 2016).

Essa estimativa é requerida por planejadores e concessionárias para fazerem um balanço correto da geração baseada em alternativas, hídricas e fósseis. De modo que, uma estimativa correta poupa gastos desnecessários com combustíveis, evita emergência na compra de energia, e é útil para a manutenção, armazenamento de energia e sua comercialização (BHOLA e BHARDWAJ, 2016).

Verifica-se na literatura que várias propostas vêm sendo apresentadas, para modelar e estimar a parcela de geração distribuída presente no fluxo total de potência da rede. Devido à sua randomicidade e aleatoriedade, a parcela de energia proveniente da GFV não pode ser calculada por métodos analíticos ou determinísticos. Por isso, métodos estatísticos de estimativa e/ou que a partir de bancos de dados ‘criam’ cenários que emulem a realidade, se apresentam como uma alternativa interessante para superar esse problema (BERNARDS, VERWEIJ, *et al.*, 2017; BHOLA e BHARDWAJ, 2016).

Em Shaker, Zareipour e Wood (2016), por exemplo, é apresentado um estudo que se baseia em dados de GFV disponibilizados publicamente em *websites*. Com os dados é trabalhada a predição do montante de GFV invisível na rede da concessionária. O termo ‘invisível’ tem a finalidade de discriminar a geração proveniente de pequenos empreendimentos fotovoltaicos nos telhados de residências, os quais não têm sua geração monitorada pela concessionária local.

O método proposto usa apenas os dados medidos de geração de energia de locais disponíveis publicamente. A partir de dados em tempo real de um pequeno conjunto de locais, estima-se a geração de energia agregada de locais conhecidos em uma sub-região. Esta informação é então utilizada para desenvolver números *fuzzy* associados a cada subregião. Em seguida, um número muito pequeno de locais representativos são escolhidos e sua geração de energia em tempo real é utilizada para alimentar modelo, como entradas. Finalmente, o modelo calcula um número *fuzzy* associado à geração de energia em tempo real de todos os locais da região, com base na capacidade de energia fotovoltaica invisível existente em cada subregião. Para melhorar o desempenho do modelo, a geração em tempo real de locais adicionais também foi usada para modificar as entradas do modelo proposto. A validação do modelo é feita usando dados de GFV invisível real do sistema de energia da Califórnia (SHAKER, ZAREIPOUR e WOOD, 2016).

Em muitos casos, a previsão da GFV é realizada de forma indireta, por meio de dados climatológicos ou de modelos híbridos. Estes modelos agregam mais de um método, ou então, utilizam diferentes abordagens para cada etapa do trabalho. Estudos como em: Scolari, Sossan e Paolone (2018), em Safarini, Akash, *et al.* (2017) e em Ayvazogluyüksel e Filik (2017) são desenvolvidas abordagens baseadas em dados climatológicos e/ou em modelos híbridos.

Em Scolari, Sossan e Paolone (2018) propõe-se calcular a potência máxima do sistema fotovoltaico a partir da irradiância estimada indiretamente. Três estimadores são comparados em termos de capacidade de calcular a potência máxima da planta fotovoltaica, a largura de banda e a robustez contra o ruído das medições. As abordagens baseiam-se em medições da tensão CC, corrente e temperatura da célula e em um modelo do painel fotovoltaico. No trabalho, os métodos considerados conseguiram reconstruir com precisão a GFV máxima, mesmo durante os períodos de restrição, ou seja, quando a potência fotovoltaica medida não é representativa do potencial máximo do gerador fotovoltaico (geração fora do Seguidor de Ponto Máximo de Geração (*Maximum Power Point Tracking*, MPPT)).

A avaliação de desempenho é realizada usando uma configuração experimental dedicada em uma instalação FV no telhado, de 14,3 kWp. Dois dos métodos, com base em uma solução de forma fechada analítica e nos princípios de imersão e de invariância são tomadas a partir da literatura, enquanto o terceiro, baseado no filtro de Kalman estendido, é originalmente proposto pelos autores. O desempenho da estimativa é avaliado utilizando medições de uma configuração experimental e comparadas com estimativas de piranômetros (SCOLARI, SOSSAN e PAOLONE, 2018).

Na estimação da energia gerada por SFVs, é comum encontrar na literatura trabalhos que abordem modelos híbridos. Em Ayvazogluyüksel e Filik (2017), os autores conduzem o trabalho em duas etapas. Na primeira delas, sabendo que a saída de energia dos SFVs é significativamente afetada pela temperatura da célula, é realizada a estimativa da temperatura da célula. Assim, a temperatura da célula do SFV de uma residência fotovoltaica foi estimada por meio de seis modelos diferentes (Modelo Padrão, Modelo Koehl, Modelo Mattei, Modelo Skoplaki, Modelo Muzathik e Modelo Kurzt).

Na segunda etapa, os valores de saída de energia do sistema são previstos com três modelos diferentes usando os valores estimados de temperatura da célula, os parâmetros externos medidos e as especificações do painel fotovoltaico. Portanto, os modelos mais precisos para a estimativa da temperatura da célula e para a previsão de energia são determinados de acordo com os resultados dos métodos de análise de teste estatístico. O estudo de caso mostrou que o Modelo Skoplaki e o Modelo 1, foram os que apresentaram, respectivamente, os melhores resultados para a estimação da temperatura e da energia gerada pelo SFV (AYVAZOGLUYÜKSEL e FILIK, 2017).

No mesmo segmento do trabalho realizado por Ayvazogluyüksel e Filik (2017), alguns autores apoiam seus estudos em dados meteorológicos e nas características físico-construtivas dos painéis para prever GFV. Em Snegirev, Valiev, *et al.*(2017) a previsão da geração de energia de SFVs, foi feita levando em consideração um modelo híbrido. Assim, tal modelo leva em consideração dados estocásticos de irradiação e as características físico-construtivas do SFV, para estimar qual será a GFV. A potência de saída do SFV, tem relação direta com a intensidade da irradiação solar nos painéis. Uma característica positiva desse estudo é que a abordagem proposta pode ser facilmente adaptada para quaisquer coordenadas geográficas, ajustando o conjunto de dados de entrada, que permitem calcular a irradiação solar (SNEGIREV, VALIEV, *et al.*, 2017).

Na procura por pesquisas que tragam metodologias de previsão da energia fotovoltaica, encontraram-se trabalhos que aplicam diferentes recursos para chegar ao objetivo. Classificando os trabalhos de acordo com os seguintes critérios: os dados de entrada, o intervalo de amostragem, o conjunto de dados para treino e validação e quais métodos foram empregados no estudo, foi possível montar o Quadro 3 com exemplos dos principais recursos/métodos utilizados (YESILBUDAK, COLAK e BAYINDIR, 2016).

Quadro 3 – Diferentes métodos utilizados na predição da GFV.

Dados de Entrada	Intervalos de aquisição	Conjunto total de dados		Métodos implementados nos estudos
		Treino	Validação	
Pluviosidade, umidade, máxima e mínima temperatura do ar, elevação, longitude e latitude	1 mês	Não mostrado	Não mostrado	Redes neurais artificiais
Grandezas elétricas relevantes, temperatura local, intensidade da radiação solar	10 minutos	27278	9275	Árvore neural flexível
Energia fotovoltaica	Não mostrado	Não mostrado	Não mostrado	Conhecimento baseado em redes neurais, perceptron multilayer
Altitude, horas, longitude, claridade, latitude	Não mostrado	Não mostrado	Não mostrado	Funções de bases radiais, Ferramenta de ajuste da rede neural
Energia fotovoltaica gerada	5 minutos	Não mostrado	Não mostrado	Redes neurais artificiais
Ângulo horário solar e inclinação solar, ângulo azimutal solar, ângulo de elevação solar	Não mostrado	Não mostrado	Não mostrado	Redes neurais recorrentes
Radiação horizontal global obtida por 2 meios (estação meteorológica pública e estação meteorológica local)	Não mostrado	11480	5740	Vetor de regressão de apoio, Máquina de aprendizagem extrema
Temperatura, irradiação, cobertura	Não mostrado	Não mostrado	Não mostrado	Redes neurais artificiais

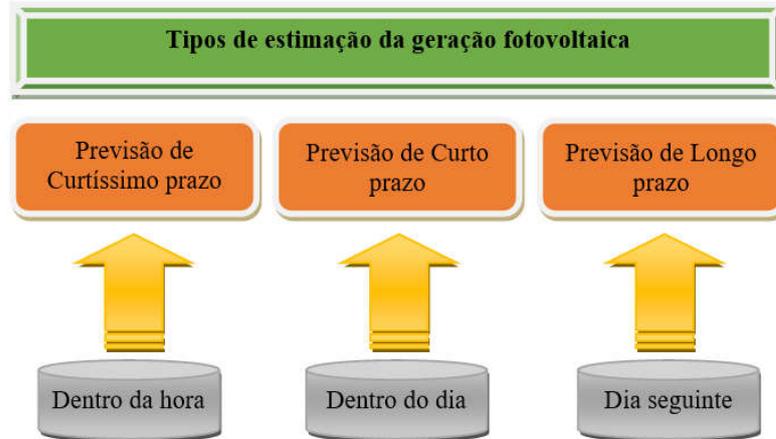
Dados de Entrada	Intervalos de aquisição	Conjunto total de dados		Métodos implementados nos estudos
		Treino	Validação	
de nuvens				
Posição solar, umidade, nuvens, temperatura do ar, irradiação	Não mostrado	Não mostrado	Não mostrado	Modelos físicos, Redes neurais artificiais
Imagens de satélites, dados meteorológicos em numéricos, medições de estações terrestres	10 minutos	9048	4524	Redes neurais artificiais
Dados meteorológicos	Não mostrado	Não mostrado	Não mostrado	Máquina de aprendizagem extrema, Algoritmo genético agrupado

Fonte: Adaptado de: (YESILBUDAK, COLAK e BAYINDIR, 2016).

A partir da extração dos dados presentes no Quadro 3, foi possível chegar às seguintes conclusões: os trabalhos pesquisados atenderam bem o seu propósito; as comparações em termos de modelo empregado, dos dados de entrada, do intervalo de amostragem e do conjunto total de dados considerados, são feitas de forma eficiente. Os principais pontos-chaves e deficiências encontradas nos artigos foram: a mineração de dados é uma boa maneira para melhorar a previsão e é sempre o primeiro passo para qualquer processo de previsão da GFV; os pesquisadores adotam diferentes quantidades de parâmetros de entrada em seus estudos; as informações sobre os intervalos de amostragem dos parâmetros de entrada e o número de conjuntos de dados para o treino e validação não são suficientes na maioria dos trabalhos pesquisados; performances sazonais dos modelos empregados devem ser consideradas para melhorar as previsões.

Ainda se observa que outras classificações, agrupamentos e associações de técnicas utilizadas na mineração de dados, devem ser focados, além das redes neurais artificiais para testes comparativos (YESILBUDAK, COLAK e BAYINDIR, 2016). De modo geral, as estimativas da GFV podem ser classificadas de acordo com o seu tipo, em: previsões de curtíssimo, curto e longo prazo, conforme ilustrado na Figura 10.

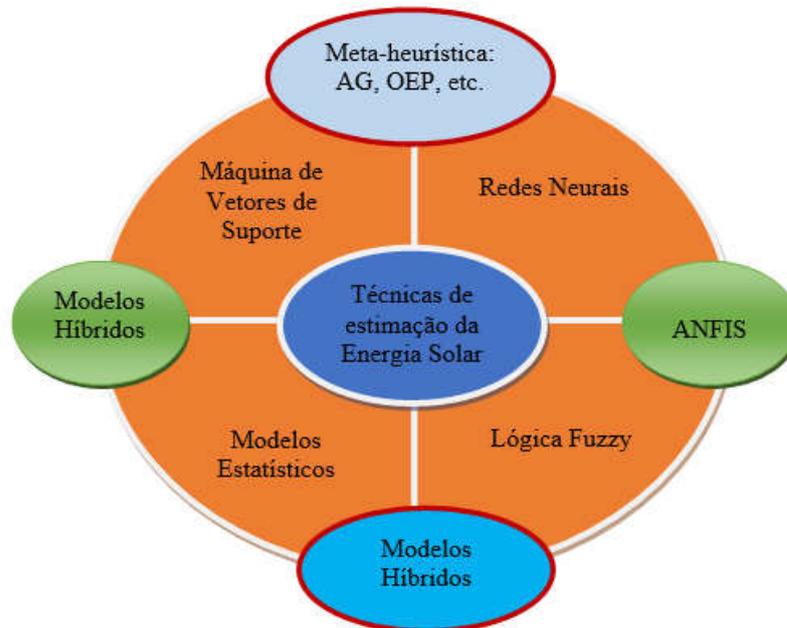
Figura 10 – Tipos de estimação da energia fotovoltaica.



Fonte: Adaptado de: (BHOLA e BHARDWAJ, 2016).

Outra classificação diz respeito aos métodos e as técnicas empregados para prever o montante de energia fotovoltaica que será gerada. Na Figura 11 são mostradas algumas das principais técnicas que estão sendo utilizadas e que vêm sendo pesquisadas ao redor do mundo, quando se trata da predição da energia fotovoltaica.

Figura 11 – Técnicas utilizadas para a estimação da energia fotovoltaica gerada.



Fonte: Adaptado de: (BHOLA e BHARDWAJ, 2016).

As siglas AG e OEP² mostradas na Figura 11 significam, respectivamente, Algoritmo Genético e Otimização por Enxame de Partículas. Além de abordar métodos para prever a quantidade de energia fotovoltaica que será gerada, também é importante, nos planejamentos de médio e longo prazo, conseguir estimar o percentual de entrada da GD nos SEDs. Sabendo que nesses casos também não é possível encontrar uma resposta exata, pode-se utilizar métodos que permitam estimar valores/cenários aproximados de penetração.

2.5 SOFTWARES, FERRAMENTAS E MÉTODOS UTILIZADOS NO TRATAMENTO DA GDFV

2.5.1 *Software* OpenDSS

O simulador de sistema de distribuição de energia elétrica (OpenDSS) é um *software* livre, que foi projetado para trabalhar com SEDs que possuam cargas variáveis, diferentes tipos GDs, presença de VEs, novas tecnologias, demandam análise dinâmica da rede, entre outras. Reconhecendo que os desenvolvedores nunca conseguiriam antecipar tudo o que os usuários desejariam fazer com o *software*, uma interface Modelo de Objeto Componente (COM) foi implementada na versão de *Dynamic-link library*³ (DLL) do servidor em processo, para permitir que usuários conhecedores possam usar os recursos do programa para executar novos tipos de estudos (DUGAN, 2016).

O programa possui vários modos de solução prontos em sua estrutura básica, como: a análise instantânea, diária e anual de fluxo de potência, análise de harmônicos, estudos de faltas, estudos de faltas randômicas (Método de Monte Carlo), integração de sistemas com GD, modelagens de carga com potência constante, corrente constante, impedância constante, modelo de carga composto (ZIP) e com a partir de curvas de carga (OCHOALUIS e QUIROS-TORTOS, 2015; SEXAUER, 2016).

Por meio da interface COM, o usuário é capaz de projetar e executar modos de solução personalizados e recursos de um programa externo e executar as funções do simulador, incluindo a definição dos dados do modelo. Assim, o DSS pode ser implementado de forma totalmente independente de qualquer banco de dados ou definição de circuito de arquivo de texto fixo. Por exemplo, pode ser totalmente conduzido a partir de uma ferramenta do MS Office através do VBA ou de qualquer outro programa de análise que possa lidar com

² Na literatura técnica, em inglês, essa sigla é correspondente a *Particle Swarm Optimization* (PSO).

³ É uma biblioteca dinâmica que contém dados que podem ser acessados simultaneamente por mais de um programa instalado no computador.

interface COM. Os usuários geralmente conduzem o OpenDSS com o familiar programa Mathworks MATLAB, Python, C#, R e outras linguagens de programação. Isso fornece recursos analíticos externos poderosos, além de excelentes gráficos para a exibição de resultados (DUGAN, 2016).

Contudo, muitos usuários consideram que a interface programação da versão executável é suficientemente autônoma para quase todos os tipos de trabalho. Como, de modo geral, os usuários precisam repetidamente de um mesmo recursosos trabalhos, esse recurso é implementado dentro do módulo de controle de solução integrado e conectado à interface de comando baseada em texto. O *software* não possui interface gráfica na forma de diagramas unifilar ou trifilar para a entrada de dados. Logo, toda a programação deve ser realizada através de códigos (linhas) de comando (OCHOALUIS e QUIROS-TORTOS, 2015).

Graças aos variados recursos que o OpenDSS apresenta, o programa é frequentemente utilizado por pesquisadores. Alguns dos trabalhos em que o *software* é empregado na modelagem e simulação em SEDs são sinteticamente detalhados no Quadro 4. Os estudos consultados são, basicamente, referentes a sistemas elétricos de potência, considerando a integração de fontes alternativas de geração, juntamente ou não, com a entrada de VEs.

Quadro 4 – Alguns trabalhos que utilizam o OpenDSS para a modelagem de SEDs.

Tipo/local/descrição da aplicação	Artigo(s) em que o OpenDSS foi empregado
Estudos para verificar os impactos na regulação e na instabilidade de tensão em caso de alta penetração de SFV, em sistema IEEE de 37 barras, entre outros mostrados na revisão da literatura	Voltage Regulation Mitigation Techniques in Distribution System with High PV Penetration: A Review (CHAUDHARY e RIZWAN, 2018)
Modelagem de um alimentador de testes IEEE 34 nós modificado, com cargas realísticas e perfis de GFV	Distribution Voltage Regulation Through Active Power Curtailment With PV Inverters (GHOSH, RAHMAN e PIPATTANASOMPORN, 2017)
Rodar o fluxo de potência, para uma série temporal de 24 horas, com demandas variadas e unidades de GDFV monofásicas presentes na rede de testes IEEE 13 barras	The Impact Of Single-Phase Grid-Connected Distributed Photovoltaic Systems on the Distribution Network Using P-Q and P-V Models (EMMANUEL e RAYUDU, 2017)
Modelagem de uma rede de testes de 31 barras, para a qual é desenvolvida uma metodologia baseada em MMC para estimar o impacto da geração de energia fotovoltaica no planejamento de longo prazo da	A Granular Monte Carlo Based Methodology to Estimate PV Generation Impacts on the Utility Long-Term Energy Planning (ANDRADE, TORQUATO e FREITAS, 2015)

Tipo/local/descrição da aplicação	Artigo(s) em que o OpenDSS foi empregado
concessionária	
Para a simulação do fluxo de potência e estudo dos impactos causados pela inserção da GD fotovoltaica em um alimentador da rede de distribuição, no município de Armação dos Búzios, RJ	Modeling Distributed PV Market and its Impacts on Distribution System: A Brazilian Case Study (MACHADO, BORBA e MACIEL, 2016)
Realizar as simulações no SED, com entrada de GD, de modo a obter a localização ótima da GD, para a minimização das perdas de energia	A Parallel Monte Carlo Method for Optimum Allocation of Distributed Generation (MARTINEZ e GUERRA, 2014)
No estudo e simulação de 48 cenários de penetração envolvendo GDs e VEs, no sistema radial de distribuição de energia IEEE de 123 barramentos, após a modelagem do circuito secundário. São investigados no estudo o excesso em energia ativa/reativa, a energia excedente a normal, a energia não suprida e as perdas de energia	Impact of Wind-Based Distributed Generation on Electric Energy in Distribution Systems Embedded With Electric Vehicles (ABDELSAMAD, MORSI e SIDHU, 2015)
Modelar o sistema IEEE 123 barras e todos os componentes do circuito secundário, inclusive os transformadores de distribuição, para a aplicação de uma metodologia desenvolvida para avaliar o impacto da GDFV no SED considerando os cenários de adoção do cliente	Probabilistic Impact of Transportation Electrification on the Loss-of-Life of Distribution Transformers in the Presence of Rooftop Solar Photovoltaic (ABDELSAMAD, MORSI e SIDHU, 2015)

Fonte: (Do autor).

2.5.2 Lógica Fuzzy

A lógica *Fuzzy* é uma ferramenta comumente utilizada nos estudos que englobam incertezas e variações não-binárias dos parâmetros em questão; podendo servir, por exemplo, de instrumento para estipular cenários prováveis, com diferentes níveis de entrada da GD (PEI ZHAI, 2012). Por ser um sistema especialista, com variação não-binária das variáveis de entrada e saída (que são descritas por funções de pertinência), pode-se determinar qualitativa ou quantitativamente uma zona de classificação contínua (ZADEH, 1989). Portanto, pode-se desenvolver um Sistema de Inferência *Fuzzy* (SIF) sabendo como cada variável de entrada afeta individualmente a saída, partindo da combinação dos graus de pertinência, ou seja, na fuzzificação de todas as variáveis de entrada. Por meio de um conjunto de regras é modelada a contribuição das variáveis de entrada e, então se estima a saída do SIF, chamada de defuzzificação (PERRY e ZADEH., 1995).

Os SIFs vêm ao longo dos anos servindo como ferramenta para trabalhar com as imprecisões (PEDRYCZ e GOMIDE, 2007). Desse modo, a lógica *fuzzy* é uma maneira pertinente de estruturar uma variável de entrada para uma variável de saída, de fácil entendimento, uma vez que possui uma abordagem mais intuitiva. Assim, seus conceitos são formulados com base em habilidades antigas do raciocínio humano, através da descrição qualitativa utilizada na linguagem cotidiana, que foi moldada para ser conveniente e eficiente. Sendo caracterizada pela tolerância a dados imprecisos, pois seu raciocínio constrói o entendimento do processo em vez de focar em uma solução final (MATHWORKS., 2016).

Tanto os sistemas especialistas, como também os baseados na inteligência artificial são ferramentas importantes, pois podem lidar com ambientes de informação imperfeita e, portanto, pode reduzir os requisitos de comunicação e processamento de dados (AZZOUZ, FARAG e EL-SAADANY, 2017). Na literatura, frequentemente são encontrados estudos que utilizam puramente a lógica *fuzzy* ou mesmo sistemas híbridos, com *fuzzy* trabalhando em conjunto às redes neurais, para prever o montante de energia proveniente da GD ou estimar locais/tamanhos de implantação de sistemas descentralizados de geração. Em Paixão, Rigodanzo, *et al.* (2017), por exemplo, é realizado um estudo de previsão da velocidade do vento em regiões com parques eólicos, utilizando um sistema de inferência neuro-fuzzy adaptativo (ANFIS). A partir da velocidade do vento prevista foi estimada a geração total do parque eólico.

Na abordagem realizada por Santos, Canha e Bernardon (2018), avalia-se a parcela de consumidores residenciais adotantes da GDFV. O trabalho mostra que o percentual de aderentes aos SFVs tenderá a se incrementar rapidamente à medida que a tecnologia se popularizar/aprimorar e houver o conhecimento mais generalizado sobre essa fonte de energia. Conforme se verifica na literatura, todo esse processo de expansão pode ser discutido sob uma perspectiva de espaço e de tempo, com a aplicação de diversos métodos. Em Santos, Canha e Bernardon (2018), para a estimativa da disseminação dos SFVs no tempo foi utilizado um modelo Bass, enquanto os locais prováveis da implantação da GDFV foram estimados por meio da SMC.

Outra abordagem está na aplicação da teoria dos conjuntos *Fuzzy* para modelar o problema da inserção dos SFVs (PEI ZHAI, 2012). No trabalho de Pei Zah (2012) a adoção da GFV é baseada na combinação dos 3 conjuntos *fuzzy* de entrada (Preocupações ambientais, Custo de aquisição do SFV e Custo de manutenção do SFV, percebidos pelos consumidores). Ao passarem pela base de regras estabelecidas no SIF, os 3 conjuntos de entrada influenciam

a saída do sistema, que é composta por 5 subconjuntos *fuzzy* de probabilidade de instalação (*muito baixa, baixa, média, alta, muito alta*).

Em Jahic, Konjic, *et al.* (2016) também utiliza-se um ANFIS para prever o montante de energia fotovoltaica que será gerado. O sistema tem como entrada dados de irradiação solar, temperatura dos módulos e temperatura ambiente; e como saída a previsão da geração. Para treinamento do sistema foram utilizados dados históricos, coletados horariamente, das 6h00min às 18h00min, entre os anos 2012 e 2013. Este estudo mostrou que com um pequeno banco de dados para treinamento, é possível obter previsões aceitáveis.

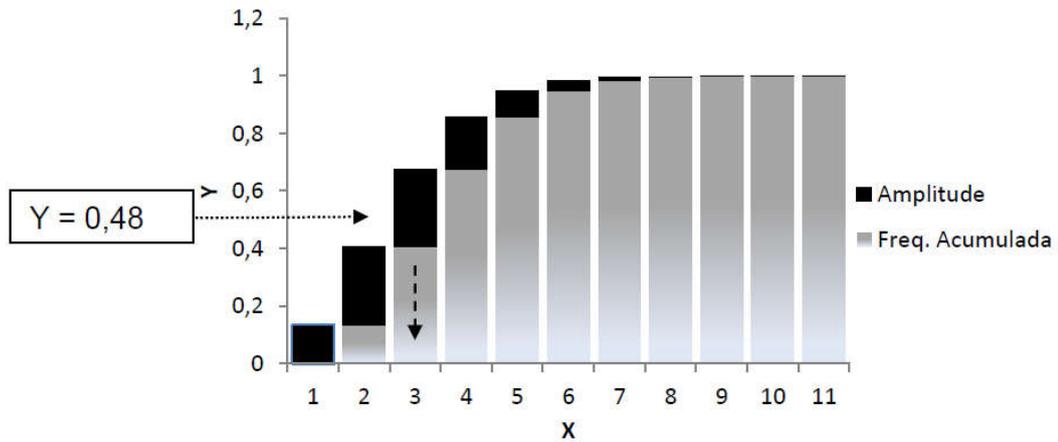
Aplicações que adotam metodologias baseadas em lógica *fuzzy*, redes neurais e/ou ANFIS também são desenvolvidas por Chugh, Chaudhary e Rizwan (2015), Yazdanbaksh, Krahn e Dick (2013) e Quan, Ogliari, *et al.* (2013), para prever a curto prazo o montante de geração proveniente de fontes renováveis intermitentes.

2.5.3 Simulação de Monte Carlo

Para superar os obstáculos decorrentes da variabilidade e natureza estocástica de certas grandezas, fenômenos e processos, vários métodos probabilísticos têm sido propostos. Um dos métodos mais populares utilizados é a Simulação de Monte Carlo (SMC), que é amplamente aplicada por causa de sua alta precisão e simplicidade (AI, J.WEN, *et al.*, 2013). A SMC é um método de amostragem baseado na Função de Densidade de Probabilidade (PDF) das variáveis estocásticas, que requer a execução de dezenas de milhares de execuções de simulação com diferentes combinações de valores de entrada (ELMAKIAS, 2008; BILLINTON e LI, 1994).

Para tratar dessa aleatoriedade, o MMC é baseado em um conceito estatístico simples. A partir de uma variável x com distribuição aleatória própria e representada por uma FDP – $f(x)$ e por uma Função Cumulativa de Probabilidades (FCP) – $F(x)$; ao definir uma nova variável aleatória y , que tem uma distribuição uniforme sobre o intervalo fechado de (0 a 1 ou 0 a 100), determina-se uma relação entre a variável x e a variável y , da seguinte forma: $y = F(x)$. Isto é, a partir da $F(x)$, determina-se o valor da variável x correspondente ao número aleatório y gerado, conforme exposto na Figura 12 (ANDRADE, 2011).

Figura 12 – Exemplo de processo de SMC.



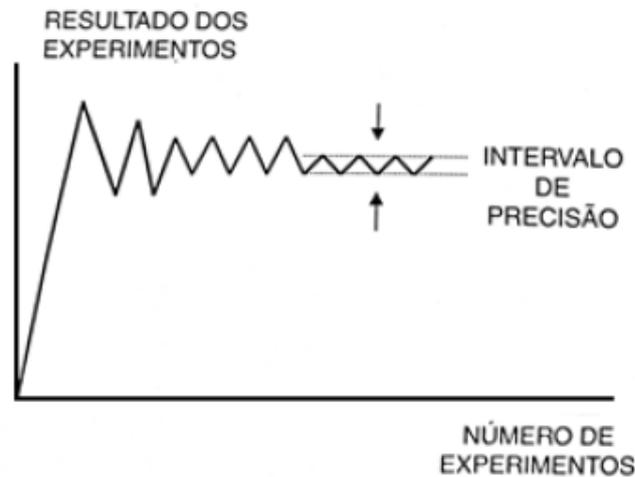
Fonte: (FIGUEIRÓ, 2013).

Na Figura 12, a parte cinza das barras representa a frequência acumulada ($F(x)$) e a parte em preto representam a frequência de distribuição de probabilidades ($f(x)$), para cada valor de x . A frequência total acumulada, para cada ponto (valor de x), é dada pela soma da frequência de ocorrência da variável com a frequência acumulada no ponto anterior.

Na Figura 12 é exemplificado o processo de simulação, onde o sorteio corresponde à variável aleatória $y = F(x)$, que é igual a 0,48 e, neste caso, corresponde ao valor 3 de x . Portanto, a expectativa de encontrar o número 3 é dada pela amplitude do segmento em preto, que está associada a uma probabilidade ocorrência de 0,2706 ou 27,06 % na simulação. A SMC consiste no experimento desenvolvido para gerar números aleatórios a partir de qualquer distribuição de probabilidade ou processo estocástico, estimando, portanto, o seu comportamento (ZAPATA, 2010). Na simulação, uma ou mais variáveis de interesse passam por experimentos a fim de avaliar seu efeito sobre outras variáveis de interesse.

Conforme Zapata (2010), a SMC deve ser realizada várias vezes para que se chegue a uma estabilidade do experimento e reduza-se o erro entre os valores simulados e os reais. Um pequeno número de rodadas de simulação pode levar a resultados muito discrepantes dos dados originais. Portanto, verifica-se que a precisão do experimento aumenta de modo proporcional ao crescimento do número total de simulação, como mostra a Figura 13.

Figura 13 – Processo de convergência da SMC.



Fonte: (ANDRADE, 2011).

A SMC foi amplamente utilizada em Desrochers, Blanchard e Sud (1986); Billinton e Gan (1993); Billinton, Hua e Ghajar (1996) para avaliar a confiabilidade do sistema, modelando a geração aleatória das fontes renováveis, a variação de carga e a taxa de faltas forçadas em componentes do SED, em um longo período de estudo.

Na estimação da GDFV ou do seu percentual de participação, verifica-se na literatura que a SMC é comumente utilizada, conforme em Andrade, Torquato e Freitas (2015). Tal simulação permite emular cenários fictícios, a partir da geração de números aleatórios com base em uma determinada frequência de ocorrência ou probabilidade da variável ou sistema em análise ocorrerem (FIGUEIRÓ, 2013).

A SMC é utilizada em alguns estudos como método principal, complementar ou também em comparação a outros métodos. Em Liu, Shen, *et al.* (2017), em vez da SMC, um método de estimação de dois pontos (2PEM) é aplicado para obter resultados de análise precisos e eficientes computacionalmente. Com base nos dados reais meteorológicos (irradiação) e de carga horária de dois anos na cidade de Ottawa, a precisão da estimativa do 2PEM foi verificada no equivalente de um alimentador de distribuição de 44 kV.

Em termos de eficiência computacional, o 2PEM pode reduzir significativamente o tempo de processamento computacional em comparação com a SMC. Resolvendo o problema em 2,5s enquanto o MMC levou mais de 2 minutos. Com o 2PEM, foram minuciosamente estudados o impacto da potência de saída dos SFVs e as variações de carga, sob a incerteza das estimações no sistema de distribuição, em diferentes estações do ano. No estudo de caso, o método 2PEM conseguiu estimar a geração média fotovoltaica com erro inferior a 3%.

O erro entre os valores adotados da simulação e os valores reais deve ser pequeno, para que a SMC consiga representar com fidelidade o processo (ATWA, EL-SAADANY, *et al.*, 2011). Pode-se medir a acurácia dos dados encontrados por meio dos erros: Erro Médio Absoluto (MAE) e Erro Quadrático Médio (RMSE) e Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE) (BERNARDS, VERWEIJ, *et al.*, 2017). Tais erros são definidos, respectivamente, por (1), (2) e (3).

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{1}^N |V_R - V_E| \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{1}^N (V_R - V_E)^2} \quad (2)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{1}^N \left| \frac{V_R - V_E}{V_R} \right| \times 100\% \quad (3)$$

onde:

V_R : É o valor real da variável em questão;

V_E : É o valor estimado para a variável em estudo por meio do método utilizado.

Considerando esse mesmo sistema de distribuição, de 44 kV, o modelo probabilístico de fluxo de potência ótimo (P-OPF) é formulado para analisar o impacto das incertezas da carga e da energia proveniente da GDFV, correlacionadas (LIU, LIU, *et al.*, 2017). Um método de Harr modificado de estimativa de dois pontos (MH-2PEM) é introduzido para fornecer uma estimativa eficiente de computação da solução de P-OPF. Os resultados mostraram que o MH-2PEM pode estimar com precisão as médias e variações das soluções de predição do dia seguinte da microrrede em 5s. Futuramente, os autores pretendem estender a aplicação do MH-2PEM, aplicando-o em microrredes ilhadas (LIU, LIU, *et al.*, 2017).

Em Soroudi, Aien e Ehsan (2012), o método de estimativa de dois pontos assimétricos (US2PEM) é usado para lidar com as incertezas dos recursos de energia renovável. A incerteza da geração intermitente de plantas eólicas, SFVs e também cargas elétricas, como

variáveis de entrada, são levadas em conta. A variação das perdas ativas e a energia importada da rede principal são definidas como variáveis de saída. O US2PEM é comparado ao método de estimativa simétrica de dois pontos, ao método de Gram-Charlier e ao método de amostragem de hipercubo latino, sendo que a SMC é usada como base para comparação entre os métodos.

A SMC e uma técnica analítica são abordadas por Atwa, El-saadany, *et al.* (2011) com uma nova utilização da PDF de índice de clareza, para modelar a irradiância solar. No estudo, ambas as técnicas são aplicadas para a mesma finalidade, todavia a SMC serve também para validar o desempenho e qualidade da técnica analítica.

