



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica
Programa de Engenharia Urbana

Luiz Eduardo Benevides Pequeno

GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM HABITAÇÕES DE
INTERESSE SOCIAL: ESTUDO DE CASO DO CONDOMÍNIO VILLAGIO DO CAMPO,
RIO DE JANEIRO/RJ

Rio de Janeiro
2019



UFRJ

Luiz Eduardo Benevides Pequeno

GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM HABITAÇÕES DE
INTERESSE SOCIAL: ESTUDO DE CASO DO CONDOMÍNIO VILLAGIO DO CAMPO,
RIO DE JANEIRO/RJ

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientador: Armando Carlos de Pina Filho

Rio de Janeiro
2019

Pequeno, Luiz Eduardo Benevides.

Geração de Energia Solar Fotovoltaica em Habitações de Interesse Social: Estudo de Caso do Condomínio Villagio do Campo, Rio de Janeiro/RJ / Luiz Eduardo Benevides Pequeno. Rio de Janeiro, 2019.

109 f.: 70 il.; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Programa de Engenharia Urbana, Rio de Janeiro, 2019.

Orientador: Armando Carlos de Pina Filho

1. Energia Elétrica. 2. Energia Renovável. 3. Eficiência Energética. 4. Energia Solar. 5. Habitação de Interesse Social. I. Pina Filho, Armando Carlos de. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica. III. Título.



UFRJ

**GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM HABITAÇÕES DE
INTERESSE SOCIAL: ESTUDO DE CASO DO CONDOMÍNIO VILLAGIO DO CAMPO,
RIO DE JANEIRO/RJ**

Luiz Eduardo Benevides Pequeno

Orientador: Armando Carlos de Pina Filho

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Urbana da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Aprovada pela Banca:

Presidente, Prof. Armando Carlos de Pina Filho, D.Sc., PEE/POLI/UFRJ

Prof. Julio César Boscher Torres, D.Sc., PEE/POLI/UFRJ

Prof. Walter Issamu Suemitsu, Dr. Ing., PEE/COPPE/UFRJ

Rio de Janeiro
2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais que sempre colocaram a educação dos filhos em primeiro lugar. Este trabalho é dedicado à minha família e em memória de meu pai.

Aos meus familiares, especialmente à minha esposa por todo o apoio durante o mestrado e pela ajuda na revisão deste trabalho.

Aos professores do PEU pelos conhecimentos transmitidos. A todos os professores de minha vida acadêmica que contribuíram para minha formação profissional.

À UFRJ que me apoiou e permitiu realizar este trabalho.

Agradeço, por fim, ao professor Armando, orientador deste trabalho, por todo o auxílio, atenção e disponibilidade durante o período de realização deste trabalho e aos professores Julio e Walter por aceitarem o convite de compor a banca e apontar importantes sugestões.

RESUMO

PEQUENO, Luiz Eduardo Benevides. **Geração de Energia Solar Fotovoltaica em Habitações de Interesse Social: Estudo de Caso do Condomínio Villagio do Campo, Rio de Janeiro/RJ.** Rio de Janeiro, 2019. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Urbana, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

A utilização de fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis é a principal responsáveis pela emissão de dióxido de carbono. O crescimento mundial da geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis foi impulsionado pela crescente preocupação com a preservação do meio ambiente e a busca pela diversificação da matriz elétrica, associado com o aumento na demanda por energia e desenvolvimento da indústria. No Brasil, a energia solar vem se destacando, em particular na autoprodução no setor residencial. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo apresentar uma forma sustentável de geração de eletricidade em residências de interesse social, através de projetos simples e baratos. É apresentada uma revisão bibliográfica do recurso solar. Para a simulação de geração de energia foi utilizado um software para projetos fotovoltaicos e os dados de entrada referentes ao estudo de caso para um condomínio do Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV), existente na cidade do Rio de Janeiro. Foram avaliados dois projetos típicos de uma instalação fotovoltaica, um capaz de gerar no mínimo 800 kWh/ano e outro capaz de gerar 2.440 kWh/ano, reduzindo o consumo de energia elétrica proveniente da rede da concessionária de distribuição local em 30 e 92%, respectivamente. A metodologia utilizada se inicia pela caracterização do consumo das residências do estudo de caso e o levantamento das principais características a serem consideradas no desenvolvimento de um projeto fotovoltaico conectado à rede. São apresentados os benefícios econômicos e sustentáveis que a implantação dos sistemas proporcionará.

Palavras-chave: energia elétrica, energia renovável, eficiência energética, energia solar, habitação de interesse social.

ABSTRACT

PEQUENO, Luiz Eduardo Benevides. **Generation of Photovoltaic Solar Energy in Houses of Social Interest: Case Study of Villagio do Campo Condominium, Rio de Janeiro/RJ.** Rio de Janeiro, 2019. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Urbana, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

The use of fossil fuel-based energy sources is primarily responsible for carbon dioxide emissions. The worldwide growth of electricity generation from renewable sources has been driven by the growing concern with the preservation of the environment and the pursuit of diversification of the electrical matrix, associated with increased demand for energy and industry development. In Brazil, solar energy has been standing out, particularly in self-production in the residential sector. Thus, this paper aims to present a sustainable way of generating electricity in homes of social interest through simple and inexpensive projects. A bibliographic review of the solar resource is presented. For the simulation of power generation, software for photovoltaic projects was used and the input data related to the case study for a condominium of the Minha Casa Minha Vida Program (PMCMV), existing in the city of Rio de Janeiro. Two typical projects for a photovoltaic installation were evaluated, one capable of generating at least 800 kWh/year and one capable of generating 2,440 kWh/year, reducing electricity consumption from the local utility grid by 30 and 92%, respectively. The methodology used starts by characterizing the consumption of the case study residences and the survey of the main characteristics to be considered in the development of a grid connected photovoltaic project. The economic and sustainable benefits that the implementation of the systems will bring about are presented.

Keywords: electricity, renewable energy, energy efficiency, solar energy, housing of social interest.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	ASPECTOS INICIAIS	16
1.2	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA	18
1.3	OBJETIVOS DO TRABALHO	19
1.3.1	Objetivo geral	19
1.3.2	Objetivos específicos	19
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	PANORAMA ENERGÉTICO MUNDIAL	22
2.2	PANORAMA ENERGÉTICO BRASILEIRO	25
2.2.1	Compromisso brasileiro para o Acordo de Paris	26
2.3	ENERGIA SOLAR	27
2.3.1	Conceitos básicos	29
2.3.2	Tipos de radiação solar	32
2.4	POTENCIAL DE GERAÇÃO NO BRASIL	35
2.5	PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA	39
2.6	CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	41
2.7	ASSOCIAÇÕES DE CÉLULAS	44
2.8	MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	45
2.9	ASSOCIAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	49
2.10	SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	52
2.10.1	Sistemas isolados da rede	54
2.10.2	Sistemas conectados à rede	54
2.11	INVERSORES	57
2.12	SEGUIDOR DE PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA – MPPT	58
2.13	MICROINVERSORES	59

2.14	MEDIDORES	60
2.15	ÍNDICE DE PERFORMANCE	60
3	AUTOPRODUTORES DE ENERGIA	61
3.1	MICRO E MINIGERAÇÃO	63
3.2	GERAÇÃO DE ENERGIA NAS UNIDADES CONSUMIDORAS	63
3.3	MODELO DE CONEXÃO RESIDENCIAL COM A REDE ELÉTRICA	64
3.4	SISTEMA DE MEDIÇÃO	65
3.5	PROGRAMA MINHA CASA MINHA VIDA	66
3.6	GERAÇÃO FOTOTOLTAICA NO PMCMV	67
4	METODOLOGIA	69
4.1	LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA	69
4.2	CARGA A SER ATENDIDA	69
4.3	CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	70
4.4	SIMULAÇÃO ATRAVÉS DE SOFTWARE PVSYSY	70
5	ESTUDO DE CASO	76
5.1	CARACTERÍSTICAS DO CONDOMÍNIO	76
5.2	PERFIL DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA	82
5.3	DADOS DE IRRADIAÇÃO LOCAL	84
5.4	PRÉ-DIMENSIONAMENTO PARA 800 KWH/ANO	84
5.5	DIMENSIONAMENTO PARA 800 KWH/ANO	85
5.6	BALANÇO ENERGÉTICO ZERO	89
5.6.1	Pré-dimensionamento para 2.440 kWh/ano	89
5.6.2	Dimensionamento para 2.440 kWh/ano	90
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	93
6.1	MODELO PROPOSTO PARA 800 KWH/ANO	94
6.2	MODELO PROPOSTO PARA 2.440 KWH/ANO	95
6.3	REDUÇÃO DA EMISSÃO DE CO ₂	96

6.4	CÁLCULO DO PAYBACK	98
7	CONCLUSÕES	99
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
	APÊNDICE I.....	103
	APÊNDICE II.....	109

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Capacidade Global de Energia Renovável, 2007-2017.	23
Figura 2. Capacidade Global Solar Fotovoltaica e Adições Anuais, 2007-2017.	24
Figura 3. Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte.	25
Figura 4. Movimento da Terra em torno do Sol e as estações do ano para o hemisfério Sul. .	27
Figura 5. Declinação solar em quatro posições da Terra ao longo do ano.	28
Figura 6. Variação da irradiância solar extraterrestre ao longo do ano.	29
Figura 7. Ilustração dos ângulos entre o Sol em relação a um plano horizontal.	31
Figura 8. Orientação de uma superfície inclinada em relação ao mesmo plano.	31
Figura 9. Irradiância incidente sobre uma superfície horizontal e uma superfície inclinada. .	32
Figura 10. Irradiância solar incidente no topo da atmosfera.	33
Figura 11. Componentes da radiação solar.	34
Figura 12. Radiação Solar Global Horizontal (GHI) Média Anual.	36
Figura 13. Oferta Interna de Energia Elétrica.	37
Figura 14. Mapa de geração fotovoltaica anual estimada, para SFVC, em kWh/kWN/ano. ...	38
Figura 15. Desenvolvimento das Células Fotovoltaicas.	40
Figura 16. Curvas características das células fotovoltaicas.	41
Figura 17. Potência elétrica em função da corrente elétrica de uma célula fotovoltaica de silício cristalino.	42
Figura 18. Influência da variação da irradiância solar na curva característica I-V.	43
Figura 19. Influência da variação da temperatura na curva característica I-V.	43
Figura 20. Curva I-V de duas células fotovoltaicas de silício cristalino conectadas em série. .	44
Figura 21. Curva I-V de duas células fotovoltaicas de silício cristalino conectadas em paralelo (PINHO & GALDINO, 2014).	45
Figura 22. Curva característica I-V e curva de potência P-V para um módulo com potência nominal de 100 Wp.	47
Figura 23. Efeito causado pela variação da irradiância solar sobre a curva I-V.	48
Figura 24. Efeito causado pela variação da temperatura sobre a curva I-V.	48
Figura 25. Curva I-V para uma associação em série de módulos fotovoltaicos.	50
Figura 26. Curva I-V para uma associação em paralelo de módulos fotovoltaicos.	50
Figura 27. Célula, Módulo e Arranjo fotovoltaico, respectivamente.	51
Figura 28. Sistema aplicado num telhado.	52

Figura 29. Sistema Integrado, metrô Coney Island.	53
Figura 30. Exemplos de sistemas fotovoltaicos.....	54
Figura 31. Arranjo fotovoltaico com seguidor do ponto de máxima potência.	56
Figura 32. Diferença de onda entre senóide pura e senóide modificada.	58
Figura 33. Microinversor de dois canais com MPPT individual.	59
Figura 34. Forma de conexão do Acessante à rede de BT da Light.	65
Figura 35. Curva de Carga (dia útil) e Curva de Geração Fotovoltaica.	66
Figura 36. Faixas de renda do PMCMV.....	67
Figura 37. Diagrama de blocos das etapas de simulação.	72
Figura 38. Tela de seleção do tipo de sistema a ser simulado.	73
Figura 39. Tela inicial do PVSyst.....	73
Figura 40. Tela de configuração do sistema conectado à rede.	74
Figura 41. Tela para especificação do sistema a ser simulado.	74
Figura 42. Tela para especificação do sistema a ser simulado.	75
Figura 43. Imagem de satélite do condomínio estudado.	77
Figura 44. Desvio azimutal do Bloco 1 (9°) e do Bloco 2 (16°).....	77
Figura 45. Desvio azimutal do Bloco 3 (55°) e do Bloco 4 (67°).....	78
Figura 46. Desvio azimutal do Bloco 5 (81°).	78
Figura 47. Imagem do condomínio estudado.	79
Figura 48. Imagem do condomínio estudado.	79
Figura 49. Imagem do condomínio estudado.	79
Figura 50. Corte da fachada.....	80
Figura 51. Telhado do empreendimento.....	80
Figura 52. Corte do empreendimento.	81
Figura 53. Planta baixa da residência.	81
Figura 54. Consumo mensal da Casa de Referência.	82
Figura 55. Dados de irradiância do local.....	84
Figura 56. Entrada de dados do sistema.	85
Figura 57. Resultados principais.	86
Figura 58. Relatório de saída.....	86
Figura 59. Diagrama de perdas.....	87
Figura 60. Consumo da residência com geração.	88
Figura 61. Economia anual de energia.	88

Figura 62. Resultados principais.	90
Figura 63. Relatório de saída.	91
Figura 64. Diagrama de perdas.	91
Figura 65. Consumo da residência com geração.	92
Figura 66. Economia anual de energia.	92
Figura 67. Microinversor e 2 módulos.	94
Figura 68. Projeção do telhado com dois módulos por residência.	94
Figura 69. Três microinversores com dois módulos cada.	95
Figura 70. Projeção do telhado com dois módulos por residência.	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Consumo por classe (2017-2016).....	17
Tabela 2. Capacidade instalada de geração elétrica por região no mundo.....	22
Tabela 3. Capacidade instalada de geração elétrica no mundo - 10 maiores países em 2014 (GW).....	23
Tabela 4. Dados estimados sobre empregos diretos e indiretos, por país e por tecnologia.....	24
Tabela 5. Valores típicos de albedo para diferentes superfícies.....	34
Tabela 6. Dados de painéis solares.....	49
Tabela 7. Usinas autoprodutores de energia.....	62
Tabela 8. Tipos de unidades com geração distribuída.....	62
Tabela 9. Provisão de sistemas alternativos de geração de energia para empreendimentos do PMCMV.....	67
Tabela 10. Dados técnicos fornecidos em bancos de dados.....	75
Tabela 11. Inclinação e Desvio Azimutal do condomínio.....	78
Tabela 12. Consumo mensal das residências.....	83
Tabela 13. Pré-dimensionamento para 800 kWh/ano.....	85
Tabela 14. Pré-dimensionamento para 2.440 kWh/ano.....	89
Tabela 15. Fator médio de emissão de CO ₂ no SIN.....	97
Tabela 16. Redução das emissões de CO ₂	97
Tabela 17. Pesquisa de preços.....	98
Tabela 18. Cálculo do payback simplificado.....	98

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

A – Ampère

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BEN – Balanço Energético Nacional

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

CEPEL – Centro de Pesquisa da Eletrobrás

CO₂ – Dióxido de Carbono

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

EUA – Estados Unidos da América

GW – Gigawatt

GWh – Gigawatt-hora

h – Hora

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

Icc ou Isc – Corrente de Curto Circuito

kg – Quilograma

km² – Quilômetro Quadrado

kW – Quilowatt

kWh – Quilowatt hora

kW_N – Quilowatt nominal

kW_p – Quilowatt pico

m – Metro

m² – Metro Quadrado

MME – Ministério de Minas e Energia

MPPT – Maximum Power Point Tracking / Seguidor do Ponto de Máxima Potência

MW – Megawatt

MWh – Megawatt-hora

MW_p – Megawatt-pico

ONS – Operador Nacional do Sistema

PCH – Pequena Central Hidrelétrica

PMCMV – Programa Minha Casa Minha Vida

PWM – Pulse With Modulation / Modulação por Pulsos

RPM – Rotação por Minuto

R\$ – Reais

SIN – Sistema Interligado Nacional

V – Volt

Voc – Tensão de circuito Aberto

W – Watt

Wh – Watt-hora

Wp – Watt-pico

°C – Graus Celsius

1 INTRODUÇÃO

O consumo energético continuará aumentando como resultado do crescimento da população, aumento das exigências de conforto e mudanças climáticas. Os custos de energia podem contribuir consideravelmente para o ônus financeiro geral da habitação para muitas famílias de baixa renda, tornando as condições confortáveis de moradia inacessíveis para elas. As famílias de baixa renda são incapazes de adotar medidas de eficiência energética, apesar do forte aumento no preço da energia.

O Ministério das Cidades, através da Portaria 643/2017, apresenta as condições gerais para provisão de sistemas alternativos de geração de energia para empreendimentos do Programa Minha Casa, Minha Vida (PMCMV), visando à sustentabilidade ambiental dos empreendimentos, com obtenção de maior eficiência energética e contribuindo para a economia de energia e redução de despesas dos beneficiários.

Alguns aspectos iniciais sobre o tema, bem como a justificativa, objetivos e estrutura deste trabalho serão apresentados nas seções subseqüentes.

1.1 ASPECTOS INICIAIS

A sociedade moderna depende de um alto consumo de energia baseado, principalmente, em derivados de combustíveis fósseis que possuem quantidades limitadas. A emissão de dióxido de carbono (CO₂), resultado de sua combustão, ameaça agravar a mudança climática global, razão pela qual os estudos sugerem que o planeta deva reduzir de 40 a 70% as emissões de gases de efeito estufa, para limitar o aquecimento global a um máximo de 2°C (ONU, 2015).

As fontes renováveis produzem energia limpa, sendo uma alternativa aos combustíveis fósseis. Inicialmente mais caras, tornaram-se competitivas com o aumento da produção e dos avanços tecnológicos, resultando em redução de custos. O crescimento mundial da geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis foi impulsionado pela crescente preocupação com a preservação do meio ambiente e pela busca pela diversificação da matriz elétrica, associado com o aumento na demanda por energia e desenvolvimento da indústria.

A energia solar é a principal fonte do nosso planeta e uma das mais importantes fontes de energia renovável. A utilização de energias renováveis colabora para a redução das emissões de poluentes no setor energético. No Brasil, a energia solar vem se destacando, em particular na autoprodução no setor residencial. Este setor é o segundo maior consumidor de energia elétrica no país, superado pelo setor industrial. Em 2017 o setor residencial consumiu 28,66% de toda a energia produzida no Brasil (Tabela 1).

Tabela 1. Consumo por classe (2017-2016).

	2017	2016	Δ (GWh)	% Cres. (17/16)	Particip. (2017)
Brasil	462.131	458.449	3.682	0,8	100%
Residencial	132.468	131.408	1.060	0,8	28,66%
Industrial	166.815	164.972	1.843	1,1	36,10%
Comercial	87.623	87.363	260	0,3	18,96%
Outros	75.225	74.707	518	0,7	16,28%

Fonte: EPE. Adaptado pelo autor.

Na Tabela 1 há montante de consumo na rede, para os anos de 2016 e 2017, por classe de consumo, a taxa de crescimento em 2017 e a participação de cada classe no consumo em 2017.

Em 1997, o surgimento do protocolo de Quioto representou um dos primeiros passos para frear as emissões dos gases de efeito estufa (GEE), servindo de base para um futuro sustentável. Com a celebração do Acordo de Paris, na COP 21, realizada em 2015, a preocupação com a geração de energia por fontes renováveis tornou-se ainda maior. O Brasil se comprometeu a reduzir as emissões de gases de efeito estufa, em 2025 e 2030, respectivamente em 37% e 43% em relação aos níveis de 2005.

O Brasil possui a matriz energética mais renovável do mundo, com aproximadamente 75% de fontes renováveis na oferta de energia elétrica. Para alcançar as metas firmadas será necessário expandir o uso de fontes de energia não fóssil, aumentando a parcela de energias renováveis (além da energia hídrica) para ao menos 23% até 2030, principalmente pelo aumento da participação das fontes solar, eólica e biomassa (EPE, 2016).

O Brasil possui grande potencial para geração de energia a partir da irradiação solar, que chega a ser superior aos de países onde projetos para aproveitamento de energia solar são amplamente disseminados, como Alemanha, França e Espanha.

Os módulos fotovoltaicos geram eletricidade a partir de uma fonte inesgotável, na nossa escala de tempo: o Sol. Este processo permite que uma fonte de energia alternativa confiável esteja disponível durante algumas horas por dia. A conversão fotovoltaica é a conversão direta da luz solar em eletricidade. Dispositivos fotovoltaicos são robustos, exigem pouca manutenção e uma de suas maiores vantagens é a flexibilidade de sua construção, permitindo a montagem de sistemas capazes de gerar poucos watts até megawatts. Por isso, podem ser utilizados como fonte de energia para bombeamento de água, sistemas de telecomunicações, satélites, veículos espaciais e até para usinas elétricas.

Com um vasto conjunto de aplicações, a demanda por energia fotovoltaica está aumentando a cada ano. Segundo a ANEEL, o Brasil fechou 2017 com 1.112 MW em capacidade de geração solar fotovoltaica instalada, dos quais 935 MW são projetos de geração centralizada e 177 MW em geração distribuída.

1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA

O potencial solar do Brasil é relativamente superior ao dos países mais desenvolvidos em termos de energia solar. Segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017), a irradiação média anual brasileira varia entre 1.500 e 2.400 kWh/m²/ano, valores que são significativamente superiores à maioria dos países europeus, cujas estatísticas indicam intervalos entre 900 e 1.250 kWh/m²/ano na Alemanha, entre 900 e 1.650 kWh/m²/ano na França e entre 1.200 e 1.850 kWh/m²/ano na Espanha.

Devido às características de seu ciclo diário, limitado ao período diurno e com irradiação solar, a geração fotovoltaica não substitui investimentos na ampliação e modernização do Sistema Interligado Nacional (SIN), mas pode ser vista como uma fonte economicamente viável para reduzir o pico de demanda diurno, ampliando a participação de fontes renováveis na matriz energética brasileira.

Apresentando maior facilidade de instalação, operação e manutenção, a energia fotovoltaica está entre as alternativas para a democratização da geração de energia elétrica nas

residências de interesse social, através da autoprodução de energia. Isto porque, desde 2013, é possível qualquer consumidor conectar à rede elétrica um micro ou minigerador fotovoltaico e receber créditos na fatura de energia pelo excedente produzido.

Além disso, a energia solar fotovoltaica contribui significativamente com o desenvolvimento de cidades sustentáveis, pois reduz o consumo de combustíveis fósseis, diminuindo o impacto ambiental na geração de energia.

Dentre as vantagens da energia solar fotovoltaica destacam-se:

- É uma energia limpa e que não emite gás carbônico na atmosfera;
- A economia é imediata na conta de energia;
- A eficiência do sistema é de no mínimo 80% após 25 anos;
- A manutenção do sistema é baixa e fácil de ser realizada.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.3.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo principal apresentar um estudo de caso para geração de energia fotovoltaica numa habitação de interesse social, considerando a legislação vigente da atividade de microgeração conectada na rede e as especificações mínimas para atender a portaria do Ministério das Cidades. Os modelos apresentados serão simples e baratos para serem instalados em residências de interesse social. Desta forma é possível aliar a conservação dos recursos naturais e a redução dos gastos mensais familiares com energia elétrica, além de fomentar a aplicação de novas tecnologias e geração de empregos.

1.3.2 Objetivos específicos

Pretende-se propor dois projetos fotovoltaicos, simples e baratos, considerando as características construtivas de uma residência unifamiliar pertencente a um condomínio do Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV). Além disso, serão apresentados aspectos construtivos necessários a serem utilizados no cálculo da geração fotovoltaica, considerando

as características locais próprias e as atuais condições tecnológicas e econômicas disponíveis atualmente.

O principal objetivo do sistema capaz de gerar no mínimo 800 kWh/ano é a redução do consumo de energia elétrica proveniente da rede da concessionária de distribuição local. Já o outro, será capaz de produzir a mesma quantidade de energia consumida pela residência através da rede da concessionária, de 2.440 kWh/ano, fazendo com que a mesma possua um balanço energético zero.

Os seguintes aspectos, entre outros, são desenvolvidos:

- Funcionamento da tecnologia fotovoltaica;
- O cálculo da radiação disponível e previsão de energia gerada;
- Os componentes da instalação;
- Modelo do sistema.

Para cada um dos modelos, serão calculados a redução das emissões de CO₂ e o *payback* do sistema, que é o tempo necessário para recuperar o custo de um investimento.

Espera-se, também, que este material sirva para difundir a tecnologia para autoprodução de energia através da energia solar, listando os principais parâmetros na definição do sistema a ser utilizado e as variáveis que devem ser consideradas para a tomada de decisão, além de incentivar profissionais que desejam aplicar soluções sustentáveis de geração de energia, seja numa construção nova ou existente.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é composta por sete capítulos. Sua organização se dá conforme apresentado a seguir.

O Capítulo 1 consiste de uma introdução apontando as motivações para utilização de energia solar fotovoltaica. Este capítulo apresenta também os objetivos deste trabalho.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica do panorama energético atual e do recurso solar. São descritos os cenários de geração de energia elétrica mundial e nacional, e se apresentam justificativas para o uso de uma fonte de energia alternativa

renovável no próprio local de consumo. O levantamento do panorama energético mundial foi realizado através de documentos divulgados por instituições atuantes no setor elétrico brasileiro, tal como a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e o Ministério de Minas e Energia (MME). São apresentadas características de irradiação solar e como funciona a geração fotovoltaica.

No Capítulo 3 é apresentada uma visão geral das regras impostas atualmente pelas concessionárias de energia para o acoplamento desses sistemas à rede de eletricidade pelos autoprodutores de energia.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia utilizada para a simulação de geração anual de energia dos sistemas apresentados através do software PVSyst. São apresentados os dados necessários para serem inseridos no software para as simulações.

O Capítulo 5 é dedicado ao estudo de caso da aplicação desta tecnologia renovável para suprir, em parte, a demanda de eletricidade de um empreendimento residencial do programa MCMV. Nesse estudo, além da seleção dos equipamentos a serem utilizados, foram feitas simulações do balanço de energia gerada no software PVSyst, usando dados solares e temperatura locais.

O Capítulo 6 apresenta os resultados e discussões, com detalhamento dos modelos dos sistemas fotovoltaicos propostos, além do cálculo da redução de emissão de CO₂ e do *payback*.

Por fim, o capítulo 7 relata as conclusões gerais da dissertação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PANORAMA ENERGÉTICO MUNDIAL

As pessoas utilizam energia de forma direta em casa, no trabalho e em viagens. De forma indireta, também utilizam energia ao comprar bens que consumiram energia para serem fabricados, embalados e distribuídos. Há três fatores significativos que elevam a demanda por energia: o aumento populacional, a urbanização e o aumento do padrão de vida da população. Por um lado, o uso da energia contribui para a sociedade, por outro, apresenta limites e desafios na medida em que gera impactos sobre o meio ambiente.

A Tabela 2 mostra a capacidade instalada de geração elétrica no mundo, por região. Enquanto a Tabela 3 mostra a capacidade instalada por país, com o Brasil ocupando a oitava posição.

A capacidade total de energia renovável mais que dobrou na década 2007-2017 (Figura 1). A capacidade de geração de energia renovável registrou seu maior aumento anual em 2017, com uma estimativa de 178 GW instalados em todo o mundo, aumentando a capacidade total em quase 9% em relação a 2016. A solar fotovoltaica liderou o caminho, respondendo por quase 55% da capacidade de energia renovável recém-instalada. Mais capacidade solar fotovoltaica foi adicionada em 2017 do que as adições líquidas de combustíveis fósseis e energia nuclear combinadas (REN21, 2018).

Tabela 2. Capacidade instalada de geração elétrica por região no mundo.

	2012 (GW)	2013 (GW)	2014 (GW)	Δ (2014/2013) (GW)	$\Delta\%$ Cres. (14/13)	Particip. (2014)
Mundo	5.514,6	5.736,2	6.038,7	302,5	5,3	100%
Ásia & Oceania	2.157,8	2.321,4	2.525,5	204,1	8,8	41,8%
América do Norte	1.257,9	1.257,5	1.277,8	20,3	1,6	21,2%
Europa	1.067,6	1.088,7	1.111,8	23,1	2,1	18,4%
Eurásia	336,4	370,5	383,9	13,4	3,6	6,4%
América do Sul e Central	285,4	298,0	313,8	15,8	5,3	5,2%
Oriente Médio	230,9	243,4	258,8	15,4	6,3	4,3%
África	148,7	156,6	167,0	10,4	6,6	2,8%

Fonte: EPE, 2017. Adaptado pelo autor.

Tabela 3. Capacidade instalada de geração elétrica no mundo - 10 maiores países em 2014 (GW).

	2012 (GW)	2013 (GW)	2014 (GW)	Δ (2014/2013) (GW)	$\Delta\%$ Cres. (14/13)	Particip. (2014)
Mundo	5.514,6	5.736,2	6.038,7	302,5	5,3	100%
China	1.154,6	1.267,7	1.399,5	131,8	10,4	23,2%
Estados Unidos	1.063,0	1.060,1	1.074,6	14,5	1,4	17,8%
Japão	293,3	300,8	313,4	12,6	4,2	5,2%
Índia	260,3	283,0	310,8	27,8	9,8	5,1%
Rússia	233,6	235,2	247,6	12,4	5,3	4,1%
Alemanha	177,3	186,1	198,4	12,3	6,6	3,3%
Canadá	130,7	133,3	136,8	3,5	2,6	2,3%
Brasil	121,0	126,7	133,9	7,2	5,7	2,2%
França	129,3	128,4	129,1	0,7	0,5	2,1%
Itália	124,2	124,8	121,8	-3,0	-2,4	2,0%
Outros	1.827,5	1.890,1	1.972,8	82,7	4,4	32,7%

Fonte: EPE, 2017. Adaptado pelo autor.