Pode-se dizer, portanto, que a SMC além de possuir extensa aplicabilidade no tratamento de fenômenos incertos e aleatórios, pode ser também comumente encontrada em estudos servindo como ferramenta de validação de novas metodologias e técnicas. Um resumo das principais aplicabilidades da SMC, em estudos relacionados aos sistemas elétricos de potência, considerando a integração de fontes de geração alternativas é dado no Quadro 5.

Quadro 5 – Resumo das aplicabilidades da SMC em alguns trabalhos na literatura técnica.

Tipo/abrangência da aplicação	Trabalhos em que a SMC foi utilizada
Modelagem de irradiação solar e/ou velocidade do vento	Em artigos, como (ATWA, EL-SAADANY, <i>et al.</i> , 2011); (SAFDARIAN, FOTUHI-FIRUZABAD e AMINIFAR, 2012); (ABDELSAMAD, MORSI e SIDHU, 2015) e (CONSTANTE-FLORES e ILLINDALA, 2019)
Em comparação ou para a validação de outros métodos de estimação	Empregado em pesquisas, como (ATWA, EL-SAADANY, <i>et al.</i> , 2011); (SOROUDI, AIEN e EHSAN, 2012) e (MARTINEZ e GUERRA, 2014)
Estimação de carga horária e/ou velocidade do vento	Compromising Wind and Solar Energies From the Power System Adequacy Viewpoint (SAFDARIAN, FOTUHI-FIRUZABAD e AMINIFAR, 2012)
SMC para o modelo combinado de geração-carga	DG Allocation for Benefit Maximization in Distribution Networks (SHAABAN, ATWA e EL-SAADANY, 2013)
SMC para modelar consumo de energia de VEs	Em trabalhos, como em (SHAABAN e EL-SAADANY, 2014) e (ABDELSAMAD, MORSI e SIDHU, 2015)
SMC para determinar os locais de inserção e tamanhos das unidades de GDs	A Parallel Monte Carlo Method for Optimum Allocation of Distributed Generation (MARTINEZ e GUERRA, 2014)
Temperatura dos painéis fotovoltaicos em SFVs	Probabilistic Impact of Transportation Electrification on the Loss-of-Life of Distribution

Tipo/abrangência da aplicação	Trabalhos em que a SMC foi utilizada
	Transformers in the Presence of Rooftop Solar Photovoltaic (ABDELSAMAD, MORSI e SIDHU, 2015)
Modelar incertezas de entrada, como possíveis correlações entre os preços do carvão, gás e carbono	Valuing Large-Scale Solar Photovoltaics in Future Electricity Generation Portfolios and its Implications for Energy and Climate Policies (VITHAYASRICHAREON e MACGILL, 2016)
Modelar os custos anuais de geração da indústria, a matriz de combustíveis e as emissões de CO ₂ para cada possível portfólio de geração	Valuing Large-Scale Solar Photovoltaics in Future Electricity Generation Portfolios and its Implications for Energy and Climate Policies (VITHAYASRICHAREON e MACGILL, 2016)
Modelar o fluxo de potência probabilístico	Valuing Large-Scale Solar Photovoltaics in Future Electricity Generation Portfolios and its Implications for Energy and Climate Policies (CONSTANTE-FLORES e ILLINDALA, 2019)
A SMC é aplicada para criar um perfil de comportamento residencial (modelar curva de geração/carga), combinado com o modelo uma rede trifásica, incluindo fluxo de potência, harmônicas e efeitos de cargas motrizes	A Monte Carlo Simulation Platform for Studying Low Voltage Residential Networks (TORQUATO, SHI, <i>et al.</i> , 2014)
Modelo de avaliação quantitativa da flexibilidade do sistema de potência	Planning of Flexible Power Sources in Power Distribution Systems With High Penetration of Dispersed Generation (SUN, TIAN e JIA, 2017)

Fonte: (Do autor).

A aplicação da SMC demanda a estratificação da variável ou das variáveis em simulação, de acordo com a probabilidade de ocorrência de cada cenário, intervalo ou patamar de valores. Essa modelagem comumente é feita por meio do uso de PDFs, que descrevem a probabilidade de ocorrência dos termos da variável (SAUSEN, 2017). De modo que a totalização das probalidades corresponde a 100% dos casos. As PDFs do tipo normal são as mais amplamente empregadas em trabalhos que modelam a irradiância solar, por exemplo (TORQUATO, SHI, *et al.*, 2014) e também na modelagem probabilidade de ocorrência de patamares de carga elétrica na rede (SOROUDI, AIEN e EHSAN, 2012).

As PDFs do tipo Weibull e Beta também encontram aplicação no tratamento de variáveis como a velocidade do vento e a irradiação solar (SOROUDI, AIEN e EHSAN, 2012). A irradiância solar, que é determinante para estimar a geração em um SFV, também tem seu comportamento descrito probabilisticamente pela estimativa de densidade de Kernel (CONSTANTE-FLORES e ILLINDALA, 2019). A distribuição uniforme não gaussiana e a

distribuição de probabilidade discreta caracterizam, respectivamente, o comportamento das grandezas demanda de carga e localização da GD (CONSTANTE-FLORES e ILLINDALA, 2019).

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi contextualizado o sistema elétrico brasileiro e sua organização, a matriz energética nacional, também foram apresentadas novas fontes que vêm adentrando na expansão da geração, sendo caracterizada a modalidade de GD.

Os sistemas de geração alternativa foram abordados, apresentando suas principais características, avanços no mercado, potencialidades e estudos que vem sendo realizados sobre o tema. Discutiram-se também os principais aspectos da RN nº 687 de 2015, a qual alterou a RN nº 482 de 2012, e estabeleceu as condições gerais para a instalação de sistemas de geração alternativos distribuídos e modificou os prazos no sistema de compensação de energia. Assim, ficou estabelecido o conceito de geração distribuída, suas características e potencialidades, enfatizando na geração distribuída do tipo fotovoltaica.

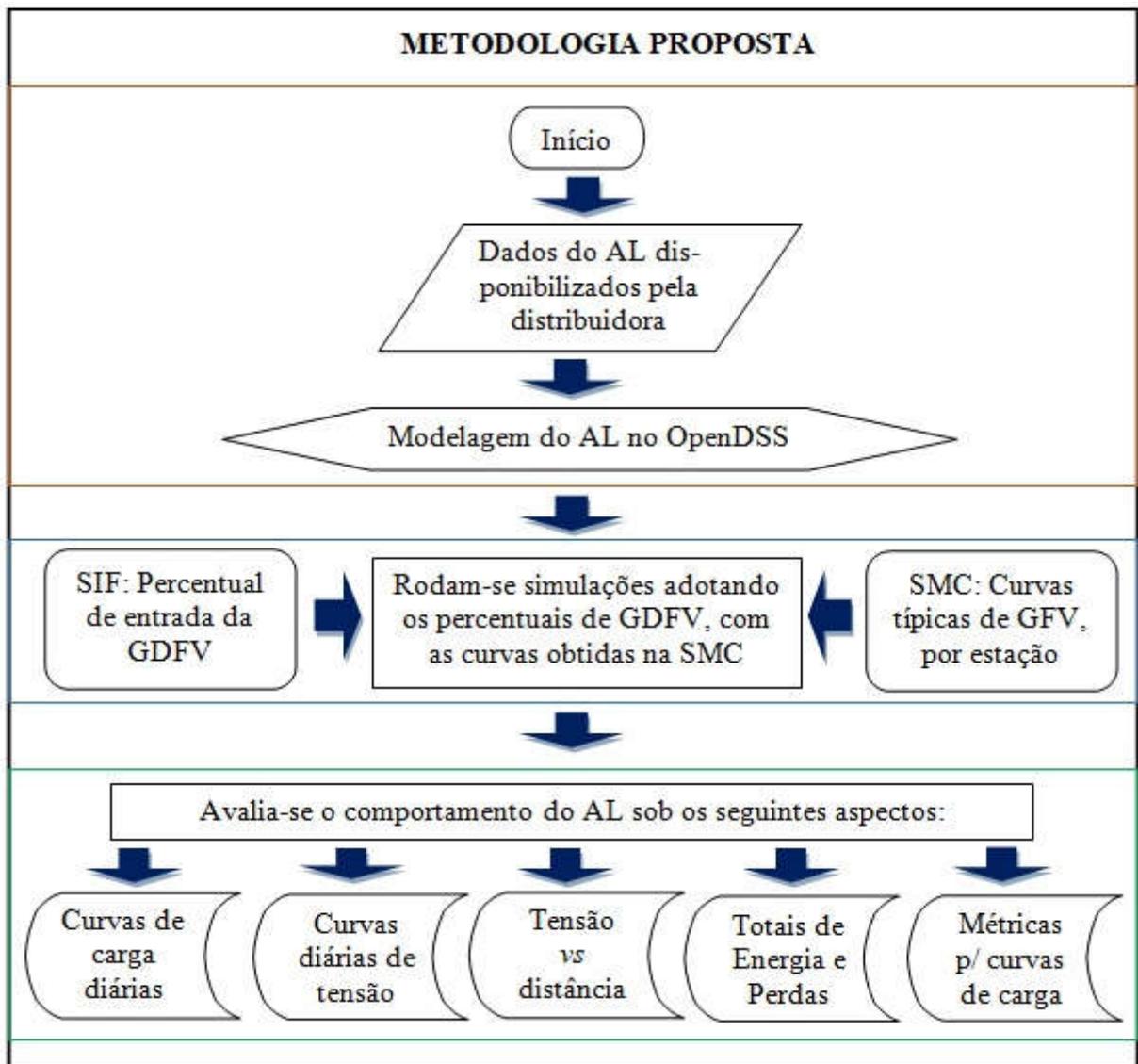
Em uma linha a pesquisa teve foco nos estudos de impactos, simulações e avaliações de sistemas elétricos com a entrada da GFV. Enquanto, em um segundo segmento abordou-se quais os principais métodos e técnicas que vêm sendo trabalhados para estimar o montante de energia que um SFV é capaz de gerar, sob as mais variadas condições. Também foram detalhados programas, recursos e técnicas que permitem trabalhar a integração da GDFV.

Como o objetivo dessa dissertação é analisar o comportamento de um sistema de distribuição frente à entrada da GDFV, conclui-se que a busca referencial realizada foi determinante para embasar o conhecimento sobre os SFVs e, portanto, caracteriza e conduz à abordagem desenvolvida nos próximos capítulos.

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do estudo é preciso definir as etapas que serão executadas, e também estabelecer e conhecer as ferramentas que serão utilizadas nas modelagens e simulações, para alcançar os objetivos traçados. Assim, para verificar como um SED se comportará com a entrada da GDFV é preciso modelar cenários para a realização de simulações, uma vez que não é viável a efetivação real/prática do trabalho. A Figura 14 mostra o fluxograma da metodologia proposta de forma a evidenciar as etapas e os processos que serão realizados até a obtenção dos resultados.

Figura 14 – Metodologia proposta para o desenvolvimento do estudo.



Fonte: (Do autor).

Para avaliar a influência da GDFV no SED, conforme a Figura 14, primeiramente modela-se um alimentador real em um *software* para posteriormente agregar montantes de GDFV em determinados pontos da rede. Tais pontos são escolhidos com base nos consumidores que apresentam maior poder econômico para investir nos SFVs. Desta forma, a primeira etapa consiste na modelagem da rede piloto no ambiente computacional.

Para isso, escolheu-se o *software* OpenDSS, pois foi desenvolvido para modelar e rodar simulações em SEDs, e seu uso é bastante difundido na literatura. Sua aplicação nessa dissertação se justifica pela presença de recursos, tais como a integração da GD aos sistemas tradicionais, modelagem de cargas a partir de curvas de cargas típicas e análise do comportamento dinâmico diário da rede. Portanto, utiliza-se o OpenDSS para modelar todo o SED, compreendendo as cargas, os transformadores, as redes e a GDFV.

A segunda etapa consiste em estimar a probabilidade de integração da GDFV, em criar curvas sazonais típicas de GFV, e rodar simulações na rede. Assim, a lógica *fuzzy* é utilizada para avaliar a parcela de consumidores que, ao longo do tempo, poderão aderir à GDFV. Isto é, estima-se a probabilidade dos consumidores se interessarem pelos SFVs. O SIF desenvolvido tem a entrada composta por 5 variáveis de caráter técnico-econômico. Sendo que cada variável de entrada é composta por 3 funções de pertinência, que a descrevem quantitativa e qualitativamente. Na defuzzificação do SIF, encontra-se a quantidade de GDFV que será inserida na rede. Esta parcela é tomada como uma porcentagem do total de consumidores do alimentador, cuja faixa de saída varia de zero a 1, e cada intervalo corresponde a um percentual de entrada da GDFV.

A partir de um SFV real, com 1 kWp de potência, situado na mesma região onde está localizada a concessionária desse estudo, é estimada a energia média gerada com base em medições diárias ao longo de um ano. Assim, a GFV é modelada adotando o valor de potência instalada associado a uma curva de GFV típica diária. Essas curvas de GFV são obtidas por meio da SMC, a qual é aplicada ao conjunto de dados obtidos pelas medições. Os dados são estratificados por estação anual, de forma a se obter perfis de GFV sazonais típicos. A inserção da GDFV é baseada nos percentuais encontrados a partir do SIF.

A terceira etapa da metodologia consiste em avaliar como a rede se comporta com os diferentes cenários de integração da GDFV. Essa avaliação da integração de GDFV é feita considerando os seguintes critérios: análise das curvas de carga e de tensão diárias na saída do alimentador, dos perfis de tensão vs distância ao longo do alimentador, da avaliação da

energia total drenada do alimentador, da análise das perdas na rede, e por fim, da mensuração das novas curvas de carga a partir de métricas presentes na literatura técnica para a avaliação dos impactos causados pela GDFV. Todas as medições e análises acima mencionadas são aplicadas aos resultados das simulações, considerando que o estudo abrange as 4 estações do ano, e as curvas de cargas dos consumidores estão separadas em dias úteis e finais de semana.

A avaliação das novas curvas de carga no alimentador permite identificar a redução de fluxo durante o dia, os períodos de maior GFV, se houve em algum momento fluxo de potência reverso, como estão as variações horárias no fluxo de potência, ou seja, se há pouca, média ou grande variações. Já a análise dos perfis de tensão na saída do alimentador e ao longo da rede, permite identificar se houve períodos em que os níveis de tensão aceitáveis foram violados, e como a GDFV interfere nos níveis de tensão desde a saída do alimentador até as cargas mais distantes.

As medições da energia total diária consumida do alimentador permitem mensurar a quantidade da energia diária que pode ser localmente gerada pela GDFV. Já na análise das perdas, pode-se avaliar qual a contribuição dos SFVs para a sua redução ou aumento. Além disso, pode-se verificar em quais cenários (dia útil ou final de semana, estações anuais e percentuais de entrada da GDFV) obtêm-se os níveis mais baixos de perdas.

Por fim, as novas curvas de carga são avaliadas sob critérios quantitativos, isto é, são aplicadas métricas, difundidas na literatura técnica, que ponderam sobre as variações no fluxo de potência decorrentes da participação da GDFV.

3.1 MODELAGEM DAREDE DE MÉDIA TENSÃO–*SOFTWARE* OPENDSS

A rede de uma concessionária é composta por um conjunto de redes de média e baixa tensão, transformadores e demais dispositivos de proteção e manobra (KERSTING, 2001). A modelagem de todos estes elementos em um único arquivo não é interessante e, devido à quantidade de elementos, pode ocasionar erros, por parte do usuário. Então, para tornar o processo mais seguro e fluído, decidiu-se pela modelagem de cada conjunto de elementos da rede em arquivos separados. Para simular a rede, todos os arquivos modelados individualmente são redirecionados para um arquivo principal, no qual se configuram os parâmetros para a simulação, as medições e a apresentação e exportação dos resultados (OCHOALUIS e QUIROS-TORTOS, 2015; DUGAN, 2013).

Para a modelagem da rede de média tensão no OpenDSS foram adotados alguns critérios e simplificações. Suprimiu-se a modelagem da rede de baixa tensão (BT), uma vez que as impedâncias de redes muito curtas não são significativas, pois as redes secundárias, por padrão, não devem ter extensão maior que 250 m nas redes de 220 V ou maior que 150 m em redes de 127 V (CEEE-D, 2013, p. 12). Por essa razão, a impedância equivalente das redes em BT pode ser desprezada na modelagem. Portanto, no modelo de rede, as cargas são conectadas diretamente no lado de BT em cada transformador.

Os transformadores são modelados de acordo com o número de fases, monofásicos ou trifásicos, e com a indicação das barras entre as quais ele está conectado. Ao modelar, cada transformador, o poste é considerado como sendo duas barras, uma no lado de MT, outra no lado de BT, também é necessário informar ao OpenDSS o tipo de ligação (delta/Y) e as tensões no lado de MT e no lado de BT, a potência (kVA) do transformador e sua reatância percentual entre a MT e a BT.

Na caracterização das cargas, cada consumidor é modelado com um valor de carga média horária, obtido a partir do seu histórico anual de consumo, sendo do tipo potência constante. Como a demanda da carga não é estática no tempo, pois varia durante o dia, optou-se por trabalhar com curvas de carga diárias típicas, para verificar o comportamento dinâmico da rede. Essas curvas de carga utilizadas são resultantes de campanhas de medições rotineiras realizadas pela concessionária. Assim, na modelagem das cargas, estas são representadas por um valor de demanda médio que varia em conformidade com a curva de carga típica adotada (KAGAN, OLIVEIRA e ROBBA, 2010). A partir desse banco de dados, foi possível montar perfis de carga típicos para os diferentes períodos semanais (dia útil e final de semana).

Uma curva de carga típica deve representar uma parcela de sua classe de consumidores e faixa de consumo (ou ramo de atividade) com base na demanda média, que diz respeito à relação entre a quantidade de energia elétrica (kWh) consumida durante certo período de tempo e o número de horas desse período, conforme descrito por (4) (KAGAN, OLIVEIRA e ROBBA, 2010).

$$D_{méd} = \frac{1}{24 \times 30} \int_0^{720} d_i dt = \frac{\varepsilon}{720} \text{ (kW)} \quad (4)$$

onde:

d_i = representa a demanda instantânea (kW) no tempo i ;

ε = representa o consumo mensal (kWh);

$D_{méd}$ = corresponde à demanda média (kW).

O valor da demanda, $D(t)$, em qualquer instante do dia, pode ser obtido conforme a expressão (5):

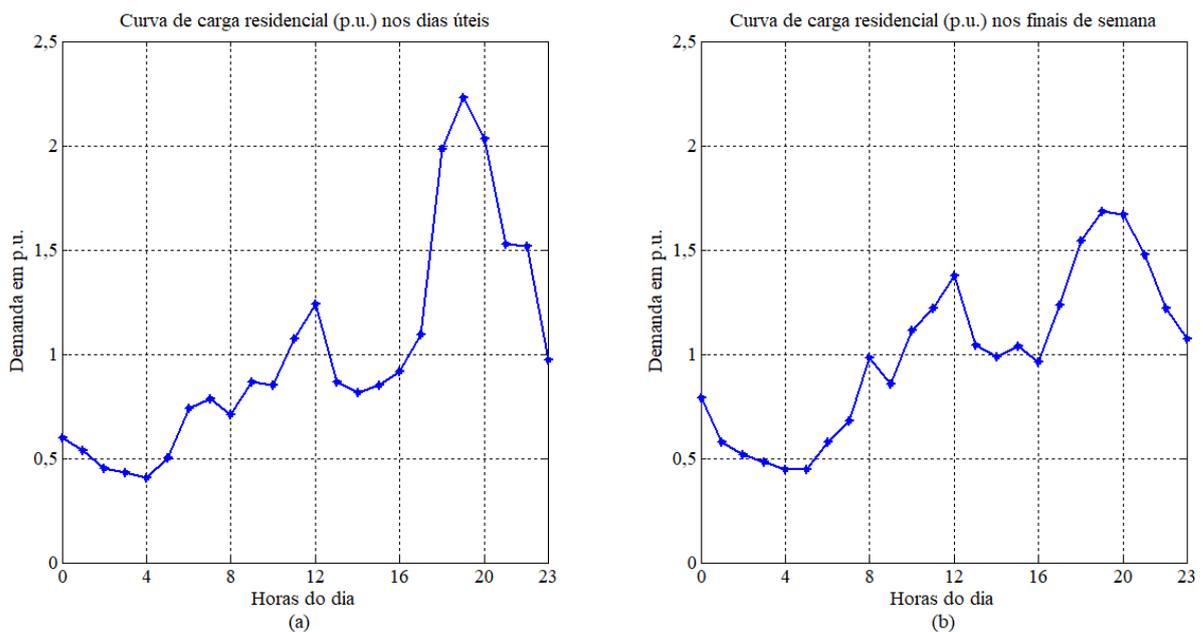
$$D(t) = D_{méd} \times d(t) \quad (5)$$

onde:

$d(t)$ representa a demanda em por unidade (p.u.) da curva de carga típica.

De acordo com Kagan, Oliveira e Robba (2010), essa metodologia é bastante utilizada para o tratamento da carga, pois oportuniza o conhecimento do formato da curva, o fator de carga médio e os horários em que acontecem as demandas máximas em cada classe de consumo. E assim, possibilita avaliar o comportamento da rede e seus níveis de tensão, correntes e fluxo de potência durante períodos, como dias e semanas. Na Figura 15 são mostradas as curvas de cargas típicas, para consumidores residenciais (B1), que são o foco desse trabalho, nos dias úteis e finais de semana.

Figura 15 – Curvas de carga semanais típicas (a) Dias Úteis, (b) Finais de Semana.



Fonte: (Do autor).

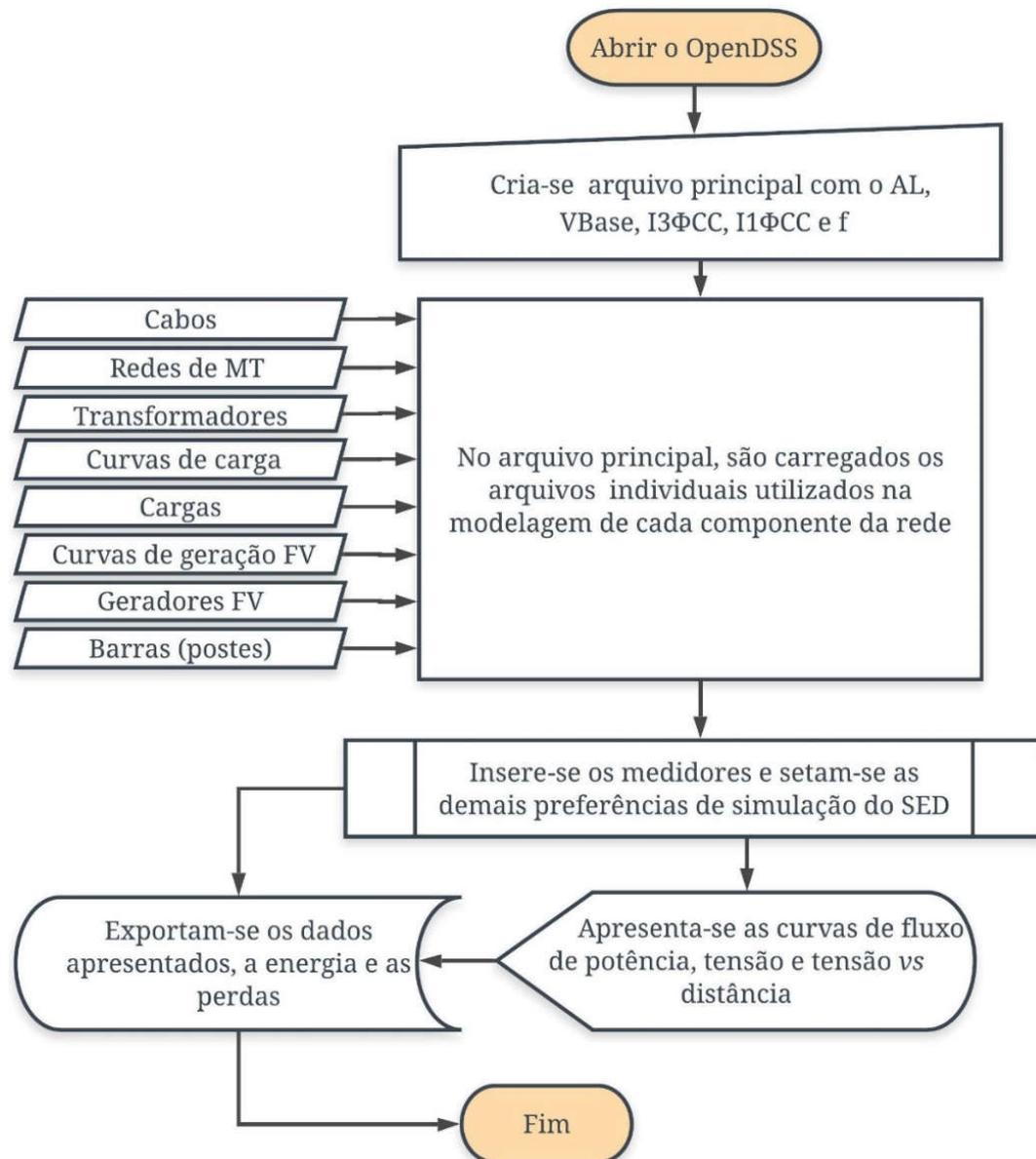
As curvas de carga emulam a variação de demanda dos consumidores durante as 24 horas do dia, contemplando todos os dias da semana. No OpenDSS, as curvas da Figura 15 servem para modelar o comportamento das cargas durante o dia em estudo. Já o fluxo de potência total, observado por hora nas simulações, dependerá da quantidade de cargas conectadas e da intensidade de penetração da GDFV. Além da caracterização das cargas e das suas variações diárias, para completar a modelagem, deve-se indicar como estas estão conectadas à rede (Y ou delta), a tensão de atendimento, o número de fases e a indicação de quais fases são utilizadas para a ligação.

Conforme Dugan (2016) avalia, ao modelar redes de distribuição no OpenDSS, é mais efetivo e prático fazer o levantamento prévio dos tipos de cabos presentes no alimentador que será modelado. Identificando os cabos presentes nas linhas, pode-se modelá-los em arquivo separado, como códigos de linha (*line code*). Cada código de linha é nomeado com o tipo de cabo, apresentando o número de fases, com a matriz de impedância construída a partir dos parâmetros geométricos da rede ou dos valores de resistência e reatância de sequência positiva e zero, em ohm/km. Na modelagem dos códigos de linha, nesse trabalho, utilizam-se os valores de resistência e reatância de sequência positiva e zero, que são disponibilizados pela concessionária. Para redes equilibradas, conforme Kersting (2001), a reatância de sequência negativa é igual à de sequência positiva. Portanto, para o OpenDSS é suficiente a informação dos valores de reatâncias sequência positiva e zero (DUGAN, 2016).

Uma vez modelados os códigos de linha, referentes a cada tipo de cabo e topologia da rede, pode-se modelar cada trecho da linha, nomeando-a e informando a quais barras estão conectadas, o número de fases, o código de linha e a extensão do trecho, com a respectiva unidade de medida (m ou km). As barras são modeladas no OpenDSS a partir de dois dados, que são a numeração e o par das coordenadas geográficas, da abscissa e da ordenada (X e Y), da localização da barra. Essa localização é baseada nas coordenadas geográficas dos postes que são vistos como barras pelo programa.

A GDFV possui modelagem parecida à das cargas, se diferindo, porém, por ser modelada como uma carga negativa. As diferenças consistem na mudança do tipo de elemento de carga para gerador e nas curvas típicas de geração, por estação do ano. O percentual de entrada e as curvas típicas de GFV diárias são obtidos, respectivamente, a partir de um SIF e da SMC, conforme serão abordados no decorrer desse capítulo. Na Figura 16 é exibido o fluxograma dos passos seguidos durante a modelagem do alimentador no OpenDSS.

Figura 16 – Fluxograma da modelagem do alimentador no OpenDSS.



Fonte: (Do autor).

Nesse fluxograma é mostrado, de forma resumida, como é definido o circuito do alimentador e as características, como: frequência, tensões e níveis de curto-circuito trifásico e monofásico na barra de saída do alimentador. Em seguida são carregados os demais elementos, modelados em arquivos separados no formato .txt, que fazem parte do circuito, tais como: redes de MT, transformadores, cargas e curvas de cargas típicas, perfis de GFV e coordenadas geográficas das barras. Tendo a rede carregada no OpenDSS, define-se o modo de simulação, as medições a serem feitas e os resultados que se deseja apresentar e exportar.

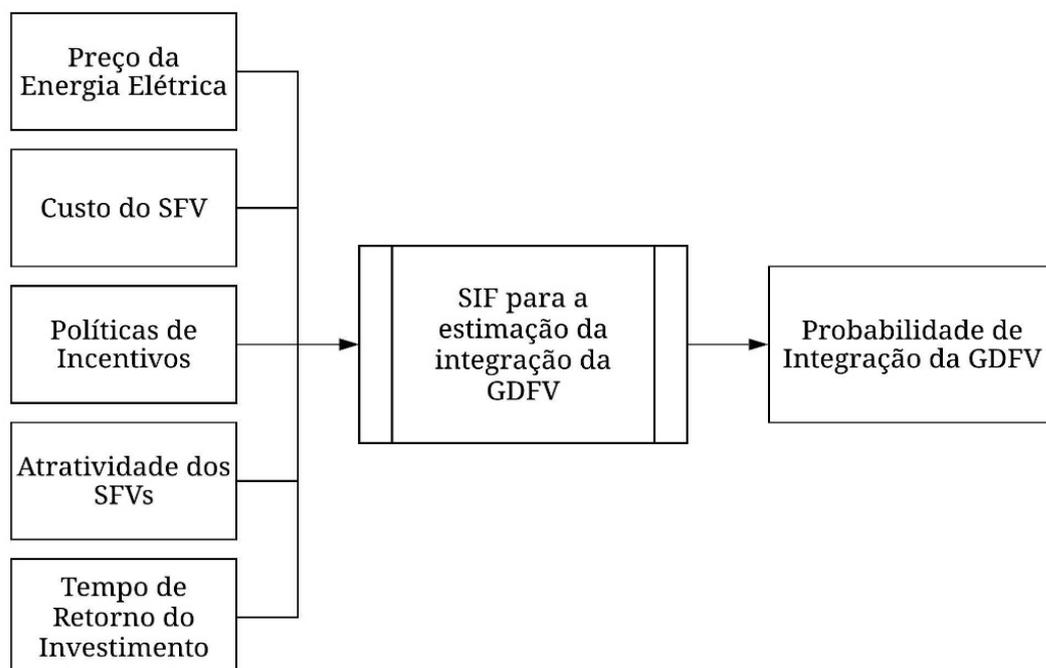
3.2 INSERÇÃO DA MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA – LÓGICA FUZZY

Na avaliação de como os SFVs poderão impactar no SED, é preciso, além do conhecimento integral da rede, uma estimativa confiável dos níveis de GFV que será integrada. Esse conhecimento, no entanto, não é de posse da concessionária, uma vez que a decisão sobre a instalação da GDFV é tomada pelo consumidor. Para contornar esse problema, ou então, torná-lo tratável do ponto de vista técnico, é preciso lançar mão de algum recurso ou ferramenta que permita a estimação dos adotantes.

A lógica *fuzzy* se apresenta como um recurso interessante na tratativa da previsão da entrada dos SFVs no SED. Conforme trabalhado por Pei Zhai (2012), é possível discriminar o interesse dos consumidores pela GDFV, a partir de modelagem de fatores que propiciam ou dificultam o surgimento do interesse. Portanto, se torna natural a escolha pela aplicação de conjuntos *fuzzy* na modelagem do grau de interesse dos consumidores pelos SFVs.

Neste sentido, com o intuito de estimar a probabilidade de entrada da GDFV na rede de distribuição, determinaram-se 5 variáveis de entrada do SIF, são elas: preço da energia, custo dos SFVs, políticas de incentivo, atratividade dos SFVs e tempo de retorno do investimento, conforme apresentado na Figura 17.

Figura 17 – SIF para determinar o percentual de entrada da GDFV.



Fonte: (Do autor).

O embasamento teórico previamente realizado para aplicação da lógica *Fuzzy* nessa dissertação é apresentado no Apêndice A. Para melhorar a visualização da resposta do SIF, com a variação individual nas variáveis de entrada, todos os parâmetros das variáveis de entrada são normalizados pelo valor máximo do conjunto que descreve o seu universo de existência.

3.2.1 Modelagem das variáveis de entrada do SIF

a) Preço da Energia Elétrica (\$/kWh)

A energia elétrica, consolidada como bem essencial na sociedade contemporânea, está com suas fontes de geração passando por diversas transformações no cenário nacional. Houve, nos últimos anos, aumento da geração proveniente de fontes renováveis, principalmente a partir de plantas eólica e de biomassa. Passou-se também por uma intensa redução nos índices de afluência no ano de 2014, ocasionado uma crise hídrica no país. E, no decorrer desses anos, o conceito de geração descentralizada começou a ganhar credibilidade, principalmente após o lançamento da RN 482 em 2012, fomentando a participação da GDFV. Também se verificou recentemente, a ocorrência de consecutivos aumentos nas tarifas de energia elétrica no Brasil. Conforme dado no Quadro 6, de 2013 a 2017, para o consumidor residencial, o preço médio do MWh aumentou em 59% (EPE, 2018).

Quadro 6 – Tarifas Médias por Classe de Consumo (R\$/MWh).

Classes	2013	2014	2015	2016	2017	$\Delta\%$ (2017/2013)
Residencial	285,24	305,35	427,89	454,33	453,56	59,0
Industrial	223,19	249,01	374,93	392,94	396,95	77,9
Comercial	269,85	293,07	415,67	444,78	446,71	65,5
Rural	167,62	184,91	257,05	266,98	278,42	66,1
Poder Público	286,11	305,97	421,51	455,18	457,97	60,1

Fonte: Adaptado de: (EPE, 2018).

Para nortear como os SFVs poderão ganhar participação entre os consumidores residenciais, tomou-se como uma das variáveis de entrada do SIF, a variável denominada *Preço da Energia Elétrica*, para qual se adotaram três subconjuntos *fuzzy*: **Baixo**, **Atual** e **Alto**. Para essa variável é considerado um universo de análise representado pelo conjunto $[0, 1,8]$, de modo que o valor 1 indica o preço atual, e os valores abaixo e acima de 1 indicam,

respectivamente, o barateamento e o acréscimo percentual futuros no custo do kWh (%\$/kWh).

Para essa variável, o universo de análise considerado assume que pode haver conjuntos nos quais o *Preço da Energia Elétrica* pode tanto se reduzir ou aumentar em até 80%. Embora não se tenha perspectivas de grandes reduções na conta de energia, sabe-se que podem ocorrer consecutivos aumentos, como observado no Quadro 6, em que para a classe residencial houve quase 60% de reajuste nos últimos 5 anos. Essas condições extremas são bastante difíceis de ocorrer, assim entre elas há um conjunto intermediário que modela as variações dentro de um cenário mais provável. O Quadro 7 exhibe os tipos de função utilizados e também os parâmetros de cada subconjunto.

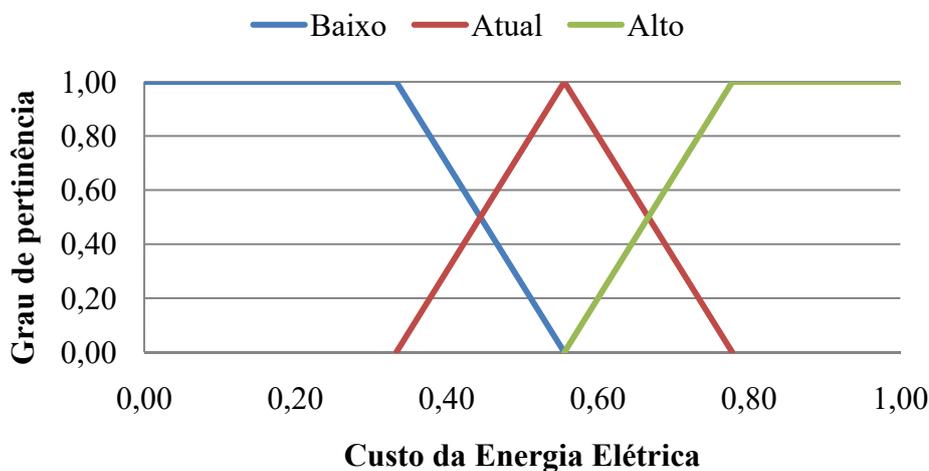
Quadro 7 – Funções e parâmetros dos subconjuntos *fuzzy* definidos para a variável Preço da Energia Elétrica.

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
Baixo	Trapezoidal	0,00	0,00	0,33	0,56
Atual	Triangular	0,33	0,56	-	0,78
Alto	Trapezoidal	0,56	0,78	1,00	1,00

Fonte: (Do autor).

Na Figura 18 apresentam-se os respectivos subconjuntos *fuzzy* para a variável de entrada *Preço da Energia Elétrica*.

Figura 18 – Subconjuntos da variável de entrada *Preço da Energia Elétrica*.



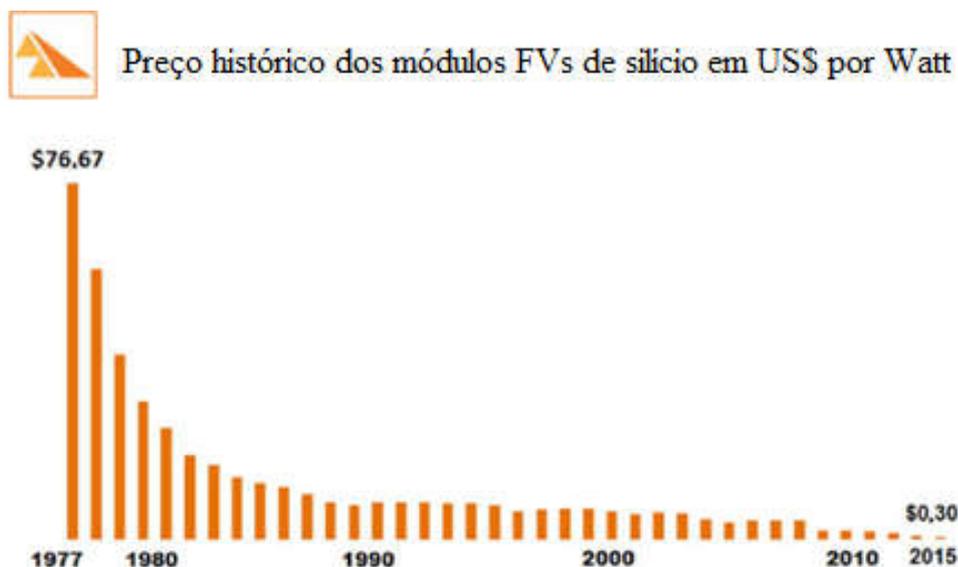
Fonte: (Do autor).

b) Custo do SFV (\$/Watt)

O preço do SFV, que inclui módulos fotovoltaicos (MFVs), inversores e demais dispositivos de interconexão e proteção, é um fator relevante na tomada de decisão dos consumidores pela aquisição da GDFV. No caso brasileiro, as boas taxas de irradiação solar observadas no território nacional, associadas à queda de preço exponencial das tecnologias ligadas à GFV, tornam as possibilidades de disseminação dos SFVs maiores.

Um resumo da queda gradual no preço dos MFVs, durante os últimos 38 anos é mostrado na Figura 19. Fator este que se soma aos demais para contribuir para a ascensão da quantidade de unidades consumidoras com GDFV.

Figura 19 – Preço histórico dos MFVs do ano 1977 a 2015 em dólares por Watt.



Fonte: Adaptado de: (FERREIRA, KUNH, *et al.*, 2017).

Feitas estas considerações para representar a influência do *Custo do SFV* na probabilidade de entrada da GDFV, modela-se tal variável através de três subconjuntos *fuzzy*: **Redução, Atual e Acréscimo**. Para essa variável é considerado um universo de análise representado pelo conjunto $[0, 1,5]$, de modo que o valor 1 indica o preço atual, e os valores abaixo e acima de 1 indicam, respectivamente, um abatimento e um acréscimo percentual no preço do SFV. Na definição do universo de análise, tomou-se como referência a queda íngreme e gradual do preço dos MFVs, que nos últimos 38 anos decaiu em 99,6%. Assim, foi considerado que se houver descontos ou incrementos no preço dos SFVs de até 25%, pode-se

dizer que há a consolidação de uma **Redução** ou **Acréscimo**, respectivamente. O Quadro 8 mostra os tipos de função utilizados e também os parâmetros de cada subconjunto.

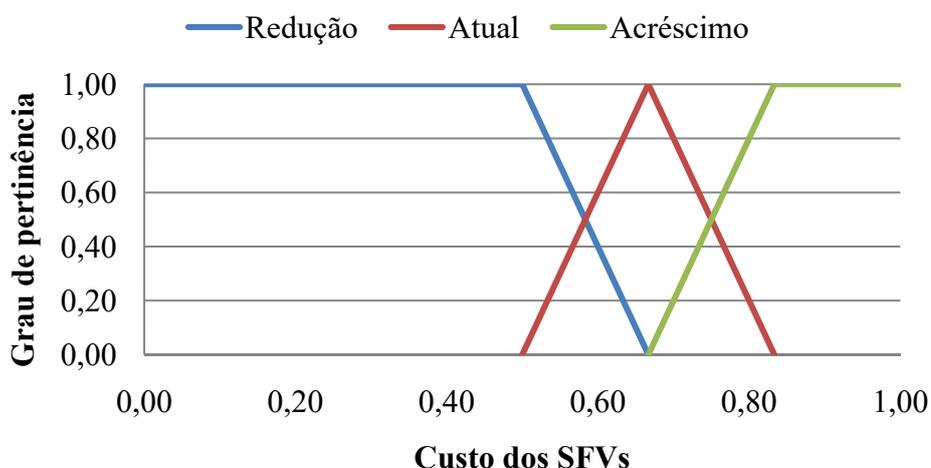
Quadro 8 – Funções e parâmetros dos subconjuntos *fuzzy* definidos para a variável Custo dos SFVs.

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
Redução	Trapezoidal	0,00	0,00	0,50	0,67
Atual	Triangular	0,50	0,67	-	0,83
Acréscimo	Trapezoidal	0,67	0,83	1,00	1,00

Fonte: (Do autor).

Na Figura 20 apresentam-se os respectivos subconjuntos *fuzzy* para a variável de entrada *Custo dos SFVs*.

Figura 20 – Subconjuntos da variável de entrada *Custo dos SFVs*.



Fonte: (Do autor).

c) Políticas de Incentivos

Conforme muitos pesquisadores e investidores apontam, os incentivos à implantação da GDFV ainda são deficitários no Brasil. Acredita-se que poderia haver políticas que garantissem taxas especiais para os adquirentes de SFVs, mudanças na composição das taxas aplicadas à energia compensada, ou seja, aplicação dos impostos federais e estaduais (PIS, COFINS e ICMS) apenas no montante líquido de energia (energia consumida menos a gerada

pelo SFV), redução de barreiras político-burocráticas para as instalações de GDFV (CAMILO, UDAETA, *et al.*, 2017).

Avaliar como a presença de incentivos pode ajudar a energia FV a disseminar-se pelo país não é uma tarefa tão trivial. Sabe-se que a maior incidência de incentivos deve propiciar um aumento no índice de interesse pelos SFVs. Entretanto, os incentivos governamentais podem, muitas vezes, terem pesos diferentes. Isto é, pode haver tipos e abrangência de incentivos que consigam alavancar mais o desenvolvimento da GDFV do que outros. Todavia, para tornar essa variável mais tratável, decidiu-se segmentá-la por número de incentivos. Assim, a variável de entrada *Políticas de incentivos* é representada pelo conjunto $[0, 20]$, o qual compreende três subconjuntos *fuzzy*: **Poucas**, **Média** e **Bastante**. Dessa forma os incentivos, embora muitas vezes tenham pesos diferentes, serão avaliados no SIF pela sua quantidade. Uma vez que, inegavelmente, o crescimento dessa variável deverá estimular a ascensão da presença da GDFV nos SEDs.

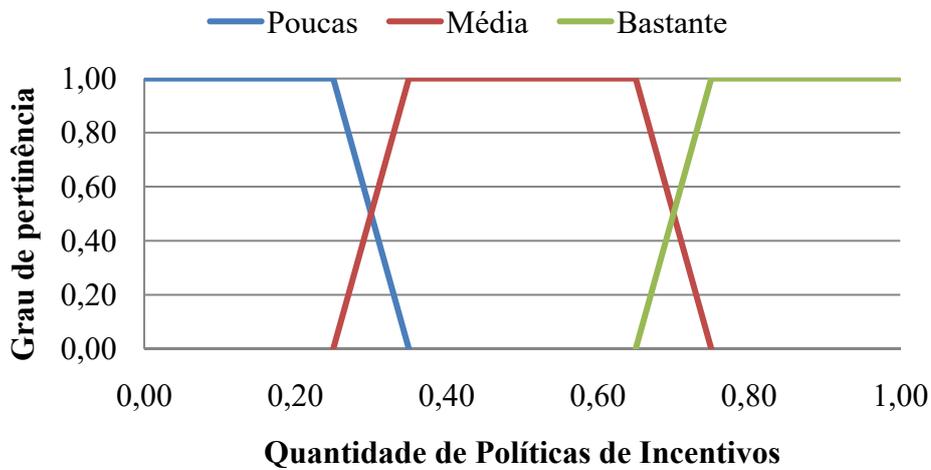
Portanto, definiu-se que uma quantidade de *Políticas de incentivos* menor ou igual a 5 é considerada pouca. Havendo uma quantidade de incentivos maior que 5 e menor que 15, pode-se dizer que existirá um número médio de incentivos. Dentro desse intervalo, torna-se mais provável que, ao menos alguma das políticas criadas desperte o interesse do consumidor pelos SFVs. Definir um teto para a quantidade de *Políticas de Incentivos* implica em adotar um valor para algo imprevisível. Contudo, nesse trabalho adotou-se como 20 o número máximo de incentivos, pois a partir dessa quantidade os impeditivos à adoção da GDFV, se ainda houver, provavelmente não serão mais políticos. No Quadro 9 são mostrados os tipos de função utilizados e também os parâmetros de cada subconjunto.

Quadro 9 – Funções e parâmetros dos subconjuntos *fuzzy* definidos para a variável Políticas de Incentivos.

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
Poucas	Trapezoidal	0,00	0,00	0,25	0,35
Média	Trapezoidal	0,25	0,35	0,65	0,75
Bastante	Trapezoidal	0,65	0,75	1,00	1,00

Fonte: (Do autor).

Na Figura 21 apresentam-se os respectivos subconjuntos *fuzzy* para a variável de entrada *Políticas de Incentivo*.

Figura 21 – Subconjuntos da variável de entrada *Políticas de Incentivo*.

Fonte: (Do autor).

d) Atratividade dos SFVs

A variável *Atratividade dos SFVs* é uma proposta que aborda uma perspectiva para avaliar como o SFV pode ser visto pelos consumidores, como um investimento atrativo. Essa entrada é definida como uma relação entre a energia gerada pelo SFV e a energia média consumida no período mensal, conforme (6):

$$FAT = \frac{EMGFV}{EMCM} \quad (6)$$

onde:

FAT = Fator de Atratividade;

$EMGFV$ = Energia Média Gerada pelo SFV mensalmente;

$EMCM$ = Energia Média Consumida Mensalmente.

O Módulo 3 do PRODIST estabelece que mesmo com sistema próprio de geração, nesse caso o SFV, o consumidor deve pagar mensalmente uma taxa de disponibilidade de: 30 kWh, 50 kWh ou 100 kWh, para ligações monofásicas, bifásicas e trifásicas, respectivamente, mais os impostos (ANEEL, 2018). Em Camilo, Udaeta, *et al.* (2017) apresenta-se que a estimação da GFV média é dada por (7).

$$E = A * r * H * PR \quad (7)$$

em que:

E = Energia (kWh);

A = Área total dos MFVs (m²);

r = Rendimento dos MFVs (%);

H = Irradiação solar média por dia/mês/ano (kWh/m²);

PR = Taxa de desempenho do sistema (%).

A eficiência dos MFVs depende de fatores, dentre eles, da tecnologia empregada no processo de fabricação. De acordo com Sampaio e González (2017) verifica-se que a tecnologia aplicada a módulos do tipo silício policristalino apresenta eficiência de até 20%.

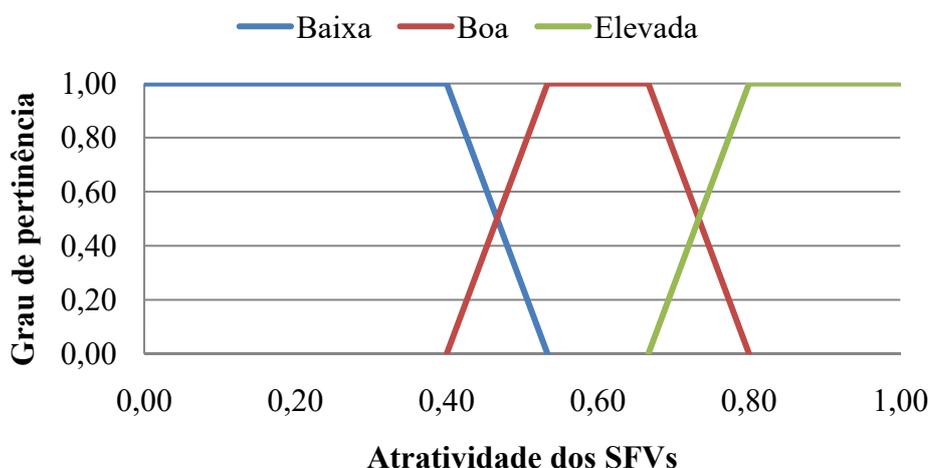
Partindo desse referencial, para a variável *Atratividade dos SFVs* são definidos três subconjuntos *fuzzy*: **Baixa**, **Boa** e **Elevada**. Para essa variável, o universo de análise considerado é representado pelo conjunto [0, 1,5], ou seja, considera-se que pode haver conjuntos, nos quais o FAT pode ir de qualquer valor acima de zero até o valor de geração 50% maior que a média consumida. Essas condições extremas são bastante difíceis de ocorrer, assim entre elas há um conjunto intermediário que modela um cenário mais provável e considerado bom. No Quadro 10 são apresentados os tipos de funções utilizados, bem como os parâmetros de cada subconjunto.

Quadro 10 – Funções e parâmetros dos subconjuntos *fuzzy* definidos para a variável Atratividade dos SFVs.

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
Baixa	Trapezoidal	0,00	0,00	0,40	0,53
Boa	Trapezoidal	0,40	0,53	0,67	0,80
Elevada	Trapezoidal	0,67	0,80	1,00	1,00

Fonte: (Do autor).

Na Figura 22 apresentam-se os respectivos subconjuntos *fuzzy* para a variável de entrada *Atratividade dos SFVs*.

Figura 22 – Subconjuntos da variável de entrada *Atratividade dos SFVs*.

Fonte: (Do autor).

e) Tempo de Retorno do Investimento

Na avaliação do tempo de retorno do investimento é imprescindível embasar a análise em dados palpáveis. Isto é, precisa-se definir um horizonte de tempo de retorno do capital investido, que torne a decisão pela aquisição dos SFVs um negócio lucrativo. Deste modo, entende-se que quanto mais breve for o prazo que o SFV propiciar a quitação do investimento inicial, maiores serão as chances de disseminação da GDFV. Partindo de um ponto de vista técnico-financeiro, verifica-se que os fabricantes estimam que a vida útil de um SFV deva chegar aos 25 anos (CAMILO, UDAETA, *et al.*, 2017). Portanto, o tempo de retorno do investimento só o tornará atrativo se for menor, ao menos alguns anos, que a vida útil do SFV.

Para a variável *Tempo de Retorno do Investimento* são definidos três subconjuntos *fuzzy*: **Bom**, **Aceitável** e **Ruim**. Para essa variável, o universo de análise considerado é representado pelo conjunto $[0, 25]$, ou seja, considera-se que poderia haver conjuntos com até 25 anos de tempo de retorno. O Quadro 11 mostra os tipos de função utilizados e os parâmetros de cada subconjunto.

Quadro 11 – Funções e parâmetros dos subconjuntos *fuzzy* definidos para a variável *Tempo de Retorno do Investimento*.

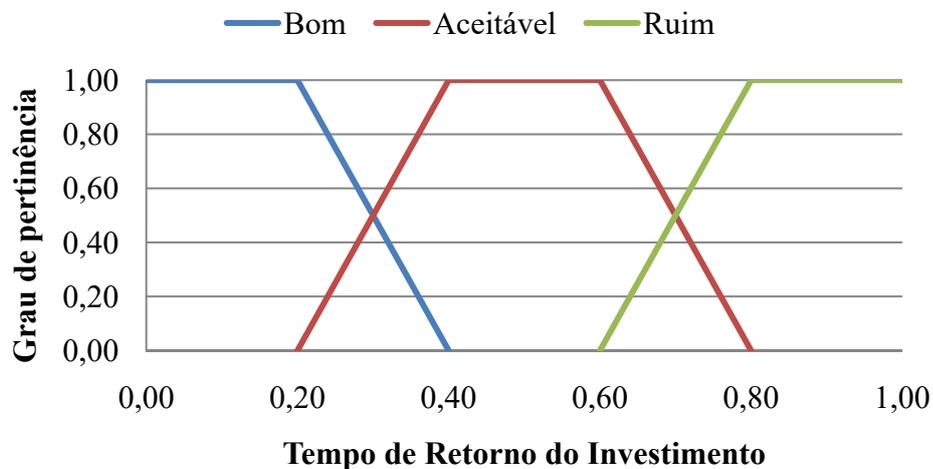
Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
Bom	Trapezoidal	0,00	0,00	0,20	0,40
Aceitável	Trapezoidal	0,20	0,40	0,60	0,80

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
Ruim	Trapezoidal	0,60	0,80	1,00	1,00

Fonte: (Do autor).

A Figura 23 apresenta os respectivos subconjuntos *fuzzy* para a variável de entrada *Tempo de Retorno do Investimento*.

Figura 23 – Subconjuntos da variável *Tempo de Retorno do Investimento*.



Fonte: (Do autor).

3.2.2 Modelagem da base de regras do SIF

A base de regras de um sistema *fuzzy* de múltiplas entradas e apenas uma saída apresenta uma estrutura descrita da seguinte forma, pela expressão (8):

$$SE A \text{ é } A1 \text{ E } B \text{ é } B2 \text{ E } C \text{ é } C3 \text{ ENTÃO } X \text{ é } X1 \quad (8)$$

sendo que A , B e C são as variáveis de entrada; $A1$, $B2$ e $C3$ são alguns dos termos linguísticos dos subconjuntos das respectivas variáveis de entrada; e X e $X1$ correspondem à saída e um dos termos linguísticos (NETO, 2012). Sabendo que a totalidade das regras de um SIF é igual à combinação de todos os subconjuntos das variáveis de entrada, a qual é expressa pelo produto da quantidade de termos linguísticos de cada variável. Portanto, no SIF

desenvolvido, como se têm 5 variáveis de entrada e cada uma é representada por 3 termos linguísticos, o número total de regras possíveis será $3*3*3*3*3 = 3^5 = 243$.

Para a definição do julgamento da regra, isto é, na definição do consequente, é necessário o conhecimento sobre a dinâmica do SIF. Esse conhecimento é, em muitos casos, empírico ou resultante do julgamento baseado na experiência do pesquisador e sua equipe. Desta maneira, pode-se afirmar que também não há critérios e métodos pré-definidos para a determinação do julgamento. Logo, a partir da definição das variáveis linguísticas, o pesquisador define as convenções e critérios que norteiam a avaliação. Para esse SIF, as condições e princípios que direcionam o especialista na definição das regras são:

- Para a variável *Preço da Energia Elétrica* considera-se que quanto mais baixa esta for, menos consumidores tenderão a se interessar em instalar SFVs. Ou seja, haverá uma baixa probabilidade de entrada da GDFV ou percentual de inserção bastante pequeno de aderentes. O contrário a essa premissa também é verdadeiro;
- Para a variável *Custo do SFV* considera-se que quanto mais elevado esta for, menos consumidores se interessarão em adquiri-los. Ou seja, haverá uma baixa probabilidade de entrada ou percentual bastante pequeno de aderentes. O contrário a essa premissa também é verdadeiro;
- Para a variável *Políticas de Incentivos*, adota-se que quanto maior for o fomento ou quanto mais efetivas forem as práticas governamentais em relação à inserção da GDFV, mais provável será que haja sua disseminação entre os consumidores. O oposto a essa premissa também será verdadeiro;
- Para a variável *Atratividade dos SFVs* diz-se que quanto mais elevadas estiverem as tarifas de energia elétrica e mais eficientes se tornarem às tecnologias aplicadas nos SFVs, mais atrativos estes serão. Isto é, haverá mais chances da população se interessar pelo investimento na GDFV. O inverso a estas condições também será verdadeiro;
- Para a variável *Tempo de Retorno do Investimento* tem-se que quanto menor este for, mais consumidores poderão se interessar pelo investimento na GDFV. Isto é, eleva-se a probabilidade de entrada dos SFVs; o inverso dessa afirmativa também é verdadeiro.

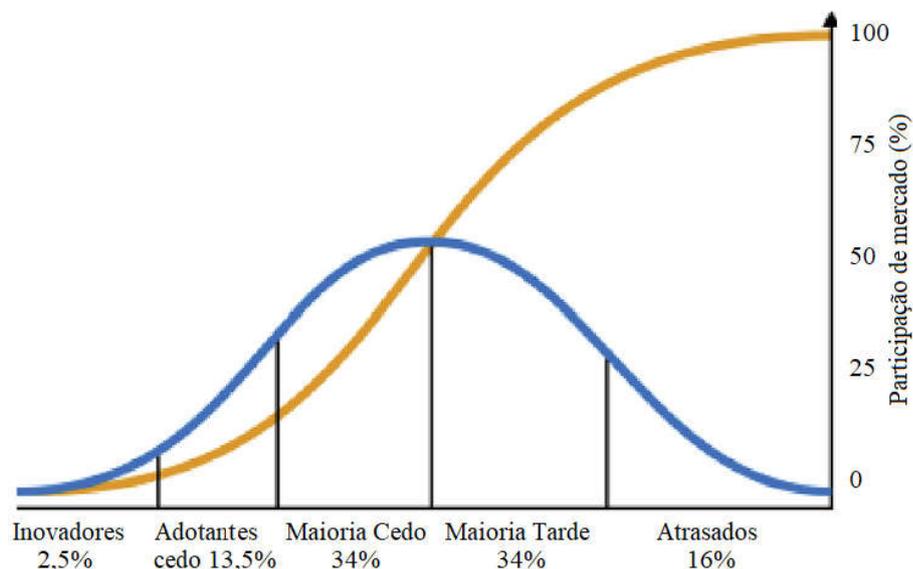
No Apêndice B é exemplificado parte do conjunto total de regras que compõem o SIF no Matlab, e também é apresentado o algoritmo completo do SIF.

3.2.3 Modelagem da variável de saída do SIF

A saída do SIF é denominada de *Probabilidade de Instalação dos SFVs* e deve expressar um índice referente ao grau de possibilidade de os consumidores adquirirem os SFVs. Para definição desse índice, adotou-se como padrão o intervalo de avaliação [0, 1], ou seja, o índice estabelecido pelo controlador *fuzzy* estará definido nesse intervalo. Para fins práticos, este índice de saída está associado a níveis percentuais de penetração dos SFVs.

A escolha dos valores percentuais foi realizada com base em percentuais de entrada dos SFVs adotados em Rosenkranz, Martinez-anido e Hodge (2016), nos percentuais estimados nos cenários de difusão dos SFVs trabalhados por Santos, Canha e Bernardon (2018) e também na curva de adotantes percentuais das inovações apontada por Rogers (1971) na Figura 24. Esta curva mostra a distribuição de frequência normal dividida em cinco categorias de adoção: (1) inovadores, (2) adotantes precoces (cedo), (3) maioria precoce (cedo), (4) maioria tardia e (5) retardatários ou atrasados. Os dados de ação são representados por uma curva cumulativa em forma de S.

Figura 24 – Curvas de adoção da inovação.



Fonte: Adaptado de: (ROGERS, 1971).

Para a saída são atribuídos 5 subconjuntos *fuzzy*: **Improvável**, **Pouco provável**, **Provável**, **Bastante provável** e **Muitíssimo provável**. O Quadro 12 apresenta os tipos de funções utilizados, bem como os parâmetros de cada subconjunto da saída.

Quadro 12 – Funções e parâmetros dos subconjuntos *fuzzy* definidos para a saída do SIF.

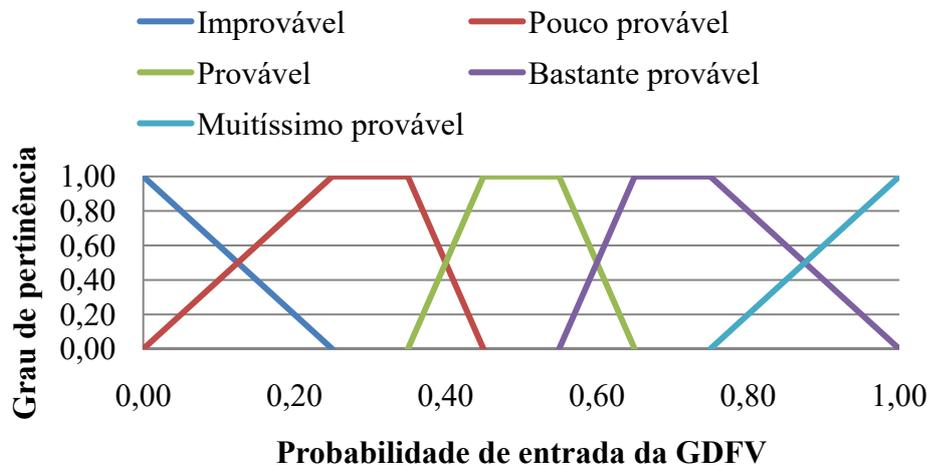
Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
Improvável	Triangular	0,00	0,00	-	0,25
Pouco provável	Trapezoidal	0,00	0,25	0,35	0,45
Provável	Trapezoidal	0,35	0,45	0,55	0,65
Bastante provável	Trapezoidal	0,55	0,65	0,75	1,00
Muitíssimo provável	Triangular	0,75	1,00	-	1,00

Fonte: (Do autor).

Os dados apresentados no Quadro 12 correspondem aos parâmetros necessários para estabelecer as fronteiras de atuação das funções de pertinência triangular e trapezoidal. Os subconjuntos que limitam o universo de avaliação, ou seja, os subconjuntos, **Improvável** e **Muitíssimo provável**, são mais específicos ao realizar a avaliação, ao serem descritos por funções triangulares. Dizendo de outra forma, isso significa que somente em uma situação muito específica, casos extremos, será atribuída a pertinência máxima. Estes casos ocorrem em 0 e 1 para o subconjunto **Improvável** e **Muitíssimo provável**, respectivamente.

Já os subconjuntos intermediários, **Pouco provável**, **Provável** e **Bastante provável**, são representados por funções trapezoidais, fato que os torna mais relevantes na determinação da saída, uma vez que dão mais peso às regras para as quais foram atribuídos e também por cobrirem a maior parte da faixa de saída. Acredita-se que estas condições correspondem à maioria das regras. Cada subconjunto intermediário cobre uma terça parte do restante da saída total, garantindo uma avaliação mais equilibrada das condições de entrada. A Figura 25 apresenta os respectivos subconjuntos *fuzzy* para a saída do SIF.

Figura 25 – Subconjuntos da Saída do SIF.



Fonte: (Do autor).

O SIF criado para avaliar o potencial de entrada dos SFVs no estudo de caso é baseado em 5 variáveis de entrada: Preço da Energia Elétrica (1), Custo do SFV (2), Políticas de Incentivos (3), Atratividade dos SFVs (4) e o Tempo de Retorno do Investimento (5); e tem como saída a probabilidade de instalação do sistema. A saída tem dependência diretamente proporcional às entradas (3) e (4), e inversamente proporcional com as entradas (1), (2) e (5).

3.2.4 Saída do SIF - Defuzzificação

Dentre as alternativas de métodos de defuzzificação possíveis, o selecionado foi o método do centro de gravidade ou centroide, que considera a união das conclusões de todas as regras ativas solucionando a integral de toda a área de saída (ROSS, 2010). O método do centro de gravidade foi selecionado para ser utilizado neste trabalho, por ser o mais predominante na literatura (AZZOUZ, FARAG e EL-SAADANY, 2017; SOROUDI, 2012).

3.3 CURVAS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA – MÉTODO DE MONTE CARLO

A base da SMC é a geração de números aleatórios independentes e uniformes, ou seja, os números sorteados para y pertencem a uma distribuição de probabilidade uniformemente definida entre 0 e 1, sem relação entre si (ZAPATA, 2010). Para a geração destes números,

pode-se utilizar o comando *random* presente no *software* MATLAB, ou então, a função *aleatorio()* presente no Microsoft Excel.

Para a estimativa do número de experimentos, pode-se adotar a Lei dos Grandes Números, a qual descreve que a representatividade de uma amostra depende do número de experimentos que são realizados. Para a SMC, a lei garante que os experimentos de um processo de simulação tenderão a reproduzir a verdadeira probabilidade do evento (ANDRADE, 2011).

Para que a abordagem dessa dissertação seja mais ampla e consiga simular o comportamento da rede com maior fidelidade à inserção real da GDFV, são adotadas curvas típicas de GFV para cada estação do ano. Os dados para confecção das curvas são obtidos por meio de um sistema de medição e testes, de 1 kWp de potência, instalado na UFSM, mesmo estado onde está localizado o alimentador utilizado no estudo de caso (SANTOS, CANHA e BERNARDON, 2018). Este sistema monitora e armazena dados de GFV ao longo dos dias, gerando assim, um banco de dados, o qual é utilizado para as modelagens das curvas típicas de GFV, para cada estação do ano.

Para obter cada curva típica de GFV, utilizaram-se os dados coletados durante os três meses de duração de cada estação, entre os anos de 2016 e 2017. Com amostragens realizadas a cada 5 minutos, constrói-se um perfil de curva de GFV típico, de modo que a potência adotada para cada ponto esteja na faixa com maior taxa de ocorrência provável. Isto é, encontra-se a FDP para o conjunto de dados e, a partir dela, avaliam-se quais os valores mais prováveis de ocorrer dentro de cada intervalo por meio da SMC (ANDRADE, TORQUATO e FREITAS, 2015). A potência adotada será igual ao valor médio do subintervalo com a maior PDF.