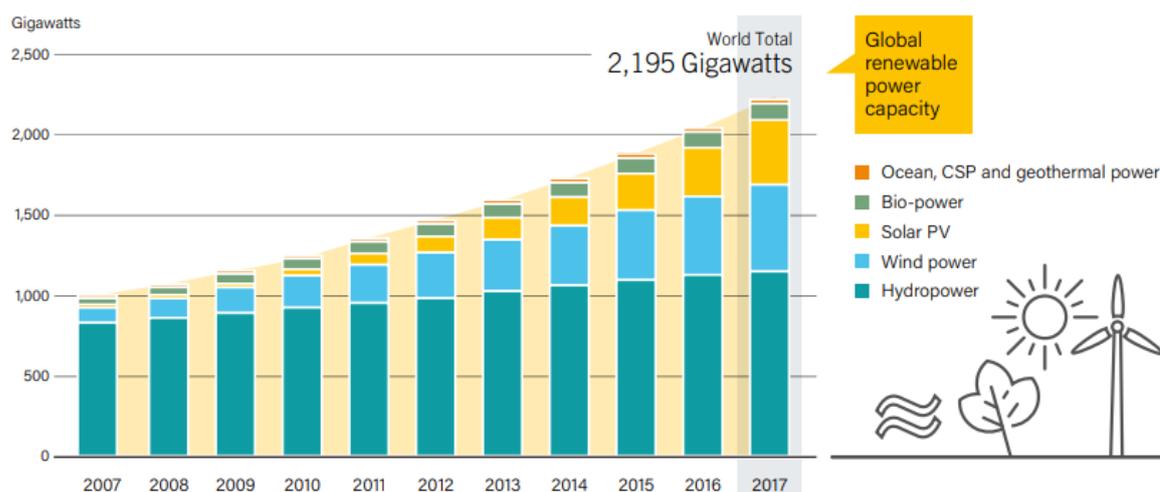


Figura 1. Capacidade Global de Energia Renovável, 2007-2017.

Fonte: REN21, 2018.

O ano de 2017 foi um marco para a energia solar fotovoltaica. O mundo adicionou mais capacidade de energia solar fotovoltaica do que de qualquer outro tipo de tecnologia de geração de energia. Globalmente, há um aumento de pelo menos 98 GW de capacidade instalada de energia solar fotovoltaica (*on e off-grid*), aumentando a capacidade total em quase um terço, para um total acumulado de aproximadamente 402 GW (Figura 2). Isso

representa, em média, o equivalente a mais de 40.000 módulos solares instalados a cada hora do ano.

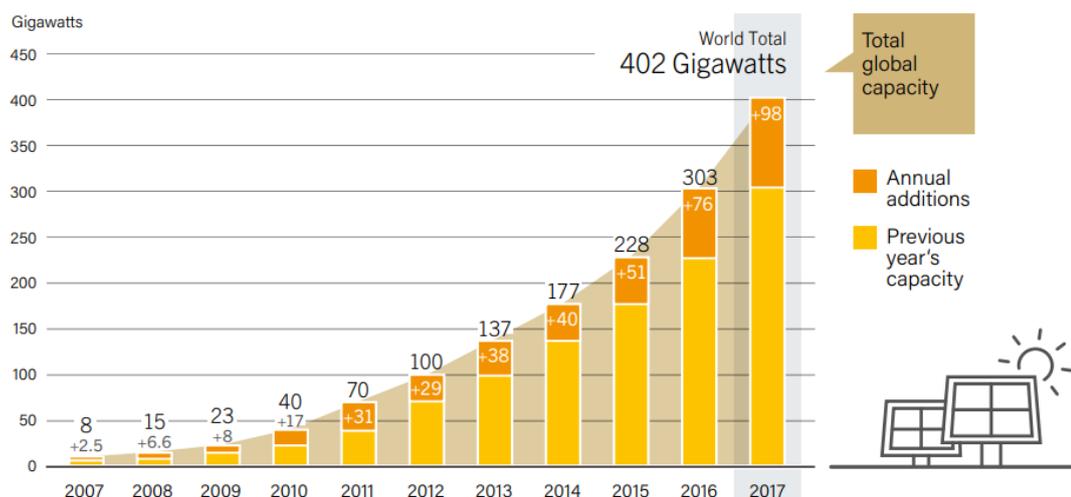


Figura 2. Capacidade Global Solar Fotovoltaica e Adições Anuais, 2007-2017.

Fonte: REN21, 2018.

A Tabela 4 apresenta dados estimados sobre empregos diretos e indiretos em alguns países considerando dois tipos de energias renováveis.

Tabela 4. Dados estimados sobre empregos diretos e indiretos, por país e por tecnologia.

	SOLAR FV (mil)	EÓLICA (mil)
China	2.216	510
Japão	272	5
Estados Unidos	233	106
Índia	164	61
União Europeia	100	344
Alemanha	36	160
Brasil	10	34
Total	3.031	1.220

Fonte: Relatório da Situação Global das Renováveis 2018 da REN21. Adaptado pelo autor.

Segundo o Relatório da Situação Global das Renováveis 2018 da REN21 (*Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*), o setor de energia renovável empregou, direta e indiretamente, aproximadamente 10,3 milhões de pessoas em 2017. O número de empregos criados mundialmente em energia solar fotovoltaica foi estimado em 3,4 milhões em 2017, 9% maior do que em 2016. A energia solar fotovoltaica foi a tecnologia que gerou mais

empregos no mundo, superando a eólica. Como principal fabricante e mercado de módulos fotovoltaicos, a China responde por dois terços desses empregos, ou cerca de 2,2 milhões.

O potencial de criação de empregos diretos e indiretos é proporcional à capacidade de geração e ao investimento que, no caso do Brasil, seria enorme. Com uma política de democratização da geração fotovoltaica no Brasil seria possível a criação de milhares de empregos, contribuindo para aumentar o desenvolvimento do mercado de energia renovável, que já vem apresentando queda de custos em tecnologia.

2.2 PANORAMA ENERGÉTICO BRASILEIRO

Segundo o Balanço Energético Nacional - 2017 (BEN), houve crescimento da micro e minigeração distribuída de energia elétrica, incentivado através de ações regulatórias como a que estabelece a possibilidade de compensação da energia excedente produzida por sistemas de menor porte (*net metering*). Em 2016, a micro e mini geração distribuída atingiu 104,1 GWh com uma potência instalada de 72,4 MW, com destaque para a fonte solar fotovoltaica, com 53,6 GWh e 56,9 MW de geração e potência instaladas, respectivamente.

A matriz energética brasileira é predominantemente renovável, correspondendo a 81,7% da oferta total de energia elétrica, com 68,1% de participação da geração hidráulica. A Figura 3 apresenta a estrutura da oferta interna de eletricidade no Brasil em 2016. Observa-se que a energia solar ainda colabora muito pouco para suprir a demanda nacional.

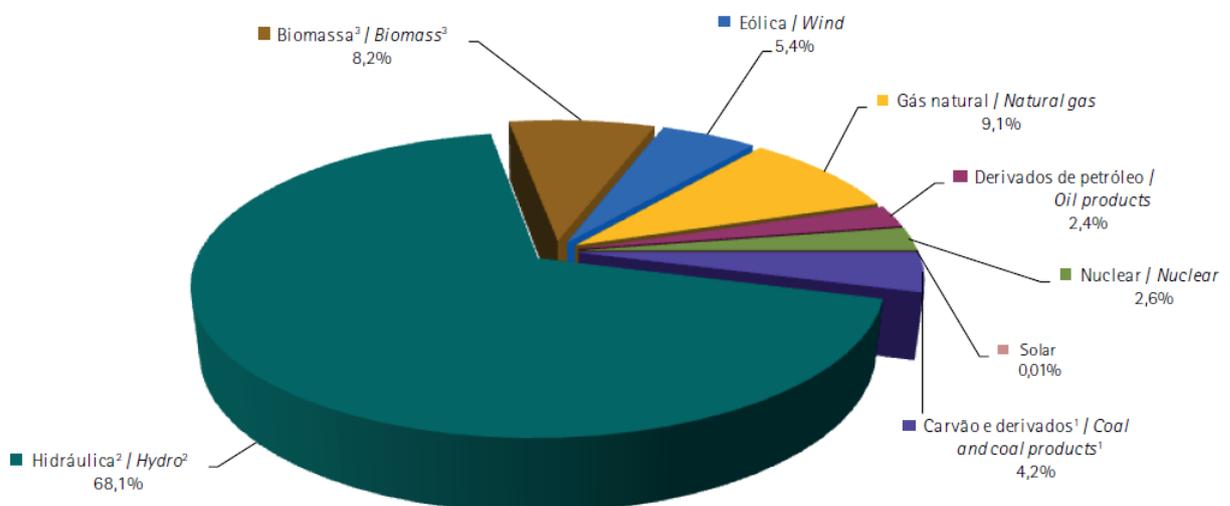


Figura 3. Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte.

Fonte: EPE, BEN 2017.

No Brasil, a água é o recurso natural mais amplamente explorado para a geração de energia elétrica, tornando-o um dos poucos países cuja matriz de geração de eletricidade é predominantemente baseada em recursos naturais.

De acordo com a Figura 3, as fontes derivadas de petróleo representam 15,7% na matriz energética brasileira. A produção de energia por estas fontes faz aumentar a emissão de gases de efeito estufa.

Diante deste cenário, faz-se necessário o investimento na diversificação e complementação da geração de energia elétrica brasileira através de outras fontes, que não sejam baseadas na hidroeletricidade.

2.2.1 Compromisso brasileiro para o Acordo de Paris

O Acordo de Paris é um tratado estabelecido entre os 196 países signatários da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, que visa a fortalecer a resposta mundial à ameaça das mudanças climáticas. O compromisso firmado entre os países participantes visa manter o aumento da temperatura média global em menos de 2 °C acima dos níveis pré-industriais e, ainda, do esforço para limitar o aumento da temperatura a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais – e isso pode ser feito, sobretudo, com a diminuição do lançamento de gases que causam o efeito estufa na atmosfera.

Em 06 de junho de 2017, foi publicado o Decreto Federal 9.073, que promulga o Acordo de Paris sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima.

O Brasil comprometeu-se a:

- Reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% abaixo dos níveis de 2005, em 2025;
- Reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 43% abaixo dos níveis de 2005, em 2030;
- Aumentar a participação de bioenergia sustentável na sua matriz energética para aproximadamente 18% até 2030;
- Restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares de florestas;

- Alcançar uma participação estimada de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030, incluindo o aumento da participação da energia solar, eólica e da biomassa.

A energia solar é, sem dúvida, uma importante alternativa para que o acordo de Paris seja cumprido.

2.3 ENERGIA SOLAR

O Sol fornece energia na forma de radiação. Aproximadamente 1 kW/m^2 da radiação solar emitida atinge a superfície terrestre. Para entender como funciona a radiação solar sobre a Terra, deve-se estudar o comportamento da Terra em relação ao Sol, bem como a incidência dos raios solares sobre a superfície, de forma a se obter o modo como a energia é captada e como tal captação pode ser feita de forma mais eficiente.

O movimento anual da Terra em torno do Sol descreve uma trajetória elíptica com uma pequena excentricidade (0,017). O seu eixo, em relação ao plano normal da elipse, apresenta uma inclinação de aproximadamente $23,45^\circ$. Tal inclinação, juntamente com o movimento de translação da Terra, dá origem às estações do ano. Nas Figuras 4 e 5 é possível identificar a posição da Terra em relação ao Sol, bem como os ângulos de inclinação da mesma, resultando em durações do dia diferentes para estações do ano diferentes.

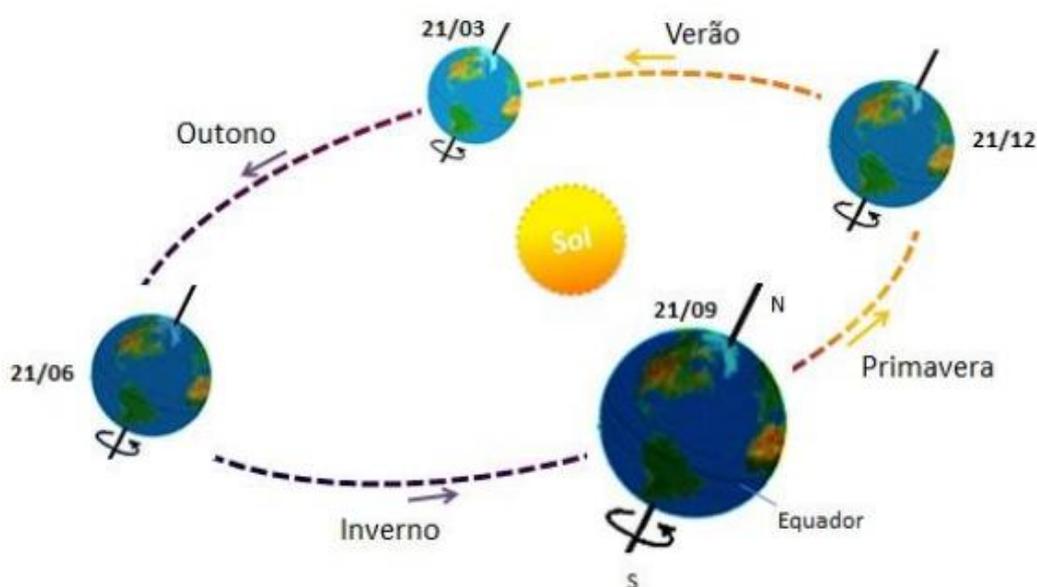


Figura 4. Movimento da Terra em torno do Sol e as estações do ano para o hemisfério Sul.

Fonte: PINHO & GALDINO, 2014.

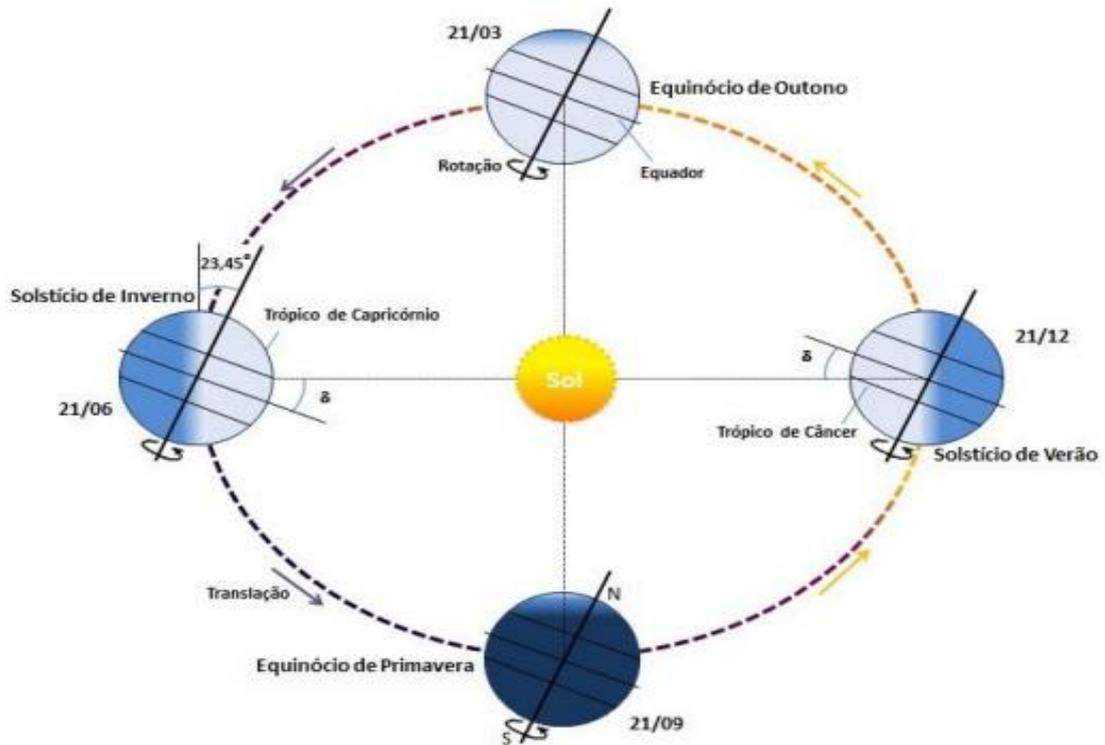


Figura 5. Declinação solar em quatro posições da Terra ao longo do ano.

Fonte: PINHO & GALDINO, 2014.

A declinação solar é definida como o ângulo entre a incidência dos raios solares e o plano do Equador, o qual varia entre $-23,45^\circ$ e $+23,45^\circ$, de acordo com a posição da Terra. Considerando-se as convenções para a declinação solar e a latitude, positivas ao Norte e negativas ao Sul do Equador, a diferença entre a latitude e a declinação determina a trajetória do movimento aparente do Sol para um determinado dia em uma dada localidade da Terra.

A declinação solar pode ser calculada através da seguinte equação:

$$\text{sen}(\delta) = -\text{sen}(23,45) \cos \left[\left(\frac{360}{365,25} \right) (n + 10) \right] \quad (1)$$

Em que n representa o dia Juliano, contado de 1 a 365 a partir de 1º de janeiro (PINHO & GALDINO, 2014).

O termo “radiação solar” é, frequentemente, utilizado de forma genérica. Pode ser referenciado em termos de fluxo de potência, quando é especificamente denominado de irradiância solar, ou em termos de energia por unidade de área, denominado de irradiação solar.

2.3.1 Conceitos básicos

A irradiância solar que atinge a Terra, no topo da camada atmosférica, é denominada irradiância extraterrestre. A constante solar I_0 é definida como o valor da irradiância extraterrestre que chega sobre uma superfície perpendicular aos raios solares na distância média Terra-Sol, e tem valor aproximado de 1367 W/m^2 (PINHO & GALDINO, 2014). A excentricidade da elipse que descreve a trajetória da Terra em torno do Sol resulta em uma variação no valor da irradiância extraterrestre ao longo do ano. Na Figura 6 pode-se observar o comportamento anual da irradiância extraterrestre efetiva ao longo do ano.

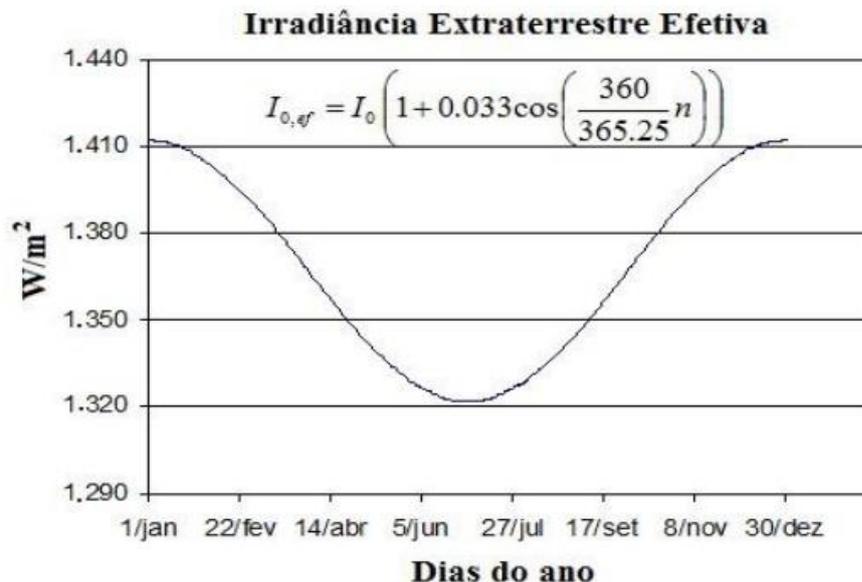


Figura 6. Variação da irradiância solar extraterrestre ao longo do ano.

Fonte: PINHO & GALDINO, 2014.

Diante das posições da Terra e do Sol, deve-se destacar alguns ângulos que são utilizados para a determinação da radiação solar em uma determinada região. Pode-se definir os ângulos da seguinte forma (PINHO & GALDINO, 2014):

- Ângulo zenital (θ_z): ângulo formado entre os raios do Sol e a vertical local (Zênite). Pode ser definido em função da declinação solar (δ), do ângulo horário (ω) e da latitude local (ϕ), através da seguinte equação:

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \cos \phi + \text{sen} \delta \cdot \text{sen} \phi \quad (2)$$

- Altura ou Elevação Solar (α): ângulo compreendido entre os raios do Sol e a projeção dos mesmos sobre o plano horizontal (horizonte do observador).
- Ângulo Azimutal do Sol (γ_S): também chamado de azimute solar, é o ângulo entre a projeção dos raios solares no plano horizontal e a direção Norte-Sul (horizonte do observador). O deslocamento angular é tomado a partir do Norte geográfico, sendo, por convenção, positivo quando a projeção se encontrar à direita do Sul (Leste) e negativo quando se encontrar à esquerda (Oeste).
- Ângulo azimutal da superfície (γ): ângulo entre a projeção da normal à superfície no plano horizontal e a direção Norte-Sul. Obedece às mesmas condições do azimute solar.
- Inclinação da superfície de captação (β): ângulo entre o plano da superfície em questão e o plano horizontal.
- Ângulo de incidência (θ): ângulo formado entre os raios do Sol e a normal à superfície de captação. Pode ser calculado através da seguinte equação:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \cos \beta . \cos \delta . \cos \omega . \cos \phi + \cos \beta . \operatorname{sen} \delta . \operatorname{sen} \phi \\ & + \operatorname{sen} \beta . \operatorname{sen} \gamma . \cos \delta . \operatorname{sen} \omega + \operatorname{sen} \beta . \cos \gamma . \cos \delta . \cos \omega . \operatorname{sen} \phi \\ & - \operatorname{sen} \beta . \cos \gamma . \operatorname{sen} \delta . \cos \phi \end{aligned} \quad (3)$$

- Ângulo horário do Sol ou Hora Angular (ω): deslocamento angular Leste-Oeste do meridiano do Sol, a partir do meridiano local, e devido ao movimento de rotação da Terra. Cada hora solar (H_s) corresponde a um deslocamento de 15° , conforme pode ser visto na equação a seguir:

$$\omega = (H_s - 12) \cdot 15^\circ \quad (4)$$

Para uma melhor visualização, alguns dos ângulos definidos anteriormente estão representados nas Figuras 7 e 8, mostrando claramente suas posições de acordo com as posições da superfície e do Sol.

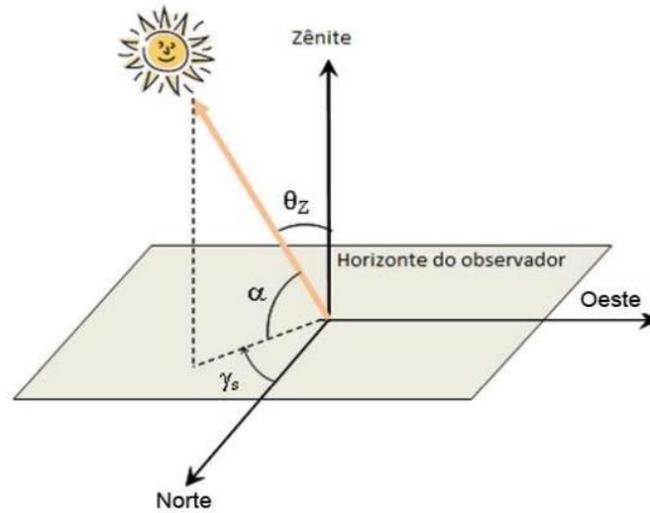


Figura 7. Ilustração dos ângulos entre o Sol em relação a um plano horizontal.

Fonte: PINHO & GALDINO, 2014.

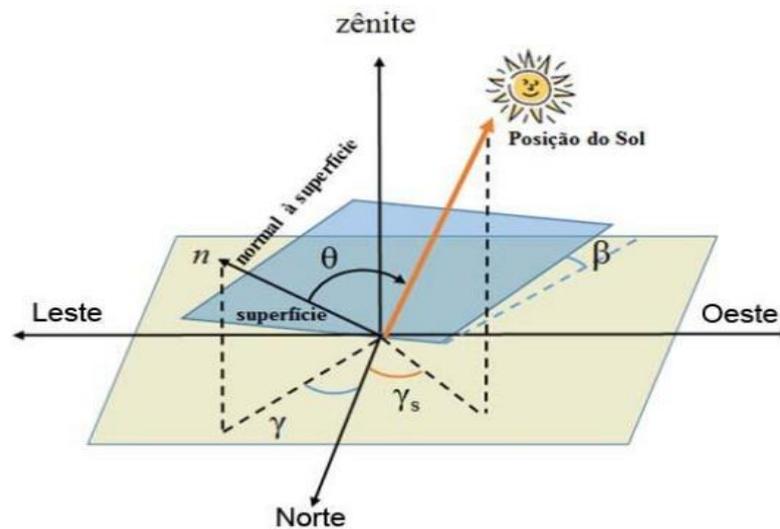


Figura 8. Orientação de uma superfície inclinada em relação ao mesmo plano.

Fonte: PINHO & GALDINO, 2014.

Os ângulos zenital e de incidência permitem calcular a componente direta da irradiância que incide normalmente a um plano horizontal ($G_{d,h}$) ou a qualquer superfície inclinada ($G_{d,\beta}$), como mostra a Figura 9, desde que a irradiância incidente seja conhecida. As componentes podem ser calculadas através da equação definida a seguir:

$$\frac{G_{d,\beta}}{G_{d,h}} = \frac{G_d \cdot \cos\theta}{G_d \cdot \cos\theta_z} = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \quad (5)$$

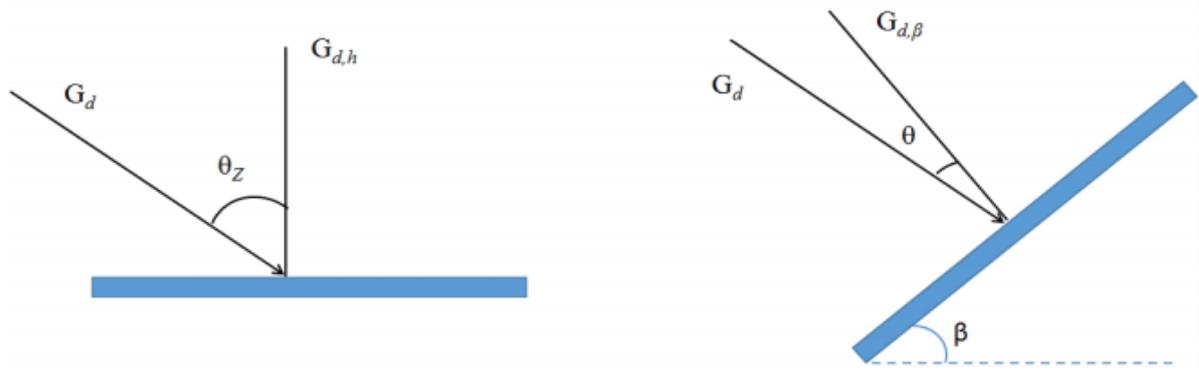


Figura 9. Irradiância incidente sobre uma superfície horizontal e uma superfície inclinada.

Fonte: PINHO & GALDINO, 2014.

2.3.2 Tipos de radiação solar

Irradiação é a intensidade (ou potência) da luz do sol medida em watts por metro quadrado (W/m^2). A potência é um valor instantâneo e, portanto, a irradiação é a intensidade da luz do sol em um determinado momento. A irradiação muda ao longo do dia à medida em que o sol se desloca no céu ou é encoberto pelas nuvens.

Radiação Solar ou insolação é a quantidade de energia solar que incide em uma superfície durante certo período de tempo e é medido em Wh ou kWh por m^2 (Wh/m^2 ou kWh/m^2). Como a energia é expressa como potência ao longo do tempo ($P \times t$), a radiação solar é a irradiação ao longo de um determinado tempo.

A atmosfera reduz a radiação solar através da reflexão, absorção e dispersão. Desta forma, a radiação pode-se dividir em três componentes, como mostra a Figura 10.

A partir da análise da figura, pode-se observar que, enquanto uma parte da radiação é absorvida diretamente do sol, outras partes são refletidas pela atmosfera. Isso se dá por conta de três componentes fundamentais da radiação solar global: radiação direta; radiação difusa; e radiação refletida pelo entorno (albedo).

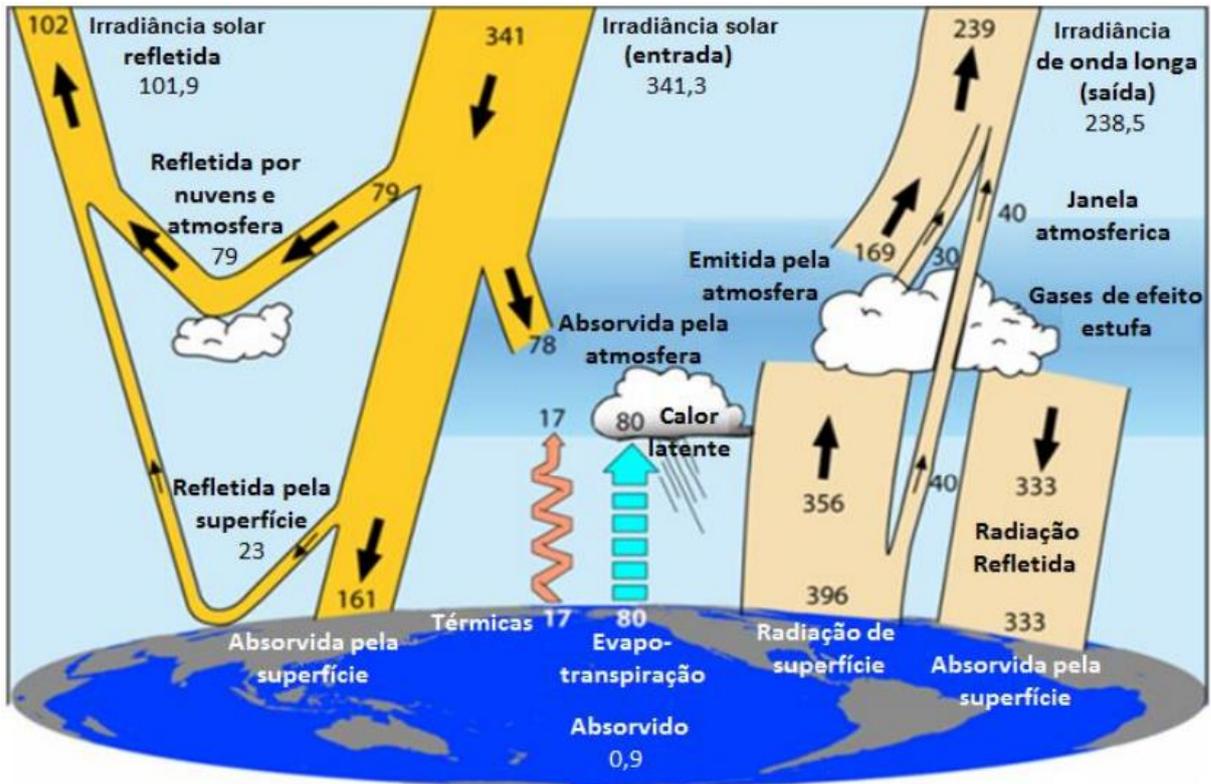


Figura 10. Irradiância solar incidente no topo da atmosfera.

Fonte: PINHO & GALDINO, 2014 apud TRENBERTH et al., 2009.

A seguir apresentam-se as definições relativas às três componentes que constituem a radiação solar global:

- Radiação direta: constituída por raios solares recebidos em linha reta do Sol.
- Radiação difusa: procedente de todo o céu visível, excluindo o disco solar, e originada pelos raios não diretos e dispersos pela atmosfera.
- Radiação refletida pelo entorno (albedo): procedente do solo e com origem na reflexão da radiação incidente na superfície, ou seja, é proveniente do entorno do ambiente em caso de a superfície ser inclinada em relação à horizontal. Pelo fato de o entorno se tratar de diferentes superfícies (solo, rochas, vegetação etc.), a reflexão se dá de formas diferentes. Sendo assim, cada uma das superfícies possui um coeficiente de reflexão associado, denominado “coeficiente de albedo”. Quanto maior for o albedo, maior será a reflexão solar (Energia Fotovoltaica, 2004). A Tabela 5 mostra diferentes valores de albedo para diferentes tipos de superfície.

Tabela 5. Valores típicos de albedo para diferentes superfícies.

Superfície	Albedo
Gramado	0,18 – 0,23
Grama seca	0,28 – 0,32
Solo descampado	0,17
Asfalto	0,15
Concreto novo (sem ação de intempéries)	0,55
Concreto (em construção urbana)	0,2
Neve fresca	0,8 – 0,9
Água, para diferentes valores de altura solar:	
$\alpha > 45^\circ$	0,05
$\alpha = 30^\circ$	0,08
$\alpha = 20^\circ$	0,12
$\alpha = 10^\circ$	0,22

Fonte: MARKVART & CASTAÑER, 2004

A Figura 11 ilustra uma superfície receptora e as três componentes da radiação solar. A soma das três componentes é definida como radiação global.

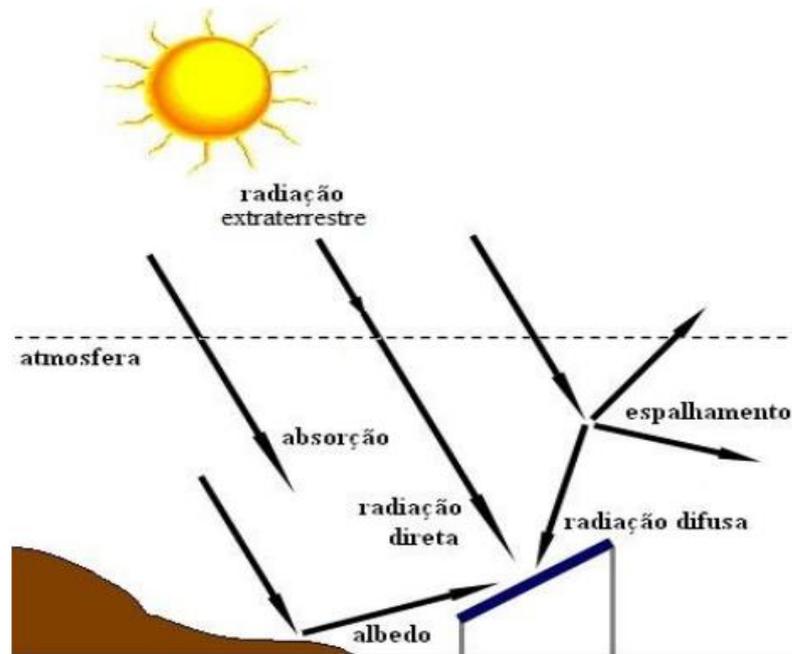


Figura 11. Componentes da radiação solar.

Fonte: PINHO et al., 2008.

- Radiação global: é a radiação total que incide na superfície e é a soma da radiação direta e difusa.
- Radiação total: é a soma da radiação direta, difusa e a refletida no albedo.

Antes de atingir o solo, as características da radiação solar (intensidade, distribuição espectral e angular) são afetadas por interações com a atmosfera, devidas aos efeitos de absorção e espalhamento. Estas modificações são dependentes da espessura da camada atmosférica, também identificada por um coeficiente denominado “Massa de Ar” (do inglês, *Air Mass*), e, portanto, do ângulo zenital do Sol, da distância Terra-Sol e das condições atmosféricas e meteorológicas (PINHO & GALDINO, 2014).

A massa de ar pode ser interpretada também como o comprimento relativo que a radiação solar direta percorre até atingir a superfície terrestre. Para ângulos zenitais entre 0° e 70°, a massa de ar ao nível do mar pode ser definida matematicamente através da equação a seguir:

$$AM = \frac{1}{\cos\theta_z} \quad (6)$$

Para ângulos zenitais maiores, os efeitos da curvatura da Terra devem ser levados em consideração.

2.4 POTENCIAL DE GERAÇÃO NO BRASIL

O Brasil possui um grande potencial para gerar energia a partir do sol. Na região menos ensolarada no Brasil é possível gerar mais eletricidade solar do que na região mais ensolarada da Alemanha, que é um dos líderes no uso da energia fotovoltaica. Segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar, diariamente o sol incide entre 4,44 kWh/m² a 5,48 kWh/m² na superfície plana do País.

Para o cálculo do potencial de geração solar fotovoltaica, dois dados básicos são necessários: a eficiência ou o rendimento das placas e a radiação solar, geralmente representada em kWh/m². Os dados de eficiência são dados de placa das células, obtidos em laboratório. O ponto mais importante torna-se, portanto, uma análise da radiação solar do local onde se pretende instalar um sistema de geração fotovoltaico (COOPER e JUNIOR, 2013).

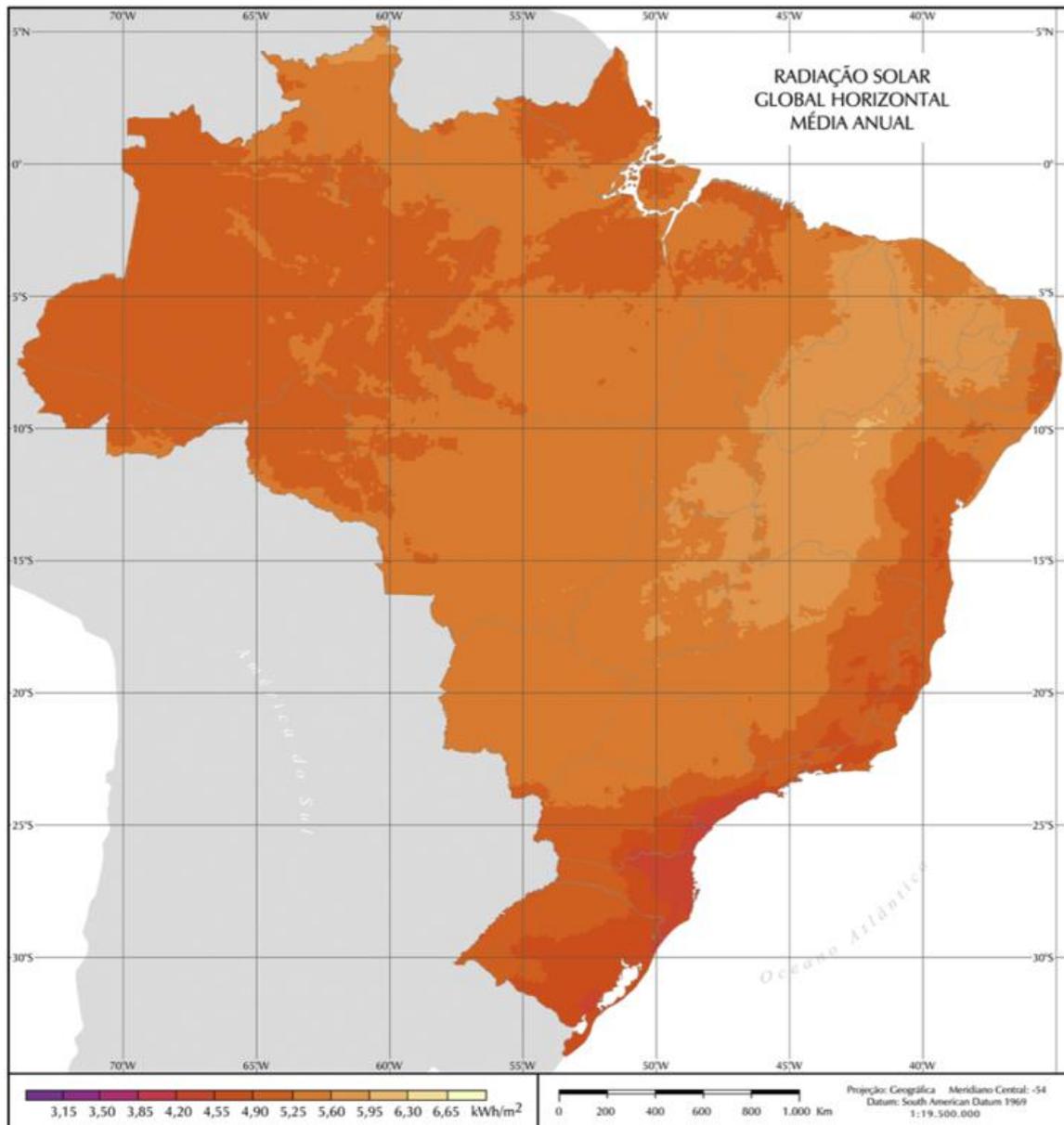


Figura 12. Radiação Solar Global Horizontal (GHI) Média Anual.

Fonte: PEREIRA et al., 2006.

O mapa apresentado na Figura 12 mostra a média anual do total diário de irradiação solar global incidente no território brasileiro. Apesar das diferentes características climáticas observadas no Brasil, pode-se observar que a média anual de irradiação global apresenta boa uniformidade, com médias anuais relativamente altas em todo país.

O valor máximo de irradiação global de 6,5 kWh/m² ocorre no norte do estado da Bahia. A menor irradiação solar global de 4,25 kWh/m² ocorre no litoral norte de Santa Catarina. Os valores de irradiação solar global incidente em qualquer região do território

brasileiro, de 1.500 à 2.500 kWh/m², são superiores aos da maioria dos países da União Europeia, como Alemanha (900 à 1.250 kWh/m²), França (900 à 1.650 kWh/m²) e Espanha (1.200 à 1.850 kWh/m²).

Na Figura 13 pode-se notar que 64% de toda energia elétrica produzida no Brasil é derivada da geração hidráulica através das Hidrelétricas tradicionais e das PCH (pequenas centrais hidrelétricas). Observa-se também que a contribuição da energia solar é muito pequena, logo investimentos e incentivos para a energia solar fazem-se necessários para difundir esta fonte e assim tornar a matriz energética menos dependente de fatores climáticos (chuvas) para abastecer as bacias onde se encontram as hidrelétricas tornando, assim, a matriz elétrica brasileira mais robusta e diversificada.

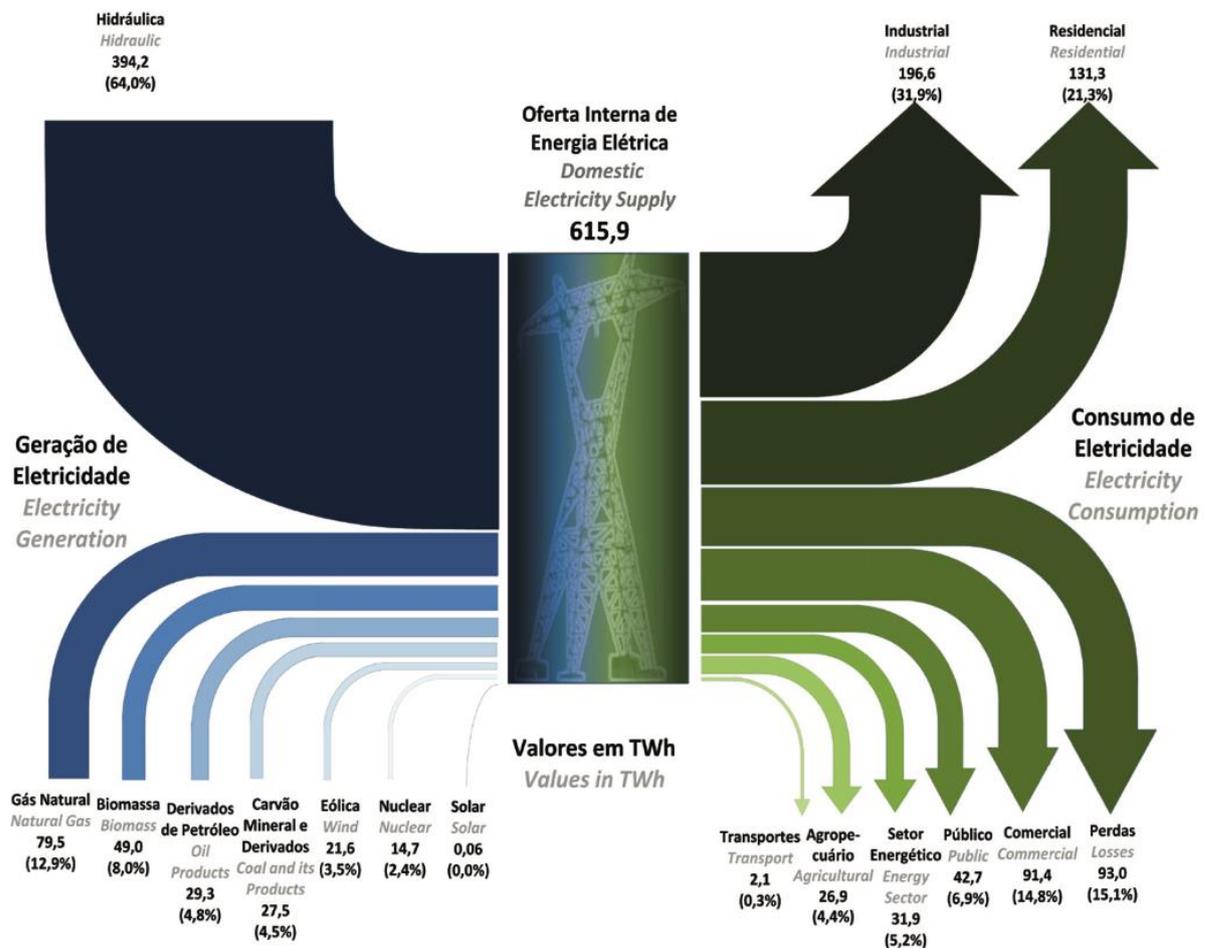


Figura 13. Oferta Interna de Energia Elétrica.

Fonte: BEM, 2016.

VIANA (2010) destaca o potencial de geração fotovoltaica, em kWh, de acordo com a potência instalada de sistema fotovoltaico concentrado (SFVC), em kW_N (Quilowatt nominal) conforme mapa da Figura 14. As faixas de valores do total anual de geração estimada, em $kWh/kW_N/ano$, são baseadas em uma metodologia que leva em conta os níveis de desempenho de SFVC operando em países como a Espanha (VIANA 2010, *apud* LERCHENMÜLLER *et al.*, 2005, LERCHENMÜLLER *et al.*, 2007, PERPIÑAN *et al.*, 2008). A Figura 14 é uma amostra do Atlas de geração estimada com SFVC, preparado para o Brasil, onde se observa que, mesmo nas regiões com os menores níveis de irradiação direta normal, se pode esperar uma produtividade anual de 1.400 $kWh/kW_N/ano$ (VIANA *et al.*, 2010).

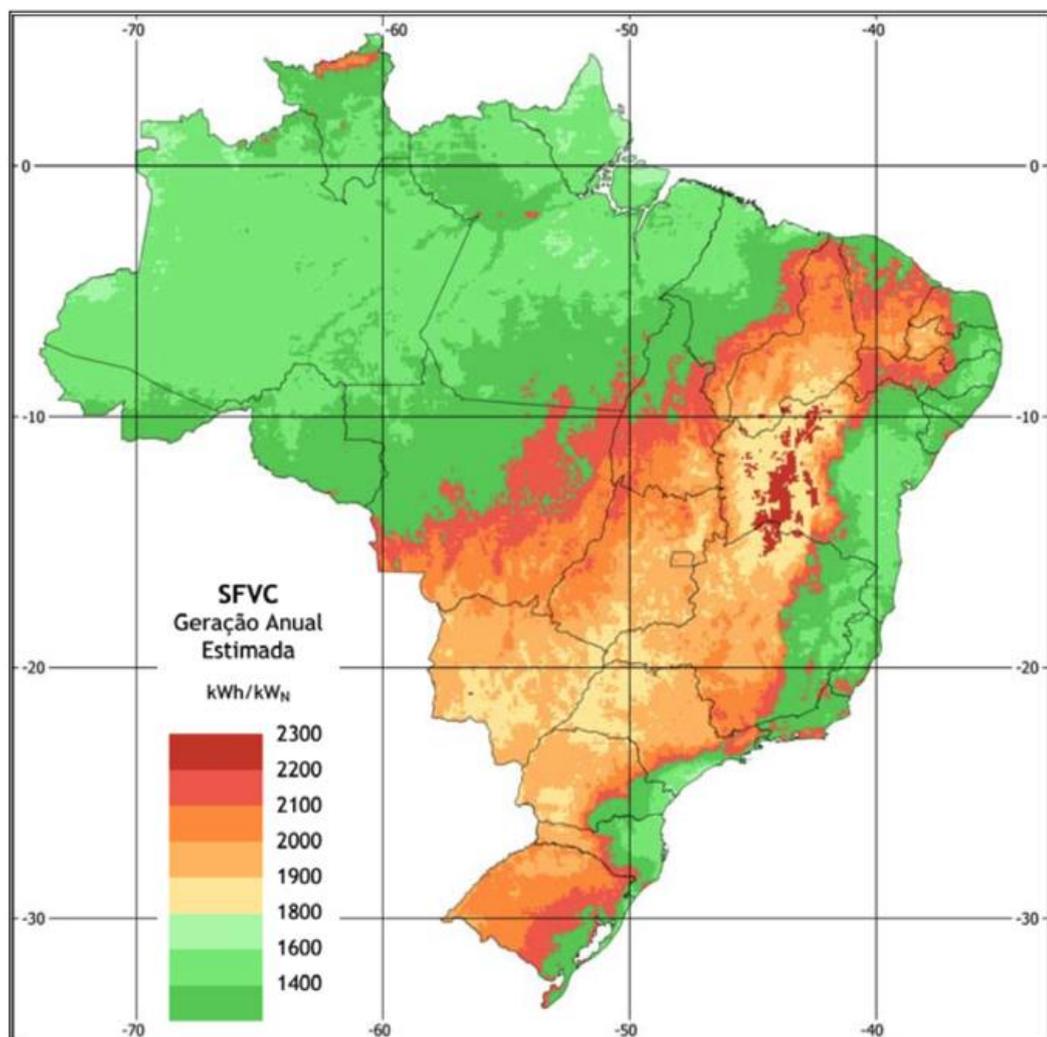


Figura 14. Mapa de geração fotovoltaica anual estimada, para SFVC, em $kWh/kW_N/ano$.

Fonte: VIANA *et al.*, 2010.

2.5 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA

A fonte de energia mais abundante dentre todas as fontes renováveis disponíveis é a energia solar. A energia solar fotovoltaica é obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (chamado efeito fotovoltaico) através de um dispositivo fabricado com material semicondutor chamado de célula fotovoltaica.

A utilização da energia solar pode ser dividida em dois campos: térmico e fotovoltaico. A térmica solar utiliza da radiação incidente para fornecer aquecimento útil. Alguns dos melhores exemplos incluem aquecimento solar passivo de casas e aquecimento solar de água. Os fotovoltaicos, por outro lado, destinam-se à conversão da energia solar em eletricidade, principalmente utilizando as células solares baseadas em silício. O desempenho da energia solar fotovoltaica depende das condições climáticas locais e da disponibilidade de radiação solar.

As tecnologias mais comumente encontradas no mercado atualmente são células fotovoltaicas de silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si). Juntas, representam mais de 85% do mercado por serem consideradas tecnologias consolidadas, confiáveis e por possuírem a melhor eficiência comercialmente disponível (PINHO e GALDINO, 2014).

Outra opção encontrada comercialmente é chamada de filmes finos: silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre e índio (CIS) ou disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe).

A Figura 15 mostra a evolução da eficiência das células fotovoltaicas verificada no período de 1990 a 2010. Analisando a mesma, pode-se concluir que as células multijunção para concentração (III-V MJ Conc), ainda em fase de Pesquisa e Desenvolvimento, apresentou uma eficiência bem superior às demais. Nota-se, também, que a segunda célula mais eficiente dentre as que estão disponíveis comercialmente é a de silício monocristalino (m-Si).

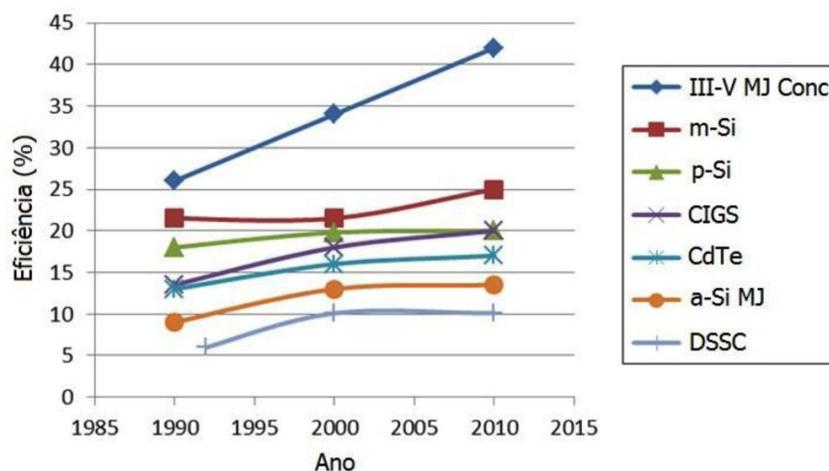


Figura 15. Desenvolvimento das Células Fotovoltaicas.

Fonte: GREEN, 2011.

Para o aproveitamento solar fotovoltaico, faz-se uso da Irradiação Global Horizontal (GHI) - que quantifica a radiação recebida por uma superfície plana horizontal. A GHI é composta pela Irradiação Difusa Horizontal (DIF) e pela Irradiação Normal Direta (DNI). A DIF é a parcela dispersa e atenuada por reflexões em nuvens, poeira, vapor d'água e outros elementos em suspensão na atmosfera. A DIN é a parcela que atinge o solo diretamente, sem reflexões. Em dias nublados, a principal fração é a DIF, enquanto que em dias claros prevalece a DNI (EPE, 2012).

Quanto ao posicionamento dos painéis para melhor aproveitamento da irradiação solar, afirma-se que a variação da posição da Terra em relação ao Sol ao longo do ano determina ângulos de inclinação dos painéis solares, em relação ao norte (azimute) e em relação ao plano horizontal, mais adequado para a otimização do aproveitamento solar quando são utilizados painéis fixos, que não acompanham a trajetória diária do Sol.

Dois fatores principais afetam a eficiência da conversão: a temperatura ambiente de operação e a intensidade da irradiação solar incidente sobre a célula. Este último fator é afetado tanto pela nebulosidade local quanto pelo ângulo de inclinação da célula em relação ao sol. A eficiência da conversão se reduz ao longo da vida útil das células à taxa próxima de 1% ao ano (EPE, 2012). A Figura 16 mostra a característica de tensão e corrente de um painel fotovoltaico em diferentes temperaturas das células e níveis de irradiação.

Um dos fatores que devem ser considerados para avaliação da viabilidade do sistema fotovoltaico é o sombreamento que o local escolhido está sujeito. Os atlas solarimétricos disponíveis fornecem-nos uma avaliação do potencial de irradiação de uma determinada região sem considerar possíveis interferências de construções e da própria natureza que podem provocar, inviabilizando a instalação de um sistema fotovoltaico tanto no seu aspecto técnico como no econômico.

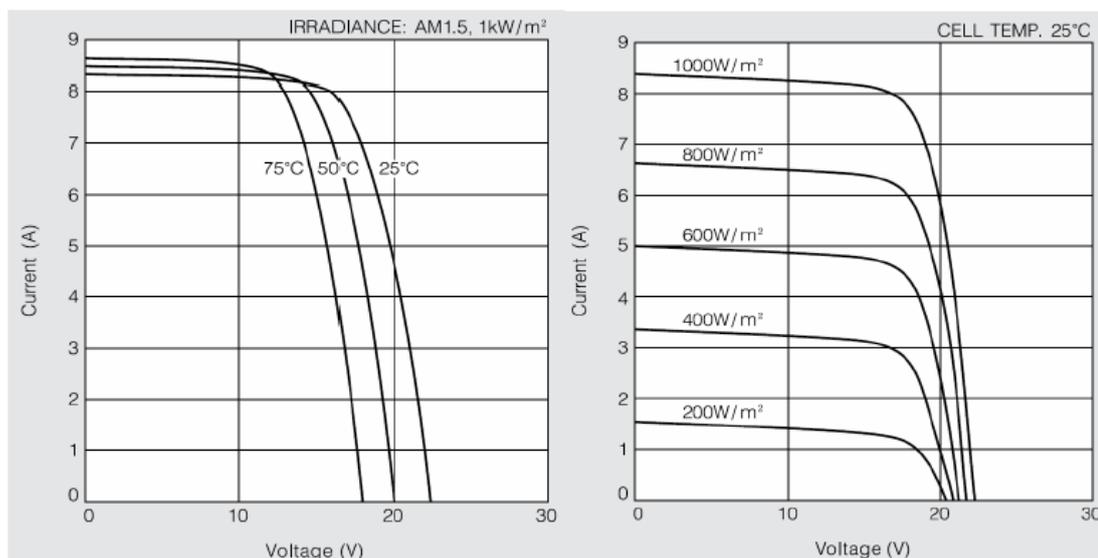


Figura 16. Curvas características das células fotovoltaicas.

Fonte: Kyocera apud EPE, 2012.

2.6 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

A seguir são apresentadas as principais características das células:

- Tensão de circuito aberto (V_{oc}): tensão entre os terminais de uma célula fotovoltaica quando não há corrente elétrica circulando. É a máxima tensão que uma célula fotovoltaica pode produzir. Pode ser medida diretamente com um voltímetro nos terminais do módulo.
- Corrente de curto-circuito (I_{sc}): máxima corrente que se pode obter. É medida na célula fotovoltaica quando a tensão elétrica em seus terminais é igual a zero. Pode ser medida com um amperímetro curto-circuitando os terminais do módulo.
- Fator de forma (FF): é a razão entre a máxima potência da célula e o produto da corrente de curto circuito com a tensão de circuito aberto.

- Eficiência (η): é o parâmetro que define quão efetivo é o processo de conversão de energia solar em energia elétrica. Representa a relação entre a potência elétrica produzida pela célula fotovoltaica e a potência da energia solar incidente (SIMIONI, 2017).

Sob condições normais de ensaio, pode-se determinar a relação entre tensão e corrente elétrica, destacando-se as principais características elétricas definidas e a máxima potência (P_{MP}). A curva em questão é mostrada na Figura 17.

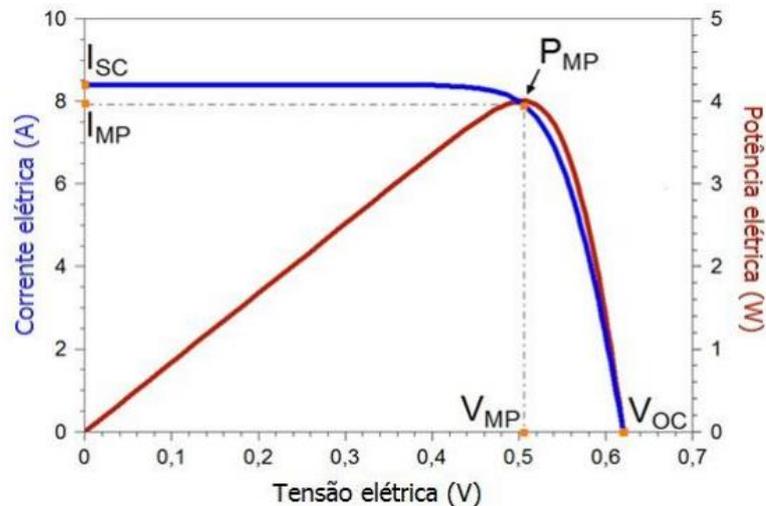


Figura 17. Potência elétrica em função da corrente elétrica de uma célula fotovoltaica de silício cristalino.

Fonte: PINHO & GALDINO, 2014.

Alguns parâmetros afetam as características elétricas da célula fotovoltaica, que são a irradiância solar e a temperatura local. Sendo assim, deve-se analisar como cada um dos fatores contribui para as mudanças ocorridas, de forma a se realizar um planejamento preciso para a obtenção de energia. A seguir é descrita a influência de cada parâmetro:

- Influência da irradiância solar: a corrente elétrica gerada por uma célula fotovoltaica aumenta linearmente com o aumento da irradiância solar incidente, enquanto que a tensão de circuito aberto aumenta de forma logarítmica, se mantida a mesma temperatura. A Figura 18 exhibe o comportamento da curva corrente x tensão para diferentes valores de irradiância solar em uma célula fotovoltaica de silício cristalino.

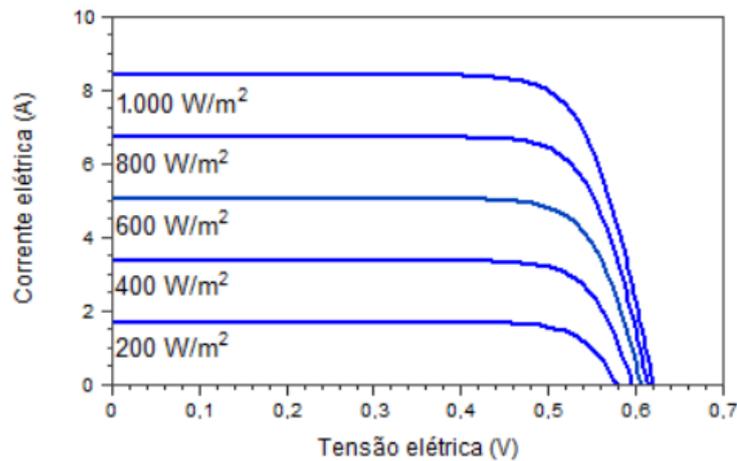


Figura 18. Influência da variação da irradiação solar na curva característica I-V.

Fonte: PINHO & GALDINO, 2014.

- Influência da temperatura: o aumento da temperatura ambiente produz um aumento da temperatura da célula e, conseqüentemente, tende a reduzir sua eficiência. Isso se deve ao fato de que a tensão da célula diminui significativamente com o aumento da temperatura, enquanto que sua corrente sofre uma elevação muito pequena, quase desprezível. A Figura 19 exibe o comportamento da curva corrente x tensão para diferentes valores de temperatura em uma célula fotovoltaica de silício cristalino.