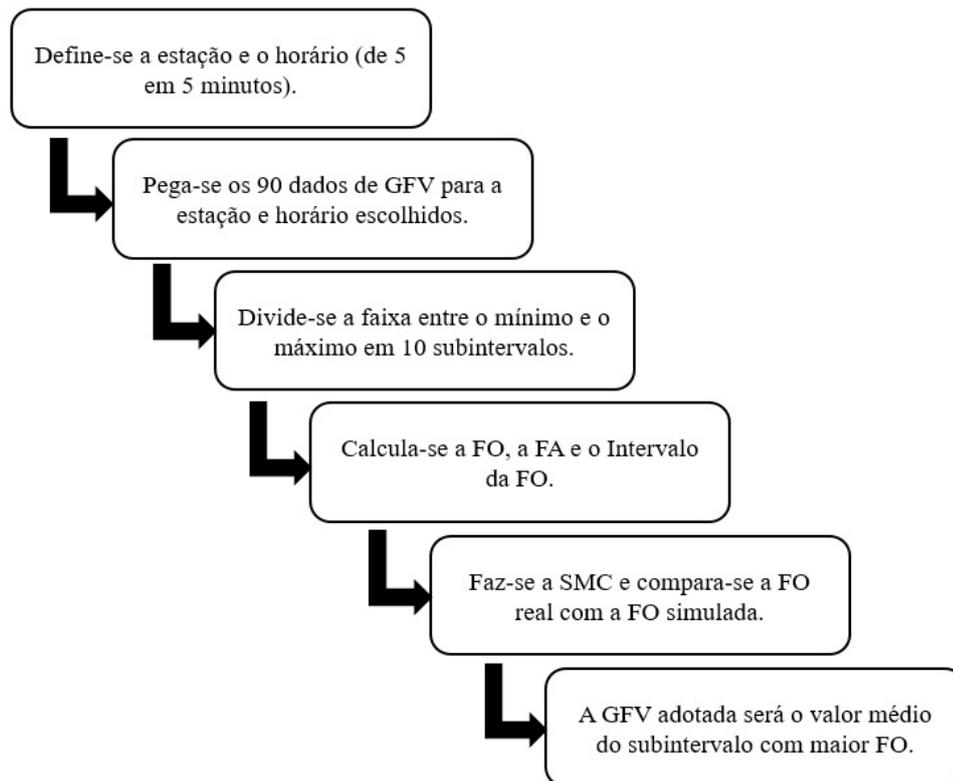
O processo seguido para obter as curvas típicas de GFV segue a mesma linha de raciocínio utilizada em Figueiró (2013), porém com propósitos e objeto de estudo diferentes. O critério de parada adotado é o número pré-definido de iterações, para o qual o erro seja suficientemente pequeno. Conforme se observa na literatura, verifica-se que quantidades de rodadas de simulação superiores a 2 mil já podem ser consideradas satisfatórias, pois a frequência simulada tende a se igualar com a frequência real, reduzindo o erro. Nesse estudo optou-se por adotar uma quantidade de 10 mil simulações, igualmente a adotada em (CONSTANTE-FLORES e ILLINDALA, 2019).

Para melhor elucidar, esse processo pode ser exemplificado da seguinte maneira: primeiramente são obtidos os 90 conjuntos de potência da GFV (correspondentes a uma

estação) para cada ponto (intervalo horário, amostrado de 5 em 5 minutos). A partir destes 90 valores, tomam-se o máximo e o mínimo e se divide o intervalo entre eles em 10 subintervalos iguais. Analisando os dados coletados, pode-se calcular a frequência de ocorrência de cada subintervalo de geração e a frequência absoluta ou acumulada. A frequência de ocorrência dos dados medidos em cada subintervalo foi integralmente respeitada, ou seja, corresponde fielmente ao percentual de dados presentes em cada subintervalo.

A síntese das etapas trabalhadas, desde a mineração dos dados, estratificação por estações do ano, definição do ponto horário, verificação das frequências de ocorrência e absoluta, realização da SMC e adoção do valor de potência é esquematizada na Figura 26.

Figura 26 – Resumo das etapas seguidas na aplicação da SMC.



Fonte: (Do autor).

3.4 CRITÉRIOS E MÉTRICAS APLICADOS NA ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os impactos da integração da GDFV no alimentador são mensurados em termos das variações diárias das grandezas fundamentais para o correto funcionamento do SED. As

grandezas analisadas são: energia drenada, totais de perdas, fluxo de potência, níveis de tensão diários e o perfil de queda de tensão na rede em função da distância. Além desses, são também aplicadas métricas às curvas de fluxo de potência, presentes na literatura técnica, para transcreverem dados numéricos os impactos que a GDFV ocasiona.

Conforme é definido no Módulo 8 do PRODIST, não deve haver violação dos níveis de tensão. Portanto, nessa análise deve-se ter conhecimento dos valores dos níveis de tensão nominal adequados para entrega ao consumidor em 13,8 kV ou 23,1 kV, além dos limites precários e críticos (ANEEL, 2018). Como a rede de BT é suprimida da modelagem, todas as medições realizadas são feitas na MT. Portanto, para que a tensão esteja adequada, os valores lidos nas simulações devem se enquadrar aos limites de referência, expressos no Quadro 13.

Quadro 13 – Pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV.

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL < 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$

Fonte: (ANEEL, 2018).

No estudo também é realizado um levantamento das perdas e da energia diária drenada no alimentador, considerando o caso base, sem a inserção da GDFV, e com a presença de diferentes níveis de penetração, definidos pelo SIF. O objetivo dessa análise é avaliar quais os benefícios ou problemas ao SED atual que a GDFV pode trazer. Por exemplo, a redução das perdas globais de energia, o quanto da energia diária demandada pode ser suprido pela GDFV. Essas análises servem para mensurar como os SFVs podem reduzir ou acentuar perdas e estimar o montante de energia que a concessionária deixará de distribuir ou faturar.

Na avaliação do impacto causado pela entrada da energia fotovoltaica nos SEDs atuais, utilizam-se algumas métricas tradicionais, tais como: Fator de Capacidade (CF), Valor de Capacidade (CV), Razão entre demanda de pico e demanda média. Além dessas, propõem-se alguns fatores quantitativos, como: Redução na Carga Máxima da Rede (RMNL), Faixa de Carga (LR), Mudança na Faixa de Carga (LRC) (LAVE e ELLIS, 2017).

O Fator de Capacidade é definido como a razão entre a energia total produzida ao longo de um período de tempo (1 ano ou 1 dia, por exemplo) e a energia que seria produzida na potência total contínua (isto é, capacidade nominal) durante o mesmo período, sendo

expressa em percentagem, conforme (9). Já o Valor de Capacidade é definido como a média do fator de capacidade durante as 10 horas de maior carga (LAVE e ELLIS, 2017).

$$CF = \frac{\int_{hr=1}^{hr=24} Eg(t)dt}{\int_{hr=1}^{hr=24} Ed(t)dt} \times 100\% \quad (9)$$

onde:

CF = É o fator de capacidade percentual da GFV suprir às cargas;

$Eg(t)$ = Curva da energia fotovoltaica gerada durante o dia;

$Ed(t)$ = Curva da energia total demandada durante o dia;

hr = São as horas, que definem os limites, mínimo e máximo, de integração.

Dentre as novas métricas tem-se a RMNL que é definida como a carga média durante as 10 horas de carga mais elevada (sem GFV) menos a carga média durante as 10 horas de carga líquida (com GFV). Este valor será expresso como uma percentagem da capacidade instalada, conforme dado em (10).

$$RMNL = \frac{\frac{\sum_{hr=1}^{hr=10} CMSGD_{(hr)}}{10} - \frac{\sum_{hr=1}^{hr=10} CMCGD_{(hr)}}{10}}{CV} \quad (10)$$

onde:

$RMNL$ = Redução da carga máxima na rede;

$CMSGD_{(hr)}$ = Maiores cargas na rede sem a presença da GDFV;

$CMCGD_{(hr)}$ = Maiores cargas na rede com a entrada da GDFV;

CV = Valor de capacidade da GDFV;

$hr = 1$ É a primeira hora de carga líquida mais alta (com ou sem GDFV);

$hr = 10$ É a décima hora de carga líquida maior (com ou sem GDFV).

Essas 10 horas podem ser diferentes para a carga líquida com GDFV *versus* carga líquida sem GDFV (LAVE e ELLIS, 2017). A LR é definida como a carga líquida média durante as 10 horas de carga mais alta menos a carga líquida média durante as 10 horas de

carga mais baixa, para o período em consideração (diário, mensal, anual). Esta grandeza é calculada através da expressão (11).

$$LR = \frac{\sum_{hr=1}^{10} CMA_{(hr)}}{10} - \frac{\sum_{hr=1}^{10} CMB_{(hr)}}{10} \quad (11)$$

onde:

LR = Faixa de carga;

$CMA_{(hr)}$ = Cargas mais altas;

$CMB_{(hr)}$ = Cargas mais baixas.

Na mensuração da LRC é avaliada quão “plana” é a curva de duração da carga líquida em relação à carga original. Um gerador que produz energia constante durante todo o ano resultaria em uma $LRC = 0\%$ (ou seja, sem alteração no LR). Valores positivos (0 a 100%) da LRC indicam um aumento na LR (a adição de energia proveniente da GDFV reduz mais a carga líquida mínima do que a carga líquida máxima), uma situação que pode exigir geração mais despachável. A LRC é definida como a diferença entre a faixa de carga líquida (LR) com GDFV e a LR sem GDFV, normalizada pelo valor de capacidade da GDFV instalada, conforme dado em (12).

$$LRC = \frac{LR(CGD) - LR(SGD)}{CV} \quad (12)$$

onde:

LRC = Mudança na faixa de carga;

$LR(CGD)$ = Faixa de carga medida, quando há GDFV presente na rede;

$LR(SGD)$ = Faixa de carga medida, quando não há GDFV presente na rede;

CV = Valor de capacidade da GDFV.

De modo sintético, pode-se dizer que a RMNL representa a quantidade da geração de carga básica que pode ser substituída pela GFV, normalizada pelo valor de capacidade de cada grau de penetração da GDFV. Enquanto que a LRC representa a quantidade adicionada

(ou reduzida para valores negativos LRC) de geração despachável necessária para acomodar a GDFV (LAVE e ELLIS, 2017).

Ainda conforme Shvedov, Chorshanbiev, *et al.* (2018), é interessante avaliar como a entrada da GFV pode mudar o Fator de carga (f_{Load}), o Fator de irregularidade da curva de carga (α), e o Fator de forma da curva de carga (f_{sh}). Tais medidas são definidas, respectivamente, por (13), (14) e (15).

$$f_{Load} = \frac{P_{avg}}{P_{max}} \quad (13)$$

$$\alpha = \frac{P_{min}}{P_{max}} \quad (14)$$

$$f_{sh} = \frac{P_{rms}}{P_{avg}} \quad (15)$$

onde:

P_{max} = Representa a potência máxima no período diário;

P_{min} = Representa a potência mínima no período diário;

P_{avg} = Representa a potência média no período diário;

P_{rms} = Representa a potência eficaz no período diário ou a raiz do valor quadrático médio da potência neste período.

As três métricas, Fator de Carga, Fator de Irregularidade e Fator de Forma, servem de parâmetros para avaliar como a presença da GDFV na rede pode alterar as nuances da curva de fluxo de potência. Isto é, os valores obtidos a partir dos 3 fatores, para o fluxo de potência no caso base, sem a entrada de nenhum percentual de GDFV, são utilizados no estudo de caso como valores de referência. De modo que as variações desses, em virtude da entrada da GDFV, podem ser vistas como positivas ou negativas para o SED em geral.

No caso do Fator de Carga, considera-se que o ideal seria ter um valor mais próximo possível da unidade. Isto significa que a curva de carga é praticamente plana e não há variações na energia demandada diariamente. Considerando que com a entrada dos SFVs,

esse Fator se aproxime de 1, pode-se afirmar que a GDFV trouxe benefícios aos SED. Caso contrário, o valor se aproxime de zero, então se diz que a GDFV não foi tão benéfica à rede.

O Fator de irregularidade tem uma análise parecida com a do Fator de Carga. Sendo preferível o valor unitário. A principal diferença é que a partir de desse fator pode-se verificar se a GDFV causa no SED algum período de carga negativo, ou seja, período com fluxo de potência reverso. O valor zero para esse Fator indica que, no momento de mínima demanda, a GFV foi capaz de atender integralmente às cargas.

O Fator de forma embora tenha avaliação parecida com os outros 2 últimos fatores vistos, apresenta o comportamento inverso ao do fator de carga. Quanto mais invariável a curva de carga permanecer, mais próximo de 1 tenderá o valor desse fator. Já, à medida que a curva ficar mais distorcida, apresentando variações mais bruscas, maior ficará o valor do fator de forma.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi detalhada a metodologia proposta, a qual será utilizada para realização do estudo de caso, apresentado no próximo capítulo. Desta forma, este capítulo constituiu-se de uma explanação sobre como os recursos (*softwares* e métodos) serão utilizados no trabalho. Inicialmente, tratou-se do *software* OpenDSS, que é uma ferramenta para a análise de SEDs e apresenta uma vasta gama de funcionalidades, permitindo ao usuário modelar e simular diferentes tipos de sistemas.

Em seguida, abordou-se a Lógica *Fuzzy*, utilizada para a estimação da probabilidade dos consumidores se interessarem em aderir aos SFVs, em função dos fatores técnicos e socioeconômicos que estimulam ou não à implantação da GDFV. Também se discorreu um pouco sobre o MMC, uma vez que é a partir dessas simulações que se estabelecem as curvas de GFV típicas, utilizadas nesse trabalho, para cada estação anual.

Por fim, foi também abordado como se procederá na avaliação dos resultados no estudo de caso. Explanando assim, como a GDFV influi no comportamento das curvas diárias de fluxo de potência e nos perfis de tensão no alimentador. Além disso, foram apresentadas métricas e discutidas suas respectivas significâncias na avaliação dos impactos que a GDFV causa na rede elétrica de distribuição.

4 ESTUDO DE CASO E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo é apresentada a maneira como a metodologia proposta, capítulo 3, é utilizada para a modelagem da rede de distribuição, na aplicação do SIF desenvolvido para estimação da probabilidade de integração da GDFV e na estimação das curvas típicas sazonais de GFV a partir da SMC. Utiliza-se como estudo de caso um dos sete alimentadores que compõem o sistema de distribuição completo da concessionária da região piloto.

4.1 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Adota-se como base a rede do Departamento Municipal de Energia de Ijuí (DEMEI), empresa prestadora de serviços de distribuição de energia localizada no município de Ijuí-RS. No total, têm-se 2 subestações, uma com 3 e outra com 4 alimentadores. O alimentador adotado nesse estudo de caso tem capacidade de fornecer 10 MVA e possui cargas consumidoras tipicamente residenciais, cuja caracterização se dá conforme o Quadro 14.

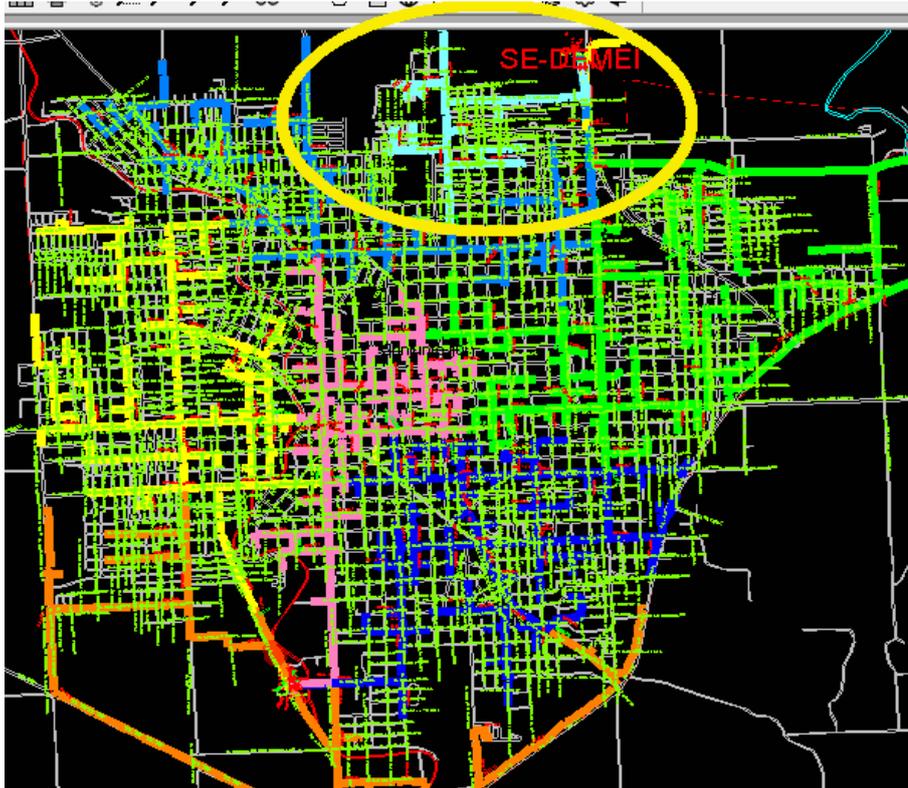
Quadro 14 – Características do alimentador estudado.

Alimentador Demei 314					
Total de consumidores monofásicos		1961			
Total de consumidores bifásicos		17			
Total de consumidores trifásicos		59			
Total de transformadores trifásicos		25			
Potência dos transformadores (kVA)	30	75	112,5	150	300
Tipos de cabos usados na rede de MT	1/0CAA	185CA	2CAA	4CAA	477CA
Extensão da rede MT (km)		6,5			
Potência do alimentador (MVA)		10			
Corrente de curto circuito trifásico na subestação (A)		4955,38			
Corrente de curto circuito monofásico na subestação (A)		6783,34			
Tensão de linha (kV)		23,1			
Quantidade de postes		216			
Quantidade de bairros		13			

Fonte: (Do autor).

Essas características do alimentador, denominado Demei 314 (AL – DEMEI 314), são utilizadas para a modelagem do mesmo no OpenDSS, seguindo os caminhos propostos na Figura 14 da Metodologia. O alimentador 314 está destacado pela elipse na Figura 27, que apresenta a rede de média tensão do DEMEI.

Figura 27 – Rede de Média Tensão do Demei.



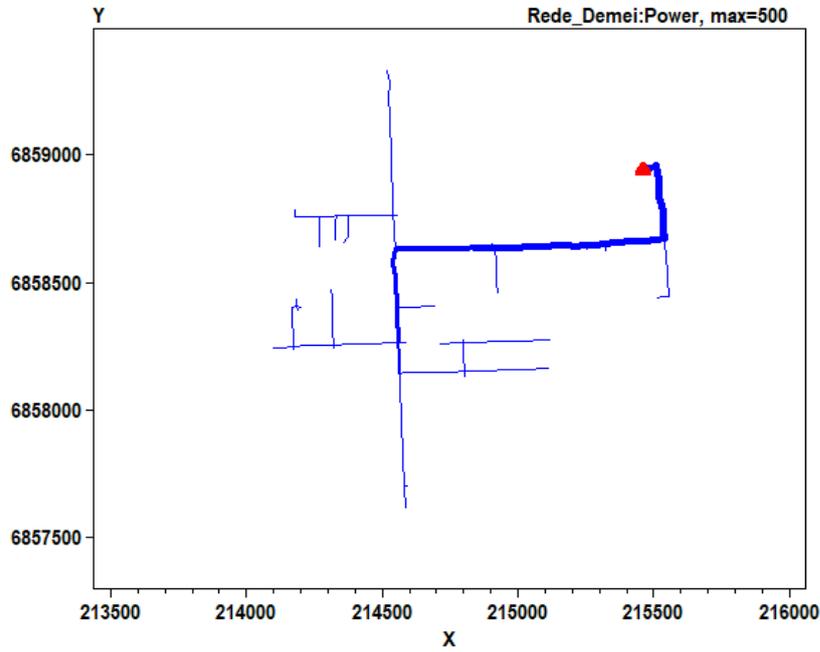
Fonte: (Do autor).

Esse alimentador foi tomado para o estudo de caso, pois apresenta todas as características demandadas à realização do trabalho, como: ser majoritariamente composto por consumidores residenciais, apresentar cabos e transformadores dos tipos e potências mais comumente empregados na distribuição, estar situado em uma região onde as taxas de irradiação solar são propícias à instalação de SFVs (médias próximas aos 5 kWh/m²/dia) (GROUP, 2016). E também, por agilizar a modelagem do alimentador devido a curta extensão do referido.

Na Figura 28 é mostrado o AL – DEMEI 314, modelado no OpenDSS, antes da inserção da GDFV, em dias úteis, às 13h00min. O triângulo, em vermelho, representa a subestação e as linhas azuis, a rede de MT deste alimentador. Os trechos com linhas mais

espessas indicam que por ali há carregamento mais acentuado, corrente de 8,7 A na saída do alimentador.

Figura 28 – Alimentador Demei 314, modelado no OpenDSS.

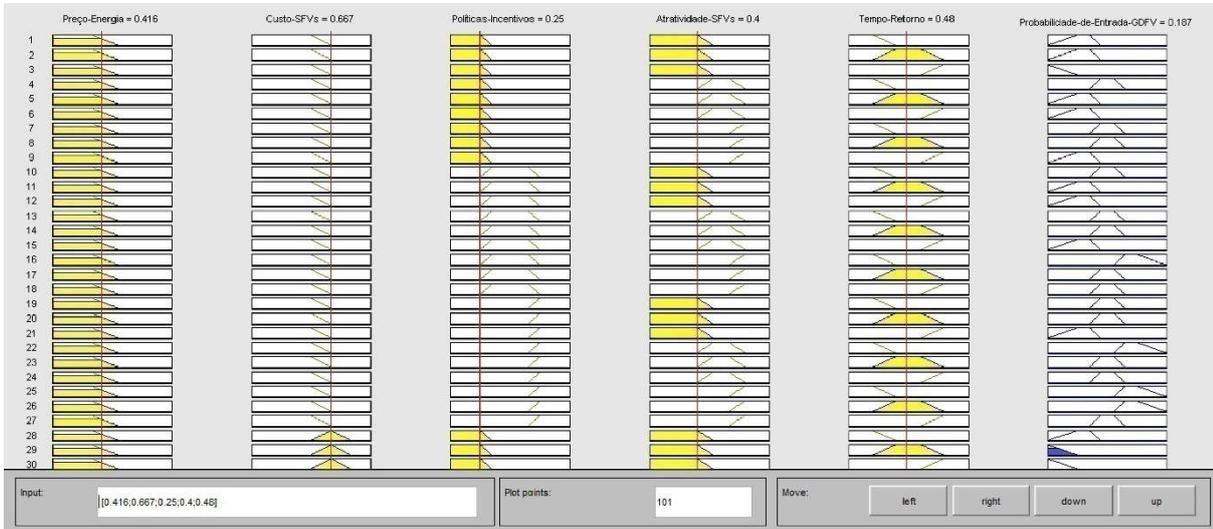


Fonte: (Do autor).

Na avaliação da probabilidade de entrada da GDFV é utilizado o SIF modelado no subcapítulo 3.2.1 do capítulo 3 da Metodologia. Este SIF estima o percentual de aderentes com base no total de regras que são aplicadas aos conjuntos de variáveis das entradas do SIF. Como já visto, para inter-relacionar todas as 5 entradas, compostas por 3 subconjuntos *fuzzy* cada, são necessárias 243 regras. Esse conjunto de regras, assim como todo o algoritmo *fuzzy* são apresentados no Apêndice B.

Para exemplificar o desempenho do SIF, nas Figura 29 e Figura 30 são mostradas as saídas, correspondentes à probabilidade de entrada da GDFV no SED. Sendo que para as variáveis de entrada foram adotadas condições que tornam a entrada da GDFV Improvável e Muitíssimo provável, respectivamente. Na Figura 29 adotou-se um cenário bastante limitador aos avanços na implantação da GDFV. Isto é, considerou-se que o preço da energia elétrica poderia reduzir-se em 25%, que o custo dos SFV se manteria estável, que as políticas de incentivos seriam deficitárias, que a atratividade dos SFVs seria baixa e que o tempo de retorno do investimento ficaria em 12 anos. Nessas condições verifica-se que a GDFV não deveria ganhar espaços na distribuição, probabilidade de integração de 18,7%.

Figura 29 – Saída do SIF, quando aplicadas condições desfavoráveis à GDFV.



Fonte: (Do autor).

Por outro lado, na Figura 30 são consideradas condições muito favoráveis à penetração da GDFV. Foi adotado que preço da energia elétrica aumentaria em 30%, que preço dos SFVs passaria por uma redução de 25%, que haveria várias políticas de incentivos para disseminação da GDFV, que a atratividade dos SFVs seria elevada e que o tempo de retorno do investimento seria baixo, 6 anos. Nesse cenário, observa-se que a GDFV tem grande potencial para se consolidar e ganhar participação na geração de eletricidade, probabilidade de integração de 84%.

Figura 30 – Saída do SIF, quando aplicadas condições bastante favoráveis à GDFV.



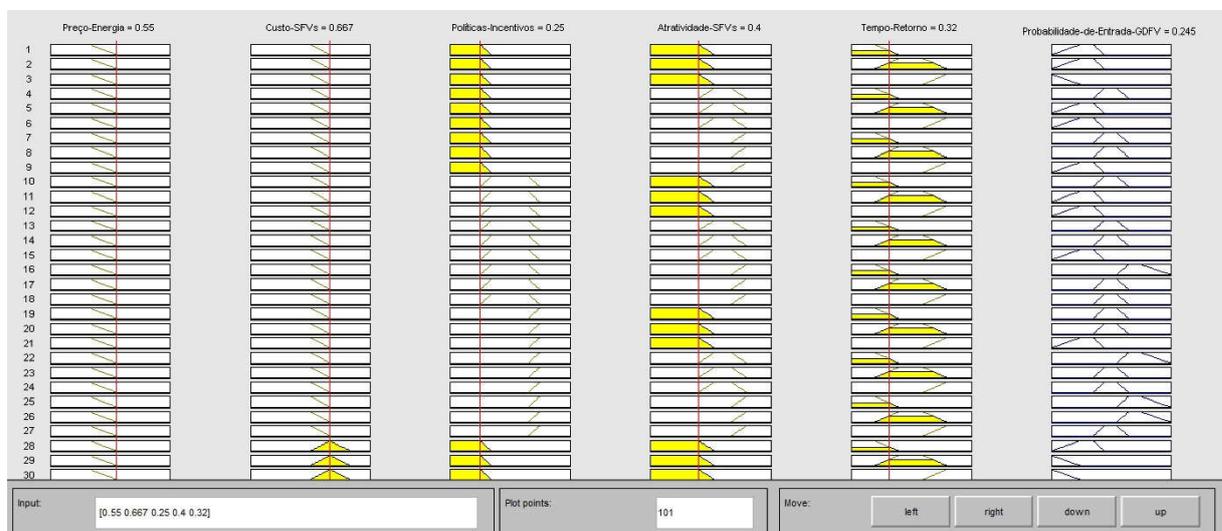
Fonte: (Do autor).

De acordo com os dados da concessionária, verifica-se que o consumo mensal médio no alimentador é de 174 kWh. Conforme, já explanado, os SFVs adotados no trabalho serão de 1 kWp, dessa forma tem-se que o ideal seria obter um FAT maior que 0,8. Isto é, que GDFV consiga suprir 80% do consumo médio, pois o restante, aproximadamente 20% do consumo médio (30 kWh), deve ser pago em instalações monofásicas, pela disponibilidade da rede. Na região de estudo, as taxas médias de irradiação solar são 4,89 kWh/m²/dia ou 146 kWh/m²/mês (GROUP, 2016). Logo, com essas taxas médias e considerando que o rendimento dos módulos é de 16%, com uma desempenho do SFV de 80%, aplicando a equação (7) obtém-se que a GFV para um sistema de 1 kWp, que ocupa uma área aproximada de 8 m², é de 149 kWh/mês, que resulta numa atratividade boa.

Portanto, no cenário atual, no qual o preço da energia elétrica e o custo do SFV é o preço corrente, em que as políticas de incentivos ainda são deficitárias em qualidade e quantidade, com a tecnologia mais difundida de MFVs a atratividade do SFV é boa e o tempo de retorno do investimento é próximo aos 8 anos; pelo SIF desenvolvido, tem-se uma probabilidade de integração da GDFV no SED de 24,5%, como mostra a Figura 31.

Conforme dados da ANEEL, no começo de 2019, o DEMEI possuía mais de 70 registros de unidades consumidoras com GDFV (ANEEL, 2019). Essa pequena quantidade de consumidores com GDFV observada é coerente com a também baixa probabilidade de integração dos SFVs.

Figura 31 – Saída do SIF para o cenário atual.



Fonte: (Do autor).

Para avaliar o comportamento dinâmico da rede, a GDFV será integrada obedecendo aos critérios de alocação discutidos na Metodologia proposta. Os níveis percentuais de penetração da GDFV foram definidos a partir da probabilidade de integração da GDFV, saída do SIF. Essa conversão das faixas de saída do SIF em percentuais fixos de integração da GDFV se tornou necessária, pois para rodar o fluxo de potência no OpenDSS e verificar como a GDFV impactará o SED atual, é fundamental o conhecimento dos seus percentuais de penetração. Portanto, a partir da probabilidade de integração da GDFV, são adotados percentuais de integração da GDFV, no estudo de caso, conforme o Quadro 15.

Quadro 15 – Saída do Sistema de Inferência *Fuzzy* vs Penetração percentual da GDFV.

Saída do SIF (Probabilidade de Integração da GDFV)	Percentual de integração da GDFV adotado
0 – 0,20	Sem GDFV
0,20 – 0,40	9% de GDFV
0,40 – 0,60	13,5% de GDFV
0,60 – 0,80	18% de GDFV
0,80 – 1	25% de GDFV

Fonte: (Do autor).

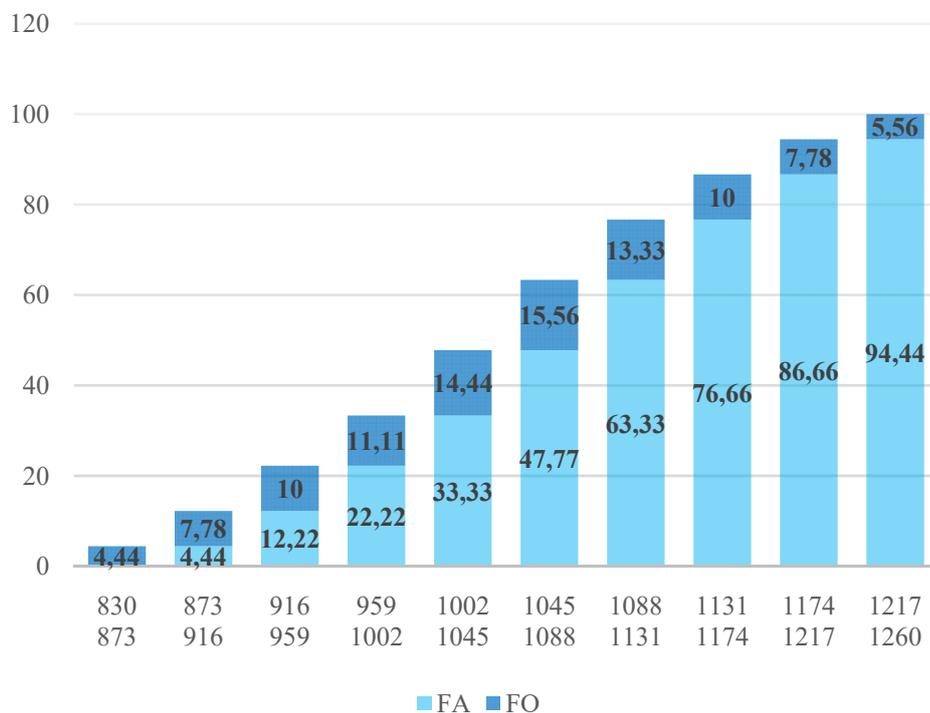
O Módulo 2 do PRODIST apresenta faixas de estratificação, por níveis de tensão e, posteriormente, por classes de consumo. Assim, os consumidores pertencentes ao alimentador do estudo de caso, são classificados como pertencentes ao Sistema de Distribuição em Baixa Tensão (SDBT), menor ou igual a 1 kV. A maioria das unidades consumidoras (mais de 90%), conforme a estratificação por classes, pertence à classe residencial. Na classe residencial de consumo, os consumidores são divididos em estratos, com base no consumo médio do último ano, sendo estes: a) até 100 kWh; b) acima de 100 kWh até 220 kWh; c) Acima de 220 kWh até 500 kWh; d) Acima de 500 kWh até 1000 kWh; e) Acima de 1000 kWh (ANEEL, 2018).

Os consumidores pertencentes aos estratos de consumo igual e superiores ao ‘Acima de 220 kWh até 500 kWh’ são os que apresentam maior probabilidade de se interessar e de condições financeiras para adquirir um SFV, de 1 kWp, que gera em média 149 kWh/mês. Portanto, definiu-se que a distribuição de unidades de GDFV entre esses consumidores será feita de forma igualitária. Isto é, todos transformadores do alimentador receberão o mesmo percentual de GDFV; exceto quando em um ou mais transformadores não houver o número suficiente de consumidores candidatos a receber o percentual estimado de entrada da GDFV.

Nesse caso, o excedente será igualmente realocado entre os clientes dos demais transformadores habilitados.

As curvas típicas de GFV são aquelas obtidas a partir da aplicação da SMC, apresentada no subcapítulo 3.3 da Metodologia proposta. Para exemplificar o processo, é mostrada a Figura 32 com a aplicação do método para o horário das 12h10min, no verão.

Figura 32 – Verificação das frequências de ocorrência e absoluta para a variável em análise (GFV, às 12h10min).



Fonte: (Do autor).

Com auxílio dos dados de frequência de ocorrência e acumulada são atribuídas faixas de valores, usados na SMC, para todos os subintervalos de GFV. A frequência acumulada auxilia na elaboração dos intervalos, iniciando em 0 e terminando em 100. Assim, ao subintervalo de GFV de 830 a 873 W é atribuído a faixa de 0 a 4,44 da frequência de ocorrência, para o subintervalo de GFV de 873 a 916 W é atribuída a faixa de 4,44 a 12,22; e assim por diante. O sorteio dos números aleatórios é feita no *software* Excel, por meio da função *aleatório()*, de modo que sejam realizadas simulações, gerando-se números aleatórios uniformes no intervalo de 0 a 100. Como forma de ilustrar a aplicação da SMC, na Tabela 1

são mostrados os resultados referentes ao número aleatório sorteado e ao subintervalo de GFV ao qual o aleatório é pertencente, para 50 rodadas de simulação.

Tabela 1 – Resultados das 50 rodadas de simulação.

Aleatório gerado	Faixa de GFV na qual se encontra a Simulação	Aleatório gerado	Faixa de GFV na qual se encontra a Simulação
18,78	916 – 959	8,89	873 – 916
15,96	916 – 959	52,58	1045 – 1088
10,58	873 – 916	92,38	1174 – 1217
21,53	916 – 959	70,30	1088 – 1131
9,02	873 – 916	61,91	1045 – 1088
68,50	1088 – 1131	27,26	959 – 1002
58,78	1045 – 1088	36,02	1002 – 1045
61,87	1045 – 1088	88,25	1174 – 1217
3,72	830 – 873	71,48	1088 – 1131
22,84	959 – 1002	39,85	1002 – 1045
2,24	830 – 873	79,68	1131 – 1174
39,00	1002 – 1045	31,35	959 – 1002
89,51	1174 – 1217	98,64	1217 – 1260
74,98	1088 – 1131	2,13	830 – 873
43,10	1002 – 1045	10,30	873 – 916
77,17	1131 – 1174	65,08	1088 – 1131
53,76	1045 – 1088	63,44	1088 – 1131
95,40	1217 – 1260	30,76	959 – 1002
44,07	1002 – 1045	15,10	916 – 959
21,55	916 – 959	32,53	959 – 1002
20,56	916 – 959	60,42	1045 – 1088
24,39	959 – 1002	48,05	1045 – 1088
63,39	1088 – 1131	51,20	1045 – 1088
42,37	1002 – 1045	27,66	959 – 1002
80,43	1131 – 1174	99,17	1217 – 1260

Fonte: (Do autor).

Observa-se que o primeiro e o segundo número aleatório encontram-se dentro da faixa de 12,22 a 22,22, resultando no subintervalo de GFV de 830 a 873 W. Um terceiro número aleatório tem valor de 10,58, estando na faixa (intervalo) de GFV de 873 a 916 W. Como 50 rodadas de simulação é um valor muito baixo para garantir a estabilidade do processo, são realizadas 10 mil simulações, no mesmo padrão das apresentadas na Tabela 1. Na Tabela 2 é mostrada a comparação entre a frequência real (Figura 32) e a simulada, após as 10 mil rodadas de geração de números aleatórios.

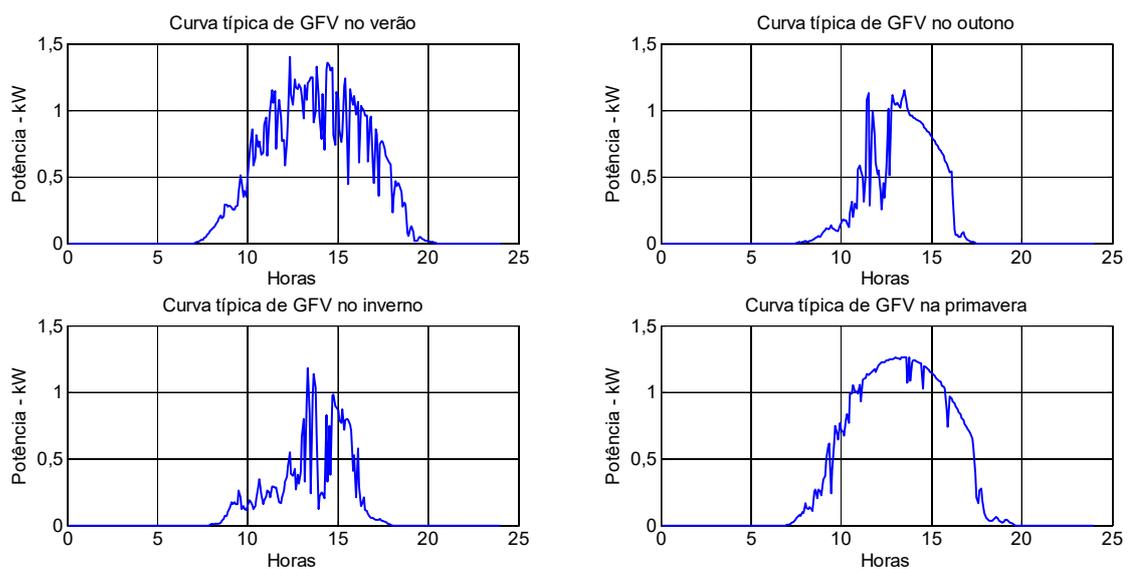
Tabela 2 – Comparação das frequências real e simulada das 10 mil simulações.

Subintervalos de GFV	Frequência real (%)	Frequência simulada (%)
830 – 873	4,44	4,48
873 – 916	7,78	8,1
916 – 959	10	9,89
959 – 1002	11,11	11,05
1002 – 1045	14,44	14,46
1045 – 1088	15,56	15,41
1088 – 1131	13,33	13,2
1131 – 1174	10	10,28
1174 – 1217	7,78	7,31
1217 – 1260	5,56	5,82

Fonte: (Do autor).

A potência adotada para o horário das 12h10min é o valor médio do subintervalo com maior frequência de ocorrência (real e simulada). Portanto, como as maiores frequências, real e simulada, foram de 15,56% e 15,41%, respectivamente, e correspondem ao subintervalo 1045-1088, o valor adotado foi de 1066,5 W. Com as 10 mil simulações os erros MAE, RMSE e MAPE, da frequência simulada em relação à real foram, respectivamente, de 0,184, 0,2294 e 2,225%. Seguindo os procedimentos anteriormente descritos para a aplicação da SMC, obteve-se uma curva de GFV típica para as quatro estações do ano, conforme é ilustrado pela Figura 33.

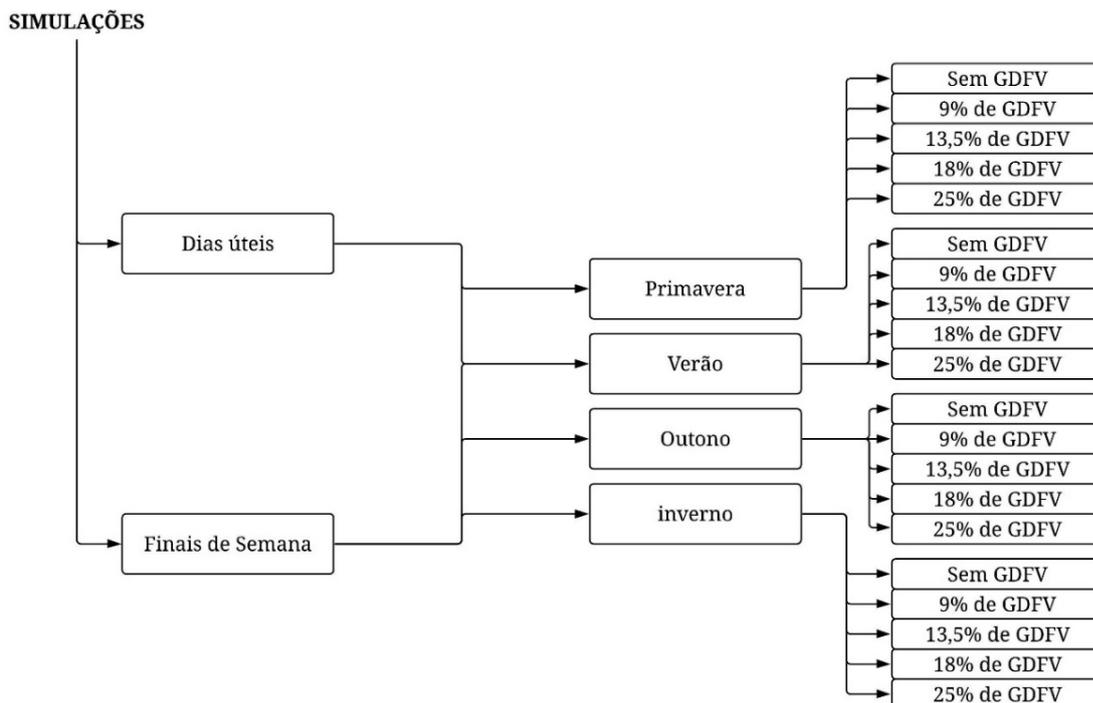
Figura 33 – Curvas típicas de GFV para cada estação do ano.



Fonte: (Do autor).

Portanto, partindo destas premissas, as simulações e as análises dos resultados serão feitas, considerando as curvas de cargas típicas para dias úteis e finais de semana, em conjunto com as curvas anuais típicas da GDFV. Logo, nesse capítulo ainda serão abordadas as simulações realizadas considerando o estado atual da rede e com a entrada percentual de sistemas de GDFV. A totalidade de casos que serão simulados é mais bem explanada pelo fluxograma da Figura 34.

Figura 34 – Fluxograma hierárquico do conjunto de simulações.



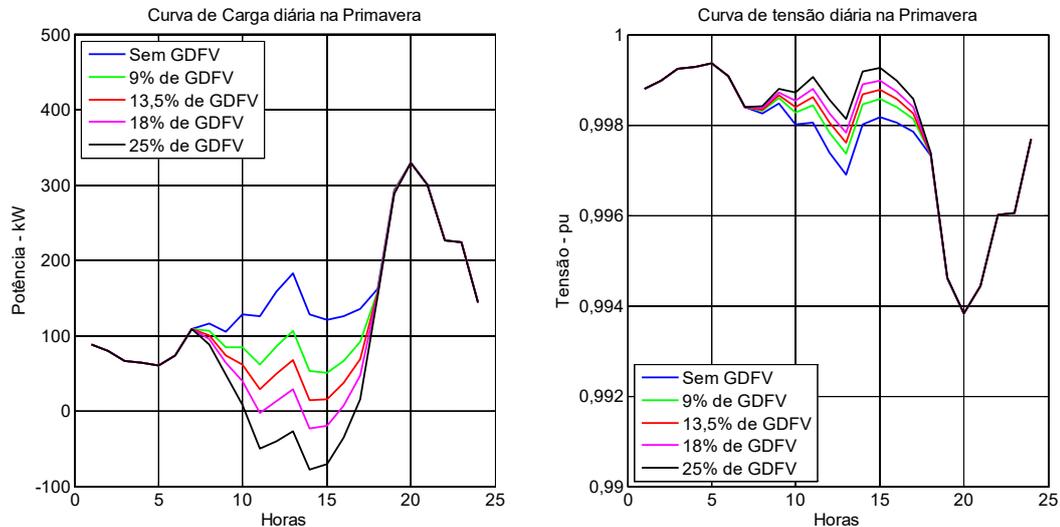
Fonte: (Do autor).

4.2 SIMULAÇÕES E RESULTADOS PARA OS DIAS ÚTEIS

4.2.1 Estação da primavera

As estações que apresentam maiores níveis de irradiação solar por metro quadrado (W/m^2) são o verão e a primavera. Nessas estações, devido à inclinação do eixo da Terra, no hemisfério Sul, chega mais luz solar à superfície terrestre. Essa irradiação é a responsável pela geração da energia elétrica a partir de MFVs. Assim, as melhores taxas de GFV observadas no estudo, são justamente nessas duas estações. Na Figura 35 são apresentadas as curvas do fluxo de potência e tensão diárias, na saída do alimentador, na primavera. Observa-se que durante o dia, à medida que a taxa de entrada dos SFVs aumenta, a potência que precisa ser solicitada do alimentador vai se reduzindo.

Figura 35 – Curvas do fluxo de potência e tensão diárias, na saída do AL, na primavera.

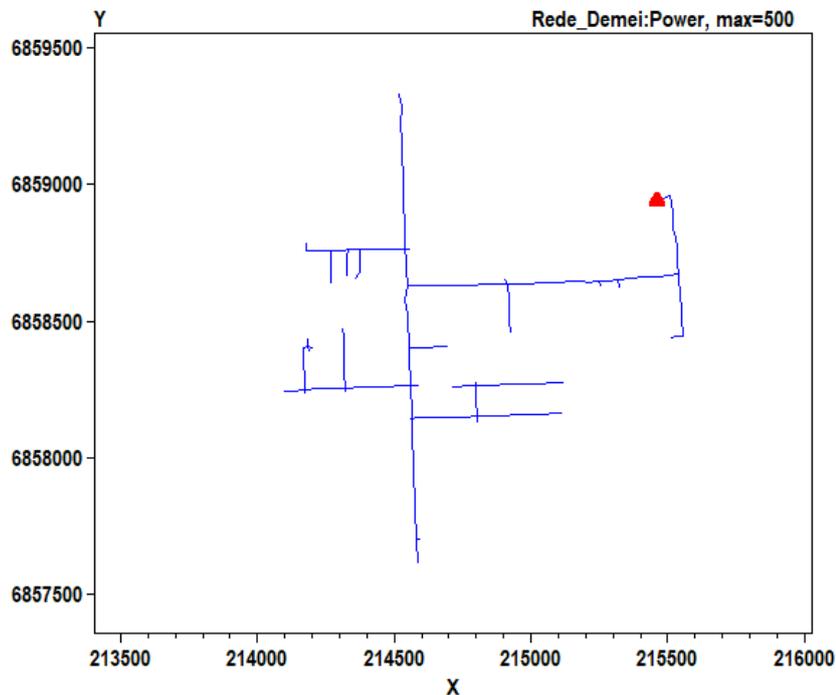


Fonte: (Do autor).

Com uma taxa percentual de 13,5% de SFVs instalados, há momentos em que a GFV é praticamente suficiente para atender a demanda das cargas, na primavera. Já com taxas maiores (18% e 25% de SFVs) nos horários de maior irradiação, há maior GFV que consumo, surgindo assim o fluxo reverso de potência. O fluxo reverso é caracterizado pela leitura de valores de potência negativos na saída do AL, indicando que a corrente flui das cargas para o alimentador. Na Figura 36, todas as linhas estreitas, destacam que havendo entrada de 25% de GDFV, às 13h00min, o fluxo de potência no alimentador é bastante baixo e, em alguns períodos (das 10h00min às 16h00min), também é reverso, conforme visto na Figura 35. O carregamento diminui, corrente em 3,85 A, que representa uma redução de 55,7%, se comparado ao caso base, sem GDFV, Figura 28.

A entrada da GFV também se demonstra benéfica para a melhora dos níveis de tensão na saída do alimentador e ao longo da rede. Além disso, também é capaz de reduzir as perdas diárias na rede. Conforme mostra a Tabela 3, as perdas nas linhas e transformadores se reduzem com a entrada do SFVs, pois há menos fluxo de potência na rede. Esse comportamento é observado para níveis de GDFV que tendem a zerar a energia consumida durante o dia. No entanto, para níveis de entrada mais elevados, nos quais nem toda a energia gerada é consumida localmente, havendo fluxo de potência reverso, as perdas tendem a aumentar novamente.

Figura 36 – Alimentador 314 com 25% de GDFV, às 13h00min.



Fonte: (Do autor).

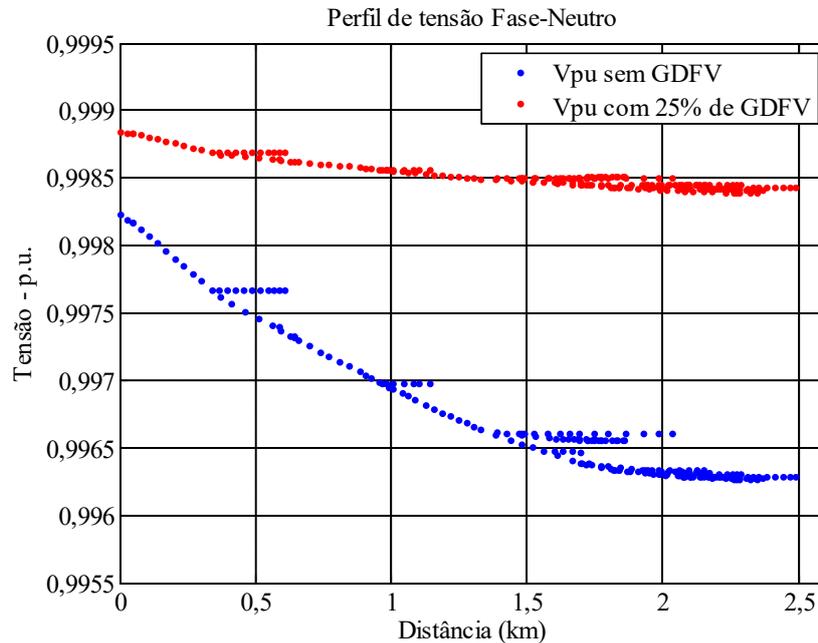
Tabela 3 – Energia e perdas totais diárias na saída do AL, em um dia de primavera.

Percentual de GDFV	Dia útil	
	Energia (kWh)	Perdas (kWh)
Sem GDFV	11206	33
9% de GDFV	9572	29
13,5% de GDFV	8752	28
18% de GDFV	7936	27
25% de GDFV	6753	28

Fonte: (Do autor).

Em termos de tensão ao longo da rede, como mostra a Figura 37, a GDFV é capaz de garantir o aumento de tensão em todos os pontos. Mesmo assim, com os níveis de geração avaliados, em nenhum momento há a presença de sobretensões ou de subtensões na rede.

Figura 37 – Perfil de tensão fase-neutro no alimentador, sem GDFV e com 25% de GDFV.



Fonte: (Do autor).

De acordo com a Tabela 4, observa-se que a GFV, à medida que é aumentada, reduz-se o fator de carga. Pois com a GDFV há uma redução na potência média consumida, no entanto, o pico de potência não é alterado, uma vez que ocorre em um horário em que não há GFV. O fator de irregularidade se reduz até ficar negativo (quando há fluxo reverso). A redução na máxima carga da rede ocorre com 9% de GDFV, enquanto que durante um dia, com taxa de 25% de GDFV, tem-se que esta é capaz de suprir 41,65% da energia diária demandada.

Com a inserção dos SFVs a LR aumenta, devido a redução do mínimo consumo de energia da rede. Logo, com uma entrada massiva de SFVs, a LR crescerá proporcionalmente. Isso significa que a GFV consegue reduzir mais os níveis mínimos de fluxo de potência que os níveis máximos. Tal fato fica mais evidente, quando se observa a Figura 35. Por meio desta, nota-se que o valor máximo de fluxo de potência permanece inalterado, pois ocorre às 20h00min, período em que não há GFV.

Tabela 4 – Métricas para a avaliação da entrada da GDFV na primavera.

	Fload	Fshape	α	CF	RMNL	LR	LRC
Sem GDFV	0,449	1,1193	0,1827	-	-	119,494	-
9% de GDFV	0,3804	1,1983	0,1538	15,29%	49,50%	123,887	12,08%
13,5% de GDFV	0,3459	1,2765	0,0452	22,95%	39,19%	139,888	37,35%

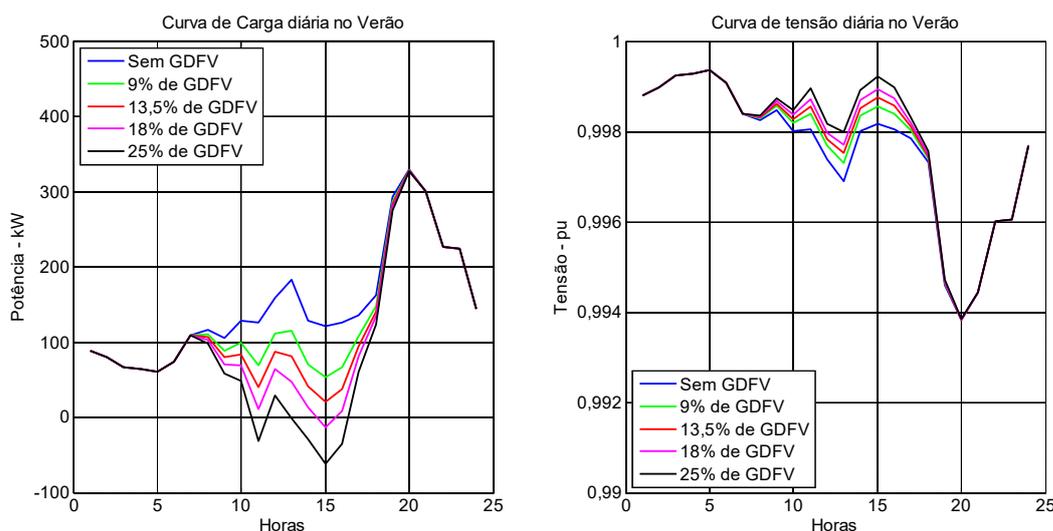
	Fload	Fshape	α	CF	RMNL	LR	LRC
18% de GDFV	0,3117	1,3944	-0,0693	30,59%	30,36%	164,311	61,59%
25% de GDFV	0,262	1,67	-0,235	41,65%	23,32%	201,519	82,78%

Fonte: (Do autor).

4.2.2 Estação do Verão

No verão, como mostra a Figura 38, as características observadas na rede são bastante semelhantes àquelas vistas na primavera, Figura 35. Com taxas de entrada de SFVs de 18% e 25%, em certos períodos do dia, surge o fluxo de potência reverso. Os níveis de tensão, na rede e na saída do alimentador, aumentam com a entrada da GDFV.

Figura 38 – Curvas do fluxo de potência e tensão diárias, na saída do AL, no verão.



Fonte: (Do autor).

As perdas são atenuadas com a GFV, conforme Tabela 5, no entanto, nesse caso não aumentam novamente com entrada de 25% de GDFV, conforme observado na primavera, Tabela 3, pois a geração é um pouco menor que na primavera. No caso da máxima entrada de GDFV, verifica-se que a redução nas perdas em relação ao cenário sem GDFV é de 18,18%.

Tabela 5 – Energia e perdas totais diárias na saída do AL, em um dia de verão.

Percentual de GDFV	Dia útil	
	Energia (kWh)	Perdas (kWh)
Sem GDFV	11206	33
9% de GDFV	9824	30
13,5% de GDFV	9131	28

Percentual de GDFV	Dia útil	
	Energia (kWh)	Perdas (kWh)
18% de GDFV	8441	27
25% de GDFV	7440	27

Fonte: (Do autor).

Com relação às métricas da GFV, Tabela 6, constata-se que o comportamento segue o mesmo padrão observado na primavera, Tabela 4. Contudo, aqui as variações são menos intensas.

Tabela 6 – Métricas para a avaliação da entrada da GDFV no verão.

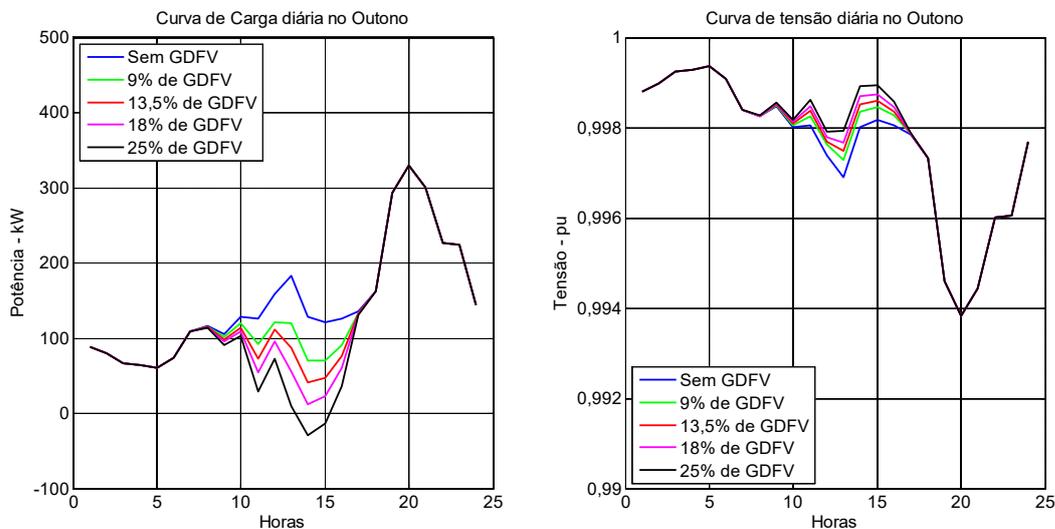
	Fload	Fshape	α	CF	RMNL	LR	LRC
Sem GDFV	0,449	1,1193	0,1827	-	-	119,494	-
9% de GDFV	0,3923	1,1775	0,1634	12,92%	54,58%	122,165	8,81%
13,5% de GDFV	0,3637	1,2308	0,0615	19,41%	47,96%	129,859	22,76%
18% de GDFV	0,3351	1,3074	-0,0403	25,87%	40,18%	144,624	41,39%
25% de GDFV	0,2935	1,4765	-0,1884	35,22%	31,90%	171,806	63,28%

Fonte: (Do autor).

4.2.3 Estação do Outono

Na estação do outono, as regiões localizadas no hemisfério Sul, passam a ter os dias mais curtos e diminuem-se também os níveis de irradiação que chegam à superfície terrestre. Neste caso, conforme a Figura 39, só há GFV maior que a demanda das cargas, em períodos mais curtos, e com nível entrada da GDFV de 25%. Também se nota que os impactos causados nos níveis de tensão pela GFV são mais suaves, se comparados aos das estações da primavera e verão.

Figura 39 – Curvas do fluxo de potência e tensão diárias, na saída do AL, no outono.



Fonte: (Do autor).

A parcela da energia que pode ser suprida pelos SFVs e a redução das perdas também são menores que os observados na primavera e no verão, Tabela 3e Tabela 5. Conforme a Tabela 7, a redução máxima ocorrida no nível de perdas é de apenas 12,12%.

Tabela 7 – Energia e perdas totais diárias na saída do AL, em um dia de outono.

Percentual de GDFV	Dia útil	
	Energia (kWh)	Perdas (kWh)
Sem GDFV	11206	33
9% de GDFV	10323	31
13,5% de GDFV	9906	30
18% de GDFV	9473	29
25% de GDFV	8846	29

Fonte: (Do autor).

Com GFV menor, as variações das métricas também são mais moderadas. De acordo com a Tabela 8, o fator de carga sofre uma variação pequena e contínua com o aumento do nível de GDFV. Comportamento semelhante ao da RMNL, CF, LR e LRC. Neste caso, como a GFV máxima só é suficiente para ocasionar o fluxo de potência reverso com 25% de GDFV, o fator de irregularidade é negativo somente nesse caso.

Tabela 8 – Métricas para a avaliação da entrada da GDFV no outono.

	Fload	Fshape	α	CF	RMNL	LR	LRC
Sem GDFV	0,449	1,1193	0,1827	-	-	119,494	-

	Fload	Fshape	α	CF	RMNL	LR	LRC
9% de GDFV	0,4119	1,154	0,1827	8,26%	52,59%	122,131	13,66%
13,5% de GDFV	0,3944	1,1815	0,1259	12,16%	42,36%	128,88	32,93%
18% de GDFV	0,3762	1,2193	0,0383	16,21%	33,56%	140,159	54,40%
25% de GDFV	0,3499	1,2947	-0,0887	22,07%	26,15%	157,436	73,34%

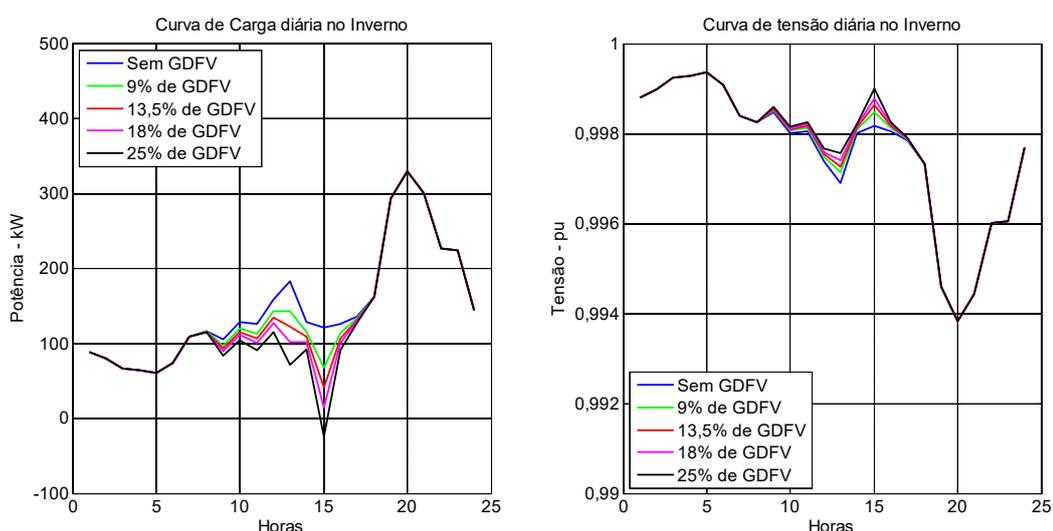
Fonte: (Do autor).

O fator de irregularidade permanece inalterado com a entrada de 9% da GDFV, pois com essa taxa de GFV os valores mínimos e máximos de demanda no alimentador não são afetados.

4.2.4 Estação do inverno

O inverno, por ser a estação com menores taxas de irradiação solar chegando à superfície terrestre, tem-se que esta é a estação em que os MFVs apresentam as menores taxas de geração. Na Figura 40 percebe-se que o impacto da GFV é o menor entre as estações, tanto em fluxo de potência como nos níveis de tensão. A variação dessas grandezas é quase insignificante com o aumento dos níveis de GDFV na rede.

Figura 40 – Curvas do fluxo de potência e tensão diárias, na saída do AL, no inverno.



Fonte: (Do autor).

De acordo com a Tabela 9, durante um dia, com a maior taxa de entrada de SFVs, consegue-se produzir localmente apenas 1387 kWh (diferença entre a energia total consumida

sem GDFV e com 25% de GDFV). As perdas também são pouco atenuadas pela GFV, de modo que a redução máxima é de 9,09%.

Tabela 9 – Energia e perdas totais diárias na saída do AL, em um dia de inverno.

Percentual de GDFV	Dia útil	
	Energia (kWh)	Perdas (kWh)
Sem GDFV	11206	33
9% de GDFV	10697	32
13,5% de GDFV	10442	31
18% de GDFV	10187	31
25% de GDFV	9819	30

Fonte: (Do autor).

Como já observado no outono, no inverno, Tabela 10, há ainda uma redução maior na taxa de variação das métricas. O fator de forma e a RMNL, por exemplo, ficam praticamente constantes, mesmo com a entrada de diferentes níveis de GDFV. Já a taxa de capacidade é a menor observada, assim como a faixa de carga e sua mudança (LRC).

Tabela 10 – Métricas para a avaliação da entrada da GDFV no inverno.

	Fload	Fshape	α	CF	RMNL	LR	LRC
Sem GDFV	0,449	1,1193	0,1827	-	-	119,494	-
9% de GDFV	0,4276	1,137	0,1827	4,76%	55,30%	119,65	1,41%
13,5% de GDFV	0,4169	1,1499	0,1246	7,15%	55,15%	120,53	6,17%
18% de GDFV	0,4062	1,166	0,0444	9,53%	49,67%	123,178	15,60%
25% de GDFV	0,3907	1,1954	-0,0718	12,97%	41,07%	129,83	33,63%

Fonte: (Do autor).

4.3 SIMULAÇÕES E RESULTADOS PARA OS FINAIS DE SEMANA

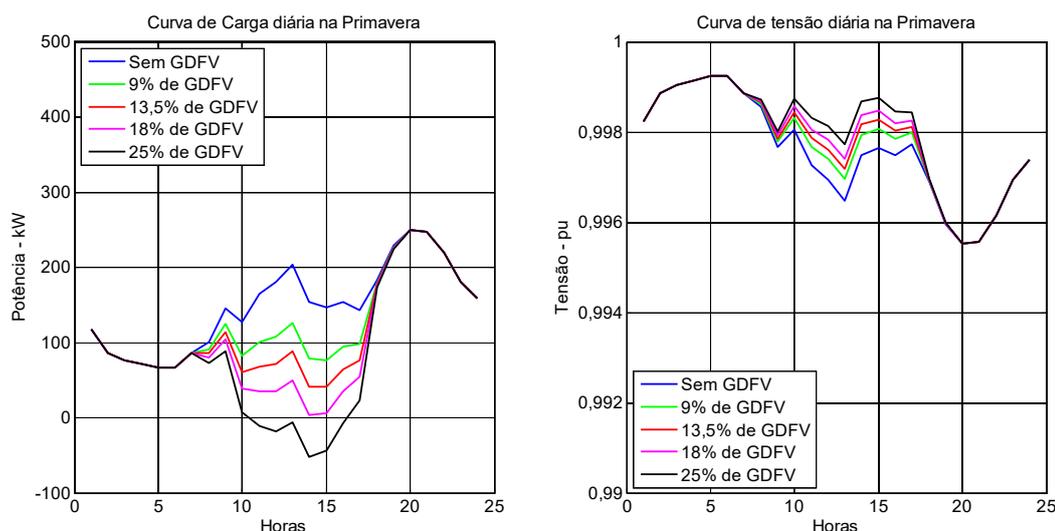
4.3.1 Estação da primavera

Nos finais de semana a curva de carga típica, Figura 15, para os consumidores residenciais é diferente da curva típica em dias úteis. As mudanças mais significativas são um leve aumento na potência ao meio dia e uma redução no pico de consumo entre às 20h00min e 21h00min. Também se percebe que durante o dia o consumo é mais uniforme, com variações mais suaves entre os valores mínimos e máximos.

Conforme se observa na Figura 41, a GFV reduz significativamente o consumo durante o dia, de modo que com o percentual de 18% de GDFV, há momentos em que o fluxo de potência no alimentador cai a praticamente zero. Já com o percentual de 25% de GDFV, há

intervalos em que a GFV é mais alta que o consumo das cargas. Nesses períodos, o excedente da energia gerada é injetado no alimentador e deve ser remanejado para outras regiões. Os níveis de tensão durante o dia se elevam, proporcionalmente com o aumento nos níveis de GDFV instalada.

Figura 41 – Curvas do fluxo de potência e tensão diárias, na saída do AL, na primavera.



Fonte: (Do autor).

Analisando a Tabela 11, constata-se que o consumo de energia diário na rede é praticamente o mesmo nos finais de semana e dias úteis. A GFV é a mesma, pois independe do dia da semana, e a curva de carga típica, em termos de energia, é praticamente igual tanto nos dias úteis quanto nos finais de semana. A diferença entre elas consiste no maior consumo diário nos finais de semana e em um maior pico de carga as 20h00min nos dias úteis.

Nos casos de inserção da GDFV em 25% das unidades consumidoras, verifica-se que o consumo total de energia da concessionária cai em mais de 40%, em relação ao caso base (Sem GDFV). A entrada da GDFV também é eficiente na redução das perdas na rede, com taxa de 25% de GDFV as perdas se reduzem em 26,67%.

Tabela 11 – Energia e perdas totais diárias na saída do AL, em um dia de primavera.