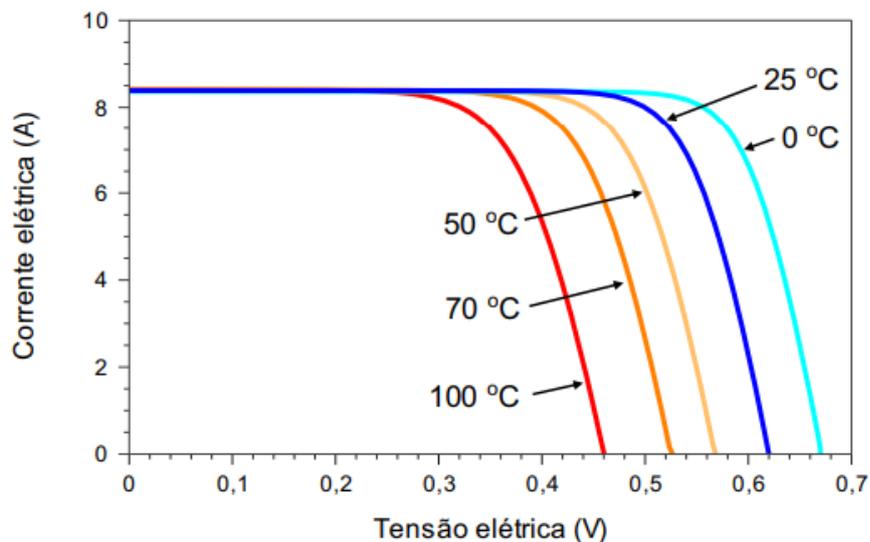


Figura 19. Influência da variação da temperatura na curva característica I-V.

Fonte: PINHO & GALDINO, 2014.

2.7 ASSOCIAÇÕES DE CÉLULAS

As células fotovoltaicas podem ser associadas em série ou em paralelo, de acordo com os níveis de tensão e corrente desejados. Na conexão em série, o terminal positivo de uma célula fotovoltaica é conectado ao terminal negativo da outra célula, e assim por diante. Como nos circuitos eletrônicos, se duas células fotovoltaicas estão conectadas em série, então ambas as células estão associadas ao mesmo valor de corrente elétrica. As tensões de cada célula são somadas (INGLE et al.,2016), como mostram as equações a seguir:

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n$$

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (7)$$

Vale ressaltar que, numa associação de células fotovoltaicas, para que as equações sejam atendidas, ambas as células devem estar sob mesmas condições de irradiância e temperatura. A Figura 20 ilustra a variação de tensão e corrente elétricas para uma associação em série entre duas células fotovoltaicas.

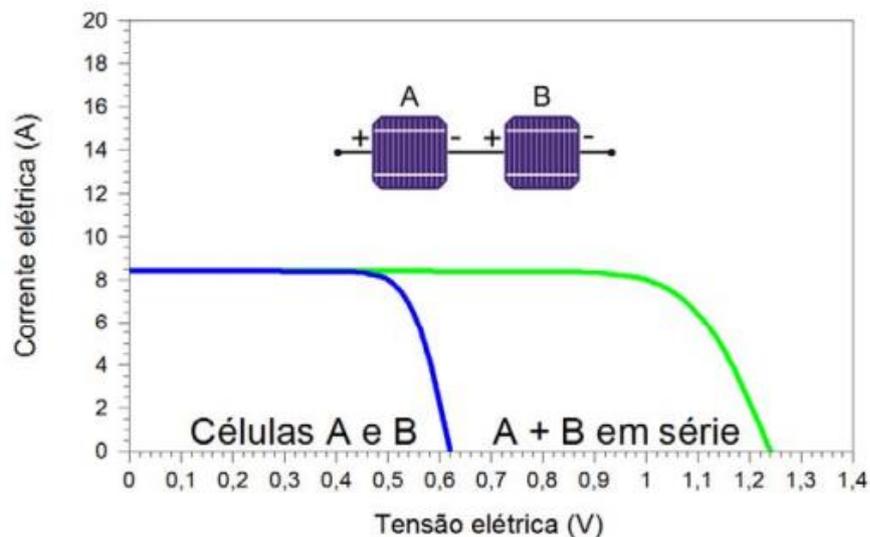


Figura 20. Curva I-V de duas células fotovoltaicas de silício cristalino conectadas em série.

Fonte: PINHO & GALDINO, 2014.

Na associação em paralelo, os terminais positivos dos dispositivos são interligados entre si, assim como os terminais negativos. Como nos circuitos eletrônicos, se duas células fotovoltaicas estão conectadas em paralelo, então as mesmas estão submetidas à mesma tensão elétrica (INGLE et al., 2016). As correntes são somadas, como mostram as equações a seguir:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_n \quad (8)$$

A Figura 21 ilustra a variação de tensão e de corrente elétricas para uma associação em paralelo entre duas células fotovoltaicas.

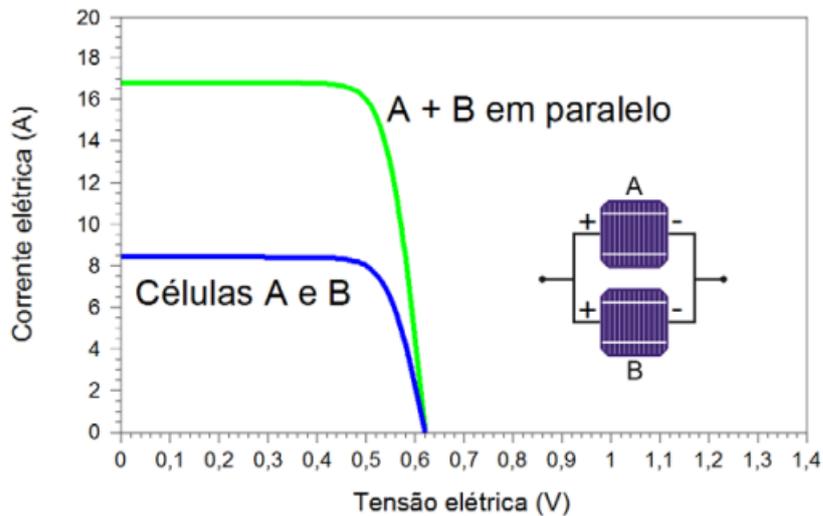


Figura 21. Curva I-V de duas células fotovoltaicas de silício cristalino conectadas em paralelo (PINHO & GALDINO, 2014).

2.8 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Um módulo fotovoltaico é composto por células fotovoltaicas conectadas em arranjos para produzir tensão e corrente suficientes para a utilização prática da energia, ao mesmo tempo em que promove a proteção das células. O número de células conectadas em um módulo e seu arranjo depende da tensão de utilização e da corrente elétrica desejadas. É importante ter cuidado com a seleção das células a serem reunidas no momento da fabricação do módulo, devido a suas características elétricas. A incompatibilidade destas características leva a módulos de baixa qualidade, devido ao efeito de descasamento, pelo qual as células de menor fotocorrente limitam o desempenho do conjunto e, conseqüentemente, a eficiência do módulo fotovoltaico é reduzida (SIMIONI, 2017).

Os módulos solares são o elemento de geração elétrica e podem ser dispostos em série e/ou paralelo para obter a tensão nominal necessária em cada caso. Estes painéis são formados por um determinado número de células que são protegidas por um vidro, encapsuladas em um material plástico e todo o conjunto emoldurado com um perfil metálico.

A manutenção do painel fotovoltaico é mínima, necessitando apenas de limpeza em um intervalo de 3 meses. Essa limpeza consiste em passar um pano molhado sobre a superfície do painel, retirando qualquer impureza devido à exposição ao ambiente. Um valor mínimo de inclinação admitido para instalação é de 10°, a qual é necessária para evitar o acúmulo de sujeira e facilitar a limpeza com a água da chuva (CEPEL, 2004).

Segundo o CEPEL (2004), os painéis solares podem ser classificados de três maneiras básicas: painéis solares monocristalinos; painéis solares policristalinos; e painéis de filme fino. Os painéis solares monocristalinos são feitos de células monocristalinas de silício e apresentam grande grau de eficiência. O silício utilizado em sua confecção deve possuir elevado grau de pureza, o que caracteriza um processo complexo de fabricação dos cristais únicos de cada célula.

Os painéis solares policristalinos, por sua vez, são menos eficientes que os monocristalinos. Esse tipo de painel não é fabricado com células formadas por um único cristal de silício e, portanto, sua aparência é como de vidro quebrado.

Nos painéis de filme fino, o material fotovoltaico é depositado diretamente sobre uma superfície como metal ou vidro para formar o painel. Dos três modelos apresentados, esse é o que possui a menor eficiência e, conseqüentemente, é o de mais baixo custo. Quando se utiliza um modelo como esse é necessário utilizar uma área maior para compensar a baixa eficiência.

Assim como é possível para as células fotovoltaicas, pode-se realizar ensaios para um estudo mais elaborado sobre as características elétricas dos módulos fotovoltaicos. Na Figura 22 é mostrado o comportamento da corrente e da tensão elétricas de módulo fotovoltaico sob condições normais de radiação solar e temperatura.

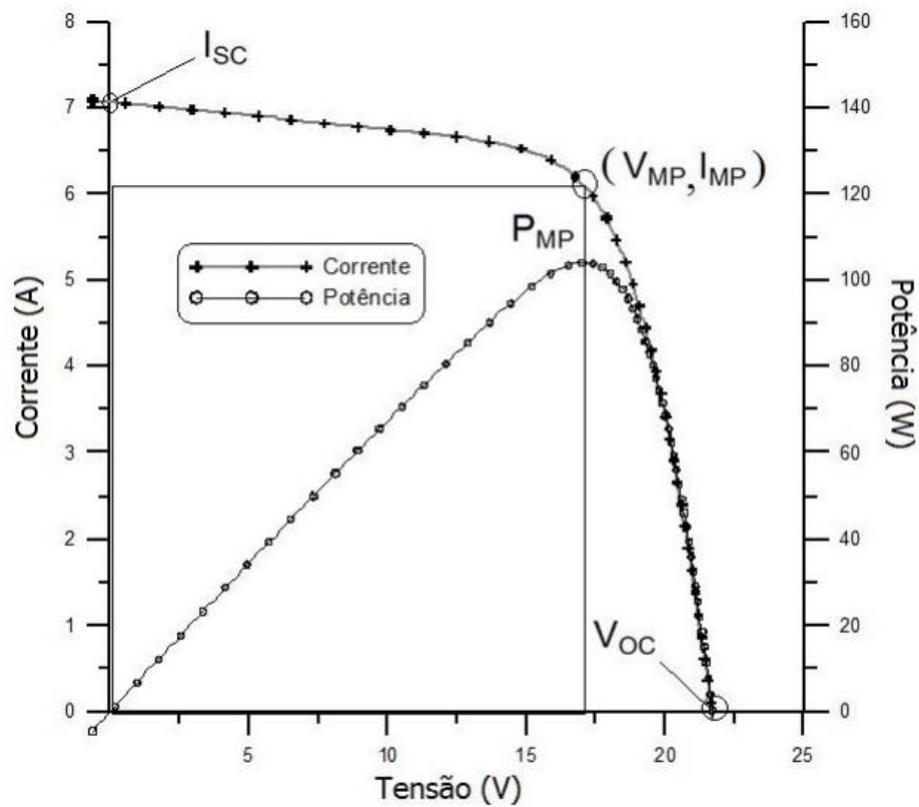


Figura 22. Curva característica I-V e curva de potência P-V para um módulo com potência nominal de 100 Wp.

Fonte: PINHO & GALDINO, 2014.

Também de forma semelhante às células fotovoltaicas, alguns fatores influenciam diretamente o desempenho dos módulos fotovoltaicos:

- Influência da irradiância solar: A corrente elétrica gerada pelo módulo aumenta de forma diretamente proporcional à irradiância solar (Energia Solar, 2006), conforme mostrado na Figura 23.

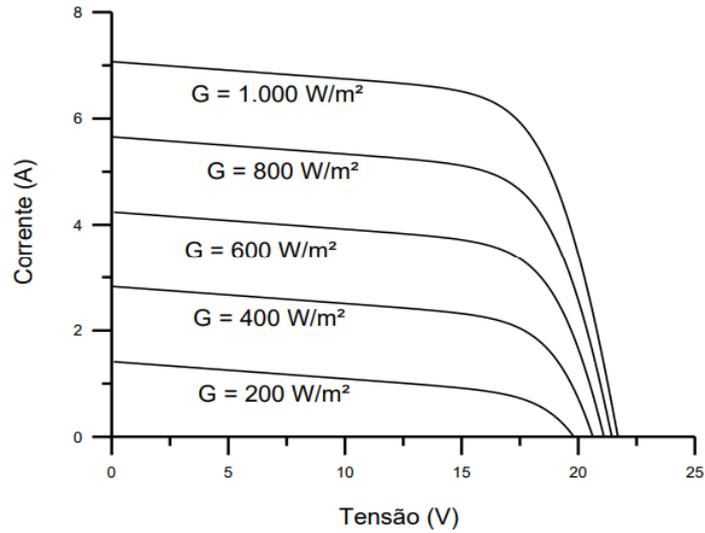


Figura 23. Efeito causado pela variação da irradiância solar sobre a curva I-V.

Fonte: PINHO & GALDINO, 2014.

- Influência da temperatura: com o aumento da temperatura, há uma queda de tensão nos módulos fotovoltaicos, como mostrado na Figura 24.

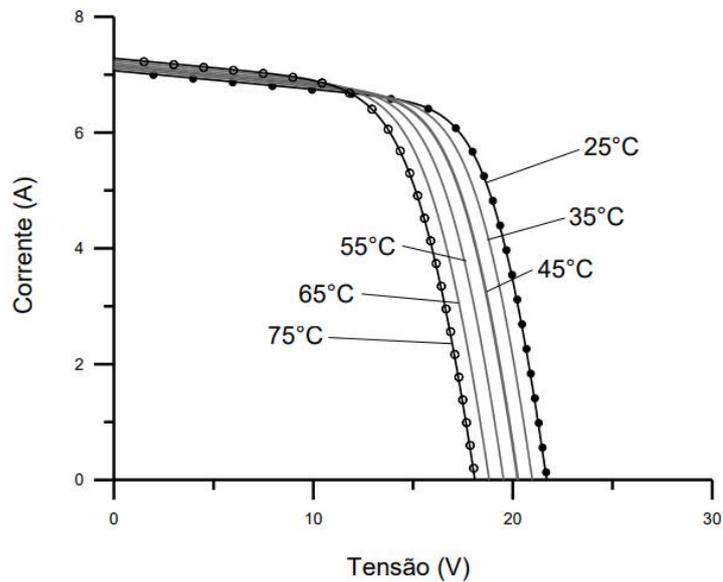


Figura 24. Efeito causado pela variação da temperatura sobre a curva I-V.

Fonte: PINHO & GALDINO, 2014.

Os painéis solares mais comumente encontrados no mercado apresentam dados técnicos conforme a Tabela 6. Os módulos são inseridos no local de implantação e conectados, seja em série ou paralelo, de modo a alcançar a potência desejada. Em condições

reais, quanto maior a temperatura dos módulos, menor será sua eficiência, e por esse motivo é importante que a instalação seja feita deixando-se uma distância entre as placas e o telhado ou local de fixação, a fim de favorecer a ventilação e consequente resfriamento do módulo. Dessa forma, o projetista é capaz de avaliar a natureza do módulo fotovoltaico em questão de forma que seus interesses sejam atendidos.

Tabela 6. Dados de painéis solares.

Dados Elétricos	CS6P-245P	CS6P-250P	CS6P-255P
Potência nominal máxima* (P _{máx})	245W	250W	255W
Tensão operacional ideal (V _{mp})	30.0V	30.1V	30.2V
Corrente operacional ideal (I _{mp})	8.17A	8.30A	8.43A
Tensão de circuito aberto (V _{oc})	37.1V	37.2V	37.4V
Corrente de curto circuito (I _{sc})	8.74A	8.87A	9.00A
Eficiência do módulo	15,23%	15,54%	15,85%
Temperatura operacional	-40°C - +85°C		

*Sob condições padrões de teste (STC) ou irradiação de 1.000W/m², temperatura da célula de 25°C.

Fonte: Canadian Solar (2015), adaptada pelo autor.

2.9 ASSOCIAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Os módulos fotovoltaicos podem ser conectados em série ou paralelo, dependendo da corrente e tensão desejadas, para formar painéis fotovoltaicos com potência mais elevada. Ao definir como serão associados os módulos, é necessário ter informações de como deverá ser a instalação e quais componentes serão utilizados, pois as tensões e correntes resultantes devem ter plena compatibilidade com esses componentes.

- Conexão em série: é feita do terminal positivo de um módulo ao terminal negativo do outro, e assim por diante. As caixas de conexões na sua face posterior ou cabos pré-instalados facilitam esta conexão. Deve-se utilizar cabos e conexões específicos para uso em sistemas fotovoltaicos, que são protegidos contra os efeitos da radiação e das intempéries. Assim como na conexão de células fotovoltaicas, as tensões são somadas e a corrente é a mesma para módulos iguais (INGLE et al., 2016). A Figura 25 exhibe o comportamento das correntes e tensões quando os módulos fotovoltaicos são conectados em série:

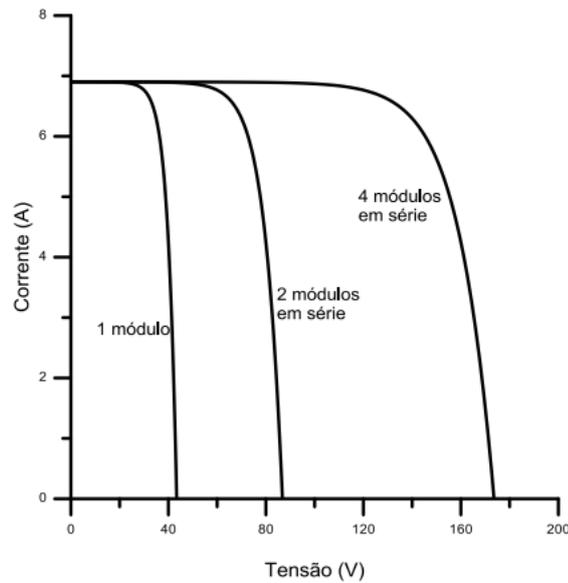


Figura 25. Curva I-V para uma associação em série de módulos fotovoltaicos.

Fonte: PINHO & GALDINO, 2014.

- Conexão em paralelo: é feita unindo-se os terminais positivos de todos os módulos entre si e procedendo da mesma forma com os terminais negativos. Assim como na conexão de células fotovoltaicas, as correntes são somadas e a tensão é a mesma para módulos iguais (INGLE et al., 2016). A Figura 26 exhibe o comportamento das correntes e tensões quando os módulos fotovoltaicos são conectados em paralelo:

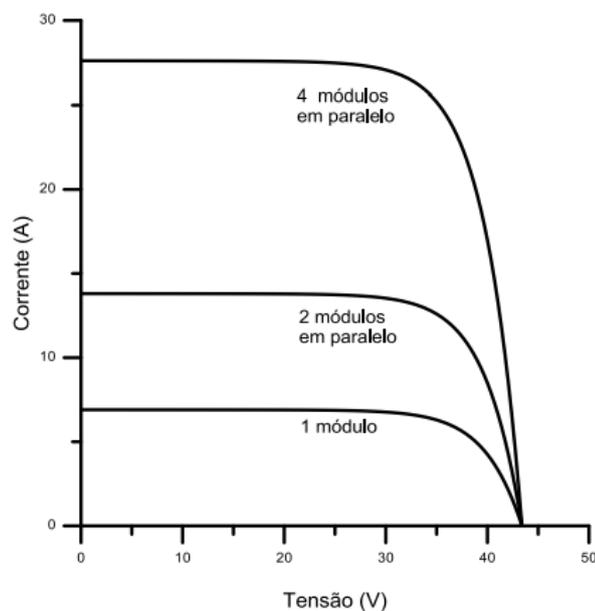


Figura 26. Curva I-V para uma associação em paralelo de módulos fotovoltaicos.

Fonte: PINHO & GALDINO, 2014.

Para a instalação de um sistema fotovoltaico, deve-se utilizar não só os módulos fotovoltaicos, mas também uma série de componentes que garantam uma maior eficiência na captação e conversão de energia. Sendo assim, além de um bom planejamento para os módulos, deve-se levar em consideração o lugar no qual tais módulos serão utilizados e fatores relacionados aos componentes que serão partes do sistema.

Para aumentar sua utilidade, várias células fotovoltaicas individuais são interconectadas em uma embalagem selada e à prova de intempéries chamada Módulo. Os módulos podem ter 60 ou 72 células fotovoltaicas conectadas em série.

Para atingir a tensão e a corrente desejadas, os módulos são conectados em série e paralelos ao que é chamado de arranjo fotovoltaico. A flexibilidade do sistema fotovoltaico modular permite aos projetistas criar sistemas de energia solar que podem atender a uma ampla variedade de necessidades elétricas. A Figura 27 mostra uma célula, um módulo e um arranjo fotovoltaico.

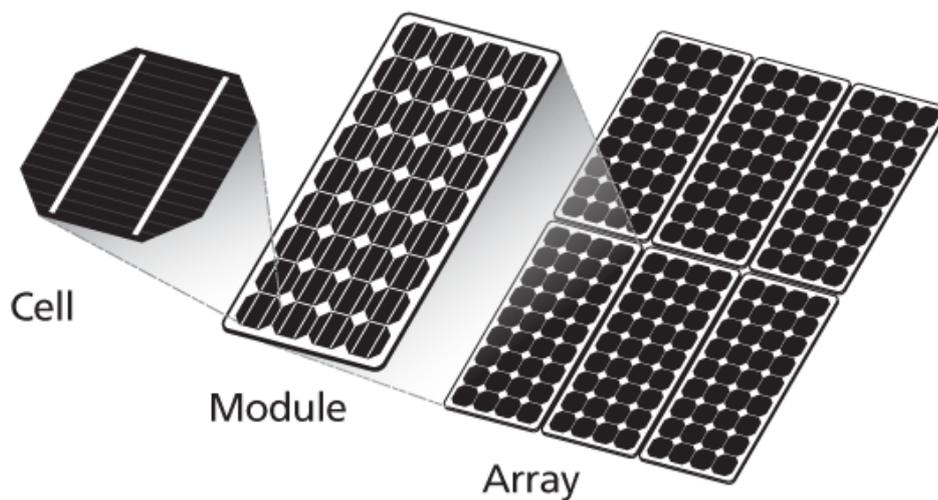


Figura 27. Célula, Módulo e Arranjo fotovoltaico, respectivamente.

Fonte: Samlex Solar.

2.10 SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Construtivamente, os sistemas fotovoltaicos podem ser do tipo aplicado (BAPV - *Building Applied Photovoltaic*) ou do tipo integrado (BIPV- *Building Integrated Photovoltaic*).

No BAPV, os módulos são usados apenas para gerar energia, mesmo como parte da composição arquitetônica do edifício, mas não substituem ou são usados como componentes de construção. Eles podem ser montados de forma coplanar, mas não na envolvente do edifício em telhados, fachadas, átrios ou dispositivos de sombreamento. A Figura 28 exibe um sistema aplicado num telhado.



Figura 28. Sistema aplicado num telhado.

Fonte: Energy Matters.

Os sistemas BIPV substituem os elementos de construção, em vez de serem sobrepostos a eles. Eles são elementos multifuncionais, portanto envolvem economia. Os sistemas BIPV são personalizados de acordo com o projeto, possuindo medidas, tipos de células, potência, transparência e cores personalizadas. A Figura 29 exibe um sistema integrado numa estação de metrô.



Figura 29. Sistema Integrado, metrô Coney Island.

Fonte: The subwaynut.

Há dois tipos principais de sistemas fotovoltaicos, como mostrado na Figura 30. Os sistemas isolados da rede (*Off-Grid*) e os sistemas conectados à rede (*On-Grid*). Existem ainda os sistemas híbridos, que podem operar tanto em modo isolado como conectado à rede pública. Os sistemas híbridos ainda não são utilizados no Brasil, portanto não serão abordados neste trabalho.

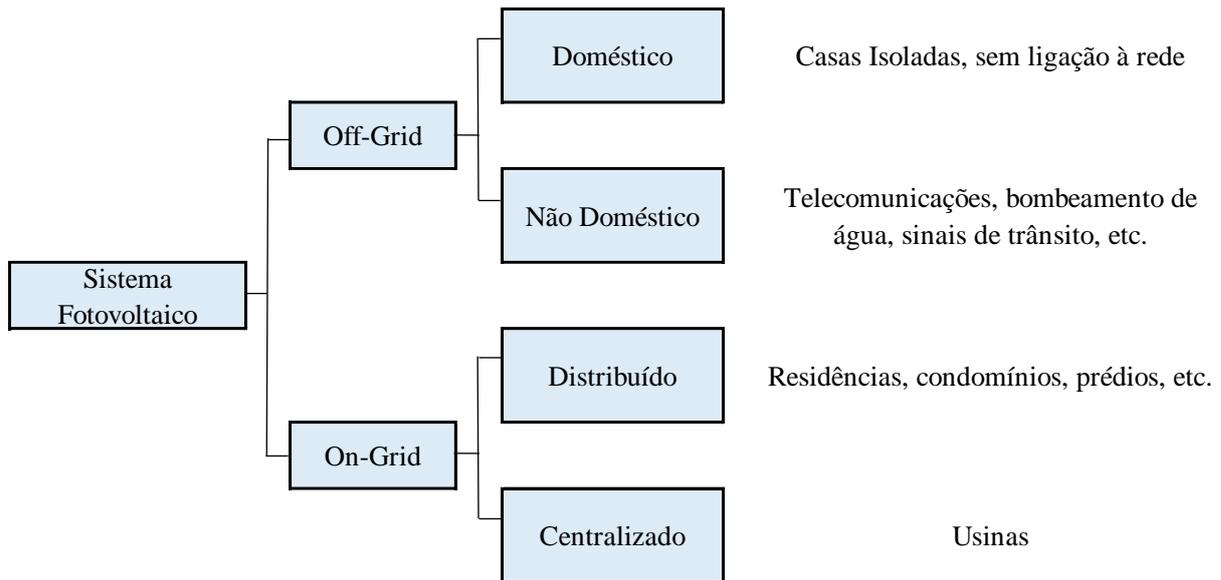


Figura 30. Exemplos de sistemas fotovoltaicos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.10.1 Sistemas isolados da rede

São sistemas que se caracterizam pelo uso de baterias como forma de acumulação de energia durante o dia e para fornecimento de energia durante a noite, quando a intensidade da luz não é suficiente para ativar os módulos fotovoltaicos. O sistema autônomo ou sistema *Off-Grid* é fundamental para atender regiões que não dispõem de rede elétrica convencional ou em que o uso de fontes alternativas seja economicamente mais viável. Opera de maneira isolada e autônoma para geração de energia elétrica.

O armazenamento é composto por um banco de baterias e necessita, dependendo da aplicação, de controladores de carga e inversores CC/CA. Conforme a tecnologia escolhida, o sistema pode alimentar cargas em corrente contínua ou em corrente alternada.

2.10.2 Sistemas conectados à rede

Os sistemas conectados à rede ou sistemas *On-Grid* estão permanentemente conectados à rede elétrica de distribuição, por esta razão, deve seguir as regras da concessionária local de energia.

Nas horas de pouca ou nenhuma irradiação solar, quando o módulo fotovoltaico não produz energia suficiente para cobrir a demanda de eletricidade, é a rede que fornece a

energia necessária. O usuário que investe em uma instalação desse tipo continua comprando a eletricidade que consome do distribuidor elétrico ao preço estabelecido.

Uma das grandes vantagens no uso desse tipo de sistema é a possibilidade de se eliminar um dos elementos mais complicados do sistema de geração elétrica: a acumulação de energia. Neste caso, como a própria rede faz o papel de fornecedora em momentos em que o sistema está em déficit e de consumidora quando o sistema gera energia em excesso, não é necessária a inclusão de um banco de baterias para suprir a carga em momentos de déficit, o que encarece muito o sistema (REIS, 2010).

Os medidores de energia unidirecionais das residências têm o objetivo de registrar a quantidade de energia consumida pelo cliente em um único sentido, da rede para a residência. Com a possibilidade de os sistemas fotovoltaicos gerarem maior quantidade de energia que a consumida em alguns períodos de tempo, surge a oportunidade de exportar energia excedente para a rede, porém essa medição era impossível com os medidores convencionais.

A partir desta necessidade surgiram os medidores bidirecionais, que são capazes de registrar o fluxo de energia em ambos os sentidos. A partir de então, a geração local de energia vem trilhando um novo caminho, abrindo a possibilidade de trocas com a rede de distribuição: é consumidora nos momentos em que a energia gerada é menor que a consumida e é fornecedora quando há produção excedente.

O sistema *On-grid* funciona em conjunto com a rede de eletricidade, e caso ocorra alguma interrupção na rede de distribuição, o sistema é imediatamente desligado, não funcionando como sistema de *backup*. Essa medida é necessária, pois caso ocorra alguma manutenção e a rede venha a ser desenergizada pelo operador, um fluxo de corrente fluiria da casa (estação geradora) para a rede, e a pessoa que estivesse executando a manutenção poderia sofrer um choque elétrico. Além disso, essa medida também garante a proteção do arranjo fotovoltaico, que não deve funcionar de forma isolada.

O funcionamento de um sistema fotovoltaico quando a rede está desenergizada é denominado operação ilhada. As normas brasileiras proíbem a operação ilhada e por esta razão, o sistema fotovoltaico precisa detectar a condição de ilhamento e se desconectar da rede. Os inversores utilizados em sistemas *On-grid*, chamados *grid-tie*, possuem uma tecnologia mais avançada do que a dos inversores utilizados nos sistemas autônomos. Esses inversores são responsáveis por gerenciar todo o sistema fotovoltaico. Os inversores *grid-tie*

modernos, em sua grande maioria, possuem seguidor do ponto de máxima potência (MPPT), que permite o aproveitamento máximo da capacidade de geração do arranjo fotovoltaico ao qual está conectado e também detectam a condição de ilhamento e desconectam o sistema fotovoltaico da rede.

Nessa configuração, representada na Figura 31, o sistema fica encarregado de converter a energia solar em eletricidade e injetar o potencial gerado diretamente na rede de distribuição da companhia de eletricidade.