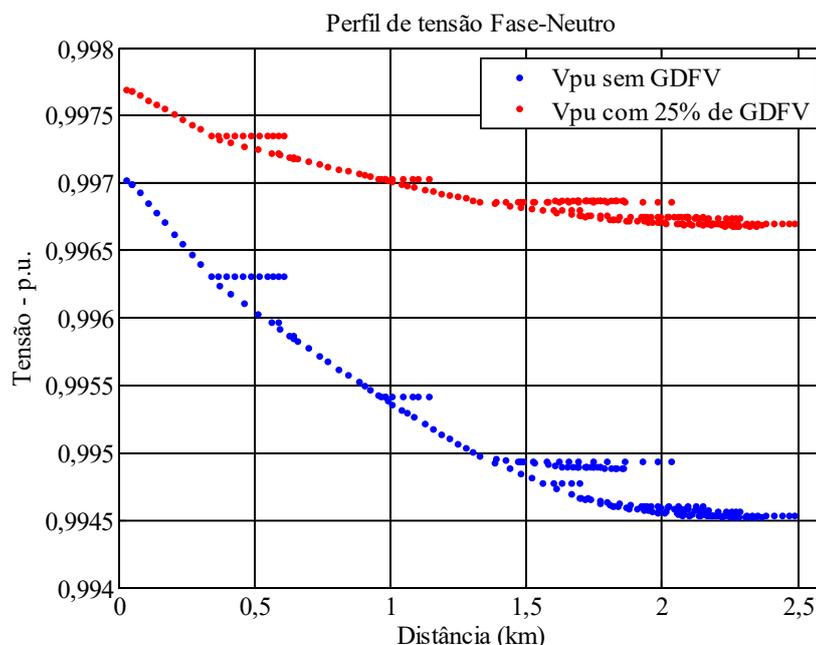
Percentual de GDFV	Finais de Semana	
	Energia (kWh)	Perdas (kWh)
Sem GDFV	11203	30
9% de GDFV	9568	25
13,5% de GDFV	8748	23

Percentual de GDFV	Finais de Semana	
	Energia (kWh)	Perdas (kWh)
18% de GDFV	7931	22
25% de GDFV	6748	22

Fonte: (Do autor).

Em termos de tensão ao longo da rede, como mostra a Figura 42, a GDFV é capaz de garantir o aumento de tensão em todos os pontos. Mesmo assim, com os níveis de geração avaliados, não há em nenhum momento a constatação de sobretensões ou de subtensões na rede. No gráfico, os níveis de tensão mostrados correspondem ao horário das 13h00min, período do dia em que há maior fluxo de potência.

Figura 42 – Perfil de tensão fase-neutro no alimentador, sem GDFV e com 25% de GDFV.



Fonte: (Do autor).

Conforme dado na Tabela 12, tem-se que sem GDFV o fator de carga é 0,5943; sendo maior que o fator de carga para os dias úteis. Isso significa dizer que entre o valor mínimo e o máximo de consumo há uma menor diferença. O fator de irregularidade varia até atingir um valor negativo para penetração de 25% da GDFV, indicando que há períodos de fluxo reverso. A inserção de GDFV na taxa de 9% é capaz de reduzir faixa de carga (LRC negativo). Isso significa que, com a entrada da GDFV, a necessidade de geração despachável da concessionária é reduzida.

Tabela 12 – Métricas para a avaliação da entrada da GDFV na primavera.

	Fload	Fshape	α	CF	RMNL	LR	LRC
Sem GDFV	0,594	1,0681	0,265	-	-	103,271	-
9% de GDFV	0,503	1,1031	0,265	15,29%	67,53%	98,0007	-16,83%
13,5% de GDFV	0,458	1,1518	0,1643	22,95%	59,17%	106,714	7,32%
18% de GDFV	0,412	1,2347	0,0128	30,59%	46,60%	129,05	41,14%
25% de GDFV	0,347	1,4488	-0,2066	41,65%	36,23%	164,054	71,24%

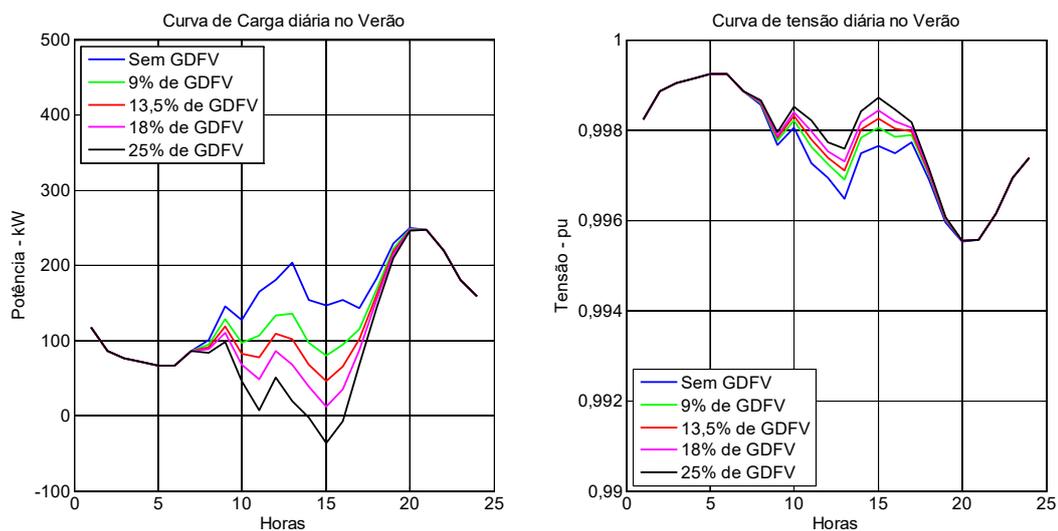
Fonte: (Do autor).

Nos casos em que a LRC é positiva, tem-se que, embora a GDFV reduza o consumo de energia, precisa-se de mais capacidade de geração despachável, pois a variação da curva de carga na rede é mais acentuada.

4.3.2 Estação do Verão

Na estação do verão, conforme se pode verificar, por meio da Figura 43 e da Tabela 13, os resultados encontrados são bastante semelhantes aos visto na primavera, Figura 41 e Tabela 11.

Figura 43 – Curvas do fluxo de potência e tensão diárias, na saída do AL, no verão.



Fonte: (Do autor).

Tabela 13 – Energia e perdas totais diárias na saída do AL, em um dia de verão.

Percentual de GDFV	Finais de Semana	
	Energia (kWh)	Perdas (kWh)

Percentual de GDFV	Finais de Semana	
	Energia (kWh)	Perdas (kWh)
Sem GDFV	11203	30
9% de GDFV	9821	26
13,5% de GDFV	9127	24
18% de GDFV	8436	23
25% de GDFV	7435	22

Fonte: (Do autor).

Com relação às métricas para avaliar os impactos da entrada da GDFV, observa-se que o fator de carga mínimo é ligeiramente maior que o mínimo da primavera. Também se tem que os fatores de forma, para todos os níveis de entrada de GDFV, são menores que na primavera, indicando uma maior uniformidade nas curvas. Com taxas de GFV de 9% e 13,5% reduz-se a LRC e também se observa que as faixas de carga são menores para todos os cenários, quando comparado à primavera. Com entrada de 25% de GDFV na rede é possível atender 35,23% da demanda diária, com a energia proveniente da GFV.

Tabela 14 – Métricas para a avaliação da entrada da GDFV no verão.

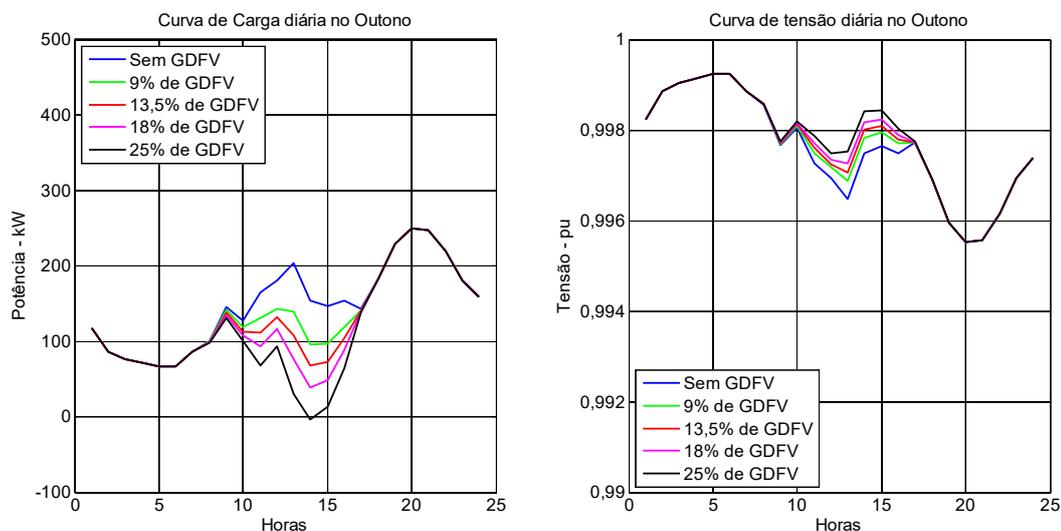
	Fload	Fshape	α	CF	RMNL	LR	LRC
Sem GDFV	0,594	1,0681	0,265	-	-	103,271	-
9% de GDFV	0,519	1,0903	0,2662	12,93%	74,24%	96,2647	-27,07%
13,5% de GDFV	0,482	1,1202	0,186	19,41%	67,59%	100,424	-7,33%
18% de GDFV	0,445	1,1694	0,0511	25,87%	60,41%	110,732	14,40%
25% de GDFV	0,388	1,2912	-0,1448	35,23%	48,53%	135,234	45,31%

Fonte: (Do autor).

4.3.3 Estação do Outono

Na estação do outono, as variações nas curvas de carga são menos bruscas que as ocorridas no verão, Figura 43. De acordo com a Figura 44, verifica-se que com entrada de GDFV em 13,5% a curva de carga oscila, com pequenas variações, em torno de 100 kW. A GDFV consegue atenuar o pico de carga ocorrido às 13h00min. Os níveis de tensão sofrem leve elevação durante o período de GFV.

Figura 44 – Curvas do fluxo de potência e tensão diárias, na saída do AL, no outono.



Fonte: (Do autor).

A entrada dos sistemas fotovoltaicos na rede consegue reduzir as taxas de perdas na rede. Conforme se observa na Tabela 15, as perdas com 25% de penetração da GDFV têm-se que as perdas de energia diárias ficam em 24 kWh, representando uma redução em 20% se comparado às perdas sem GDFV.

Tabela 15 – Energia e perdas totais diárias na saída do AL, em um dia de outono.

Percentual de GDFV	Finais de Semana	
	Energia (kWh)	Perdas (kWh)
Sem GDFV	11203	30
9% de GDFV	10319	27
13,5% de GDFV	9902	26
18% de GDFV	9469	25
25% de GDFV	8842	24

Fonte: (Do autor).

No outono, como a intensidade da GFV é menor, se comparada às estações do verão e primavera, as variações no fator de carga e fator de forma, conforme dado na Tabela 16, são menores. Isto também é observado nos fatores de irregularidade e de capacidade que são menores também. Com GFV máxima, só é possível suprir 22% da energia diária demandada. Com taxas de 9% e 13,5% de SFVs, se reduz necessidade de geração despachável da concessionária, já com entradas maiores de GDFV, é necessária mais capacidade de geração despachável, devido ao aumento da faixa de carga (LR).

Tabela 16 – Métricas para a avaliação da entrada da GDFV no outono.

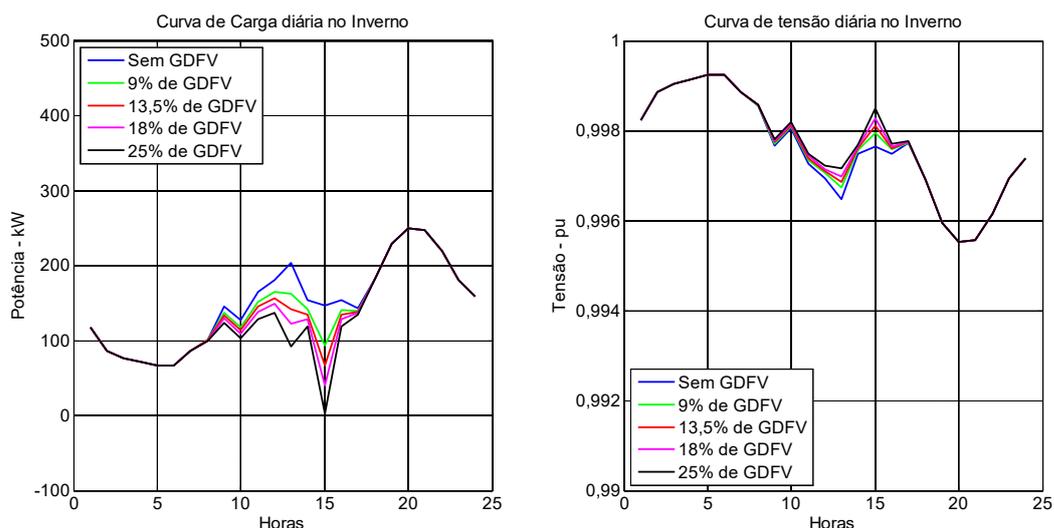
	Fload	Fshape	α	CF	RMNL	LR	LRC
Sem GDFV	0,594	1,0681	0,265	-	-	103,271	-
9% de GDFV	0,545	1,0795	0,265	8,26%	77,19%	98,4928	-29,38%
13,5% de GDFV	0,522	1,0943	0,265	12,16%	66,51%	101,617	-6,90%
18% de GDFV	0,498	1,1176	0,1552	16,21%	55,37%	109,204	18,55%
25% de GDFV	0,463	1,17	-0,0129	22,07%	44,94%	123,918	47,41%

Fonte: (Do autor).

4.3.4 Estação do inverno

O inverno, por ser a estação com menores taxas de irradiação, é a estação em que a inserção de SFVs, causa menores impactos na rede. Mesmo assim, a GDFV consegue melhorar levemente os níveis de tensão ao longo da rede e na saída do alimentador. Com relação ao fluxo de potência, verifica-se que no ápice de GFV, com 25% de GDFV, consegue-se praticamente zerar o consumo de energia da concessionária. Diferentemente das demais estações, essa é a única em que não é constatado o fluxo de potência reverso na rede em nenhum horário.

Figura 45 – Curvas do fluxo de potência e tensão diárias, na saída do AL, no inverno.



Fonte: (Do autor).

O montante de energia que se consegue ser gerado diariamente pelos SFVs é bem moderado (como expresso na Tabela 17), deste modo, a maior parte da energia que alimenta

as cargas é proveniente da subestação. Assim, a GDFV é pouco efetiva na redução das perdas de energia no SED, sendo que a maior redução observada é apenas de 10%.

Tabela 17 – Energia e perdas totais diárias na saída do AL, em um dia de inverno.

Percentual de GDFV	Finais de Semana	
	Energia (kWh)	Perdas (kWh)
Sem GDFV	11203	30
9% de GDFV	10694	28
13,5% de GDFV	10439	28
18% de GDFV	10184	27
25% de GDFV	9815	26

Fonte: (Do autor).

De acordo com a Tabela 18, nota-se que a pequena GFV no inverno faz com que os indicadores de fator de forma e de carga, permaneçam praticamente iguais, independentemente da taxa de SFVs no alimentador. Estas são as menores variações obtidas para estes indicadores. Como a GFV não é suficiente para que ocorra fluxo de potência reverso, o fator de irregularidade permanece positivo. O fator de capacidade da GDFV também é bastante modesto, sendo com 25% de GDFV, pouco menor que 1/3 da capacidade na primavera.

Tabela 18 – Métricas para a avaliação da entrada da GDFV no inverno.

	Fload	Fshape	α	CF	RMNL	LR	LRC
Sem GDFV	0,5943	1,0681	0,265	-	-	103,271	-
9% de GDFV	0,566	1,0734	0,265	4,76%	79,42%	101,532	-18,24%
13,5% de GDFV	0,5518	1,0796	0,265	7,15%	77,13%	101,173	-14,65%
18% de GDFV	0,5377	1,0885	0,1625	9,53%	71,74%	101,627	-8,62%
25% de GDFV	0,5172	1,107	0,0087	12,98%	62,87%	105,97	10,38%

Fonte: (Do autor).

Também, verifica-se que os níveis de entrada de GDFV de 9%, 13,5% e 18% são capazes de reduzir a necessidade de geração despachável da subestação, uma vez que encurtam a faixa de carga da curva do fluxo de potência. Apenas com a entrada de GDFV em 25% que é demandada maior capacidade de geração despachável.

4.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesse capítulo foram apresentados os resultados obtidos e as análises realizadas, para o alimentador em estudo, considerando cenários com variações de geração nas 4 estações anuais e curvas de carga típicas diferentes para os dias úteis e finais de semana. A partir das simulações foi possível avaliar o impacto da entrada da GDFV no SED escolhido.

4.4.1 Discussão dos Resultados para os Dias Úteis

Nos dias úteis observou-se que o valor mínimo de fator de carga ocorreu na primavera com a entrada de 25% de GDFV. Este valor indica que durante esta estação a potência média drenada do alimentador é reduzida pela elevada entrada de SFVs, que ora suprem integralmente a demanda durante o dia; mas não conseguem alterar o pico de demanda ocorrido às 20h00min. O fator de forma mínimo ocorre no caso base, sem a presença de GDFV. À medida que a GFV entre na rede, mais distorcida se torna a curva de carga, chegando ao maior valor de fator de forma na primavera, com 25% de GDFV. O fator de irregularidade também apresenta seu mínimo valor na estação da primavera com 25% de GDFV e seu maior valor é dado no caso base, sem GDFV. O menor valor é de -0,235 e significa que houve fluxo reverso na rede, o qual chegou ao patamar de 23,5% do valor máximo de demanda verificado no alimentador.

A partir dos resultados dessas métricas, pode-se afirmar que é na primavera que ocorrem os casos mais problemáticos. Ou seja, a curva de carga no alimentador fica mais distorcida e apresenta variações mais acentuadas. O fator de carga que idealmente deve ser 1, cai excessivamente para 0,262. Isso indica que é necessário manter a rede superdimensionada para suprir apenas alguns picos de carga.

Os fatores de capacidade mínimos e máximos ocorrem, respectivamente, no inverno com 9% de GDFV e na primavera com 25% de GDFV. Para este fator pode-se dizer que sua variação é proporcional com o nível de penetração dos SFVs e com as taxas de irradiação solar. Logo, em estações com maiores taxas de irradiação e com elevadas taxas de penetração da GDFV maior será o seu valor. É válido ressaltar que, matematicamente, para o fator de capacidade não há um valor máximo. Contudo, considerando as características de consumo é possível dizer que valores superiores a 100% são bastante improváveis de serem verificados. Pois isso demandaria de elevadas taxas de SFVs na rede, para suprir integralmente a carga.

Além disso, como não há GFV à noite, seria necessário um sistema para armazenar o excedente de geração diário. Nessa hipótese, a função base da distribuidora que é entregar energia elétrica para o consumidor final, deveria mudar para a de gestão da energia.

A RMNL, por ser uma grandeza normalizada pelo Valor de Capacidade, apresenta um comportamento um pouco excêntrico. De modo que apresenta valor mínimo com a entrada de 25% de GDFV na primavera e valor máximo com a entrada 9% de GDFV no inverno. Este fenômeno ocorre tendo em vista que os maiores níveis de demanda, utilizados no cálculo da RMNL, ocorrem por volta das 20h00min. Assim, a GFV não consegue atenuar esses picos, ocasionando uma redução no valor da RMNL em estações como a primavera e verão, nas quais o valor de capacidade se eleva com a maior penetração dos SFVs, mas parte dos picos de consumo não são afetados. Esta é uma medida de quão efetiva a GDFV se apresenta na redução dos picos de consumo, com base na sua capacidade de geração.

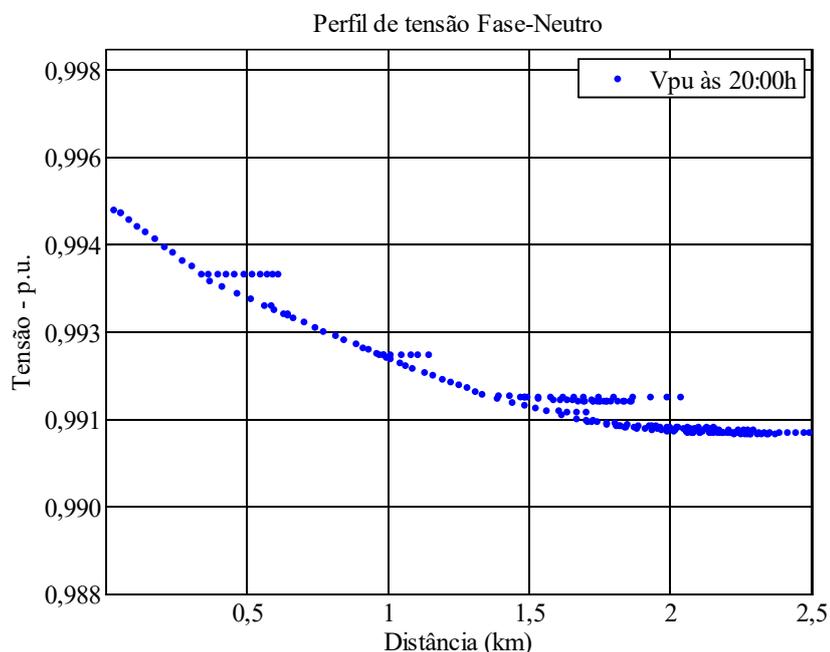
A métrica LR apresenta o menor valor no cenário base, sem a presença da GDFV, e chega ao maior valor na primavera com entrada de 25% de GDFV. Essa constatação já era esperada uma vez que a maior demanda ocorre às 20h00min, período sem GFV. Já a demanda mínima que, no caso base ocorria durante a madrugada, com elevadas taxas de SFVS na rede passa a ocorrer durante os períodos de maior geração, nas estações com maiores níveis de insolação.

A LRC teve seu menor valor (1,41%) para a entrada de 9% de GDFV no inverno, e valor máximo (82,78%) para a entrada de 25% de GDFV na primavera. Esse comportamento comprovou que, para a curva de carga típica nos dias úteis, a LRC tem variação diretamente proporcional com a penetração de SFVs na rede, sendo que a entrada da GDFV reduz mais a carga líquida mínima da rede do que as cargas máximas.

Quanto aos níveis de tensão na rede, no caso base percebe-se que a queda de tensão está dentro da faixa de tolerância. E, para o caso em que há maiores taxas de GFV (25% de GDFV na primavera), observou-se que há certo aumento nos níveis ao longo do alimentador. No entanto, a elevação da tensão não é capaz de violar os limites máximos. Desta maneira é possível concluir que a entrada da GDFV, para o alimentador em estudo, não causará problemas nos níveis de tensão.

Mesmo no horário de pico os níveis de tensão permanecem dentro da faixa de tolerância. Conforme mostra a Figura 46, a diferença entre a maior tensão, na saída do alimentador, e a tensão no ponto mais longínquo é de apenas 0,422%. Essas baixas quedas de tensão no alimentador se justificam por sua curta extensão e baixo carregamento nominal.

Figura 46 – Níveis de tensão ao longo do alimentador no horário de carga máxima.



Fonte: (Do autor).

No caso base, sem a presença da GDFV, já era observado o aumento do carregamento no final do dia. A presença de GDFV consegue acentuar ainda mais essa rampa de carga, pois reduz o consumo de energia do alimentador durante o dia, mas não ajuda a atender o pico de carga que ocorre às 20h00min. Dessa forma a rampa de carga se torna mais íngreme com a presença da GDFV, sendo que os casos mais extremos ocorrem nas estações da primavera e do verão, nas quais a GFV é maior. A Tabela 19 apresenta o crescimento de carga, na primavera, para os diferentes níveis de integração da GDFV.

Tabela 19 – Crescimento percentual de carga, com a GDFV, nos dias úteis.

DIA ÚTIL				
	PERCENTUAL DE GDFV	CARGA 15h00min (kW)	CARGA 20h00min (kW)	CRESCIMENTO (%)
PRIMAVERA	SEM GDFV	120	330	-
	9% de GDFV	51	330	33%
	13,5% de GDFV	16	330	50%
	18% de GDFV	-19	330	66%
	25% de GDFV	-70	330	90%

Fonte: (Do autor).

De acordo com a Tabela 19, é possível perceber que uma integração de 25% de GDFV seria capaz de aumentar em 90% a rampa de carga ao final do dia. Portanto, demandar-se-ia de maior capacidade de despacho de potência.

4.4.2 Discussão dos Resultados para os Finais de Semana

Em relação à curva de carga aos finais de semana, verifica-se que essa é um tanto mais uniforme que a curva de carga nos dias úteis. Seu maior valor ocorre no caso base, sendo o valor de 0,594; enquanto que o pior caso ocorre na estação da primavera, com entrada percentual de 25% de GDFV na rede. Novamente, devido à elevada geração de energia nessa estação anual, observa-se a formação de um vale acentuado durante os períodos de maior insolação.

O fator de forma também é mais próximo da unidade, quando não há GFV presente. Na proporção em que os SFVs vão tendo maior disseminação esta métrica se altera até chegar ao valor máximo observado, que é de 1,4488, na primavera. O Fator de irregularidade por sua vez atinge valor mínimo bastante semelhante ao visto para os dias úteis. Contudo aqui o mínimo é levemente maior, pois nos finais de semana a demanda típica diária é maior que a observada durante a semana. O valor máximo do fator de irregularidade é 0,265 e ocorre quando não há presença da GDFV no alimentador. Para essa curva de carga típica o pico de demanda é menor que o dos dias úteis e, nesse caso, a GDFV também só é capaz de reduzir os valores mínimos de demanda.

A maior RMNL ocorre no inverno, com taxa de entrada de 9% da GDFV, enquanto que a menor ocorre na primavera, com taxa de entrada de 25% da GDFV. Estes valores caracterizam que a GDFV não é efetiva na redução da máxima carga na rede, pois, caso fosse, os maiores valores de RMNL deveriam ocorrer nas estações da primavera e do verão, que apresentam os maiores índices de GFV.

Com entrada de 9% da GDFV foi obtida a menor faixa de carga, 96,26 kW. Idealmente, para esta grandeza deve-se ter o mínimo valor possível. Assim não haverá variações bruscas na curva de carga, que demanda de maior capacidade de energia despachável, nem a necessidade de criar uma infraestrutura de rede tão robusta para suprir um carregamento intenso, mas de curta duração. Uma curva de carga com valores predominantemente retilíneos ou pouco variáveis são os ideais para as concessionárias, pois

torna a contratação de demanda mais eficaz. Isto é, pode-se evitar a contratação de um montante elevado de potência para atender as cargas apenas em momentos pontuais.

A LRC apresentou um comportamento diferente do verificado nos dias úteis. Aqui boa parte dos resultados obtidos foi negativa. Esse fato indica que a entrada da GDFV no SED consegue reduzir a LR. Portanto, demanda-se de uma menor quantidade de capacidade de geração despachável. A maior redução percentual observada ocorreu no outono para a taxa de 9% de entrada da GDFV. A LRC teve seu maior percentual para a entrada de 25% de GDFV na primavera. Nesse caso, a boa taxa de GFV reduz a demanda da rede até níveis que caracterizam o fluxo de potência reverso. Por essa razão a LR aumenta e faz com que a LRC se eleve também, chegando ao máximo valor de 71,24%. O resultado dessas métricas aponta para uma variação bastante íngreme e abrupta no contorno da curva de carga, de maneira que se exigirá uma resposta mais rápida do alimentador à demanda. Logo, será necessário dispor de um volume maior de energia despachável no final do dia.

No caso base, sem a presença da GDFV, já era observado o aumento do carregamento no final do dia, embora um pouco menor que nos dias úteis. Com a presença de GDFV acentua-se ainda mais essa rampa de carga, pois reduz o consumo de energia do alimentador durante o dia, mas não ajuda a atender o pico de carga que ocorre às 20h00min. Dessa forma a rampa de carga se torna mais íngreme com a presença da GDFV, sendo que os casos mais extremos ocorrem nas estações da primavera e do verão, nas quais a GFV é maior. A Tabela 20 apresenta o crescimento de carga, na primavera, para os diferentes níveis de integração da GDFV.

Tabela 20 – Crescimento percentual de carga, com a GDFV, nos finais de semana.

FINAIS DE SEMANA				
PRIMAVERA	PERCENTUAL	CARGA	CARGA	CRESCIMENTO
	DE GDFV	15h00min (kW)	20h00min (kW)	(%)
	SEM GDFV	146	250	-
	9% de GDFV	76	250	67%
	13,5% de GDFV	41	250	101%
	18% de GDFV	06	250	135%
	25% de GDFV	-44	250	183%

Fonte: (Do autor).

De acordo com a Tabela 20, é possível perceber que uma integração de 25% de GDFV seria capaz de aumentar em 183% a rampa de carga ao final do dia. O crescimento de carga

nos finais de semana é maior que nos dias úteis, pois a GFV é a mesma em ambos os casos, porém o crescimento de carga no cenário-base, nos finais de semana era menor que o dos dias úteis. Portanto, em ambos os casos demandar-se-ia de maior capacidade de despacho de potência.

4.4.3 Discussões Finais

O comportamento do SED avaliado permite vislumbrar que curvas típicas de geração da GDFV podem resultar em uma combinação interessante quando inseridas em alimentadores, com cargas predominantemente industriais ou combinadas com residenciais. Uma vez que tanto a GDFV, quanto as cargas industriais apresentam, respectivamente, picos de geração e consumo durante o dia.

A constatação da variação abrupta do fluxo de potência no alimentador, tanto nos dias úteis como nos finais de semana, principalmente quando há elevada taxa de penetração da GDFV (18% e/ou 25%), demanda que algumas medidas sejam tomadas para contornar o problema. Conforme Sun, Tian e Jia (2017), no Quadro 16 são apresentadas algumas das possíveis soluções que podem ser adotadas com suas respectivas características.

Quadro 16 – Fontes de potência flexíveis.

Tipo	Capacidade	Rampa de subida	Duração	Vida
Turbina a gás	Média	Média	Mais longa	Média
Armazenamento em bateria	Menor	Mais rápida	Mais curta	Curtíssima
Armazenamento bombeado	Mais longa	Mais lenta	Média	Mais longa

Fonte: (SUN, TIAN e JIA, 2017).

Com o aumento contínuo da penetração da GD, as fontes de energia flexíveis supracitadas se tornam essenciais. No entanto, os tipos e a capacidade são de difícil determinação. Portanto, o esquema de planejamento deverá satisfazer os requisitos de flexibilidade do sistema, em escalas de tempo variadas, com a melhor economia (SUN, TIAN e JIA, 2017).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo tem por finalidade apresentar as conclusões alcançadas através do estudo realizado, além de apresentar propostas de trabalhos futuros e também os artigos publicados durante a pesquisa.

5.1 CONCLUSÕES

Os SEDs utilizados atualmente ainda conservam características bastante semelhantes às dos primeiros sistemas, que consideram taxas de crescimento vegetativo (diferença entre a entrada e a perda de consumidores) e reforços para expansões quando necessários. Obviamente que houve grandes avanços em termos de tecnologias empregadas, gerenciamento, automação, entre outros. Entretanto, se comparado com a evolução na telefonia, pode-se dizer que essas transformações foram bastante modestas. Nos sistemas elétricos de potência a geração ainda é fortemente dependente da geração hídrica e a partir de termelétricas. No Brasil, essas duas fontes são responsáveis pela geração de mais de três quartos do total de energia elétrica consumida.

Aos poucos, nas últimas décadas, também se passou a investir em empreendimentos que diversificassem a matriz energética, como a construção de usinas eólicas e fotovoltaicas. E, nos próximos anos, com o desenvolvimento tecnológico exponencial observado, espera-se que cada vez mais técnicas e recursos sejam empregadas para modernizar as redes elétricas. O processo de modernização deve proporcionar um maior controle, confiabilidade, flexibilidade, segurança e gerenciamento das redes elétricas.

O aperfeiçoamento das tecnologias empregadas na fabricação de células fotovoltaicas tem permitido aos SFVs o ganho de visibilidade globalmente. Alguns países mais desenvolvidos, como a Alemanha e demais países europeus, foram os pioneiros na implantação desses sistemas para a produção de eletricidade. Embora a descoberta do efeito fotoelétrico seja datada do século XIX, somente nestas últimas décadas que a indústria investiu no aprimoramento das tecnologias para acelerar o desenvolvimento e viabilizar a produção de MFVs voltados à geração de parcelas significativas de energia.

Em relação aos países pioneiros na exploração de energia proveniente de plantas fotovoltaicas, o Brasil ainda está em um estágio precoce de implantação. As grandes plantas fotovoltaicas, geração centralizada, correspondem a apenas 0,768% do montante total gerado.

Por outro lado, observa-se uma crescente entrada da GDFV residencial, que totaliza 75,5% das quase 50 mil unidades de GDFV instaladas. Talvez a GFV seja a mais promissora das formas de exploração da energia solar.

Com a integração de SFVs aos SEDs, surge a necessidade de explorar como a GDFV interagirá com a rede atual. Portanto, esse trabalho apresentou uma metodologia proposta, considerando um SED radial e real, como estudo de caso. A primeira etapa do trabalho foi caracterizar, em ambiente computacional, a rede elétrica já existente. O programa escolhido para a modelagem foi o OpenDSS, por ser um *software* livre e de boa praticidade, pela sua elevada aplicabilidade na literatura técnica, por dispor de todos os recursos demandados no trabalho, tais como: a modelagem das cargas a partir de curvas típicas de consumo, capacidade de integrar a GD e de realizar tanto simulações estáticas como dinâmicas no tempo, pela possibilidade da monitoração e gravação dos dados relativos a níveis de tensão, fluxo de potência, energia demandada e totais de perdas.

Estando caracterizado o alimentador, trabalhou-se para estimar a entrada da GDFV na rede. Predizer qualquer evento não é uma tarefa trivial, pois não há métodos 100% exatos. Para tratar dessa questão foi desenvolvida uma metodologia baseada na lógica *fuzzy* para determinar a probabilidade da população se interessar em instalar SFVs. Para alimentar o sistema especialista, foram modeladas cinco variáveis que têm forte relação com a probabilidade de difusão dos SFVs. Os tipos de variáveis escolhidos (Preço da Energia Elétrica, Custo do SFV, Políticas de Incentivo, Atratividade dos SFVs e Tempo de Retorno do Investimento) são condizentes com os abordados em trabalhos que tratam problemas semelhantes ao dessa dissertação.

Além de modelar o SED atual e desenvolver uma metodologia capaz de tratar da predição de penetração da GDFV, é preciso conhecer como seriam os perfis diários de GFV. Sabe-se que o comportamento de fontes de geração intermitentes é bastante randômico, podendo haver significativas variação em curto período de tempo. Para contornar essa incerteza na geração, decidiu-se por modelar curvas típicas de GFV, estratificando-as por estações do ano. Então, a SMC foi escolhida para modelar os perfis típicos. A SMC é altamente difundida na literatura técnica por ser um método eficaz de modelar fenômenos aleatórios. A partir de um elevado número de simulações, a SMC alcança a estabilidade e representa com fidelidade o comportamento real da variável em simulação, que nesse trabalho foi a GDFV. Embora existam outros métodos na literatura para modelar incertezas, a SMC

continua sendo suficientemente eficaz e, nesse trabalho, demonstrou-se bastante condizente com a realidade.

A partir da metodologia proposta, um dos alimentadores da distribuidora foi selecionado para o estudo de caso, que contemplou diversos níveis de penetração da GDFV, nas quatro estações anuais. Nas simulações foi verificado que em estações com maior incidência de radiação solar, primavera e verão, a GFV conseguiu suprir boa parte da demanda durante o dia. E, à medida que o percentual de unidades geradoras cresceu, houve uma maior redução da energia consumida do alimentador. Com a entrada de 25% da GDFV, verificou-se que durante o dia houve momentos em que a GFV superou a carga demandada. Nesses casos, houve fluxo reverso de potência, energia fluindo das cargas para a subestação.

A energia excedente no alimentador deve ser gerenciada pela concessionária. Algumas das possíveis estratégias que podem ser adotadas são: o remanejamento da energia para os demais alimentadores ou outras regiões, o armazenamento em bancos de bateria ou por outras fontes (como bombeamento de água ou pressurização de ar). O excedente energético, armazenado durante o dia, poderia ser utilizado posteriormente para suprir a crescente demanda que surge ao final do dia, ou então, para atenuar o pico de consumo observado no horário de ponta (20 horas). Um gerenciamento eficiente da energia fotovoltaica pode contribuir para uma maior preservação dos recursos naturais, para diminuir os custos da conta de energia do consumidor e reduzir a demanda contratada pela distribuidora nos leilões de energia.

Nas simulações também foi constatado que nos locais onde são instalados os SFVs há um leve aumento nos níveis de tensão, principalmente nos horários de geração mais elevada. Na barra do alimentador, os aumentos nos níveis de tensão não são significativos, sendo que os maiores ocorrem nas estações do verão e da primavera. De modo geral, a GDFV contribuiu para o aumento dos níveis de tensão em todos os pontos, ao longo do alimentador. Com as taxas de entrada de SFVs simuladas, não foi observado nenhum caso de sobretensão ou subtensão na rede.

No período diurno, a energia demandada da subestação se reduz devido à entrada dos SFVs. Esta redução provoca um aumento da LR. O incremento da faixa de carga faz com que a LRC seja positiva, ou seja, quando cessa a GFV, necessita-se de uma quantidade de geração despachável maior. Pois surge um aumento íngreme na curva de carga, dentro de poucas horas, a solicitação de potência do alimentador que era baixa, nula ou negativa passa a ser máxima. Ainda se pode afirmar que com a inserção dos SFVs, alguns investimentos de ampliação da capacidade das redes podem ser postergados, uma vez que os consumidores

geram parte da energia que consomem. A GDFV também se demonstrou benéfica em termos de perdas de energia no alimentador, pois ao diminuir o fluxo de potência diário na rede, consequentemente as perdas de energia decaem.

De maneira geral, esse trabalho simulou e analisou vários cenários de inserção da GDFV. Visto que essa fonte vem se consolidando graças às tecnologias desenvolvidas, às altas nos preços da conta de energia elétrica e ao bom potencial brasileiro à GFV. Os incentivos dados à geração limpa de energia no Brasil ainda são praticamente inexistentes quando comparados a outros países, mesmo assim a GDFV vem conseguindo ganhar presença no cenário nacional, mais que dobrando a potência instalada em 2018. A contínua queda nos preços dos componentes dos SFVs e a melhora na eficiência da conversão têm os tornado mais acessíveis e atrativos, reforçando a solidificação como fonte na GD. Em 2018, o anúncio da possibilidade de financiamento de SFVs por pessoas físicas, junto ao Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), com taxas de juros de até 4,03% ao ano, também atuou como fomento à popularização da integração dos SFVs no mercado de eletricidade.

Para finalizar, é possível afirmar que a metodologia proposta pode auxiliar na decisão da priorização de investimentos das distribuidoras no planejamento da expansão, pois permite estimar as tendências de penetração dos SFVs e também simular como o alimentador se comportará, caso a entrada da GDFV se confirme. Vale ainda ressaltar que a metodologia proposta pode ser aplicada a qualquer outro alimentador da distribuidora e também por outras concessionárias, sendo então necessária a reconfiguração dos parâmetros e variáveis, conforme as características da nova rede e de irradiação solar no local.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Seguindo a linha de pesquisa desenvolvida nesse trabalho, outros tópicos precisam ser explorados com a finalidade de auxiliar a gestão e o planejamento de distribuidoras de energia. A seguir, listam-se alguns dos tópicos considerados promissores para o desenvolvimento de futuras propostas de trabalho/pesquisa.

- Sugere-se o desenvolvimento de estudos de casos que envolvam alimentadores com perfis de cargas variados. Isto é, que apresentem consumidores de outras classes, tais como: comerciais, industriais e/ou serviço público. Dessa forma, poder-se-á trabalhar

com curvas de cargas diversificadas e, dependendo do porte do empreendimento, possam ser incorporados casos com a minigeração distribuída no estudo;

- A análise da entrada aleatória de sistemas de GDFV, com diferentes níveis de potência (micro e minigeração) também é uma abordagem relevante, uma vez que indústrias e comércios podem instalar sistemas maiores devido ao seu porte;
- Outra análise interessante é a incorporação no SED já modelado, da entrada dos VEs;
- Realizar a previsão da penetração das diversas fontes de GD no SIN. Nesse caso pode-se desenvolver uma metodologia que seja capaz de incorporar na previsão outras fontes de geração alternativa, como micro e mini geração eólica;
- Trabalhos voltados à predição da geração a médio, curto e curtíssimo prazo também são opções relevantes de estudo. Considerando cenários com a consolidação da GDFV, certa frota de VEs, medidores inteligentes e tarifa horária; torna-se necessário o desenvolvimento de métodos de estimação da carga líquida na rede, para gerenciar o despacho de PCHs e/ou otimizar a contratação de demanda em leilões de energia.

5.3 TRABALHOS PUBLICADOS

Durante o mestrado foram publicados e apresentados 2 artigos científicos em eventos nacionais e internacionais, cujo tema é o mesmo dessa dissertação, conforme listado abaixo:

- SBSE 2018 – VII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos
 Título do trabalho: “Impact Evaluation of the Photovoltaic Generation Input on a Concessionaire’s Network”.
 Autores: Joelson Lopes da Paixão, Alzenira da Rosa Abaide, Pedro Genaro Alves Filho.
 Data/Local: 12 a 16 de maio de 2018. Niterói, Rio de Janeiro.
- T&D LA 2018 – IEEE PES T&D Latin America
 Título do trabalho: “Impact Study of the Photovoltaic Generation Entrance in a Dealership Network”.
 Autores: Joelson Lopes da Paixão, Alzenira da Rosa Abaide, Jonas Rigodanzo, Jordan Passinato Sausen.
 Data/Local: 18 a 21 de setembro de 2018. Lima, Peru.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB GROUP. Tesla vs Edison: a guerra das correntes, 2012. Disponível em: <<http://www.abb.com/cawp/seitp202/31b6f1d9686553b1c12579880036eaaa.aspx>>. Acesso em: 10 fevereiro 2018.

ABDELSAMAD, S. F.; MORSI, W. G.; SIDHU, T. S. Impact of Wind-Based Distributed Generation on Electric Energy in Distribution Systems Embedded With Electric Vehicles. **IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY**, v. 6, n. 1, p. 79-87, Janeiro 2015. ISSN 1949-3029.

ABDELSAMAD, S. F.; MORSI, W. G.; SIDHU, T. S. Probabilistic Impact of Transportation Electrification on the Loss-of-Life of Distribution Transformers in the Presence of Rooftop Solar Photovoltaic. **IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY**, v. 6, n. 4, p. 1565-1573, Outubro 2015. ISSN 1949-3029.

ABSOLAR. Energia solar fotovoltaica atinge marca histórica de 500 MW em microgeração e minigeração distribuída no Brasil, 2019. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/energia-solar-fotovoltaica-atinge-marca-historica-de-500-mw-em-microgeracao-e-minigeracao-distribuid.html>>. Acesso em: 15 Janeiro 2019.

AGALGAONKAR, Y. P.; PAL, B. C.; JABR, R. A. DISTRIBUTION VOLTAGE CONTROL CONSIDERING THE IMPACT OF PV GENERATION. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS**, v. 29, n. 1, p. 182-192, janeiro 2014. ISSN 0885-8950.

AI, X. et al. A discrete point estimate method for probabilistic load flow based on the measured data of wind power. **IEEE Trans. Ind. Appl.**, v. 49, n. 5, p. 2244–2252, Setembro 2013.

ANDRADE, E. L. **Introdução à Pesquisa Operacional - Métodos e Modelos para Análise de Decisões**. Rio de Janeiro: LTC, v. 1, 2011. 195 p. ISBN 9788521629429.

ANDRADE, J.; TORQUATO, R.; FREITAS, W. A Granular Monte Carlo Based Methodology to Estimate PV Generation Impacts on the Utility Long-Term Energy Planning. **2015 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM)**, 2015. 1-6.

ANEEL. Nota Técnica 0043/2010, Brasília, 2010. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/Nota%20T%C3%A9cnica_0043_GD_SRD.pdf>. Acesso em: 17 Dezembro 2018.

ANEEL. Resolução Normativa Nº 482, Brasília, 2012. Disponível em: <www.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>. Acesso em: 10 abril 2018.

ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 687, p. 25, 24 novembro 2015. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 15 junho 2017.

ANEEL. **Micro e Minigeração Distribuída Sistema de Compensação de Energia Elétrica**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, p. 34. 2016.

ANEEL. **Banco de Informação da Geração - BIG**, 2018. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 5 março 2018.

ANEEL. Matriz de Energia Elétrica. **Banco de Informação da Geração (BIG)**, 2018. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 20 maio 2018.

ANEEL. PRODIST - Módulo 2. **Site da ANEEL**, 2018. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/modulo-2>>. Acesso em: 11 novembro 2018.

ANEEL. PRODIST - Módulo 3. **Site da Aneel**, 2018. Disponível em: <<http://aneel.gov.br/modulo-3>>. Acesso em: 10 novembro 2018.

ANEEL. PRODIST - Módulo 8. **Site da ANEEL**, Brasília, p. 88, 01 janeiro 2018. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/modulo-8>>. Acesso em: 30 Outubro 2018.

ANEEL. Unidades Consumidoras com Geração Distribuída, 2019. Disponível em: <www2.aneel.gov.br/scg/gd/gd_distribuidora_detalhe.asp?distribuidora=447&pagina=1>. Acesso em: 25 janeiro 2019.

ASSESSORIA DE IMPRENSA DA ANEEL. Aprovados reajustes tarifários de 16 permissionárias de energia elétrica. **Sala de Imprensa**, 24 outubro 2018. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/aprovados-reajustes-tarifarios-de-16-permissionarias-de-energia-eletrica/656877?inheritRedirect=false>. Acesso em: 10 outubro 2018.

ATWA, Y. M. et al. Adequacy Evaluation of Distribution System Including Wind/Solar DG During Different Modes of Operation. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS**, v. 26, n. 4, p. 1945-1952, Novembro 2011. ISSN 0885-8950.

AYVAZOGLUYÜKSEL, Ö.; FILIK, Ü. B. Power Output Forecasting of a Solar House by Considering Different Cell Temperature Methods. **10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)**, Bursa, Turquia, 29/11 a 02/12 November-December 2017. 1253-1257.

AZZOUZ, M. A.; FARAG, H. E.; EL-SAADANY, E. F. Real-Time Fuzzy Voltage Regulation for Distribution Networks Incorporating High Penetration of Renewable Sources. **IEEE SYSTEMS JOURNAL**, v. 11, n. 3, p. 1702-1711, setembro 2017. ISSN 1937-9234.

BERNARDS, R. et al. Application and evaluation of a probabilistic forecasting model forexpected local PV penetration levels. **24th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED)**, v. 1, n. 1, p. 2101-2105, Junho 2017. ISSN 2515-0855.

BHOLA, P.; BHARDWAJ, S. Solar Energy Estimation Techniques: A review. **7th India International Conference on Power Electronics (IICPE)**, 7-9 November 2016. 5.

BILLINTON, R.; GAN, L. Wind power modeling and application in generating adequacy assessment. **IEEE Conf. Communications, Computers and Power in the Modern Environment (WESCANEX 93)**, p. 100-106, 1993.

BILLINTON, R.; HUA, C.; GHAJAR, R. A sequential simulation technique for adequacy evaluation of generating systems including wind energy. **IEEE Trans. Energy Convers.**, v. 11, p. 728-734, 1996.

BILLINTON, R.; LI, W. **Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods**. 1. ed. Nova Iorque: USA: Springer, 1994.

BNDES. BNDES muda regra e pessoas físicas podem investir em energia solar. **Banco Nacional do Desenvolvimento**, 2018. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/imprensa/noticias/conteudo/bndes-muda-regra-e-pessoas-fisicas-podem-investir-em-energia-solar>>. Acesso em: 15 Junho 2018.

CAMILO, H. F. et al. Assessment of photovoltaic distributed generation – Issues of grid connected systems through the consumer side applied to a case study of Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 71, p. 712-719, 2017. ISSN 1364-0321.

CAMPOS, D. D. et al. Optimal tariff system for integration of distributed resources based on a comparison of Brazil's and Germany's system. **IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)**, Athens, 2016. 1-8.

CASTRO, N. D. et al. **Impactos Sistêmicos da Micro e Minigeração Distribuída**. UFRJ. Rio de Janeiro, p. 64. 2018. (978-85-93305-46-7).

CEEE-D. **Elaboração de Projetos de Redes Aéreas de Distribuição Urbanas**. Porto Alegre-RS, p. 28. 2013.

CEPEL; CRESESB. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, Rio de Janeiro, p. 530, 2014. Disponível em: <www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em: 20 outubro 2017.

CGEE. **Redes elétricas inteligentes: contexto nacional**. 1. ed. Brasília: [s.n.], 2012. 172 p.

CHAUDHARY, P.; RIZWAN, M. Voltage regulation mitigation techniques in distribution system with high PV penetration: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, p. 3279–3287, 2018. ISSN 1364-0321.

CHUGH, A.; CHAUDHARY, P.; RIZWAN, M. Fuzzy Logic Approach for Short Term Solar Energy Forecasting. **India Conference (INDICON), 2015 Annual IEEE**, New Delhi, 17-20 Dezembro 2015. 6.

CONSTANTE-FLORES, G. E.; ILLINDALA, M. S. Data-Driven Probabilistic Power Flow Analysis for a Distribution System With Renewable Energy Sources Using Monte Carlo Simulation. **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS**, v. 55, n. 1, p. 174-181, Janeiro 2019. ISSN 0093-9994.

DARUI, C. B. F. et al. Economic Analysis of the Impact of the Installation of PV Systems Considering Power Quality Aspects. **2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)**, Heraklion, Greece, 28-31 August 2017. 1-6.

DESROCHERS, G.; BLANCHARD, M.; SUD, S. A Monte-Carlo simulation method for the economic assessment of the contribution of wind energy to power systems. **IEEE Trans. Energy Convers.**, v. EC-1, p. 50-56, 1986.

NOTE, Y. Introduction to Fuzzy Logic. **Proceedings of IECON 95 - 21st Annual**, Muroran city, 1995. 50-56.

DUGAN, R. C. **OpenDSS Training Workshop**. EPRI. [S.l.], p. 241. 2013.

DUGAN, R. C. **Reference Guide The Open Distribution System Simulator**. Electric Power Research Institute, Inc. [S.l.], p. 184. 2016.

ELMAKIAS, D. **New Computational Methods in Power System Reliability**. 1. ed. Nova Iorque: [s.n.], 2008.

EMMANUEL, M.; RAYUDU, R. The impact of single-phase grid-connected distributed photovoltaic systems on the distribution network using P-Q and P-V models. **Electrical Power and Energy Systems**, p. 20–33, 2017. ISSN 0142-0615.

EMRAH KARAKAYA, P. S. Barriers to the adoption of photovoltaic systems: The state of the art. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 49, p. 60–66, 2015. ISSN 1364-0321.

EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica**. Ministério de Minas e Energia. Brasília, p. 232. 2016.

EPE. Anuário Estatístico de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, p. 76, 2018. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 09 dezembro 2018.

FERREIRA, A. et al. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2 março 2017. 181-191.

FIGUEIRÓ, I. C. **A TARIFA HORÁRIA PARA OS CONSUMIDORES RESIDENCIAIS SOB O FOCO DAS REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES - REI**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – UFSM. Santa Maria, p. 128. 2013.

GADO, A. A. E.-M. Impact the Expansion of the Production of Generation of Solar Power on the Low Voltage Network in Egypt. **2015 Saudi Arabia Smart Grid (SASG)**, eddah, Saudi Arabia, 7-9 Dec 2015. 1-4.

GARNI, H. A.; AWASTHI, A. Techno-Economic Feasibility Analysis of a Solar PV Grid-Connected System with Different Tracking Using HOMER Software. **5th IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering**, Oshawa, 2017. 217-222.

GHOSH, S.; RAHMAN, S.; PIPATTANASOMPORN, M. DISTRIBUTION VOLTAGE REGULATION THROUGH ACTIVE POWER CURTAILMENT WITH PV INVERTERS.

IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY, v. 8, n. 1, p. 13-22, janeiro 2017. ISSN 1949-3029.

GROUP, T. W. B. **GLOBAL SOLAR ATLAS**, 2016. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info/?c=-28.076827,-53.876953,8&s=-28.439714,-53.882446>>. Acesso em: 17 novembro 2018.

HASHEMINAMIN, M. et al. Index-Based Assessment of Voltage Rise and Reverse Power Flow Phenomena in a Distribution Feeder Under High PV Penetration. **IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS**, v. 5, n. 4, p. 1158-1168, julho 2015. ISSN 2156-3381.

JAHIC, A. et al. PHOTOVOLTAIC POWER OUTPUT FORECASTING WITH ANFIS. **Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2016)**, 9 Novembro 2016. 1-8.

JANG, J. S. R. Anfis: Adaptive-network-based fuzzy inference systems. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, 23, 1993. 714–723.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B.; ROBBA, E. J. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. [S.l.]: [s.n.], 2010.

KERSTING, W. H. **Distribution system modeling and analysis**. 1. ed. [S.l.]: CRC Press, 2001. ISBN 0-8493-0812-7.

KONGEN, G. **Difusão de Sistemas fotovoltaicos residenciais conectados à rede no Brasil: Uma simulação via Modelo de Bass**. Dissertação (Mestrado em Ciências) - USP. São Paulo. 2014.

LAVE, M.; ELLIS, A. Comparison of Solar and Wind Power Generation Impact on Net Load across a Utility Balancing Area. **2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)**, Washington, DC, USA, 25-30 June 2017. 1-6.

LIU, S. et al. Effects of correlated photovoltaic power and load uncertainties on grid-connected microgrid day-ahead scheduling. **IET Generation, Transmission & Distribution**, 19 June 2017. 3620-3627.

LIU, S. et al. Investigations of Distribution System Scheduling with Photovoltaic Power and Load Variations. **2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)**, Banff, Canadá, 5-8 October 2017. 793-797.

MACHADO, I. S.; BORBA, B. S. M. C.; MACIEL, R. S. Modeling Distributed PV Market and its Impacts on Distribution System: A Brazilian Case Study. **IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS**, 14, n. 11, 11 Novembro 2016. 7.

MAGHAMI, M.; HIZAM, H.; GOMES, C. Impact of Dust on Solar Energy Generation based on Actual Performance. **2014 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)**, Kuching, Malaysia, 1-3 Dec 2014. 388 - 393.

MARTINEZ, J. A.; GUERRA, G. A Parallel Monte Carlo Method for Optimum Allocation of Distributed Generation. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS**, v. 29, n. 6, p. 2926-2933, Novembro 2014. ISSN 0885-8950.

MATHWORKS. **Fuzzy Logic Toolbox**. [S.l.], p. 388. 2016. Revised for Version 2.2.24 (Release 2016b).

NETO, N. K. **Sistema multivariável para avaliação de desempenho e estabelecimento de limites de continuidade de fornecimento de energia utilizando a lógica fuzzy**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - UFSM. Santa Maria, p. 156. 2012.

OCHOALUIS, L. N.; QUIROS-TORTOS, J. **Advanced Modelling of Smart Distribution Networks Using OpenDSS**. ISGT LA Tutorial. [S.l.], p. 180. 2015.

ONS. Geração de energia. **Site do ONS**, 2019. Disponível em: <http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx>. Acesso em: 31 Janeiro 2019.

PAINULY, J. P. Barriers to renewable energy penetration; a framework for analysis. **Renewable Energy**, Roskilde, v. 24, p. 73-89, setembro 2001. ISSN [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(00\)00186-5](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(00)00186-5).

PAIXÃO, J. L. et al. Wind generation forecasting of short and very short duration using Neuro-Fuzzy Networks: A case study. **2017 International Conference on Modern Power Systems (MPS)**, junho 2017. 1-6.

PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F. **Fuzzy Systems Engineering: Toward Human-Centric Computing**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc, 2007. 544 p. Acesso em: 28 novembro 2018.

PEI ZHAI, E. D. W. Analyzing consumer acceptance of photovoltaics (PV) using fuzzy logic model. **Renewable Energy**, n. 41, p. 350e357, 2012. ISSN 0960-1481.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. INPE. São José dos Campos, p. 60. 2006. (85-17-00030-7).

PERRY, T. S.; ZADEH., L. A. Fuzzy logic inventor biography. **IEEE Spectrum**, v. 32, p. p. 32–35, 1995.

PESSANHA, J. F. M. **Sistema de Inferência Neuro-Fuzzy Adaptativo – ANFIS**. PUC-RJ. Rio de Janeiro, p. 52. 2002.

PETINRIN, J. O.; SHAABANB, M. Impact of renewable generation on voltage control in distribution system. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 65, p. 770–783, 2016. ISSN 1364-0321.

PHAYOMHOM, A. et al. Impact of Variable Solar PV Generation in MEA's Power Distribution System. **2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA)**, Bangkok, Thailand, 3-6 Nov 2015. 1-6.

PINTO, R. J. C. et al. Micro-Generation with Solar Energy: Power Quality and Impact on a Rural Low-Voltage Grid. **2015 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE)**, Costa da Caparica, Portugal, 24-26 Junho 2015. 87-92.

QUAN, D. M. et al. Hybrid Model for Hourly Forecast of Photovoltaic and Wind Power. **IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZY)**, Hyderabad, India., 7-10 Julho 2013. 6.

ROGERS, E. M. Diffusion of Innovations. **Rev. Ed. Of Communication of Innovations**, n. 2, 1971.

ROSA, A. R. O. D.; GASPARIN, F. P. PANORAMA DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. VII, n. 2, p. 140-147, dezembro 2016.

ROSENKRANZ, J. B.; MARTINEZ-ANIDO, C. B.; HODGE, B. M. Analyzing the Impact of Solar Power on Multi-hourly Thermal Generator Ramping. **IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)**, 2016. 153-158.

ROSS, T. J. **Fuzzy logic with engineering applications**. 3ª Edição. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010. 607 p. ISBN 978-0-470-74376-8.

SAFARINI, N. A. et al. Performance Evaluation of Solar Tracking Systems for Power Generation Based on Simulation Analysis: Solar Island Concept. **2017 International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA)**, Ras Al Khaimah, 21-23 Nov 2017. 4.

SAFDARIAN, A.; FOTUHI-FIRUZABAD, M.; AMINIFAR, F. Compromising Wind and Solar Energies From the Power System Adequacy Viewpoint. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS**, v. 27, n. 4, p. 2368-2376, Novembro 2012. ISSN 0885-8950.

SAMPAIO, P. G. V.; GONZÁLEZ, M. O. A. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2 Março 2017. 590-601.

SANTOS, L. et al. Methodology for Long-Term Forecasting to Insertion of DG in Distribution Systems. **50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)**, Stoke on Trent, 2015. 6.

SANTOS, L. L. C. D. **Metodologia para análise da tarifa branca e da geração distribuída de pequeno porte nos consumidores residenciais de baixa tensão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – UFSM. Santa Maria, p. 93. 2014.

SANTOS, L. L. C. D.; CANHA, L. N.; BERNARDON, D. P. Projection of the diffusion of photovoltaic systems in residential low voltage consumers. **Renewable Energy**, n. 116, p. 384-401, 2018. ISSN 0960-1481.

SAUAIA, R. L. **Energia solar fotovoltaica: Panorama, Oportunidades e Desafios**. ABSOLAR. Brasília, p. 30. 2017.

SAUSEN, J. P. **ANÁLISE DO CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NA CURVA DE CARGA DO TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – UFSM. Santa Maria, p. 101. 2017.

SCOLARI, E.; SOSSAN, F.; PAOLONE, M. Photovoltaic-Model-Based Solar Irradiance Estimators: Performance Comparison and Application to Maximum Power Forecasting. **IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY**, 9, n. 1, JANUARY 2018. 35-44.

SEXAUER, J. **Introdução ao OpenDSS**. EPRI. [S.l.], p. 35. 2016. Traduzido por: Paulo Radatz e Celso Rocha.

SHAABAN, M. F.; ATWA, Y. M.; EL-SAADANY, E. F. DG Allocation for Benefit Maximization in Distribution Networks. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS**, v. 28, n. 2, p. 639-649, Maio 2013. ISSN 0885-8950.

SHAABAN, M. F.; EL-SAADANY, E. F. Accommodating High Penetrations of PEVs and Renewable DG Considering Uncertainties in Distribution Systems. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS**, v. 29, n. 1, p. 259-270, Janeiro 2014. ISSN 0885-8950.

SHAKER, H.; ZAREIPOUR, H.; WOOD, D. Estimating Power Generation of Invisible Solar Sites Using Publicly Available Data. **IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID**, 7, September 2016. 2456-2465.

SHVEDOV, G. V. et al. Impact of Solar Generation Connected to 0.4 kV Grid on the Power losses and the Shape Factor of Load Curve. **2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus)**, Moscow, Russia, 2018. 773-777.

SILVA, L. N. **DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA INTELIGENTE PARA O DIAGNÓSTICO DOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA**. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - UFSM. Santa Maria, p. 83. 2015.

SILVA, R. M. D. **ENERGIA SOLAR NO BRASIL: dos incentivos aos desafios**. Núcleo de Estudos e Pesquisas da Consultoria Legislativa. Brasília, p. 1-53. 2015.

SNEGIREV, D. A. et al. Functional Assessment System of Solar Power Plant Energy Production. **2017 International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM)**, 19-20 October 2017. 349-353.

SOROUDI, A. Possibilistic-Scenario Model for DG Impact Assessment on Distribution Networks in an Uncertain Environment. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS**, v. 27, n. 3, p. 1283-1293, agosto 2012.

SOROUDI, A.; AIEN, M.; EHSAN, M. A Probabilistic Modeling of Photo Voltaic Modules and Wind Power Generation Impact on Distribution Networks. **IEEE SYSTEMS JOURNAL**, v. 6, n. 2, p. 254-259, Junho 2012. ISSN 1932-8184.

SUN, W.; TIAN, K.; JIA, S. Planning of flexible power sources in power distribution systems with high penetration of dispersed generation. **24th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED)**, n. 1, p. 2496-2499, Junho 2017. ISSN 2515-0855.

TORQUATO, R. et al. A Monte Carlo Simulation Platform for Studying Low Voltage Residential Networks. **IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID**, v. 6, n. 5, p. 2766-2776, Novembro 2014. ISSN 1949-3029.

VALLÊRA, A. M.; BRITO, M. C. Meio século de história fotovoltaica. **Gazeta da Física**, Lisboa, p. 10-15, 2006.

VITHAYASRICHAREON, P.; MACGILL, I. F. Valuing large-scale solar photovoltaics in future electricity generation portfolios and its implications for energy and climate policies. **IET Renewable Power Generation**, v. 10, n. 1, p. 79–87, 2016. ISSN 1752-1416.

VITHAYASRICHAREON, P.; MILLS, G.; MACGILL, I. Impact of Electric Vehicles and Solar PV on Future Generation Portfolio Investment. **Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 2016**, Boston, MA, USA , 17-21 July 2016. 1-1.

WIDÉN, J. et al. Impacts of distributed photovoltaics on network voltages: Stochastic simulations of three Swedish low-voltage distribution grids. **Electric Power Systems Research**, n. 80, p. 1562–1571, 2010. ISSN 0378-7796.

YAZDANBAKSH, O.; KRAHN, A.; DICK, S. Predicting Solar Power Output using Complex Fuzzy Logic. **2013 Joint IFSA World Congress and NAFIPS Annual Meeting (IFSA/NAFIPS)**, Edmonton, Canadá, 24-28 Junho 2013. 1243-1248.

YESILBUDAK, M.; COLAK, M.; BAYINDIR, R. A Review of Data Mining and Solar Power Prediction. **5th International Conference on Renewable Energy Research and Applications**, Birmingham, 20-23 November 2016. 1117-1121.

ZADEH, L. A. Knowledge representation in Fuzzy logic. **IEEE TRANSACTIONS ON KNOWLEDGE AND DATA ENGINEERING**, v. 1, p. 89-100, march 1989.

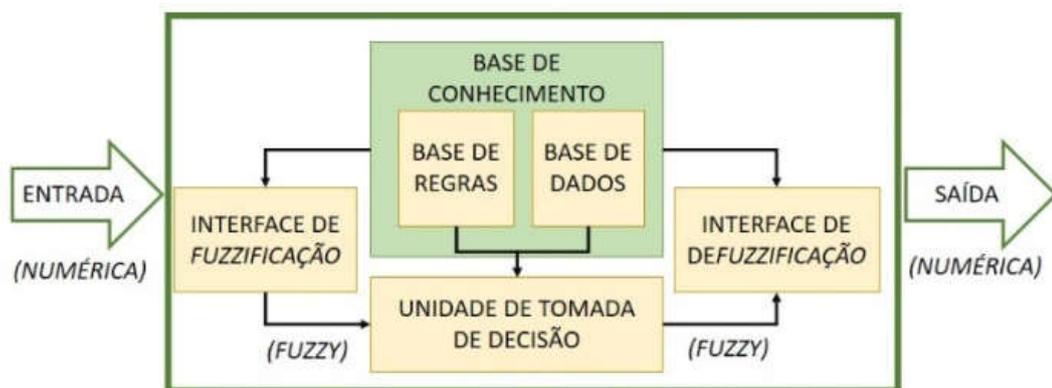
ZAPATA, C. J. **Análisis Probabilístico y Simulación**. Pereira: UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA, 2010. 235 p.

APÊNDICE A – SISTEMA DE INFERÊNCIA FUZZY

A lógica *Fuzzy* é uma ferramenta de otimização baseada nos princípios da Inteligência Artificial. Foi desenvolvida com o princípio de criar um espaço de classificação entre o “0” e o “1”, o verdadeiro ou falso, definido pela lógica tradicional de Aristóteles. Foi proposta por Lotfi Asker Zadeh, que publicou um artigo em 1965, visando resolver paradigmas lógicos até então de difícil solução devido ao aumento do uso de sistemas informatizados e o tratamento de dados com menor linearidade (PERRY e ZADEH., 1995).

A lógica *Fuzzy* se ajusta com a forma do pensamento humano, pois esse intervalo gera uma margem de “raciocínio”. Por exemplo, no caso de uma caixa de madeira, para lógica tradicional, ou ela está vazia ou está cheia. Já no contexto da lógica *Fuzzy*, ela pode estar vazia, cheia, quase cheia, meio cheia. Determina-se uma zona de classificação, qualitativa ou quantitativamente contínua, ao contrário dos valores discretos da lógica tradicional (ZADEH, 1989). Um sistema de inferência *Fuzzy* é composto por 5 blocos funcionais, correspondentes a 3 etapas, como mostrado na Figura 47.

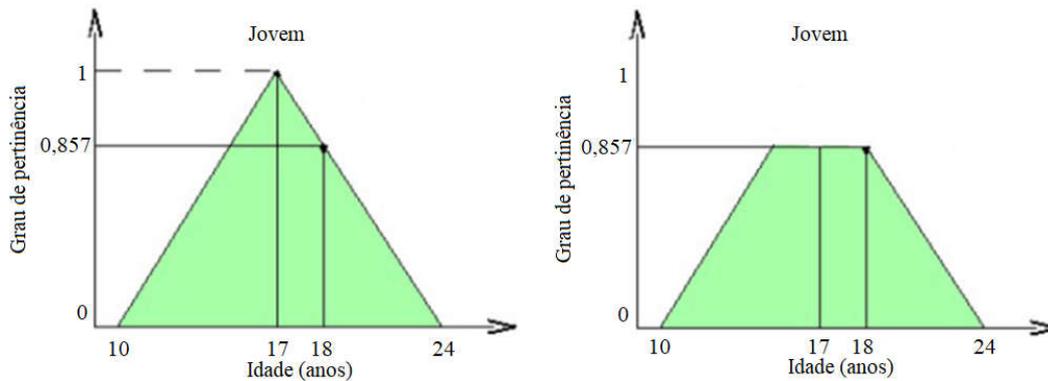
Figura 47 – Etapas de um Sistema de Inferência *Fuzzy*.



Fonte: Adaptado de: (JANG, 1993).