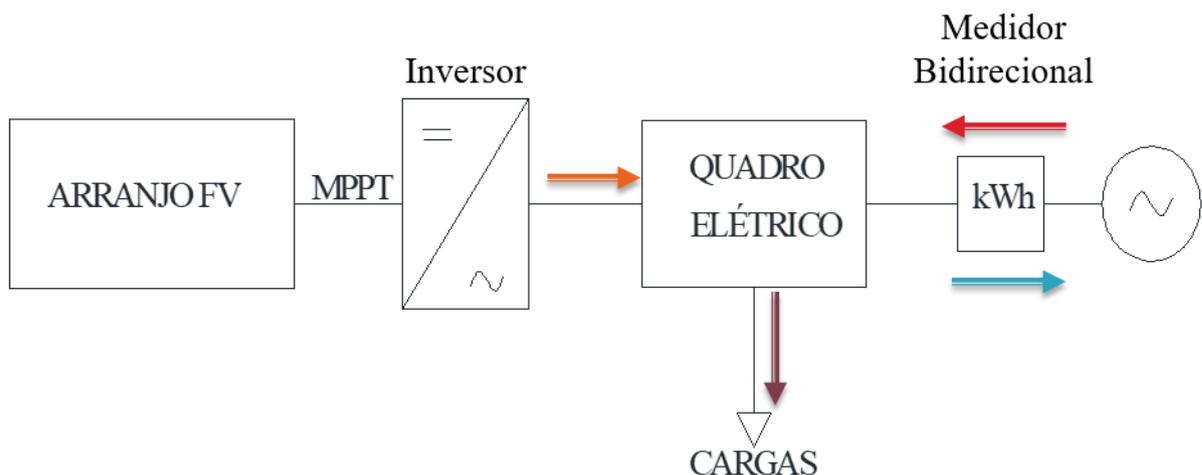


Figura 31. Arranjo fotovoltaico com seguidor do ponto de máxima potência.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Devido ao fato do sistema *On-grid* não necessitar de equipamentos de armazenamento (baterias), a rede elétrica atua como um grande sistema de carga, absorvendo a energia elétrica gerada não consumida no momento. A eficiência dos inversores define a eficiência do sistema: quanto mais eficiente o inversor, maior será o potencial aproveitado e a qualidade da energia injetada na rede de distribuição.

2.11 INVERSORES

O inversor é peça fundamental na instalação elétrica fotovoltaica, pois permite a conversão da energia gerada pelos painéis fotovoltaicos de corrente contínua para corrente alternada. Neste caso, o inversor deve ser dimensionado para alimentar diretamente a carga a ser conectada a ele.

A tensão gerada pelos módulos solares fotovoltaicos é na forma contínua, sendo necessário então o uso de um equipamento eletrônico conhecido como inversor ou conversor CC-CA (corrente contínua – corrente alternada), para obter tensão em corrente alternada com as características (frequência, forma de onda, etc.) necessárias para utilização em equipamentos convencionais em corrente alternada.

É possível encontrar no mercado dois tipos de inversores: os de saída com senóide modificada e os de senóide pura, conforme Figura 32. A especificação de cada tipo depende das características da carga a ser alimentada.

Os inversores de senóide modificada podem ser utilizados na maioria dos equipamentos, com exceção de alguns mais sensíveis a flutuações. Por exemplo, aparelhos como receptores de sinal, sistemas de segurança e alguns eletrodomésticos, podem não funcionar corretamente ou ter a sua vida útil reduzida.

Já os inversores de senóide pura produzem uma onda equivalente à da rede elétrica tradicional, podendo ser utilizados com qualquer aparelho elétrico ou eletrônico sem restrições.

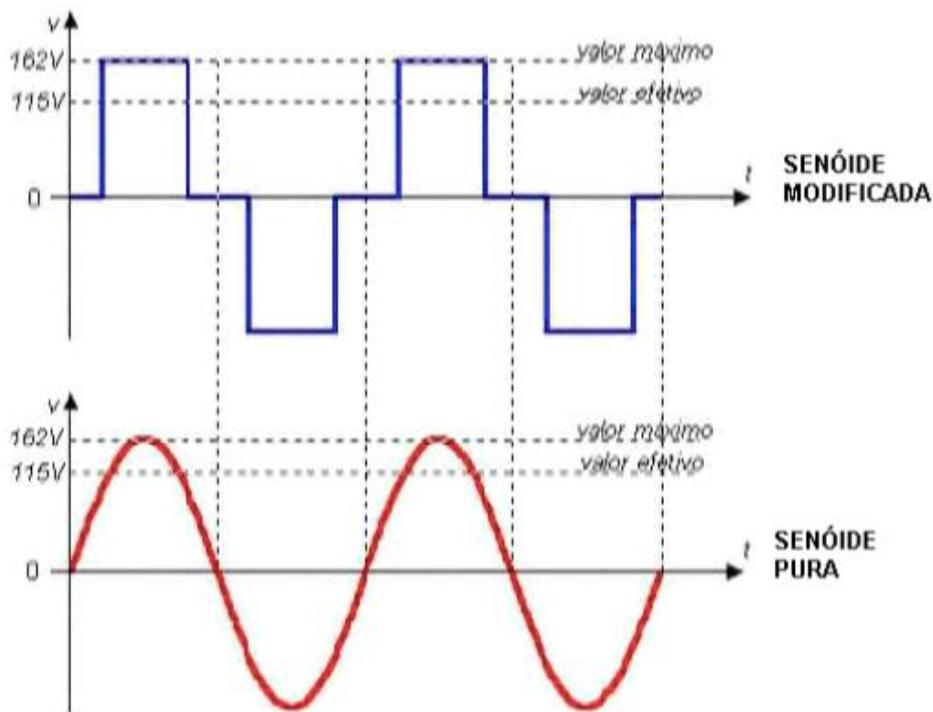


Figura 32. Diferença de onda entre senoide pura e senoide modificada.

Fonte: <http://macrosol.wagtel.com>

2.12 SEGUIDOR DE PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA – MPPT

Quando instalados, dependendo da orientação e local, os painéis fotovoltaicos são submetidos a diferentes níveis de radiação solar. Esses níveis variam ao longo dos dias e períodos do ano. Para que se possa extrair o máximo de rendimento do conjunto, são utilizados equipamentos capazes de seguir o ponto de máxima potência, chamados de MPPT (*Maximum Power Point Tracker*). A função desse dispositivo é regular a tensão e corrente de operação do sistema fotovoltaico, com a finalidade de operar sempre na máxima potência disponível, em qualquer condição de operação do sistema fotovoltaico, maximizando a produção de energia.

2.13 MICROINVERSORES

Nos sistemas fotovoltaicos com microinversores, ao invés de um único inversor central, existe um pequeno inversor para cada módulo fotovoltaico. Eles são instalados na parte traseira do módulo ou nos mesmos trilhos que os módulos.

Os microinversores convertem a tensão contínua em alternada de forma individual, permitindo o monitoramento e controle de cada módulo. Cada módulo possui controles individuais de MPPT, garantindo a potência máxima de saída independentemente do desempenho dos outros módulos fotovoltaicos do sistema. A Figura 33 mostra um exemplo de microinversor.

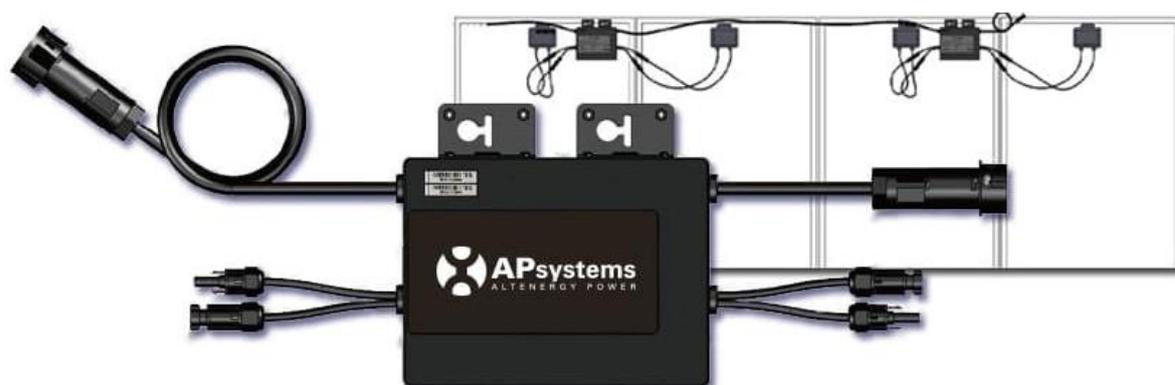


Figura 33. Microinversor de dois canais com MPPT individual.

Fonte: APsystems.

Quando os módulos fotovoltaicos são afetados por sombreamento, sujeira, ou qualquer situação em que um módulo tenha um desempenho de baixo nível em comparação com outras unidades, os microinversores conseguem garantir o melhor desempenho do sistema maximizando o desempenho de cada um dos módulos.

2.14 MEDIDORES

Segundo a ANEEL (2012), o consumidor que optar em instalar um sistema de micro ou minigeração distribuída será responsável inicialmente pelos custos de adequação do sistema de medição necessário para implantação do sistema de compensação. Após a instalação e estando o sistema em funcionamento, a distribuidora será responsável pela manutenção, incluindo os custos de eventual substituição.

A medição poderá ser feita através de um medidor bidirecional registrando a energia consumida da concessionária, e registrando a energia injetada na rede da concessionária.

Também serão aceitos dois medidores unidirecionais, um para aferir a energia elétrica ativa consumida e outro para a gerada. A medição por este método é utilizada caso seja a alternativa de menor custo ou solicitado pelo titular da unidade consumidora com micro ou minigeração.

2.15 ÍNDICE DE PERFORMANCE

É possível avaliar o desempenho global de um sistema fotovoltaico através do índice de performance (PR, *performance ratio*) que é definido como a relação entre o desempenho real do sistema e o desempenho máximo teórico possível. Este valor percentual mede o desempenho do sistema em relação às condições ótimas de funcionamento. A PR também serve como um parâmetro para comparar sistemas FV instalados em locais e/ou orientações diferentes e avalia a geração de energia elétrica levando em consideração a potência real do sistema sob condições de operação.

3 AUTOPRODUTORES DE ENERGIA

Em contraste com os sistemas tradicionalmente centralizados de fornecimento de eletricidade, como as grandes usinas, as tecnologias de energia renovável permitem a descentralização da geração de energia pelos consumidores finais. Com isso, surge a oportunidade não apenas de atender à demanda de energia, mas também de reduzir os custos de eletricidade para os moradores.

A autoprodução de energia se caracteriza pela energia produzida pelos próprios consumidores finais, ou seja, quando o consumidor produz energia elétrica, destinada ao seu uso exclusivo, utilizando suas próprias instalações.

A autoprodução sem fornecimento de excedentes ocorre quando a geração própria atende total ou parcialmente as suas próprias necessidades de energia elétrica, necessitando de suprimento permanente ou eventual por parte da concessionária de energia local para atender totalmente sua demanda.

A autoprodução com fornecimento de excedentes ocorre quando a geração própria é superior às suas necessidades e cujo excedente possa ser fornecido à concessionária de energia local, podendo eventualmente necessitar de suprimento da mesma para atender sua demanda.

Essa possibilidade surgiu em abril de 2012, quando a ANEEL publicou a Resolução Normativa nº 482/2012. Internacionalmente, esse sistema é conhecido como *net metering* e no Brasil se chama Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE). Esta Regulamentação possibilitou pessoas físicas ou jurídicas produzirem sua própria energia, inserindo na rede de distribuição elétrica o excedente produzido, contabilizando crédito nas suas futuras contas de energia.

Em 2017 a autoprodução gerou 11,2% de toda a energia elétrica consumida (EPE 2018), uma parcela considerada ainda pequena do mercado, porém com grande potencial de expansão.

Segundo a ANEEL, até maio de 2018, havia 28.342 autoprodutores de energia, que somam uma potência de 335.229,52 kW. Deste total, 28.152 são Usinas Fotovoltaicas que possuem a potência total de 256.751,44 kW, conforme mostrado na Tabela 7.

Tabela 7. Usinas autoprodutores de energia.

Total de usinas: 28.342 Total de UCs que recebem os créditos: 40.460 Potência total: 335.229,52 kW			
UNIDADES CONSUMIDORAS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA			
Tipo	Quantidade	Quantidade de UCs que recebem os créditos	Potência Instalada (kW)
CGH	45	6.795	43.325,90
EOL	55	98	10.310,10
UFV	28.152	33.334	256.751,44
UTE	90	233	24.842,08

Fonte: ANEEL, 2018.

A geração de energia elétrica próxima ao local de consumo traz inúmeros benefícios às concessionárias e ao Sistema Interligado Nacional. Pode-se citar como exemplo: economia dos investimentos em transmissão, redução das perdas nas redes e melhoria da qualidade do serviço de energia elétrica.

Destas 28.342 usinas autoprodutoras de energia, 21.808 unidades são do tipo residencial que possuem aproximadamente 30% da potência total de geração distribuída, conforme mostrado na Tabela 8.

Tabela 8. Tipos de unidades com geração distribuída.

UNIDADES CONSUMIDORAS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA			
Classe de Consumo	Quantidade	Quantidade de UCs que recebem os créditos	Potência Instalada (kW)
Comercial	4.555	13.820	153.475,20
Iluminação pública	7	7	80,70
Industrial	699	824	41.673,15
Poder Público	242	290	9.566,04
Residencial	21.808	23.991	100.353,36
Rural	988	1.483	28.549,46
Serviço Público	43	45	1.531,61

Fonte: ANEEL, 2018.

3.1 MICRO E MINIGERAÇÃO

Microgeração distribuída consiste em uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75kW conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

A Minigeração se refere a uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para as demais fontes renováveis, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

Através da regulação da ANEEL pode-se incluir a definição de sistema de compensação elétrica que estabelece que toda a energia gerada pelo autoprodutor que for injetada na rede de distribuição será compensada com o mesmo valor de consumo de energia que este autoprodutor por ventura use da rede de distribuição normal.

3.2 GERAÇÃO DE ENERGIA NAS UNIDADES CONSUMIDORAS

Com a inclusão de sistemas de geração de eletricidade conectados à rede de distribuição elétrica das concessionárias, tem-se a necessidade de regulamentar essa conexão pelos órgãos responsáveis, no caso do Brasil, a ANEEL. Esta é responsável pela regulamentação necessária para que os consumidores de energia elétrica possam ser também geradores de energia.

A ANEEL fixou normas para que um sistema de geração distribuída de pequeno porte seja conectado à rede elétrica. A Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, estabelece “as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências”. Esta regulamentação criou um novo horizonte e incentivo para a produção de energia elétrica alternativa.

O sistema de compensação de energia elétrica é o sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com micro ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa dessa mesma unidade consumidora ou de outra unidade consumidora de mesma titularidade da unidade consumidora onde os créditos foram gerados, desde que

possua o mesmo Cadastro de Pessoa Física (CPF) ou Cadastro de Pessoa Jurídica (CNPJ) junto ao Ministério da Fazenda.

Essa regra vale para unidades geradoras de energia que utilizem fontes de energia incentivadas, que são: hídrica, solar, biomassa, eólica e cogeração qualificada. No sistema de geração, a unidade geradora instalada pelo proprietário do local, produzirá uma quantidade de energia. A energia que não for consumida na hora pelo sistema local, será injetada no sistema da distribuidora de energia na qual o sistema estiver conectado, e o proprietário do sistema terá sua energia excedente exportada para a rede, em forma de créditos que servirão para abater o consumo dos meses subsequentes. Os créditos poderão ser utilizados em um prazo de 36 meses e as informações estarão na fatura do consumidor, a fim de que ele saiba o saldo de energia e tenha o controle sobre a mesma. Os órgãos públicos e as empresas com filiais que optarem por participar do sistema de compensação também poderão utilizar o excedente produzido em uma de suas instalações para reduzir a fatura de outra unidade, desde que seja a outra instalação pertencente ao mesmo CPF ou CNPJ do titular.

3.3 MODELO DE CONEXÃO RESIDENCIAL COM A REDE ELÉTRICA

O projeto de um sistema fotovoltaico envolve orientação dos módulos, disponibilidade de área, estética, disponibilidade do recurso solar, demanda a ser atendida e diversos outros fatores. Através do projeto pretende-se adequar o gerador fotovoltaico às necessidades definidas pela demanda. O dimensionamento de um sistema fotovoltaico (SFV) é o ajuste entre a energia radiante recebida do sol pelos módulos fotovoltaicos e a necessidade de suprir a demanda de energia elétrica. (PINHO e GALDINO, 2014).

A ANEEL define como “Acessante” o consumidor cuja instalação se conecte ao sistema elétrico de distribuição que possuam Microgeração ou Minigeração Distribuída. Logo, avalia-se qual a melhor tipologia para conexão de Microgeradores ou Minigeradores ao sistema de distribuição de baixa tensão da concessionária de energia local, estabelecendo critérios para a conexão de consumidores residenciais, dentro de condições técnicas e de segurança mínimas aceitáveis. Na Figura 34 está exemplificado um esquema de ligação utilizado pela concessionária de energia Light do município do Rio de Janeiro.

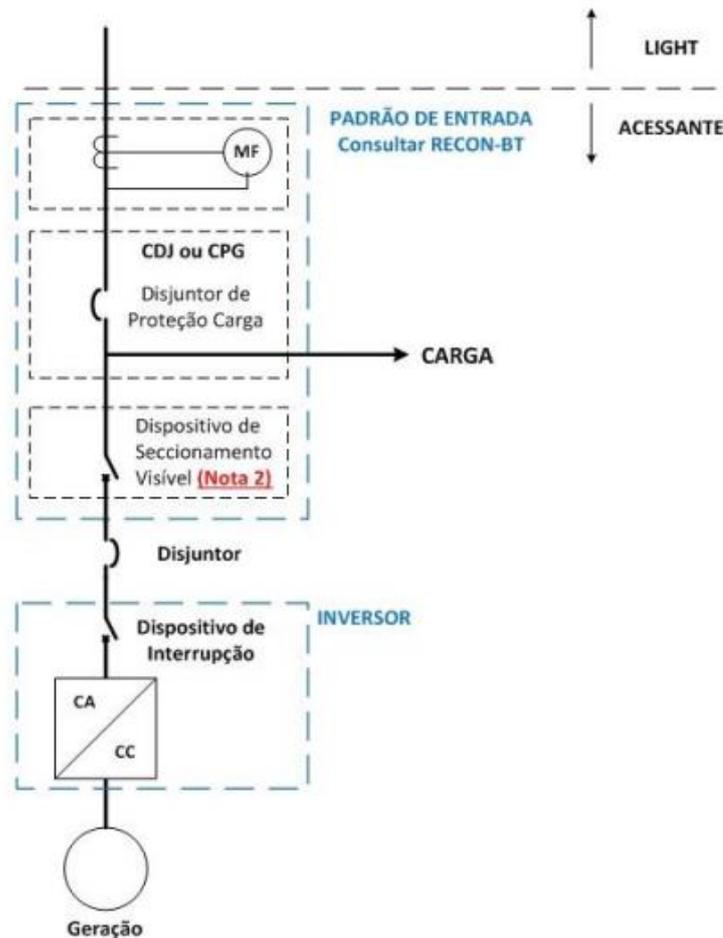


Figura 34. Forma de conexão do Acessante à rede de BT da Light.

Fonte: LIGHT, 2016.

3.4 SISTEMA DE MEDIÇÃO

O autoprodutor residencial que possuir um sistema fotovoltaico de geração de energia deverá ter o montante de energia injetado na rede elétrica de distribuição abatido do montante de energia consumido, para o cálculo do valor a ser cobrado na respectiva fatura de energia elétrica. Este sistema deverá ser capaz de medir a energia ativa injetada da rede e a energia ativa consumida da rede. Tal sistema de medição de energia, que deverá ser utilizado em todas as unidades consumidoras que desejarem solicitar conexão de microgeração, é chamado de medição bidirecional.

Caso o montante de energia injetada na rede da concessionária seja superior à consumida, cria-se um crédito de energia que não pode ser revertido em dinheiro, mas pode ser utilizado para abater o consumo da unidade consumidora até o sexagésimo mês

subsequente ou em outras unidades de mesma titularidade, desde que todas as unidades estejam na mesma área de concessão.

A Figura 35 representa uma curva de carga estimada para clientes residenciais com consumo de 300 a 500 kWh/mês em um dia útil e uma curva de geração fotovoltaica típica para um dia ensolarado, considerando um sistema de 1,5 kWp. A área da região I é a energia fotovoltaica gerada e entregue à rede. A área II é a energia fotovoltaica gerada para o autoconsumo, ou seja, que não é injetada na rede elétrica. Graficamente, o percentual de autoconsumo é dado pela divisão da área [II] pela área [I + II], que neste caso corresponde a 54,8%.

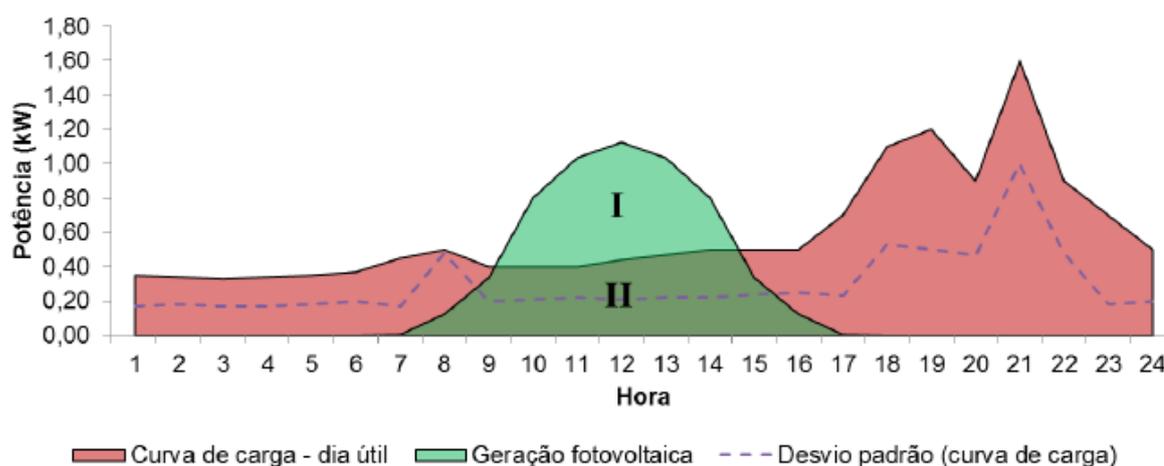


Figura 35. Curva de Carga (dia útil) e Curva de Geração Fotovoltaica.

Fonte: Instituto de Energia e Ambiente da USP, 2015.

3.5 PROGRAMA MINHA CASA MINHA VIDA

O Brasil tem investido grande quantidade de recursos em programas habitacionais de interesse social, como o Minha Casa Minha Vida. É um programa do Governo Federal que busca facilitar a conquista da primeira casa própria para as famílias de baixa renda, oferecendo condições atrativas para o financiamento de moradias nas áreas urbanas ou rurais. (CAIXA ECONÔMICA FEDERAL, 2015).

Realizado em parceria com estados, municípios, empresas e entidades sem fins lucrativos, o PMCMV oferece condições facilitadas de pagamento e baixas taxas de juros, de acordo com a renda familiar, aos interessados em adquirir o primeiro imóvel residencial novo. Além disso, também são oferecidos subsídios para que famílias de menor poder aquisitivo

possam realizar o “sonho da casa própria”. O valor é abatido do saldo devedor, funcionando como um desconto, sem a necessidade de reembolso.

Atualmente, existem quatro faixas de renda contempladas com as concessões de benefícios, conforme mostrado na Figura 36.

RENDA FAMILIAR MENSAL	FAIXA DO MCMV	CARACTERISTICA
Até R\$ 1.800,00	FAIXA 1	Até 90% de subsídio do valor do imóvel. Pago em até 120 prestações mensais de, no máximo, R\$ 270,00, sem juros.
Até R\$ 2.600,00	FAIXA 1,5	Até R\$ 47.500,00 de subsídio, com 5% de juros ao ano.
Até R\$ 4.000,00	FAIXA 2	Até R\$ 29.000,00 de subsídio, com 6% a 7% de juros ao ano.
Até R\$ 9.000,00	FAIXA 3	8,16% de juros ao ano

Figura 36. Faixas de renda do PMCMV.

Fonte: Ministério do Desenvolvimento Regional.

3.6 GERAÇÃO FOTOTOLTAICA NO PMCMV

A Portaria 643/2017 do Ministério das Cidades apresenta as condições gerais para provisão de sistemas alternativos de geração de energia para empreendimentos do Programa Minha Casa, Minha Vida (PMCMV). A Tabela 9 indica em quais regiões a geração de energia alternativa é obrigatória nos novos empreendimentos.

Tabela 9. Provisão de sistemas alternativos de geração de energia para empreendimentos do PMCMV.

Região	Zona Bioclimática	Geração de Energia Alternativa
Centro-oeste	Z3, Z4, Z5, Z6, Z7 e Z8	OBRIGATÓRIA
Sudeste	Z3, Z4, Z5 e Z6	
Sul	Z1, Z2 e Z3	
Norte	Z7 e Z8	OPCIONAL
Nordeste	Z5, Z6, Z7 e Z8	

Fonte: Ministério das Cidades. Adaptado pelo autor.

Consideram-se sistemas alternativos de geração de energia aqueles instalados em empreendimentos ou conjunto de empreendimentos, podendo ser complementares às redes de distribuição existentes no município e que utilizem fontes renováveis, tais como:

- Energia de biomassa;
- Energia eólica;
- Energia solar;
- Energia oceânica; e
- Outras que vierem a ser reconhecidas e integrem o Sistema Elétrico Brasileiro.

Para o caso da energia solar, são considerados dois tipos de sistemas:

- Sistema de aquecimento de água (SAS);
- Sistema de geração de energia elétrica a partir da radiação solar, por meio do efeito fotovoltaico, ou Sistema Fotovoltaico (SFV).

O custo total do sistema de geração, incluindo aquisição, instalação e demais serviços, não deve ultrapassar R\$ 3.000,00 (três mil reais) por unidade habitacional.

Os sistemas fotovoltaicos deverão obedecer alguns critérios:

- Ter seus equipamentos aprovados pelo INMETRO;
- Possuir classificação A pelo INMETRO de eficiência energética;
- Atender aos requisitos definidos pela Resolução ANEEL nº 482, de 17 de abril de 2012, e suas alterações, referentes à microgeração distribuída no sistema de compensação de energia elétrica;
- Possuir, no mínimo, capacidade de geração de energia elétrica correspondente a um consumo médio anual de 800 kWh por unidade habitacional;
- Para os módulos fotovoltaicos, garantia contra defeitos de fabricação de pelo menos 10 (dez) anos e garantia de performance do equipamento por pelo menos 25 (vinte e cinco) anos;
- Para os módulos fotovoltaicos, a garantia de performance acima refere-se a uma redução média de performance de até 0,5% ao ano, por período de 25 (vinte e cinco) anos de operação dos módulos fotovoltaicos;
- Para os inversores fotovoltaicos, garantia contra defeitos de fabricação por no mínimo 25 (vinte e cinco) anos.

4 METODOLOGIA

O estudo de caso em questão tem como objetivo quantificar a energia elétrica consumida através de um sistema fotovoltaico em habitações sociais existentes. Para esta análise será utilizado o software PVsyst, amplamente utilizado para simulações de sistemas fotovoltaicos. Vale ressaltar que o software é apenas uma ferramenta de modelagem, sendo que a metodologia proposta pode ser adaptada para uso de outros programas de simulação, com resultados similares.

Para o desenvolvimento do sistema fotovoltaico conectado à rede é muito importante coletar dados importantes que afetam o desempenho do sistema. Existem dois conjuntos de dados que afetam os parâmetros do sistema que são os dados geográficos e os dados de carga.

4.1 LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA

A partir da localização geográfica do local da instalação de interesse, é possível obter os dados solares e de temperatura. A irradiação global é medida em kW/m²/mês. Os valores são obtidos a partir de bancos de dados de estações meteorológicas de diversas regiões do globo. O PVSyst utiliza uma base de dados históricos de irradiação global entre os anos de 1991 a 2010.

4.2 CARGA A SER ATENDIDA

No sistema fotovoltaico conectado à rede, o cálculo dos dados de carga a ser atendida é muito importante para evitar o sobredimensionamento ou subdimensionamento do sistema, porque isso aumenta o custo total a ser aplicado ou reduz o retorno esperado. Pode-se utilizar um ano de dados de carga para o estudo em questão, o que será suficiente para estimar a quantidade de energia gerada durante todo o ano.

Conforme o Art. 98 da Resolução Normativa nº 414/2010 da ANEEL, o Custo de Disponibilidade do Sistema cobrado nas faturas de energia elétrica é o valor mínimo faturável, aplicável ao faturamento de unidades consumidoras do Grupo B, de acordo com os limites fixados por tipo de ligação:

- Monofásica: valor em moeda corrente equivalente a 30 kWh;

- Bifásica: valor em moeda corrente equivalente a 50 kWh;
- Trifásica: valor em moeda corrente equivalente a 100 kWh.

Portanto, é recomendado considerar o Custo de Disponibilidade do Sistema, de acordo com o tipo de unidade consumidora.

4.3 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

É muito importante selecionar os melhores componentes do sistema para obter um sistema eficiente e confiável de custos. Todos os componentes do sistema são selecionados com base em seus parâmetros e características.

O módulo fotovoltaico é o componente mais importante do sistema conectado à rede, uma vez que o sistema fotovoltaico converte a energia da radiação solar em energia elétrica. Vários módulos fotovoltaicos são conectados para formar um painel (do Inglês, *array*) para aumentar a potência de saída.

O painel fotovoltaico deve ser dimensionado adequadamente para fornecer a carga ao longo do ano. É necessário fixar o painel em um determinado ângulo fixo para receber a quantidade máxima de radiação solar. Para a radiação solar ideal, o sistema localizado no hemisfério sul deve ser voltado para o Norte geográfico. A partir de IRMAN 2015, verifica-se que, para a radiação solar máxima, o painel é fixado em um ângulo igual à latitude da localização do local.

4.4 SIMULAÇÃO ATRAVÉS DE SOFTWARE PVSYS

O PVSyst é uma ferramenta de modelagem amplamente utilizada na indústria de energia renovável. Ele possui um menu de ajuda detalhado que explica o processo de modelagem e oferece um guia amigável para o desenvolvimento de um projeto. Essa ferramenta apresenta resultados na forma de um relatório completo, gráficos e tabelas específicos e dados que podem ser exportados para uso em outras ferramentas de *software*.

A simulação permite ao usuário modelar diferentes tamanhos e entradas de sistema. Para um determinado projeto, o usuário pode construir diversas variações para o sistema. As entradas para o *software* incluem a especificação da potência desejada ou da área disponível e

a escolha do módulo fotovoltaico e do inversor. A partir dessas entradas, o PVsyst proporá uma configuração de sistema, que permite conduzir uma simulação preliminar.

A saída do programa permite saber como é a distribuição de energia ao longo do ano, incluindo a produção total de energia (MWh/ano), a taxa de desempenho e a energia específica (kWh/kWp) com base na irradiação disponível, bem como localização e orientação dos painéis. Os resultados também incluem um diagrama de perdas, mostrando as principais saídas de energia, além dos ganhos e perdas envolvidos na simulação.