No primeiro estágio, os dados de entrada passam pelo processo de inserção no sistema de inferência *Fuzzy*, denominado como fuzzificação. Cada valor de entrada é representado como um grau de pertinência nas funções ao qual o mesmo integra, e não como um valor absoluto. Um exemplo gráfico disso é mostrado na Figura 48, onde se tem uma função de pertinência triangular à esquerda e à direita o resultado da fuzzificação, para a variável de entrada (idade) igual a 18 anos.

Figura 48 – Exemplo do processo de fuzzificação.

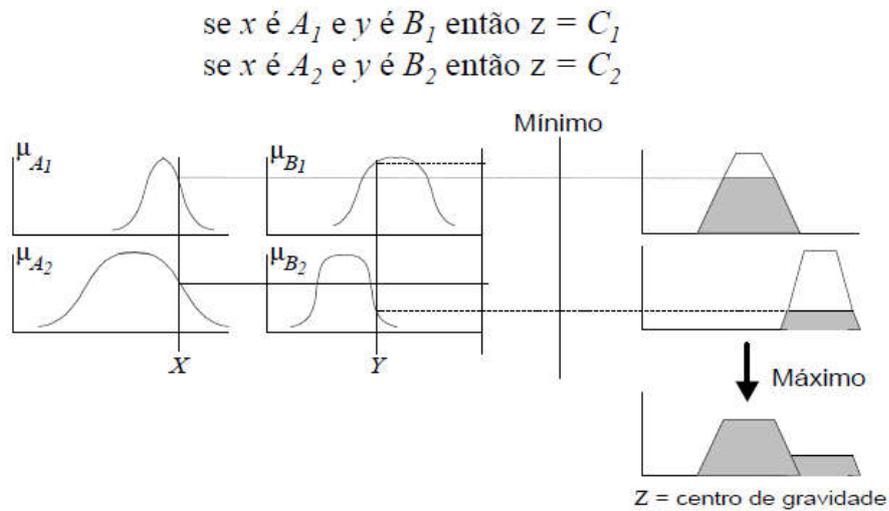


Fonte: Adaptado de: (SILVA, 2015).

A segunda etapa do raciocínio *Fuzzy* corresponde ao processo de formulação e resolução das regras de inferência. Esse processo indica a maior semelhança entre a lógica *Fuzzy* e a lógica tradicional. Nesse sentido, introduz-se o conceito de *Modus Ponens*, uma série de argumentos dedutivos, utilizados mesmo com premissas incertas, que gera conclusões relacionadas a essas premissas (ZADEH, 1989). Tais regras são do tipo: Se X então Y ou Se X e Y então Z.

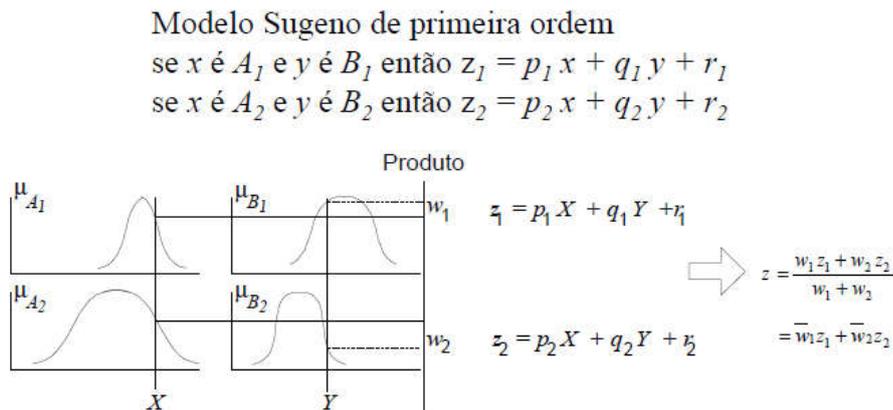
Há alguns controladores dos sistemas de inferência, como o Mamdani e o Sugeno. No controlador Mamdani as regras são do tipo: se x é A e y é B então z = C (A, B e C são conjuntos *Fuzzy*). Enquanto que no controlador Sugeno as regras são do tipo: se x é A e y é B então z = f(x, y). O consequente da regra é uma função não *Fuzzy* das variáveis de entrada, em geral um polinômio (PESSANHA, 2002). Na Figura 49 e Figura 50 são mostrados exemplos dos Sistemas de Inferência *Fuzzy* (SIF), com controladores do tipo Mamdani e Sugeno, respectivamente. As funções de pertinência μ_{A1} , μ_{A2} , μ_{B1} e μ_{B2} , a partir das quais são formuladas as regras, podem ser de diferentes formatos, conforme a aplicabilidade desejada no trabalho.

Figura 49 – Exemplo de SIF com controlador Mamdani.



Fonte: (PESSANHA, 2002).

Figura 50 – Exemplo de SIF com controlador Sugeno.



Fonte: (PESSANHA, 2002).

Um controlador *Fuzzy*, de forma geral, realiza a relação entre cada variável dentro de uma regra e também a agregação das diferentes regras. Os controladores Mamdani são os mais comumente encontrados na literatura e possuem características adequadas a este trabalho, como a praticidade de implementação e a possibilidade de acompanhamento e manipulação das regras do algoritmo. É caracterizado, também, pelo fato de as relações difusas ocorrerem tanto nos antecedentes (parte das condições) quanto nos consequentes (parte das conclusões) das regras (ROSS, 2010).

Embora os sistemas *Fuzzy* baseados no conhecimento do especialista sejam bastante efetivos, há alguns cuidados a se tomar, principalmente quando o número de regras é muito elevado. O primeiro deles é que o sentido das regras é muito rígido, uma vez que elas refletem

o conhecimento existente. Isto significa que em alguns casos uma calibração dos conjuntos *Fuzzy* pode ser necessária para que sua semântica capture ao máximo a especificidade do problema. Outro cuidado é quanto à qualidade das regras.

A construção das regras pode ser tarefa muito difícil em problemas maiores, visto que o número de regras é definido por $N = p^n$, onde n é o número de variáveis de entrada e p é o número de conjuntos linguísticos de cada uma. A qualidade das regras pode se deteriorar nestes casos. Logo, é necessária atenção a dois pontos: a plenitude de cobertura de todos os conjuntos *Fuzzy* por regras e a consistência dessas regras. O Quadro 17 mostra algumas diretrizes relativas à consistência entre regras ao elaborá-las.

Quadro 17 – Consistências entre condições e conclusões de regras *Fuzzy*.

	Conclusões similares	Conclusões distintas
Condições similares	Regra são redundantes	Regras estão em conflito
Condições distintas	Regras distintas, talvez possam ser fundidas	Regras diferentes

Fonte: Adaptado de: (PEDRYCZ e GOMIDE, 2007).

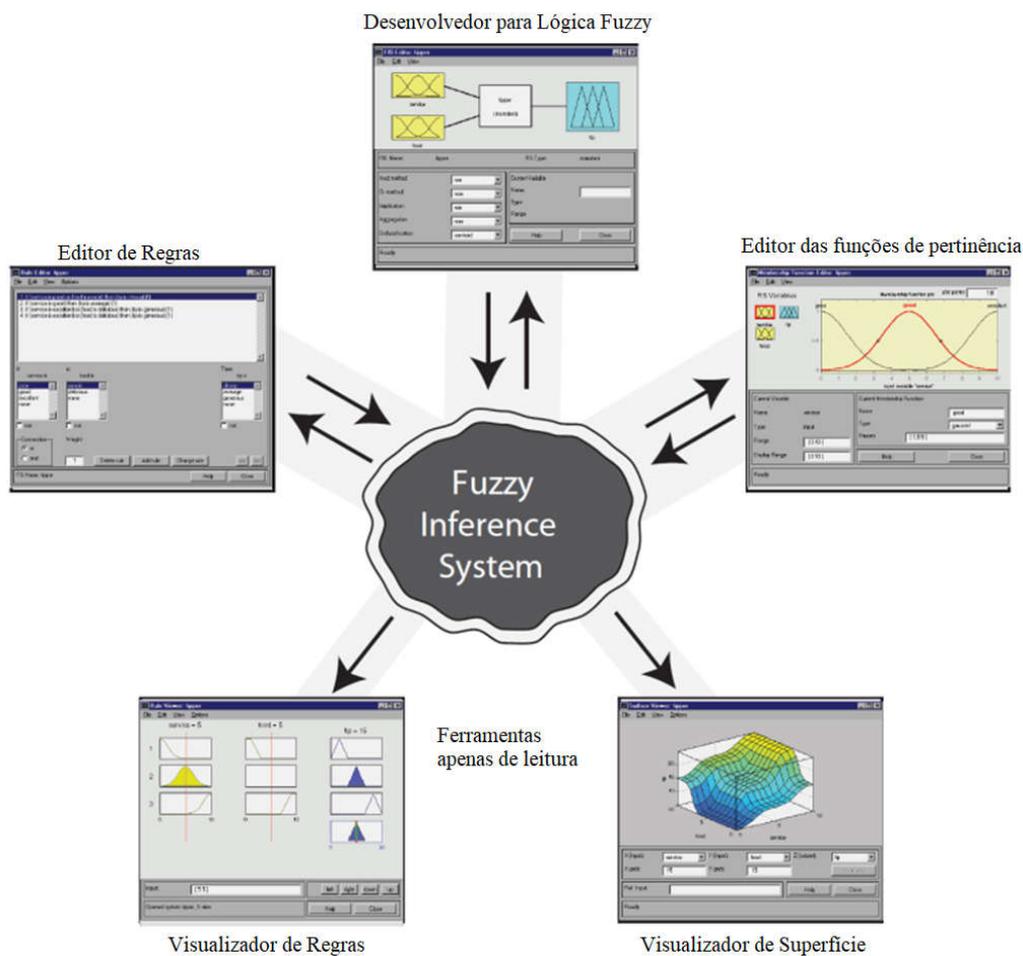
O controlador Mamdani realiza esta tarefa através de uma técnica gráfica. Devido à sua versatilidade, pode ser implementado em algumas variações, de acordo com os diferentes métodos de inferência possíveis, entre os quais os mais comuns são a composição máximo dos mínimos (*max-min*) e a composição máximo dos produtos (*max-product*) (PEI ZHAI, 2012; NETO, 2012). Essa dissertação adotou a composição máximo dos mínimos, onde a agregação do conjunto de regras é realizada pelo operador união (operador lógico *or*). Já dentro de cada regra, as condições são relacionadas com o operador intersecção (operador lógico *and*). Esse método de fuzzificação é também utilizado em (AZZOUZ, FARAG e EL-SAADANY, 2017; SOROUDI, 2012).

Na terceira e última etapa do raciocínio *Fuzzy*, a partir das funções de pertinência de entrada é feita a defuzzificação com base nas regras estabelecidas. Esse processo consiste em transformar o dado *Fuzzy* em um dado quantitativo novamente, ou seja, derivar da pertinência das regras ativas um dado conclusivo do SIF elaborado para a solução do problema (NETO, 2012; PEDRYCZ e GOMIDE, 2007). Como a saída também é composta de conjuntos *Fuzzy*, o valor quantitativo final pode ser obtido através de um método gráfico para problemas simples ou de forma matemática. Dentre as possibilidades estão o método do centroide (centro de gravidade), a média aritmética e o método da disjunção (ZADEH, 1989; DOTE, 1995). De acordo com (ROSS, 2010) o método centroide é o mais usual e fisicamente atraente

de todos os métodos de defuzzificação. Na Figura 49 é exemplificado pela letra Z o método centroide, enquanto o método da média aritmética é exemplificado, também pela letra Z, na Figura 50.

Para trabalhar com SIFs, atualmente, existem aplicativos e *softwares* que dispõem dos recursos necessários para a modelagem dos sistemas nebulosos. No meio científico, um programa que é comumente utilizado pelos pesquisadores é o Matlab® (PEI ZHAI, 2012). Este *software* se destaca por se tratar de uma ferramenta matemática bastante completa, permitindo ao usuário trabalhar com um gama de funções e instrumentos aplicáveis na área tecnológica (MATHWORKS., 2016). O *software* Matlab possui uma caixa de ferramentas (*toolbox*) completa para modelar e avaliar problemas a partir da lógica *fuzzy*. Esta *toolbox* é facilmente acessada por meio do comando *fuzzy*, na janela de comandos do programa. Na Figura 51 é mostrado um resumo dos elementos que compõem um SIF e as funcionalidades presentes nessa caixa de ferramentas.

Figura 51 – Visão geral da caixa de ferramentas para os SIFs e seus recursos no Matlab.

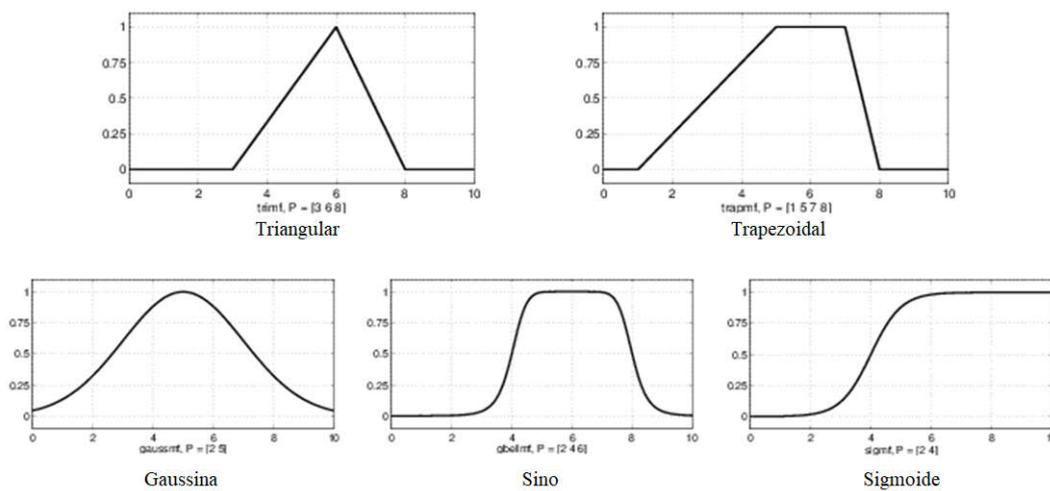


Fonte: (MATHWORKS., 2016).

A caixa de ferramentas possui um conjunto de recursos para a confecção e a edição de SIFs, tais como: o desenvolvedor do SIF, o editor de parâmetros das funções de pertinência e o editor de regras que regem a relação dos conjuntos de entrada e saída do SIF. Para verificar os resultados do sistema, têm-se o visualizador regras e o de superfície. No primeiro, com base nas regras estabelecidas, pode-se constatar como a variação das entradas influencia a saída, já no segundo é mostrada uma superfície tridimensional, que mapeia o comportamento da saída em função das variações das funções de entrada.

No total, a caixa de ferramentas possui 11 formatos padronizados para as funções de pertinência, dos quais 5 são exemplificados na Figura 52. Os tipos mais populares são os formatos triangulares, trapezoidais, gaussianas, de sino, entre outros.

Figura 52 – Formato genérico de algumas funções de pertinência, presentes no Matlab.



Fonte: (MATHWORKS., 2016).

As funções de pertinência triangulares e trapezoidais, amplamente difundidas na literatura técnica e utilizadas nessa dissertação, são descritas, respectivamente, pelos segmentos de reta conforme dado nas equações (16) e (17) (MATHWORKS., 2016).

$$\text{Fin} \quad A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{se } x \in [a, m) \\ \frac{b-x}{b-m}, & \text{se } x \in [m, b] \\ 0, & \text{se } x \geq b \end{cases} \quad (16)$$

sendo que a , m e b definem os vértices do triângulo.

Os pontos a e b representam os limites, inferior e superior, do suporte da função, sendo o suporte definido pelo conjunto de todos os elementos de X (universo de discussão) como pertinência maior que zero para o conjunto A . O ponto m é o ponto médio, no qual se apresenta a maior pertinência do conjunto, ou seja, é o ponto que mapeia elementos que pertencem completamente a esse conjunto.

$$A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < a \\ \frac{x - a}{m - a}, & \text{se } x \in [a, m) \\ 1, & \text{se } x \in [m, n) \\ \frac{b - x}{b - n}, & \text{se } x \in [n, b] \\ 0, & \text{se } x > b \end{cases} \quad (17)$$

em que a , m , n e b correspondem aos vértices do trapézio.

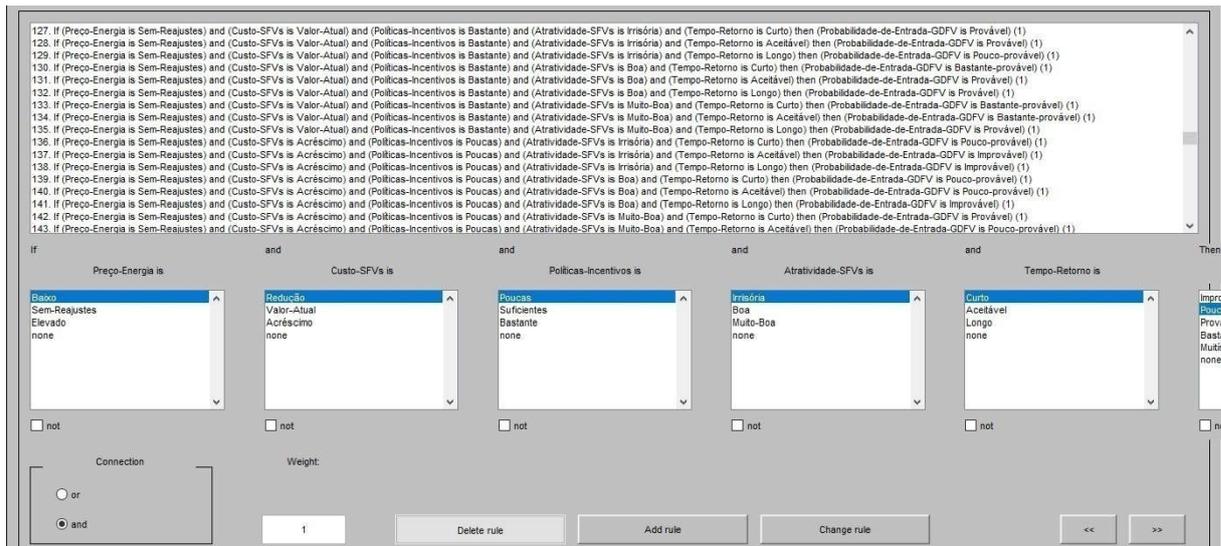
Assim como na função triangular, os pontos a e b correspondem aos limites do suporte da função, definindo o grau de pertinência 0. A diferença reside no grau de pertinência 1, o qual é delimitado pelos pontos m e n na função trapezoidal. Isso significa, em termos de classificação, que a função trapezoidal é mais generalista, pois expande para uma série de valores (definidos entre m e n), para os quais a pertinência é plena. Pode-se dizer ainda que a função triangular é uma particularização da função trapezoidal, na qual os pontos m e n correspondem ao mesmo valor (NETO, 2012).

A metodologia central da lógica difusa baseia-se em quatro conceitos: (1) conjuntos difusos: isto é, conjuntos com limites suaves; (2) variáveis linguísticas: variáveis cujos valores são qualitativa e quantitativamente descritos por um conjunto *fuzzy*; (3) distribuições de possibilidades: restrições sobre o valor de uma variável linguística imposta pela atribuição de um conjunto *fuzzy*; (4) regras *fuzzy* SE-ENTÃO: um esquema de representação de conhecimento para descrever um mapeamento funcional para uma fórmula lógica que generalizou uma implicação na lógica de dois valores (PEI ZHAI, 2012).

APÊNDICE B – ALGORITMO DO SISTEMA DE INFERÊNCIA FUZZY

Na Figura 53 é mostrada uma visão do editor de regras para exemplificar como a base de regras, que regem o SIF, é inserida na *toolbox* do Matlab.

Figura 53 – Exemplo de parte da base de regras que regem o SIF.



Fonte: (Do autor).

A seguir é apresentado o algoritmo *fuzzy* completo.

```
//SIF para estimação da entrada da GDFV
```

```
[System]
```

```
Name='SIF_GDFV1-v3'
```

```
Type='mamdani'
```

```
Version=2.0
```

```
NumInputs=5
```

```
NumOutputs=1
```

```
NumRules=243
```

```
AndMethod='min'
```

```
OrMethod='max'
```

```
ImpMethod='min'
```

```
AggMethod='max'
```

```
DefuzzMethod='centroid'
```

```
[Input1]
```

```
Name='Preço-Energia'
```

```
Range=[0 1]
```

```
NumMFs=3
```

```
MF1='Baixo':trapmf,[0 0 0.3333 0.5556]
```

```
MF2='Sem-Reajustes':trimf,[0.3333 0.5556 0.7778]
```

MF3='Elevado': 'trapmf',[0.5556 0.7778 1 1]

[Input2]

Name='Custo-SFVs'

Range=[0 1]

NumMFs=3

MF1='Redução': 'trapmf',[0 0 0.5 0.6667]

MF2='Valor-Atual': 'trimf',[0.5 0.6667 0.8333]

MF3='Acréscimo': 'trapmf',[0.6667 0.8333 1 1]

[Input3]

Name='Políticas-Incentivos'

Range=[0 1]

NumMFs=3

MF1='Poucas': 'trapmf',[0 0 0.25 0.35]

MF2='Suficientes': 'trapmf',[0.25 0.35 0.65 0.75]

MF3='Bastante': 'trapmf',[0.65 0.75 1 1]

[Input4]

Name='Atratividade-SFVs'

Range=[0 1]

NumMFs=3

MF1='Irisória': 'trapmf',[0 0 0.4 0.5333]

MF2='Boa': 'trapmf',[0.4 0.5333 0.6667 0.8]

MF3='Muito-Boa': 'trapmf',[0.6667 0.8 1 1]

[Input5]

Name='Tempo-Retorno'

Range=[0 1]

NumMFs=3

MF1='Curto': 'trapmf',[0 0 0.2 0.4]

MF2='Aceitável': 'trapmf',[0.2 0.4 0.6 0.8]

MF3='Longo': 'trapmf',[0.6 0.8 1 1]

[Output1]

Name='Probabilidade-de-Entrada-GDFV'

Range=[0 1]

NumMFs=5

MF1='Improvável': 'trimf',[0 0 0.25]

MF2='Pouco-provável': 'trapmf',[0 0.25 0.35 0.45]

MF3='Provável': 'trapmf',[0.35 0.45 0.55 0.65]

MF4='Bastante-provável': 'trapmf',[0.55 0.65 0.75 1]

MF5='Muitíssimo-Provável': 'trimf',[0.75 1 1]

[Rules]

1 1 1 1 1, 2 (1) : 1

1 1 1 1 2, 2 (1) : 1

1 1 1 1 3, 1 (1) : 1

1 1 1 2 1, 3 (1) : 1

1 1 1 2 2, 2 (1) : 1

1 1 1 2 3, 2 (1) : 1

1 1 1 3 1, 3 (1) : 1

1 1 1 3 2, 3 (1) : 1

1 1 1 3 3, 2 (1) : 1

1 1 2 1 1, 3 (1) : 1

1 1 2 1 2, 2 (1) : 1

1 1 2 1 3, 2 (1) : 1	1 3 1 3 1, 2 (1) : 1
1 1 2 2 1, 3 (1) : 1	1 3 1 3 2, 2 (1) : 1
1 1 2 2 2, 3 (1) : 1	1 3 1 3 3, 1 (1) : 1
1 1 2 2 3, 2 (1) : 1	1 3 2 1 1, 2 (1) : 1
1 1 2 3 1, 4 (1) : 1	1 3 2 1 2, 1 (1) : 1
1 1 2 3 2, 3 (1) : 1	1 3 2 1 3, 1 (1) : 1
1 1 2 3 3, 3 (1) : 1	1 3 2 2 1, 2 (1) : 1
1 1 3 1 1, 3 (1) : 1	1 3 2 2 2, 2 (1) : 1
1 1 3 1 2, 3 (1) : 1	1 3 2 2 3, 1 (1) : 1
1 1 3 1 3, 2 (1) : 1	1 3 2 3 1, 3 (1) : 1
1 1 3 2 1, 4 (1) : 1	1 3 2 3 2, 2 (1) : 1
1 1 3 2 2, 3 (1) : 1	1 3 2 3 3, 2 (1) : 1
1 1 3 2 3, 3 (1) : 1	1 3 3 1 1, 2 (1) : 1
1 1 3 3 1, 4 (1) : 1	1 3 3 1 2, 2 (1) : 1
1 1 3 3 2, 4 (1) : 1	1 3 3 1 3, 1 (1) : 1
1 1 3 3 3, 3 (1) : 1	1 3 3 2 1, 3 (1) : 1
1 2 1 1 1, 2 (1) : 1	1 3 3 2 2, 2 (1) : 1
1 2 1 1 2, 1 (1) : 1	1 3 3 2 3, 2 (1) : 1
1 2 1 1 3, 1 (1) : 1	1 3 3 3 1, 3 (1) : 1
1 2 1 2 1, 2 (1) : 1	1 3 3 3 2, 3 (1) : 1
1 2 1 2 2, 2 (1) : 1	1 3 3 3 3, 2 (1) : 1
1 2 1 2 3, 1 (1) : 1	2 1 1 1 1, 3 (1) : 1
1 2 1 3 1, 3 (1) : 1	2 1 1 1 2, 2 (1) : 1
1 2 1 3 2, 2 (1) : 1	2 1 1 1 3, 2 (1) : 1
1 2 1 3 3, 2 (1) : 1	2 1 1 2 1, 3 (1) : 1
1 2 2 1 1, 2 (1) : 1	2 1 1 2 2, 3 (1) : 1
1 2 2 1 2, 2 (1) : 1	2 1 1 2 3, 2 (1) : 1
1 2 2 1 3, 1 (1) : 1	2 1 1 3 1, 4 (1) : 1
1 2 2 2 1, 3 (1) : 1	2 1 1 3 2, 3 (1) : 1
1 2 2 2 2, 2 (1) : 1	2 1 1 3 3, 3 (1) : 1
1 2 2 2 3, 2 (1) : 1	2 1 2 1 1, 3 (1) : 1
1 2 2 3 1, 3 (1) : 1	2 1 2 1 2, 3 (1) : 1
1 2 2 3 2, 3 (1) : 1	2 1 2 1 3, 2 (1) : 1
1 2 2 3 3, 2 (1) : 1	2 1 2 2 1, 4 (1) : 1
1 2 3 1 1, 3 (1) : 1	2 1 2 2 2, 3 (1) : 1
1 2 3 1 2, 2 (1) : 1	2 1 2 2 3, 3 (1) : 1
1 2 3 1 3, 2 (1) : 1	2 1 2 3 1, 4 (1) : 1
1 2 3 2 1, 3 (1) : 1	2 1 2 3 2, 4 (1) : 1
1 2 3 2 2, 3 (1) : 1	2 1 2 3 3, 3 (1) : 1
1 2 3 2 3, 2 (1) : 1	2 1 3 1 1, 4 (1) : 1
1 2 3 3 1, 4 (1) : 1	2 1 3 1 2, 3 (1) : 1
1 2 3 3 2, 3 (1) : 1	2 1 3 1 3, 3 (1) : 1
1 2 3 3 3, 3 (1) : 1	2 1 3 2 1, 4 (1) : 1
1 3 1 1 1, 1 (1) : 1	2 1 3 2 2, 4 (1) : 1
1 3 1 1 2, 1 (1) : 1	2 1 3 2 3, 3 (1) : 1
1 3 1 1 3, 1 (1) : 1	2 1 3 3 1, 5 (1) : 1
1 3 1 2 1, 2 (1) : 1	2 1 3 3 2, 4 (1) : 1
1 3 1 2 2, 1 (1) : 1	2 1 3 3 3, 4 (1) : 1
1 3 1 2 3, 1 (1) : 1	2 2 1 1 1, 2 (1) : 1

2 2 1 1 2, 2 (1) : 1	2 3 3 3 1, 4 (1) : 1
2 2 1 1 3, 1 (1) : 1	2 3 3 3 2, 3 (1) : 1
2 2 1 2 1, 3 (1) : 1	2 3 3 3 3, 3 (1) : 1
2 2 1 2 2, 2 (1) : 1	3 1 1 1 1, 3 (1) : 1
2 2 1 2 3, 2 (1) : 1	3 1 1 1 2, 3 (1) : 1
2 2 1 3 1, 3 (1) : 1	3 1 1 1 3, 2 (1) : 1
2 2 1 3 2, 3 (1) : 1	3 1 1 2 1, 4 (1) : 1
2 2 1 3 3, 2 (1) : 1	3 1 1 2 2, 3 (1) : 1
2 2 2 1 1, 3 (1) : 1	3 1 1 2 3, 3 (1) : 1
2 2 2 1 2, 2 (1) : 1	3 1 1 3 1, 4 (1) : 1
2 2 2 1 3, 2 (1) : 1	3 1 1 3 2, 4 (1) : 1
2 2 2 2 1, 3 (1) : 1	3 1 1 3 3, 3 (1) : 1
2 2 2 2 2, 3 (1) : 1	3 1 2 1 1, 4 (1) : 1
2 2 2 2 3, 2 (1) : 1	3 1 2 1 2, 3 (1) : 1
2 2 2 3 1, 4 (1) : 1	3 1 2 1 3, 3 (1) : 1
2 2 2 3 2, 3 (1) : 1	3 1 2 2 1, 4 (1) : 1
2 2 2 3 3, 3 (1) : 1	3 1 2 2 2, 4 (1) : 1
2 2 3 1 1, 3 (1) : 1	3 1 2 2 3, 3 (1) : 1
2 2 3 1 2, 3 (1) : 1	3 1 2 3 1, 5 (1) : 1
2 2 3 1 3, 2 (1) : 1	3 1 2 3 2, 4 (1) : 1
2 2 3 2 1, 4 (1) : 1	3 1 2 3 3, 4 (1) : 1
2 2 3 2 2, 3 (1) : 1	3 1 3 1 1, 4 (1) : 1
2 2 3 2 3, 3 (1) : 1	3 1 3 1 2, 4 (1) : 1
2 2 3 3 1, 4 (1) : 1	3 1 3 1 3, 3 (1) : 1
2 2 3 3 2, 4 (1) : 1	3 1 3 2 1, 5 (1) : 1
2 2 3 3 3, 3 (1) : 1	3 1 3 2 2, 4 (1) : 1
2 3 1 1 1, 2 (1) : 1	3 1 3 2 3, 4 (1) : 1
2 3 1 1 2, 1 (1) : 1	3 1 3 3 1, 5 (1) : 1
2 3 1 1 3, 1 (1) : 1	3 1 3 3 2, 5 (1) : 1
2 3 1 2 1, 2 (1) : 1	3 1 3 3 3, 4 (1) : 1
2 3 1 2 2, 2 (1) : 1	3 2 1 1 1, 3 (1) : 1
2 3 1 2 3, 1 (1) : 1	3 2 1 1 2, 2 (1) : 1
2 3 1 3 1, 3 (1) : 1	3 2 1 1 3, 2 (1) : 1
2 3 1 3 2, 2 (1) : 1	3 2 1 2 1, 3 (1) : 1
2 3 1 3 3, 2 (1) : 1	3 2 1 2 2, 3 (1) : 1
2 3 2 1 1, 2 (1) : 1	3 2 1 2 3, 2 (1) : 1
2 3 2 1 2, 2 (1) : 1	3 2 1 3 1, 4 (1) : 1
2 3 2 1 3, 1 (1) : 1	3 2 1 3 2, 3 (1) : 1
2 3 2 2 1, 3 (1) : 1	3 2 1 3 3, 3 (1) : 1
2 3 2 2 2, 2 (1) : 1	3 2 2 1 1, 3 (1) : 1
2 3 2 2 3, 2 (1) : 1	3 2 2 1 2, 3 (1) : 1
2 3 2 3 1, 3 (1) : 1	3 2 2 1 3, 2 (1) : 1
2 3 2 3 2, 3 (1) : 1	3 2 2 2 1, 4 (1) : 1
2 3 2 3 3, 2 (1) : 1	3 2 2 2 2, 3 (1) : 1
2 3 3 1 1, 3 (1) : 1	3 2 2 2 3, 3 (1) : 1
2 3 3 1 2, 2 (1) : 1	3 2 2 3 1, 4 (1) : 1
2 3 3 1 3, 2 (1) : 1	3 2 2 3 2, 4 (1) : 1
2 3 3 2 1, 3 (1) : 1	3 2 2 3 3, 3 (1) : 1
2 3 3 2 2, 3 (1) : 1	3 2 3 1 1, 4 (1) : 1
2 3 3 2 3, 2 (1) : 1	3 2 3 1 2, 3 (1) : 1

3 2 3 1 3, 3 (1) : 1
3 2 3 2 1, 4 (1) : 1
3 2 3 2 2, 4 (1) : 1
3 2 3 2 3, 3 (1) : 1
3 2 3 3 1, 5 (1) : 1
3 2 3 3 2, 4 (1) : 1
3 2 3 3 3, 4 (1) : 1
3 3 1 1 1, 2 (1) : 1
3 3 1 1 2, 2 (1) : 1
3 3 1 1 3, 1 (1) : 1
3 3 1 2 1, 3 (1) : 1
3 3 1 2 2, 2 (1) : 1
3 3 1 2 3, 2 (1) : 1
3 3 1 3 1, 3 (1) : 1
3 3 1 3 2, 3 (1) : 1
3 3 1 3 3, 2 (1) : 1
3 3 2 1 1, 3 (1) : 1

3 3 2 1 2, 2 (1) : 1
3 3 2 1 3, 2 (1) : 1
3 3 2 2 1, 3 (1) : 1
3 3 2 2 2, 3 (1) : 1
3 3 2 2 3, 2 (1) : 1
3 3 2 3 1, 4 (1) : 1
3 3 2 3 2, 3 (1) : 1
3 3 2 3 3, 3 (1) : 1
3 3 3 1 1, 3 (1) : 1
3 3 3 1 2, 3 (1) : 1
3 3 3 1 3, 2 (1) : 1
3 3 3 2 1, 4 (1) : 1
3 3 3 2 2, 3 (1) : 1
3 3 3 2 3, 3 (1) : 1
3 3 3 3 1, 4 (1) : 1
3 3 3 3 2, 4 (1) : 1
3 3 3 3 3, 3 (1) : 1