No geral, o PVsyst é uma ferramenta poderosa que pode fornecer uma análise rápida para o sistema que você está desenvolvendo, além de mostrar melhorias potenciais que podem ser feitas no design do sistema.

A seguinte equação é aplicada nas análises:

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{E \cdot P_{sol}}{G_{poa} \cdot PR} \quad (9)$$

Onde:

$P_{m\acute{a}x}$ = Potência máxima do módulo fotovoltaico (kWp)

E = Energia consumida diariamente pelas cargas (kWh/dia)

P_{sol} = Irradiância de referência (1 kW/m²)

G_{poa} = Irradiação diária no plano dos módulos (kWh/m².dia)

PR = *Performance Ratio* – Coeficiente de desempenho, adimensional

O módulo fotovoltaico e a especificação do inversor são otimizados pelo PVsyst para dimensionamento apropriado do sistema conectado à rede. A partir das especificações do sistema simulado, são encontradas a potência de saída do sistema e as perdas totais. A Figura 37 mostra, em diagrama de blocos, os dados de entrada e saídas das etapas da simulação.

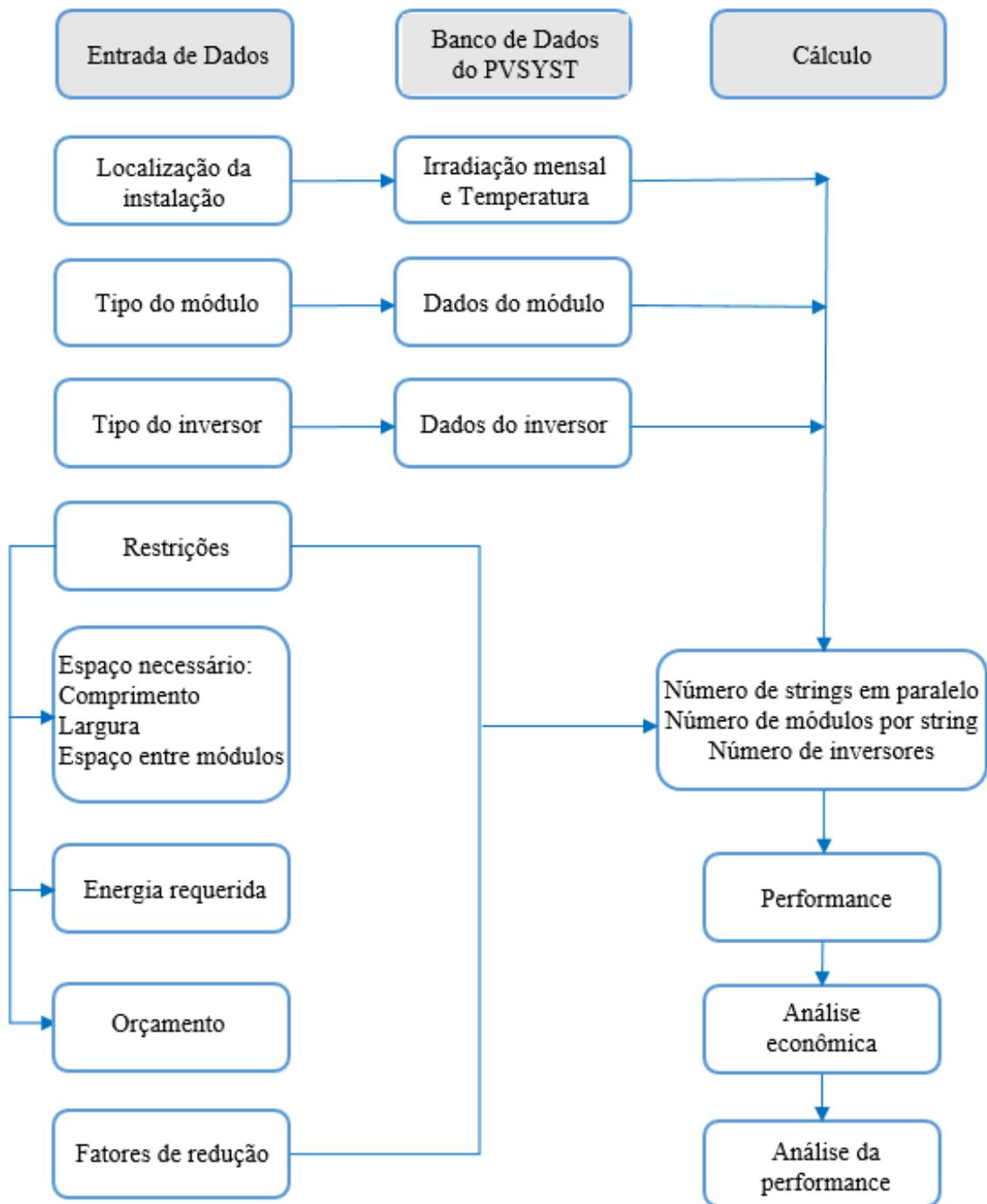


Figura 37. Diagrama de blocos das etapas de simulação.

Fonte: NORDIN e RAHMAN, 2015. Adaptado pelo autor.

A Figura 38 exibe a tela do software em questão, onde o usuário seleciona o tipo de simulação desejada.

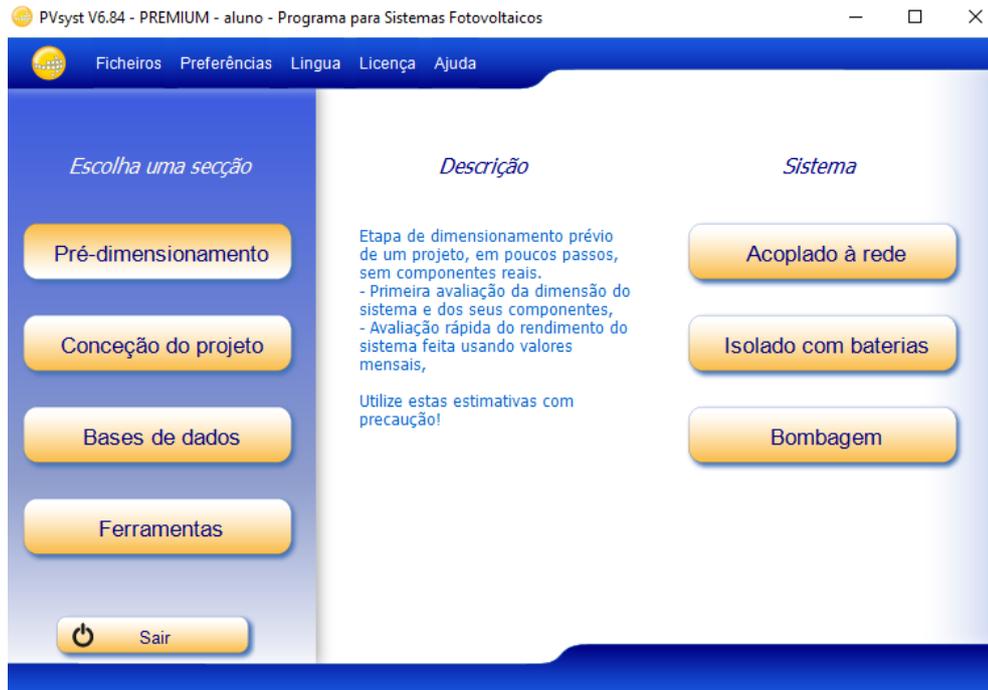


Figura 38. Tela de seleção do tipo de sistema a ser simulado.

Fonte: PVSyst V6.84.

Para a simulação dos sistemas conectados à rede, a Figura 39 exemplifica o tipo de conexão entre os equipamentos. Nesta etapa são inseridos os dados de localização geográfica do sistema, conforme Figura 40.

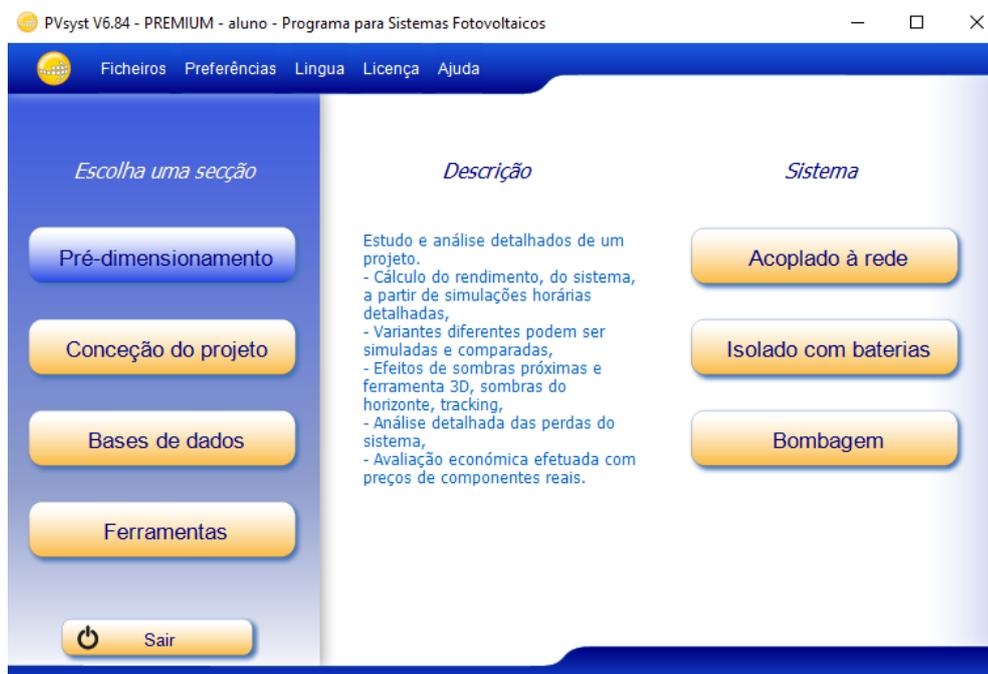


Figura 39. Tela inicial do PVSyst.

Fonte: PVSyst.

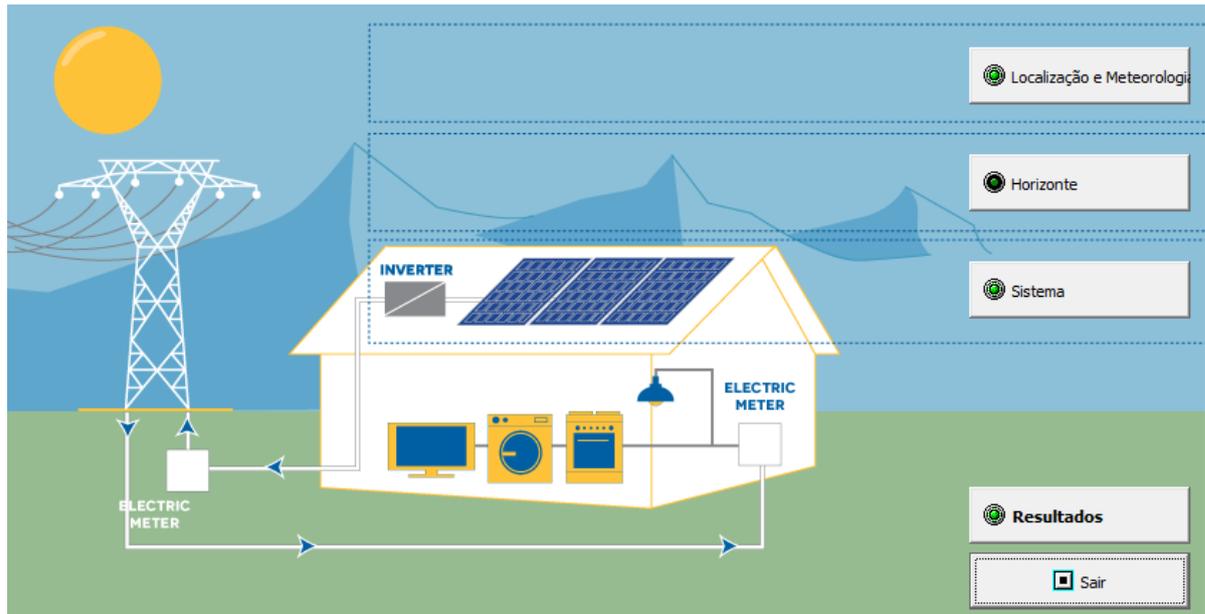


Figura 40. Tela de configuração do sistema conectado à rede.

Fonte: PVSyst.

As Figuras 41 e 42 exibem as telas de detalhamento do sistema, onde é possível especificar a potência nominal desejada, o tipo e a orientação dos módulos.

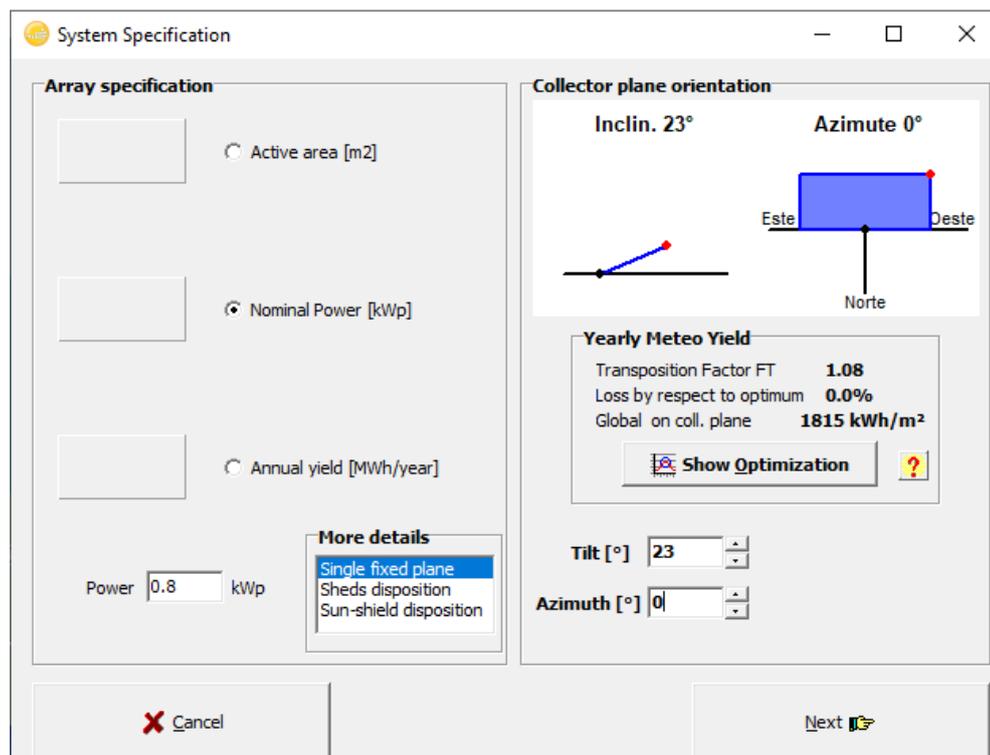


Figura 41. Tela para especificação do sistema a ser simulado.

Fonte: PVSyst V6.84.

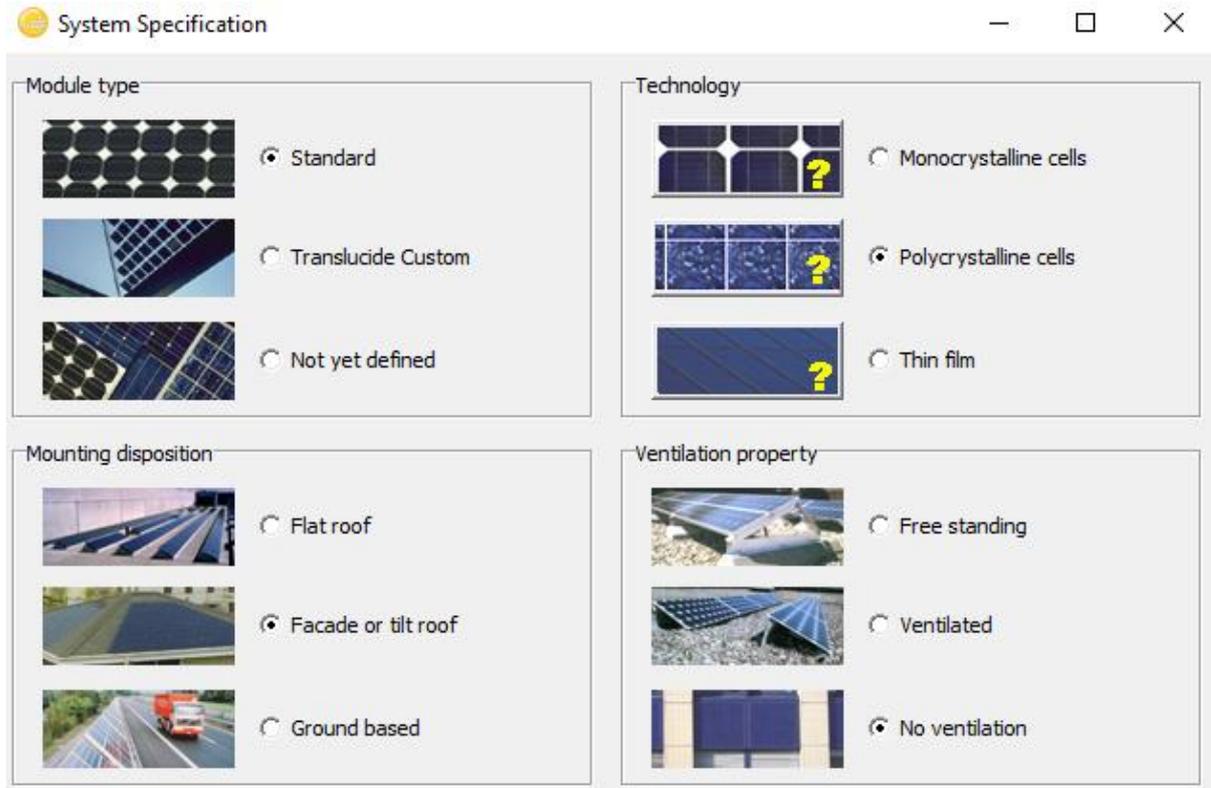


Figura 42. Tela para especificação do sistema a ser simulado.

Fonte: PVsyst V6.84.

A Tabela 10 exibe as informações técnicas presentes no banco de dados do PVsyst. Há informações detalhadas referentes aos módulos, aos inversores e dados meteorológicos.

Tabela 10. Dados técnicos fornecidos em bancos de dados.

Banco de dados do módulo fotovoltaico	Banco de dados do inversor	Banco de dados meteorológico da instalação
Marca do módulo	Marca do inversor	Radiação solar
Tipo do módulo	Tipo do inversor	Temperatura ambiente
Dimensões do módulo	Potência nominal de saída	
Potência máxima do módulo	Potência máxima	
Máxima tensão de saída	Tensão nominal	
Máxima corrente de saída	Tensão máxima entrada	
Tensão de circuito aberto	Tensão mínima entrada	
Corrente de curto circuito	Máxima corrente CC saída	
Coefficiente de temperatura	Eficiência	

Fonte: NORDIN e RAHMAN, 2015. Adaptado pelo Autor.

5 ESTUDO DE CASO

Para o estudo de caso, será considerado um condomínio já construído no Município do Rio de Janeiro, localizado na Zona Oeste. Apesar de não contar com o subsídio para instalação de sistemas fotovoltaicos, o condomínio em questão oferece dados importantes para este trabalho, como o consumo de energia elétrica mensal.

Será considerada a microgeração por fonte solar fotovoltaica. Durante o dia a energia produzida pode ser consumida pela própria residência, se houver “sobra” de energia gerada pela central, a mesma é passada para a rede. Durante à noite, quando o sistema fotovoltaico não estiver em operação, a rede devolve a energia para a unidade consumidora e supre necessidades adicionais. Pode-se considerar que a rede funciona como uma bateria, armazenando o excedente até o momento em que a unidade consumidora necessite de energia proveniente da distribuidora.

Ao utilizar energia solar como fonte alternativa para geração de eletricidade em uma unidade consumidora, como já mencionado anteriormente, é necessário verificar algumas características geográficas para obter o máximo aproveitamento do sistema.

5.1 CARACTERÍSTICAS DO CONDOMÍNIO

O Villagio do Campo é um condomínio com 999 residências, localizado no Bairro de Campo Grande, na Zona Oeste da Capital do Rio de Janeiro. O mesmo recebeu o Habite-se em 2012 e possui área total de 10.810,76 m². A Figura 43 exibe a vista aérea do condomínio.



Figura 43. Imagem de satélite do condomínio estudado.

Fonte: Google Maps, acessado em 13/09/2018.

A partir da planta de localização do condomínio, foi possível dividi-lo em cinco blocos considerando o desvio azimutal em relação às águas dos telhados, conforme mostrado nas Figuras 44, 45 e 46. A Tabela 11 resume os ângulos de desvio azimutal e inclinação.

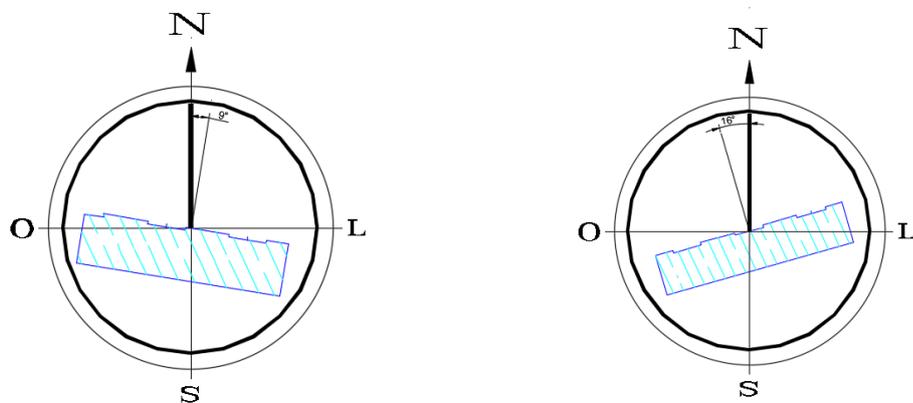


Figura 44. Desvio azimutal do Bloco 1 (9°) e do Bloco 2 (16°).

Fonte: Elaborado pelo autor.

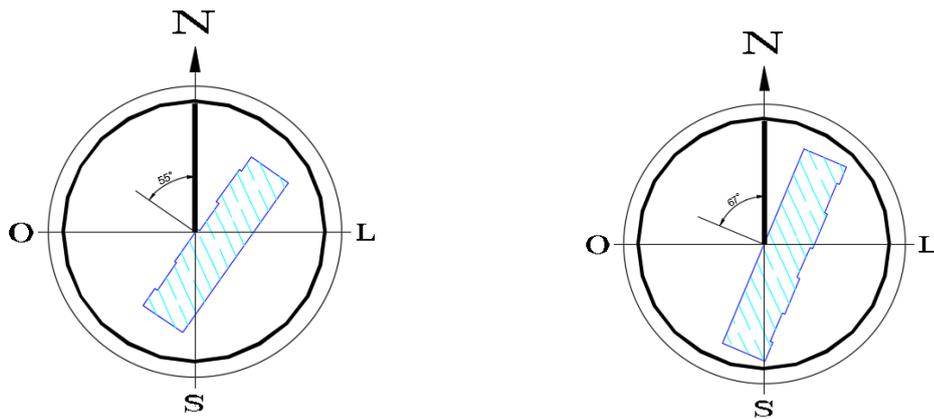


Figura 45. Desvio azimutal do Bloco 3 (55°) e do Bloco 4 (67°).

Fonte: Elaborado pelo autor.

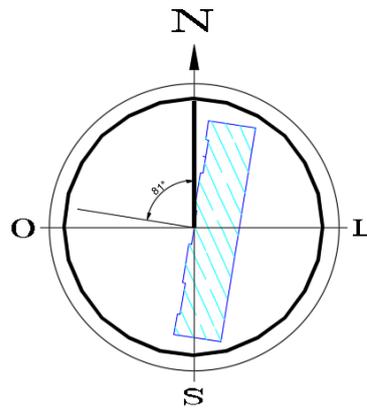


Figura 46. Desvio azimutal do Bloco 5 (81°).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11. Inclinação e Desvio Azimutal do condomínio.

	Inclinação(°)	Desvio Azimutal(°)
Bloco 1	20	9
Bloco 2	20	16
Bloco 3	20	55
Bloco 4	20	67
Bloco 5	20	81

Fonte: Elaborado pelo Autor.

As Figuras 47, 48 e 49 exibem fotos do condomínio estudado.



Figura 47. Imagem do condomínio estudado.

Fonte: CR2 Empreendimentos.



Figura 48. Imagem do condomínio estudado.

Fonte: CR2 Empreendimentos.



Figura 49. Imagem do condomínio estudado.

Fonte: CR2 Empreendimentos.

As Figuras 50, 51 e 52 exibem o corte da fachada, a vista superior e um corte do telhado, respectivamente. A inclinação do telhado é de 20° . Os sistemas fotovoltaicos serão instalados sobre os telhados dos blocos, portanto também terão a mesma inclinação.

A Figura 53 exhibe a planta baixa da residência padrão, com área total de 40 m^2 . Cada uma das 999 casas é composta por dois quartos; sala; cozinha e banheiro.



Figura 50. Corte da fachada.

Fonte: CR2 Empreendimentos.

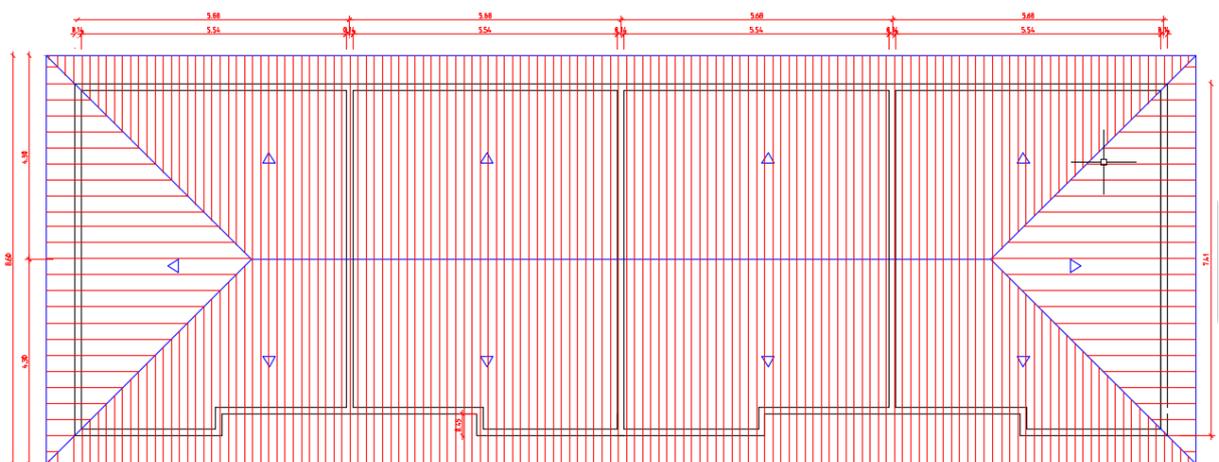


Figura 51. Telhado do empreendimento.

Fonte: CR2 Empreendimentos.

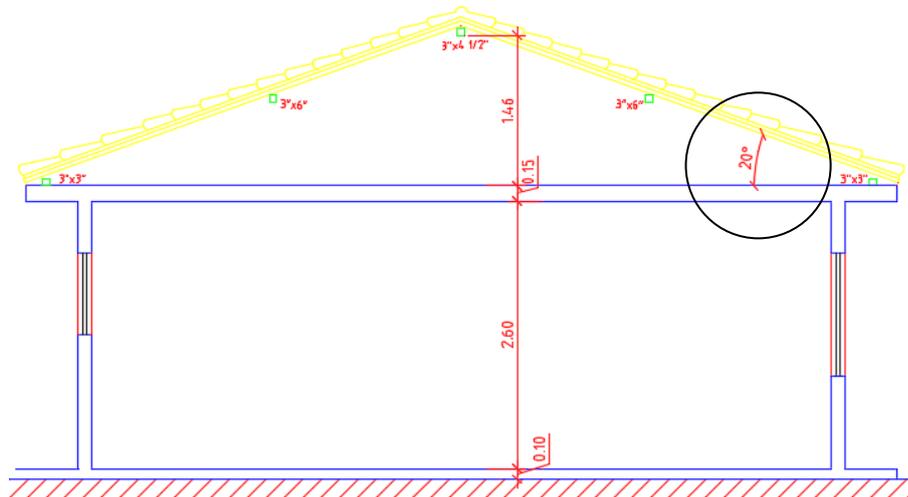


Figura 52. Corte do empreendimento.

Fonte: CR2 Empreendimentos

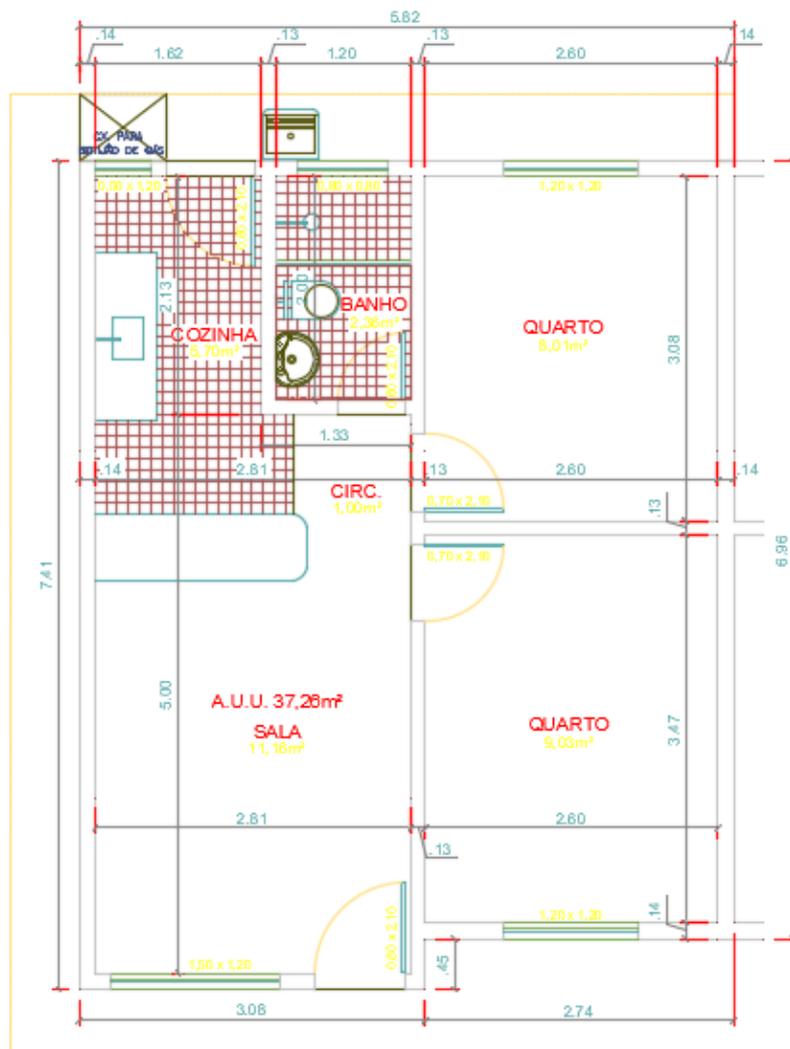


Figura 53. Planta baixa da residência.

Fonte: CR2 Empreendimentos.

5.2 PERFIL DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

A partir da fatura de energia elétrica da concessionária de distribuição local de energia foi possível obter o histórico de consumo energético de 20 (vinte) meses, referente a 17 (dezesete) residências. Os gráficos de consumo mensal de energia elétrica são apresentados no APÊNDICE I. Todos os moradores do condomínio que participaram do estudo receberam uma carta incluindo uma breve explicação do estudo e um aviso de não divulgação de dados pessoais (APÊNDICE II).

A partir dos gráficos citados acima, foi possível obter uma média de consumo anual de 2.773 kWh e uma média mensal apresentada na Figura 54. A Tabela 12 mostra os valores mensais de consumo de cada residência.

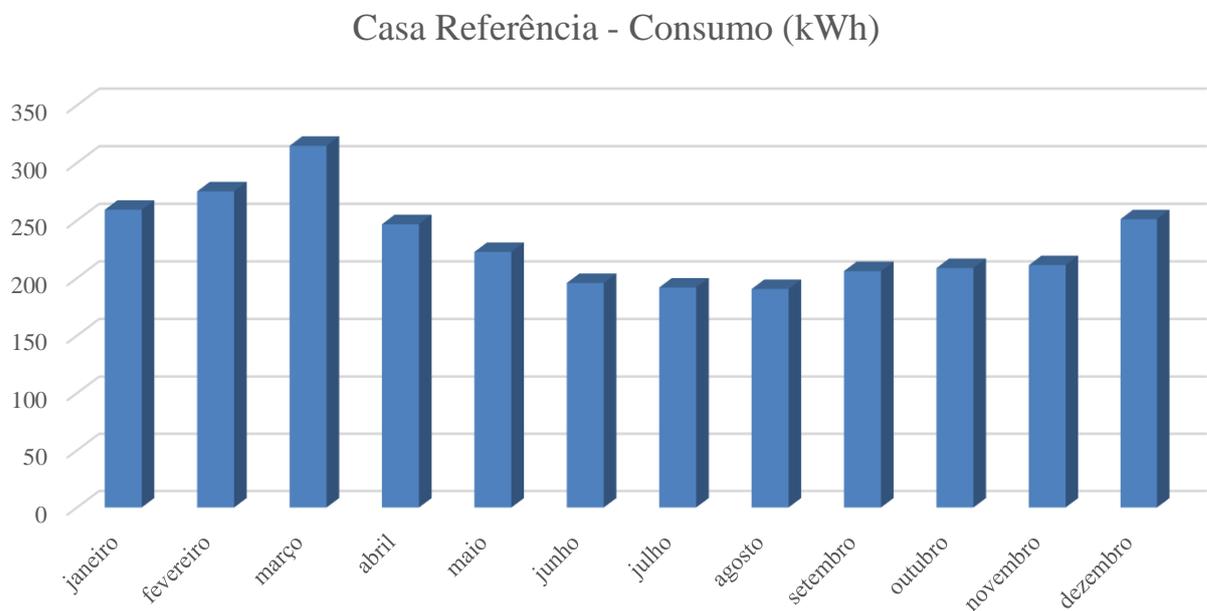


Figura 54. Consumo mensal da Casa de Referência.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 12. Consumo mensal das residências.

Mês de referência	Consumo casa 1 (kWh)	Consumo casa 2 (kWh)	Consumo casa 3 (kWh)	Consumo casa 4 (kWh)	Consumo casa 5 (kWh)	Consumo casa 6 (kWh)	Consumo casa 7 (kWh)	Consumo casa 8 (kWh)	Consumo casa 9 (kWh)	Consumo casa 10 (kWh)	Consumo casa 11 (kWh)	Consumo casa 12 (kWh)	Consumo casa 13 (kWh)	Consumo casa 14 (kWh)	Consumo casa 15 (kWh)	Consumo casa 16 (kWh)	Consumo casa 17 (kWh)	Média
fev/17	0	309	314	282	230	141	0	292	0	363	385	293	321	255	422	329	323	304,21
mar/17	0	350	443	337	268	152	0	300	0	360	449	381	382	277	510	349	400	354,14
abr/17	161	257	236	259	172	110	0	206	0	240	371	194	210	178	337	338	239	233,87
mai/17	170	249	200	247	169	115	0	155	0	283	375	180	185	173	255	313	190	217,27
jun/17	151	251	234	251	155	112	0	140	0	58	295	187	184	156	229	348	219	198,00
jul/17	94	249	251	265	144	127	0	143	0	138	306	163	175	145	206	329	226	197,40
ago/17	97	259	61	240	125	130	153	147	0	155	329	158	187	184	233	298	219	185,94
set/17	108	285	176	241	146	121	178	156	0	186	341	192	231	187	259	329	230	210,38
out/17	121	292	206	231	141	121	99	181	134	198	359	203	254	196	301	314	196	208,65
nov/17	126	275	166	220	148	125	14	176	166	240	347	222	221	238	318	329	259	211,18
dez/17	157	302	338	275	201	148	99	216	192	324	401	251	248	281	330	325	180	251,06
jan/18	155	304	237	282	182	144	135	252	176	371	380	226	290	277	370	338	288	259,24
fev/18	187	332	262	267	218	146	112	277	158	288	306	261	265	243	362	270	232	246,24
mar/18	211	335	284	291	185	186	152	263	186	387	412	305	306	295	361	280	243	275,41
abr/18	208	316	285	256	187	160	219	241	191	285	355	234	272	276	378	230	320	259,59
mai/18	173	317	229	239	167	142	247	194	193	280	332	182	203	240	256	238	244	228,00
jun/18	142	282	191	233	145	131	187	157	155	184	302	198	198	157	225	198	202	193,35
jul/18	142	255	166	236	139	134	196	134	167	199	281	186	193	196	211	191	138	186,12
ago/18	149	275	185	258	162	130	140	151	159	167	289	178	199	232	237	259	145	195,00
set/18	155	304	182	295	142	133	70	181	172	189	295	190	211	253	237	272	148	201,71

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 DADOS DE IRRADIAÇÃO LOCAL

Primeiramente, deve-se verificar a radiação solar do local da instalação. O PVSyst oferece uma base de dados históricos de 1991 a 2010. Para a região do condomínio estudado, os valores são mostrados na Figura 55.

	Irradiação global horizontal	Irradiação difusa horizontal	Temperatura	Velocidade do vento	Linke Turbidity	Relative Humidity
	kWh/m ² .mês	kWh/m ² .mês	°C	m/s	[-]	%
Janeiro	180.4	84.5	26.9	1.90	3.236	77.9
Fevereiro	155.6	78.0	27.0	1.90	3.166	78.4
Março	161.3	78.0	26.2	1.79	3.094	79.3
Abril	121.4	62.6	24.5	1.60	3.094	83.5
Maio	119.3	49.0	22.2	1.50	2.870	81.5
Junho	96.1	41.5	20.6	1.29	2.946	85.4
Julho	117.5	42.8	19.8	1.51	2.793	84.5
Agosto	125.9	57.2	21.3	1.80	2.870	80.4
Setembro	125.9	69.6	22.0	2.10	3.304	79.1
Outubro	150.2	78.2	24.4	2.30	3.371	76.7
Novembro	157.4	84.5	25.2	2.20	3.371	77.1
Dezembro	172.8	96.3	26.6	2.10	3.166	75.7
Ano	1683.7	822.0	23.9	1.8	3.107	80.0

Figura 55. Dados de irradiância do local.

Fonte: PVSyst.

5.4 PRÉ-DIMENSIONAMENTO PARA 800 kWh/ano

Utilizando o PVSyst no modo de pré-dimensionamento, foi possível dimensionar um sistema capaz de gerar 800 kWh/ano conforme exigência do PMCMV. Para cada bloco foi pré-dimensionado um sistema com potência variante entre 500 e 660 W, como mostrado na Tabela 13.

Tabela 13. Pré-dimensionamento para 800 kWh/ano.

	Inclinação(°)	Desvio Azimutal(°)	Energia Gerada (kWh/ano)	Sistema (kWp)
Bloco 1	20	9	800	0,5
Bloco 2	20	16	800	0,6
Bloco 3	20	55	800	0,6
Bloco 4	20	67	800	0,6
Bloco 5	20	81	800	0,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

A principal diferença entre os sistemas se deve ao desvio azimutal de cada bloco do condomínio que não estão perfeitamente alinhados ao norte geográfico.

5.5 DIMENSIONAMENTO PARA 800 kWh/ano

Foi escolhido um sistema de 0,6 kWp com as características do Bloco 5 para uma simulação mais detalhada. Uma vez que neste sistema possui o maior desvio azimutal, para a instalação desse mesmo sistema em qualquer outro bloco, a geração seria mais vantajosa. A Figura 56 exibe a entrada de dados da inclinação de 20° e do desvio azimutal de 81°.

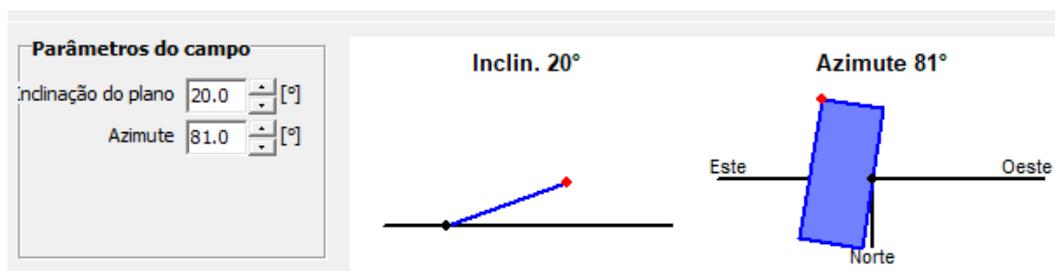


Figura 56. Entrada de dados do sistema.

Fonte: PVSyst.

Devido às características do local sem árvores ou prédios altos próximos, não foi considerado nenhum tipo de sombreamento sobre o sistema.

Após a simulação, os dados foram apresentados conforme a Figura 57. O sistema proposto possui dois módulos de 300 W e um microinversor.

Sumário do sistema global			
Número de módulos	2	Potência FV nominal	0.6 kWp
Superfície módulos	3 m ²	Potência máxima FV	0.6 kWdc
N.º de inversores	1	Potência AC nominal	0.6 kWac

Sistema acoplado à rede: Resultados principais			
Projeto :	Dissertação		
Variante da simulação :	simulação 800		
Parâmetros principais do sistema	Tipo de sistema	No 3D scene defined, no shadings	
Orientação do plano dos módulos	inclinação	20°	azimute 81°
Módulos FV	Modelo	CS3K-300P-AG P4	Pnom 300 Wp
Grupo FV	Número de módulos	2	Pnom total 600 Wp
Inversor	Modelo	YC600-NA	Pnom 550 W ac
Exigências do consumidor	Carga constante fixa	0 W	Global 2.8 kWh/ano
Resultados principais da simulação			
Produção do sistema	Energia produzida	821.1 kWh/ano	Prod. específica 1368 kWh/kWp/ano
	Índice de performance (PR)	82.77 %	Fração solar 0.00 %

Figura 57. Resultados principais.

Fonte: PVSyst V6.84

A Figura 58 apresenta o relatório de saída do *software*, indicando a produção mensal de energia e a PR de 82,8%.

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR
Janeiro	180.4	84.48	26.94	172.0	167.9	86.81	83.49	0.809
Fevereiro	155.6	77.99	27.00	151.2	147.6	76.55	73.65	0.812
Março	161.3	77.99	26.22	153.9	150.2	78.61	75.61	0.819
Abril	121.4	62.57	24.54	121.4	118.6	63.05	60.61	0.832
Mai	119.3	48.96	22.24	122.3	119.1	64.24	61.82	0.843
Junho	96.1	41.46	20.59	98.4	95.5	52.09	50.06	0.848
Julho	117.5	42.78	19.82	120.3	116.9	63.70	61.32	0.849
Agosto	125.9	57.20	21.30	127.4	124.2	67.04	64.52	0.844
Setembro	125.9	69.60	21.96	125.8	122.8	65.76	63.21	0.837
Outubro	150.2	78.25	24.41	145.7	142.3	74.88	71.97	0.823
Novembro	157.4	84.47	25.23	150.9	147.3	77.39	74.41	0.822
Dezembro	172.8	96.25	26.61	164.0	160.0	83.63	80.42	0.817
Ano	1683.7	821.99	23.89	1653.3	1612.3	853.74	821.07	0.828

Legendas: GlobHor Irradiação global horizontal GlobEff Global efetivo, corrigido para IAM e sombras
 DiffHor Irradiação difusa horizontal EArray Energia efetiva à saída do grupo
 T_Amb T amb. E_Grid Energia injetada na rede
 GlobInc Incidência global no plano dos sensores PR Performance Ratio (Quociente de performance)

Figura 58. Relatório de saída.

Fonte: PVSyst.

O diagrama de perdas também faz parte dos relatórios de saída e pode ser visto na Figura 59. É possível perceber que as perdas, para este caso, ocorrem devido a eficiências dos módulos, à temperatura, ao inversor e aos cabos do sistema.

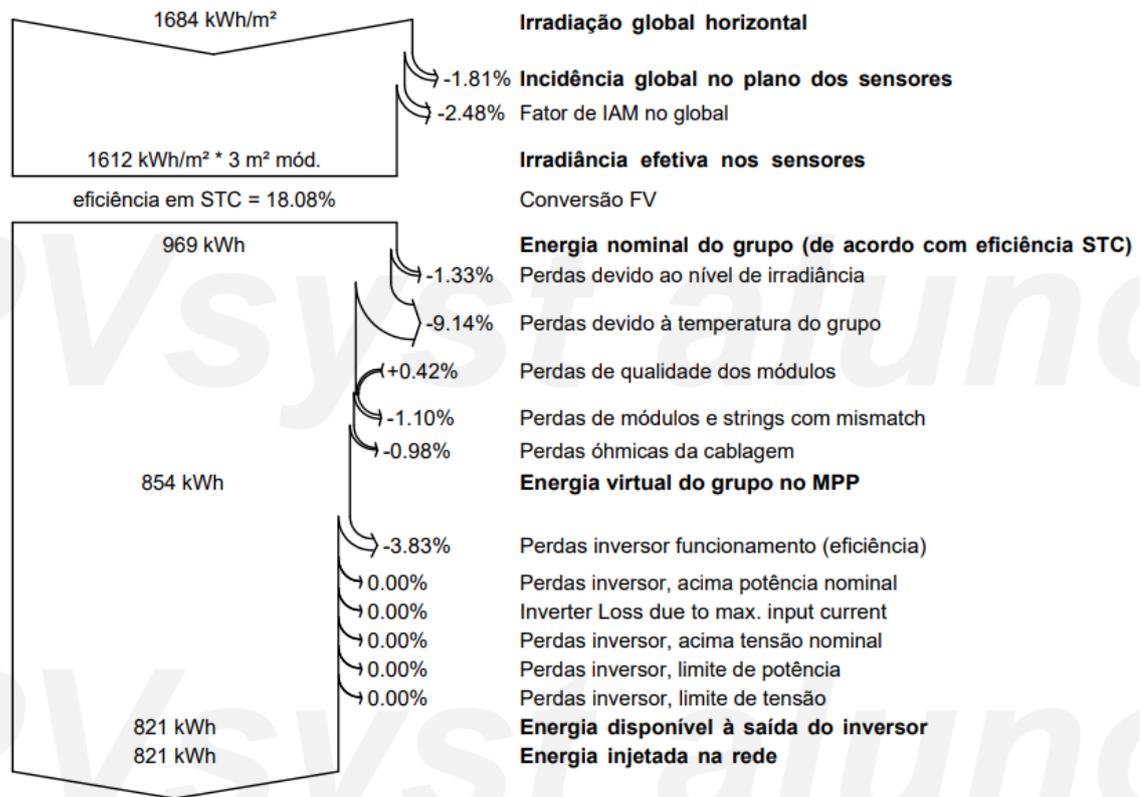


Figura 59. Diagrama de perdas.

Fonte: PVSyst.

Nas Figuras 60 e 61 é possível observar que toda a energia produzida pelo sistema é utilizada na residência, ou seja, o sistema não exporta energia. A economia anual de energia chega a 30%. Considerando a valor da tarifa atual de R\$ 0,8589/kWh, é possível calcular a economia familiar anual de aproximadamente R\$ 705,00.

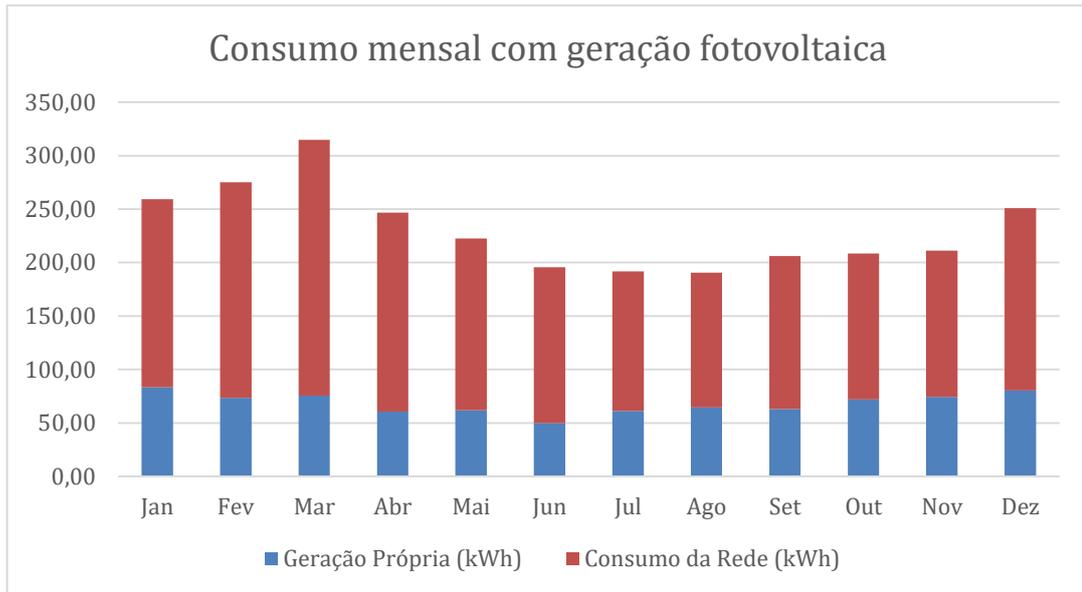


Figura 60. Consumo da residência com geração.

Fonte: Elaborado pelo autor.

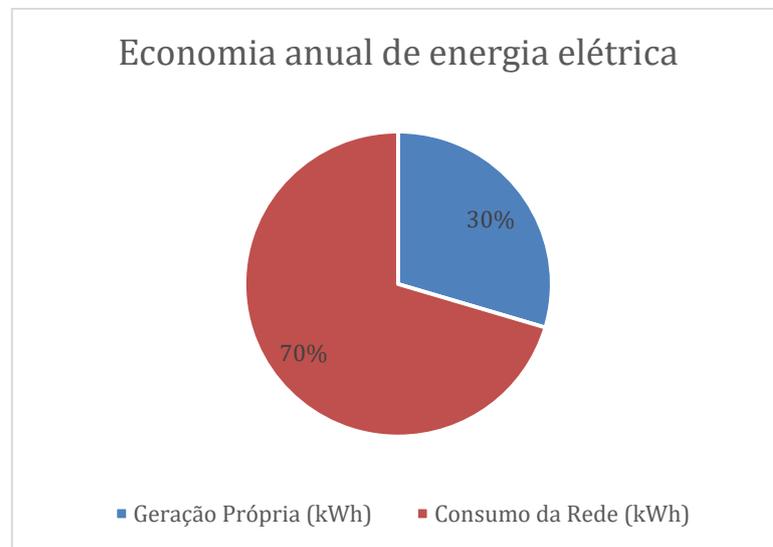


Figura 61. Economia anual de energia.

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.6 BALANÇO ENERGÉTICO ZERO

Foram realizadas novas simulações com objetivo de obter um balanço energético zero, ou seja, toda a energia consumida da rede da concessionária é gerada através de uma fonte renovável. A residência passa a gerar energia suficiente ou superior para igualar ou exceder a sua demanda anual.

O consumo anual médio das residências do estudo de caso do presente trabalho foi de aproximadamente 2.773 kWh/ano. Portanto, foram dimensionados sistemas fotovoltaicos conectados à rede para gerar esta mesma quantidade de energia.

5.6.1 Pré-dimensionamento para 2.440 kWh/ano

Utilizou-se o PVSyst no modo de pré-dimensionamento para o dimensionamento de um sistema capaz de gerar 2.440 kWh/ano para cada bloco do condomínio, conforme mostrado na Tabela 14.

Para gerar 2800 kWh/ano:

Custo de disponibilidade: 30 kWh x 12 meses = 360 kWh

$2.800 - 360 = 2.440$ kWh/ano

Tabela 14. Pré-dimensionamento para 2.440 kWh/ano.

	Inclinação(°)	Desvio Azimutal(°)	Energia Gerada (kWh/ano)	Sistema (kWp)
Bloco 1	20	9	2.440	1,6
Bloco 2	20	16	2.440	1,6
Bloco 3	20	55	2.440	1,7
Bloco 4	20	67	2.440	1,7
Bloco 5	20	81	2.440	1,8

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.6.2 Dimensionamento para 2.440 kWh/ano

Foi escolhido um sistema de 1,8 kWp com as características do Bloco 5 para uma simulação mais detalhada. Uma vez que este sistema possui o maior desvio azimutal, para a instalação em qualquer outro Bloco, a geração seria mais vantajosa.

Após a simulação, os dados foram apresentados conforme a Figura 62. O sistema proposto possui seis módulos de 300 W, podendo ser utilizado três microinversores em paralelo.

Sumário do sistema global			
Número de módulos	6	Potência FV nominal	1.8 kWp
Superfície módulos	10 m ²	Potência máxima FV	1.8 kWdc
N.º de inversores	2.5	Potência AC nominal	1.4 kWac

Sistema acoplado à rede: Parâmetros da simulação

Projeto :	Dissertação			
Localização geográfica	Rio de Janeiro	País	Brazil	
Localização	Latitude	-22.90° S	Longitude	-43.56° W
Tempo definido como	Tempo legal	Fuso horário TU-3	Altitude	0 m
	Albedo	0.20		
Dados meteorológicos:	Rio de Janeiro disser	Meteonorm 7.2, Sat=26% - Sintético		
Variante da simulação :	simulação 2440			
	Data da simulação	19/10/19 18h39		
Parâmetros da simulação	Tipo de sistema	No 3D scene defined, no shadings		
Orientação do plano dos módulos	Inclinação	20°	Azimute	81°
Modelos utilizados	Transposição	Perez	Difuso	Perez, Meteonorm
Horizonte	Sem horizonte			
Sombras próximas	Sem sombras			
Exigências do consumidor :	Carga ilimitada (rede)			
Características do grupo FV				
Módulo FV	Si-poly	Modelo	CS3K-300P-AG P4	
Original PVSyst database		Fabricante	Canadian Solar Inc.	
Número de módulos FV		Em série	1 módulos	
Número total de módulos FV		Nr. módulos	6	
Potência global do grupo		Nominal (STC)	1800 Wp	
Características de funcionamento do grupo (50°C)		Umpp	30 V	
Superfície total		Superfície módulos	10.0 m²	
			Em paralelo	6 strings
			Potência unitária	300 Wp
			Em condições de func.	1635 Wp (50°C)
			I mpp	55 A
			Superfície célula	8.8 m ²

Figura 62. Resultados principais.

Fonte: PVSyst.

A Figura 63 apresenta o relatório de saída do *software*, indicando a produção mensal de energia e a PR de 82,8%.

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR
Janeiro	180.4	84.48	26.94	172.0	167.9	260.4	250.5	0.809
Fevereiro	155.6	77.99	27.00	151.2	147.6	229.6	220.9	0.812
Março	161.3	77.99	26.22	153.9	150.2	235.8	226.8	0.819
Abril	121.4	62.57	24.54	121.4	118.6	189.2	181.8	0.832
Maio	119.3	48.96	22.24	122.3	119.1	192.7	185.5	0.843
Junho	96.1	41.46	20.59	98.4	95.5	156.3	150.2	0.848
Julho	117.5	42.78	19.82	120.3	116.9	191.1	183.9	0.849
Agosto	125.9	57.20	21.30	127.4	124.2	201.1	193.5	0.844
Setembro	125.9	69.60	21.96	125.8	122.8	197.3	189.6	0.837
Outubro	150.2	78.25	24.41	145.7	142.3	224.6	215.9	0.823
Novembro	157.4	84.47	25.23	150.9	147.3	232.2	223.2	0.822
Dezembro	172.8	96.25	26.61	164.0	160.0	250.9	241.3	0.817
Ano	1683.7	821.99	23.89	1653.3	1612.3	2561.2	2463.2	0.828

Legendas: GlobHor Irradiação global horizontal
 DiffHor Irradiação difusa horizontal
 T_Amb T amb.
 GlobInc Incidência global no plano dos sensores
 GlobEff Global efetivo, corrigido para IAM e sombras
 EArray Energia efetiva à saída do grupo
 E_Grid Energia injetada na rede
 PR Performance Ratio (Quociente de performance)

Figura 63. Relatório de saída.

Fonte: PVSyst.

O diagrama de perdas também faz parte dos relatórios de saída e pode ser visto na Figura 64. É possível perceber que as perdas, para este caso, ocorrem devido a eficiências dos módulos, à temperatura, ao inversor e aos cabos do sistema.

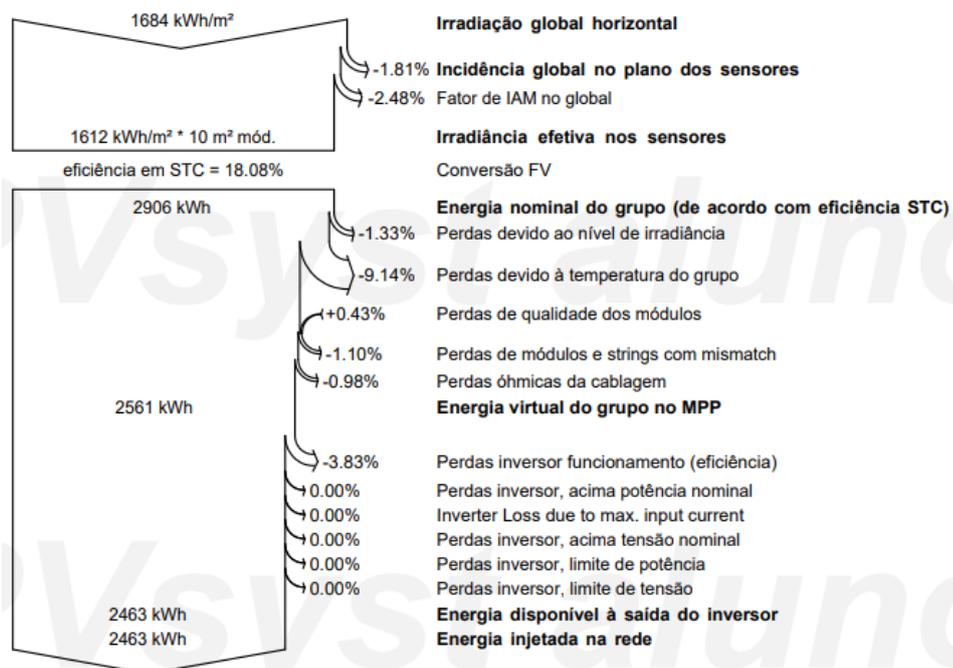


Figura 64. Diagrama de perdas.

Fonte: PVSyst.

Nas Figuras 65 e 66 é possível observar que nem toda a energia produzida pelo sistema é utilizada na residência. Nos meses de agosto, outubro e novembro o sistema produz mais energia do que é consumida na residência, ou seja, o sistema injeta energia na rede. A economia anual de energia chega a 92%. Considerando a valor da tarifa atual de R\$ 0,8589/kWh, é possível calcular a economia anual familiar de aproximadamente R\$ 2.115,00.

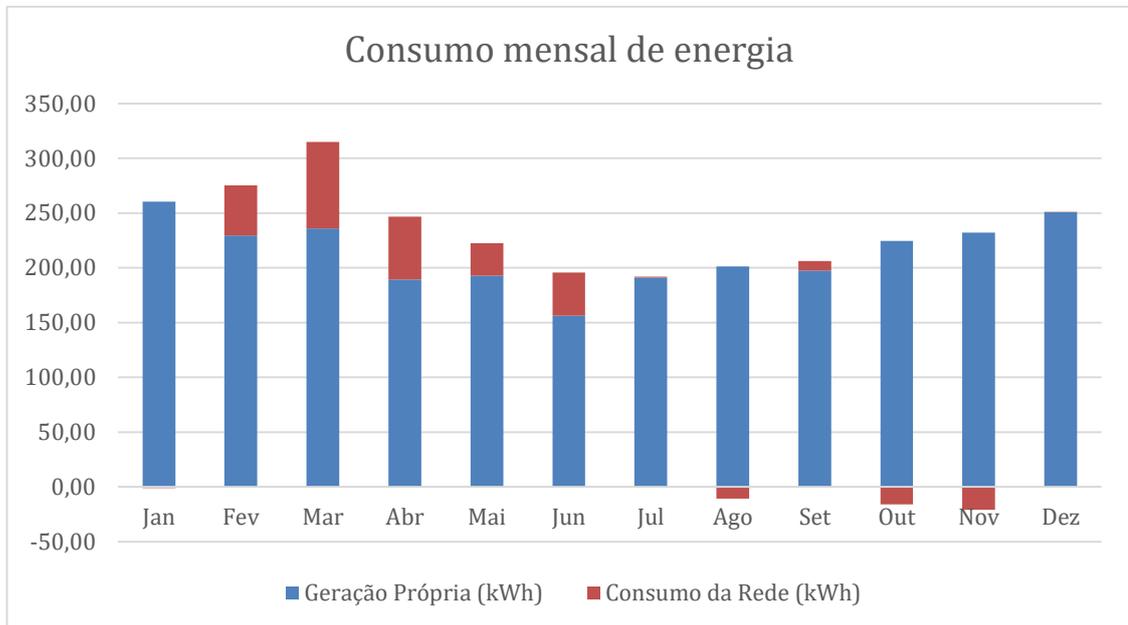


Figura 65. Consumo da residência com geração.

Fonte: Elaborado pelo autor.

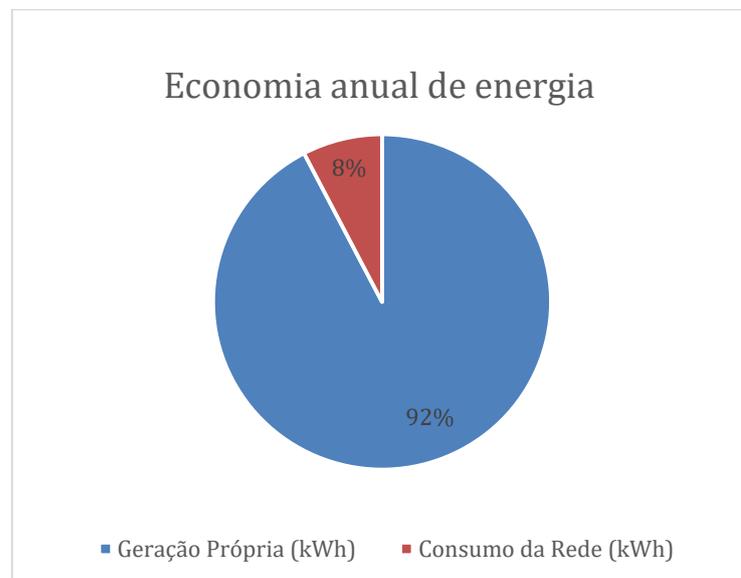


Figura 66. Economia anual de energia.

Fonte: Elaborado pelo autor.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho foi apresentado uma metodologia para avaliação de sistemas fotovoltaicos em habitações de interesse social. O custo de capital de um sistema fotovoltaico inclui: módulos, microinversores e materiais complementares (suportes de fixação, fiação, conectores, etc.).

Uma visita para inspeção do local onde será instalado o sistema é imprescindível. Esta inspeção é necessária em ambos os métodos, pois nem o *software* nem o banco de dados regionais leva em conta interferências pontuais, como sombras parciais ou totais que diminuem o potencial de geração solar.

Quando o empreendimento já está vinculado ao uso de geração local de energia de fonte solar, o projeto da estrutura já leva em conta o peso adicional dos painéis fotovoltaicos. No entanto, quando o empreendimento não prevê a implantação de um projeto de geração local, é necessário estudar a viabilidade de instalação dessas cargas nas estruturas existentes ou projetar uma nova estrutura para sustentá-las.

Com a finalidade de se obter a máxima captação de energia ao longo do ano, devem ser observadas duas condições: orientação e inclinação dos painéis. A primeira delas considera que, para uma operação adequada, os módulos fotovoltaicos devem estar orientados em direção ao Equador. Para instalações localizadas no território brasileiro (Hemisfério Sul), os módulos fotovoltaicos fixos devem ser orientados em direção ao Norte Geográfico.

Em relação à segunda condição, de maneira geral, a inclinação do arranjo deve ser de mesma proporção à latitude do local onde o sistema será instalado, mas nunca inferior a 10°, a fim de se favorecer a autolimpeza dos painéis fotovoltaicos. Vale ressaltar que em locais onde exista grande quantidade de poeira é necessário realizar a limpeza regular na superfície dos módulos (tomando-se o devido cuidado para não danificar o vidro ou qualquer outro material de cobertura do módulo), uma vez que a sujeira afeta a captação de luz, reduzindo o desempenho do painel.

6.1 MODELO PROPOSTO PARA 800 kWh/ano

O sistema com a capacidade de gerar ao menos 800 kWh/ano é requisito obrigatório para que o empreendimento possua o subsídio do PMCMV, e que o mesmo custe no máximo R\$ 3.000,00.

É proposto um modelo de 0,6 kWp formado por dois módulos fotovoltaicos com potência nominal de 300 W cada, conectados a um microinversor de 600 W com dois canais MPPT, conforme mostrado na Figura 67. A Figura 68 exibe uma projeção do condomínio com este sistema instalado.

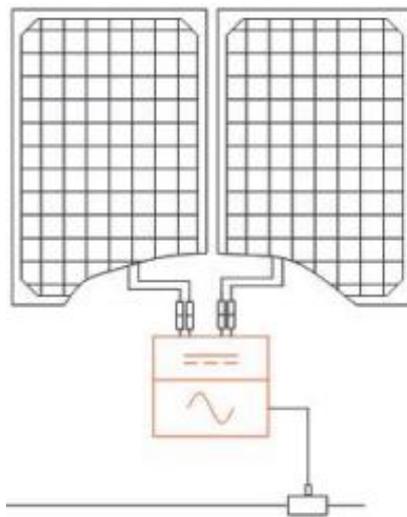


Figura 67. Microinversor e 2 módulos.
Fone: APSsystems. Adaptado pelo autor.



Figura 68. Projeção do telhado com dois módulos por residência.

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2 MODELO PROPOSTO PARA 2.440 kWh/ano

É proposto um modelo de 1,8 kWp formado por três microinversores, cada um com dois módulos fotovoltaicos com potência nominal de 300 W cada. Cada microinversor possui dois canais com MPPT. O diagrama de ligação dos módulos e microinversores é representado na Figura 69. A Figura 70 exibe uma projeção do condomínio com este sistema instalado.

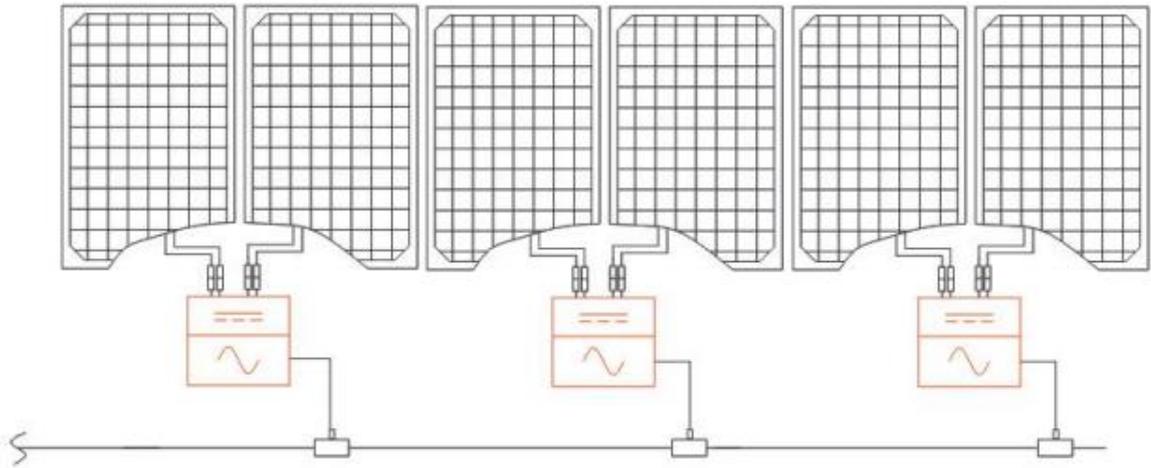


Figura 69. Três microinversores com dois módulos cada.

Fone: APSsystems. Adaptado pelo autor.



Figura 70. Projeção do telhado com dois módulos por residência.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O modelo atual de compensação de energia exige a instalação, por parte da concessionária local, de um medidor bidirecional para o faturamento. Posicionado após o quadro geral da unidade consumidora, esse medidor mede a energia gerada injetada na rede e a energia absorvida da rede. Desse modo, a energia consumida instantaneamente pela residência é desconhecida pela distribuidora, ou seja, a energia total gerada pelo sistema FV não é medida.

A falta desta informação impede o acompanhamento da energia total produzida pelo sistema, podendo impactar nas estatísticas nacionais, no processo de planejamento e na operação do sistema, comprometendo os dados e levando a uma subestimação do consumo e da geração.

Nesse sentido, é necessário avaliar a possibilidade e a viabilidade econômica de coleta agregada dos dados de geração total dos microinversores que não utilizam SAAD (Sistema de Aquisição e Análise de Dados).

O projeto e a localização acessível de equipamentos de monitoramento de energia podem aumentar a conscientização e o uso adequado da energia.

Outra questão importante é que a ANEEL necessita padronizar quais equações devem ser utilizadas nos cálculos, por exemplo, quando parte da energia FV que foi injetada na rede no horário fora da ponta em um mês com bandeira verde, será compensada no horário de ponta em um mês com bandeira vermelha.

6.3 REDUÇÃO DA EMISSÃO DE CO₂

A Tabela 15 apresenta os valores médios da emissão de CO₂ para energia elétrica. Calcula-se a média das emissões da geração, levando em consideração todas as usinas que estão gerando energia e não somente aquelas que estejam funcionando na margem. Se todos os consumidores de energia elétrica do SIN (Sistema Interligado Nacional) calculassem as suas emissões multiplicando a energia consumida por esse Fator de Emissão, o somatório corresponderia às emissões do SIN.

Tabela 15. Fator médio de emissão de CO₂ no SIN.

Fator Médio Mensal (tCO ₂ /MWh)													Fator Médio Anual (tCO ₂ /MWh)
2016	MÊS												ANO - 2016
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	0,0817
	0,0960	0,0815	0,0710	0,0757	0,0701	0,0760	0,0725	0,0836	0,0897	0,0925	0,1002	0,0714	
Fator Médio Mensal (tCO ₂ /MWh)													Fator Médio Anual (tCO ₂ /MWh)
2017	MÊS												ANO - 2017
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	0,0927
	0,0566	0,0536	0,0696	0,0815	0,0847	0,0676	0,0965	0,1312	0,1264	0,1366	0,1193	0,0892	
Fator Médio Mensal (tCO ₂ /MWh)													Fator Médio Anual (tCO ₂ /MWh)
2018	MÊS												ANO - 2018
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	0,0740
	0,0640	0,0608	0,0635	0,0523	0,0607	0,0915	0,1076	0,1181	0,1182	0,0802	0,0366	0,0343	
Fator Médio Mensal (tCO ₂ /MWh)													Fator Médio Anual (tCO ₂ /MWh)
2019	MÊS												ANO - 2019
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	0,0619
	0,0355	0,0667	0,0530	0,0514	0,0482	0,0426	0,0906	0,1070					

Fonte: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.

A partir dos dados da tabela, pode-se calcular a quantidade de CO₂ que cada sistema deixa de emitir através da geração própria de energia, já que as residências em questão deixam de consumir energia do SIN. Os valores calculados estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16. Redução das emissões de CO₂.

Fator Médio Anual (tCO ₂ /MWh)	Redução das emissões (tCO ₂ /ano) de 1 residência		Redução das emissões (tCO ₂ /ano) do condomin.	
2016 à Ago/2019	Sistema de 800 kWh	Sistema de 2440 kWh	Sistema de 800 kWh	Sistema de 2440 kWh
0,0776	0,06208	0,189344	62	151

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o caso do sistema fotovoltaico com capacidade de geração de 800 kWh/ano é possível reduzir as emissões de CO₂ em até 62 toneladas ao ano. Para o caso com capacidade de 2440 kWh/ano é possível reduzir até 151 toneladas ao ano.

6.4 CÁLCULO DO PAYBACK

Foi realizada uma pesquisa de mercado dia 15/10/2019 em três lojas que fornecem kits com microinversor, módulos e estrutura para fixação em telhas cerâmicas. A média de preços dos kits é de R\$ 4,70 por Wp. A Tabela 17 apresenta a pesquisa de preços.

Tabela 17. Pesquisa de preços.

Kit Solar	Portal Solar	Relação R\$/kW	NeoSolar	Relação R\$/kW	Energia Livre	Relação R\$/kW
660 Wp						
680 Wp	3.320,20	4,88				
700 Wp					3.086,00	4,41
800 Wp	3.775,80	4,72				
1320 Wp			6.549,90	4,96		
1400 Wp					7.171,43	5,12
1650 Wp			8.009,90	4,85		
1930 Wp						
2040 Wp	10.061,58	4,93				
2310 Wp			9.749,90	4,22		
2400 Wp	11.250,98	4,69				
2800 Wp					11.790,00	4,21

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o cálculo do *payback* simplificado, considerando a tarifa fixa de R\$ 0,8589/kWh, e custo para a mão de obra de instalação de 20% do sistema fotovoltaico, têm-se os valores apresentados na Tabela 28.

Tabela 18. Cálculo do *payback* simplificado.

Sistema FV	Custo aproximado (R\$)	Energia gerada (kWh/ano)	Redução anual na fatura (R\$)	Payback Simplificado
600 Wp	3.384	821	705,16	4 anos de 10 meses
1800 Wp	10.152	2.463	2.115,47	4 anos e 8 meses

Fonte: Elaborado pelo autor.

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram desenvolvidos dois modelos de sistema fotovoltaicos para serem instalados no telhado de uma habitação de interesse social. Um sistema de 800 kWh/ano com custo aproximado de R\$ 3.000,00, capaz de economizar até 30% na conta de energia e evitar a emissão de 62 toneladas de CO₂. E outro modelo de 2.440 kWh/ano com custo aproximado de R\$ 10.000,00, capaz de reduzir o custo de energia em até 92% e evitar a emissão de 151 toneladas de CO₂.

O sistema de 800 kWh/ano pode ser composto por dois módulos de 300 W por casa. O sistema de 2.440 kWh/ano pode ser composto por seis módulos de 300 W. Ambos os sistemas contam com microinversores para conexão à rede elétrica.

Somente o sistema de 800 kWh/ano conta com subsídio para instalação nos novos empreendimentos do PMCMV. Entretanto os maiores benefícios são obtidos com um sistema maior. Portanto, fica a sugestão para que a Portaria 643/2017 do Ministério das Cidades amplie o subsídio para sistemas fotovoltaicos de maior capacidade de geração.

É importante ressaltar que mesmo em condições não ideais de instalação, ou seja, com os módulos FV não orientados ao norte geográfico e com inclinação diferente da latitude local, há viabilidade técnica para geração própria.

Atingir os objetivos de sustentabilidade exigirá mudanças não apenas no modo pelo qual a energia é produzida, mas no modo como é utilizada. Portanto, as oportunidades de melhoria pelo lado da demanda de energia também devem ser exploradas, objetivando benefícios econômicos significativos de curto e de longo prazo.

Além disso, com o contínuo avanço no aperfeiçoamento dos sistemas FV, aumentando a eficiência de conversão energética e reduzindo custos, será possível integrar os sistemas FV em qualquer tipo de projeto de edificação inserido no meio urbano.

Foi verificado que os autoprodutores de energia podem exportar o excedente produzido à rede. Este modelo promove a redução da dependência energética da rede pública. Trata-se de uma produção não centralizada, ou seja, próxima da carga, favorecendo a diminuição da circulação de energia por longas distâncias, o que implica uma diminuição das perdas relativas ao sistema de transmissão e distribuição.

A metodologia apresentada foi aplicada num condomínio existente, entretanto é possível aplicá-la também a empreendimentos que se encontram em fase de projeto, permitindo a melhor orientação e posicionamento dos módulos fotovoltaicos.

Esta nova diretriz beneficiará diretamente a população de baixa renda, por meio da geração de energia renovável, limpa e de baixo impacto ambiental a partir do sol, diretamente nos telhados das residências do PMCMV, contribuindo para o desenvolvimento social, econômico e ambiental do país, com especial atenção aos menos favorecidos, demonstrando que a energia solar fotovoltaica está se tornando uma tecnologia democrática e acessível a todas as faixas de renda.

Os benefícios desta iniciativa, no entanto, ultrapassam a economia direta na conta de luz, pois contribuirá também para a geração de milhares de empregos locais e de qualidade, criando novas oportunidades de trabalho para a população, distribuindo renda, movimentando a economia e gerando riqueza ao país.

Do ponto de vista ambiental, a utilização da energia solar constitui uma das principais alternativas para a redução na emissão de CO₂. Todavia, uma preocupação futura será como reciclar os módulos FV que duram cerca de 30 anos, pois possuem substâncias químicas prejudiciais ao meio ambiente, como ácido sulfúrico. Com o aumento da demanda por energia solar, haverá um aumento proporcional no lixo solar daqui a alguns anos. O lixo proveniente dos módulos FV são, provavelmente, menos problemáticos que os resíduos nucleares, mas é um problema que deve ser solucionado para garantir que a energia solar de fato seja uma tecnologia sustentável. Logo, sugere-se a realização de estudos sobre o descarte adequado ou reciclagem dos módulos FV.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL [Agência Nacional de Energia Elétrica]. Geração Solar. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf)>.

ANEEL [Agência Nacional de Energia Elétrica]. Resolução Normativa n. 482 de 17 de Abril de 2012. Brasília, 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. Minha Casa Minha Vida, habitações. Disponível em: <<http://www20.caixa.gov.br/Paginas/Noticias/Noticia/Default.aspx?newsID=904>>.

CANADIAN SOLAR. Dados técnicos de painéis solares. Disponível em: <http://www.canadiansolar.com/fileadmin/user_upload/downloads/manuals/Canadian_Solar-Diamond_Module_Installation_Manual_v1.11_en.pdf>.

CEPEL [Centro de Pesquisas de Energia Elétrica]. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Brasília, 2001. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/>.

CEPEL [Centro de Pesquisas de Energia Elétrica]. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2004.pdf>.

CPFL RENOVÁVEIS. Companhia brasileira de geração de energia elétrica renovável. Usina de Energia Eólica de Praia Formosa, 2009. Disponível em: <<http://www.cpfrenovaveis.com.br/>>.

CRESESB [Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito]. Coletânea de Artigos - Energia Solar e Eólica, vol.2. Rio de Janeiro, 2005.

CRESESB [Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito]. Energia Solar: princípios e aplicações, 2006. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf>.

ELETROSUL. Complexo Eólico de Cerro Chato, 2012. Disponível em: <<http://www.eletrosul.gov.br/sala-de-imprensa/noticias/eletrosul-inaugura-parque-eolico-de-258-mw-no-rio-grande-do-sul>>.

ENERGIA FOTOVOLTAICA: Manual sobre Tecnologias, Projeto e Instalação. Janeiro, 2004. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/downloads/guia-tecnico-manual-energia-fotovoltaica.pdf>>.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética] (BRASIL). Plano Decenal de Energia 2026: Horizonte 2023. Rio de Janeiro: EPE, 2014.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética] (BRASIL). Plano Nacional de Energia 2050. Rio de Janeiro: EPE, 2014.

MME [Ministério de Minas e Energia]. Plano Decenal de Expansão de Energia 2026 / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2017.

IRMAN, Y.M., et al. (2015). “Stand-Alone Photovoltaic (SAPV) System Assessment using PVSYST Software”. *Energy Procedia*, Vol. 79, pp. 596-603.

NORDIN, Nur Dalilah; RAHMAN Hasimah Abd. Pre-Installation Design Simulation Tool for Grid-Connected Photovoltaic System Using Iterative Methods. Centre of Electrical Energy Systems, Universiti Teknologi Malaysia, May 2015.

VALE, A.M.; FELIX, D.G.; FORTES, M.Z.; BORBA, B.S.M.C.; DIAS, B.H.; SANTELLI, B.S. Analysis of the Economic Viability of a Photovoltaic Generation Project Applied to the Brazilian Housing Program “Minha Casa Minha Vida”, June, 2017.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. Manual de Engenharia para sistemas fotovoltaicos. Edição revisada e atualizada, Rio de Janeiro: Cepel, 2014.

PVSYST, Tutorial. May, 2017.

RENEWABLES GLOBAL STATUS REPORT. A comprehensive annual overview of the state of renewable energy. 2018.

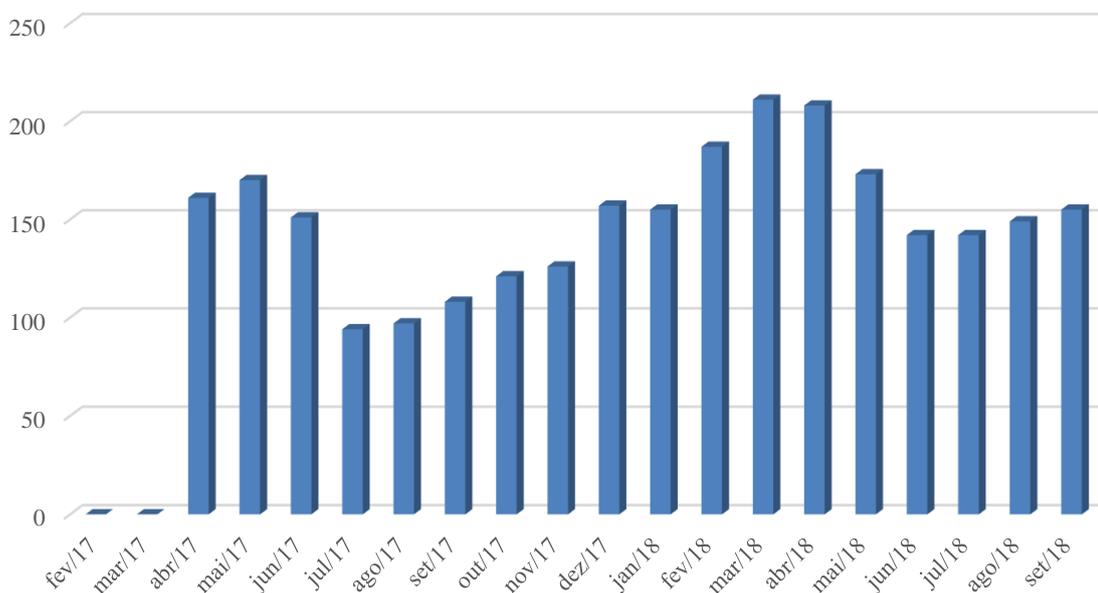
RÜTHER, Ricardo. Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil. 1ª Edição, Florianópolis: Ed. Labsolar, 2004.

SOARES, G. F. W. Comparação de Custos entre Sistemas Fotovoltaicos Individuais e Minicentraís Fotovoltaicas para Eletrificação Rural. III Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belém, 2010.

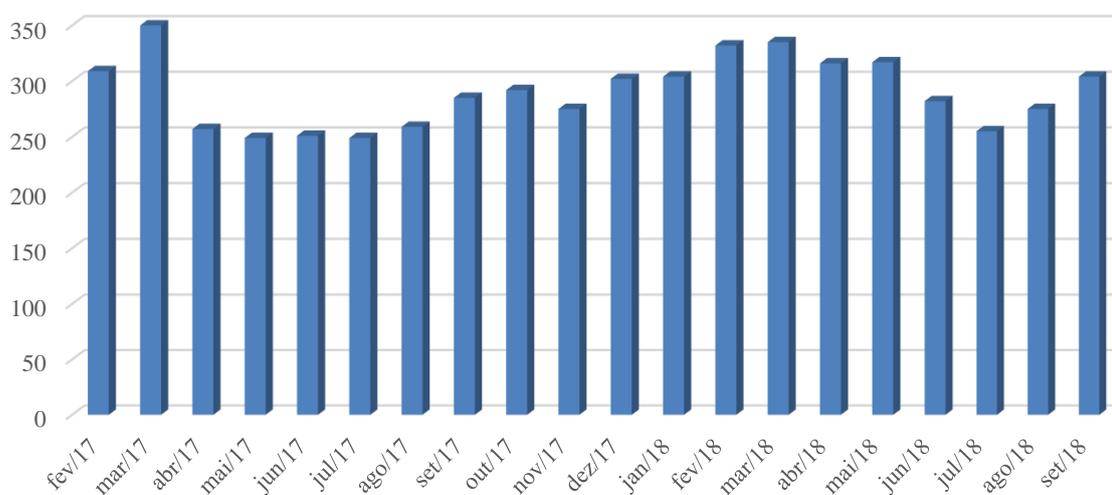
APÊNDICE I

Gráficos das dezessete residências analisadas, representando o histórico de vinte meses de consumo de energia elétrica.

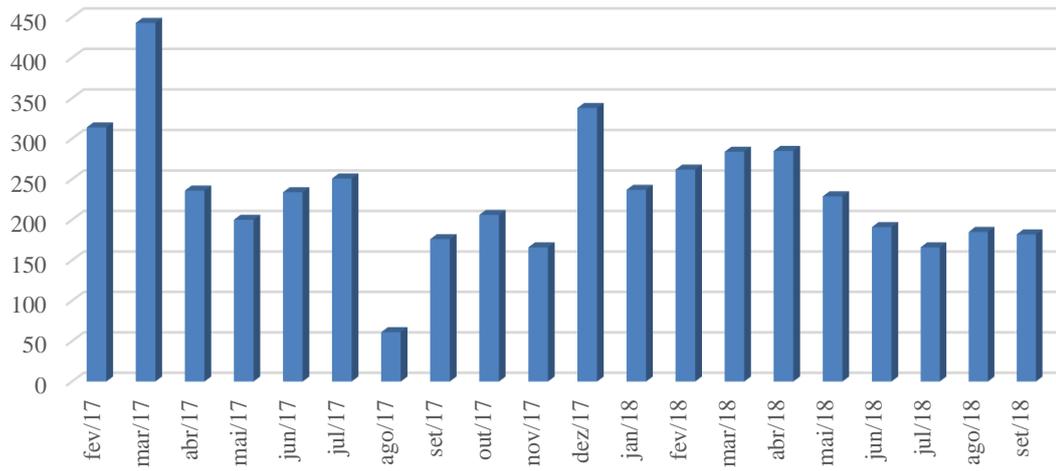
Casa 1 - Consumo (kWh)



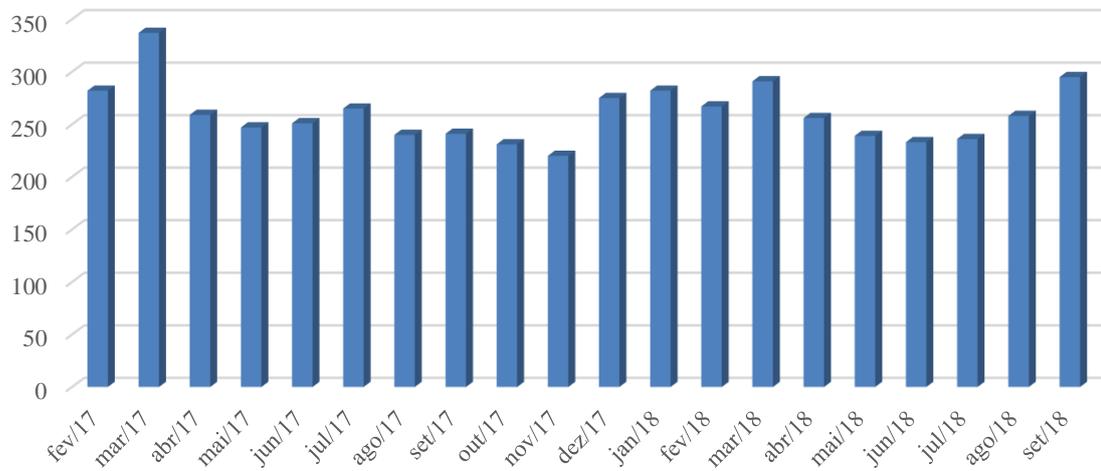
Casa 2 - Consumo (kWh)



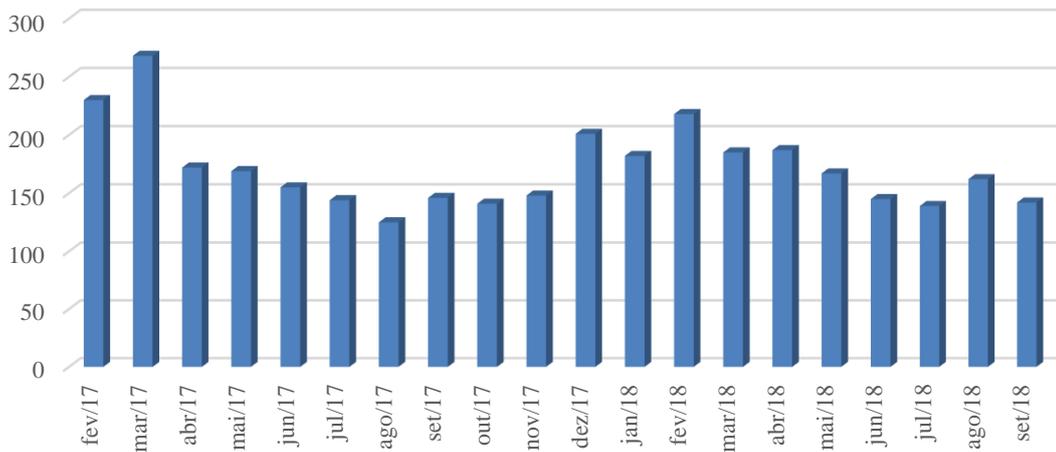
Casa 3 - Consumo (kWh)



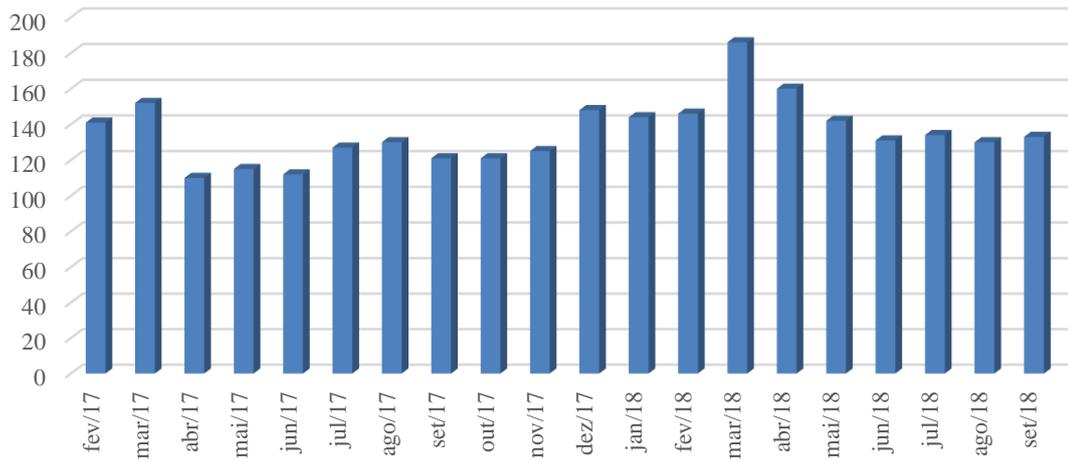
Casa 4 - Consumo (kWh)



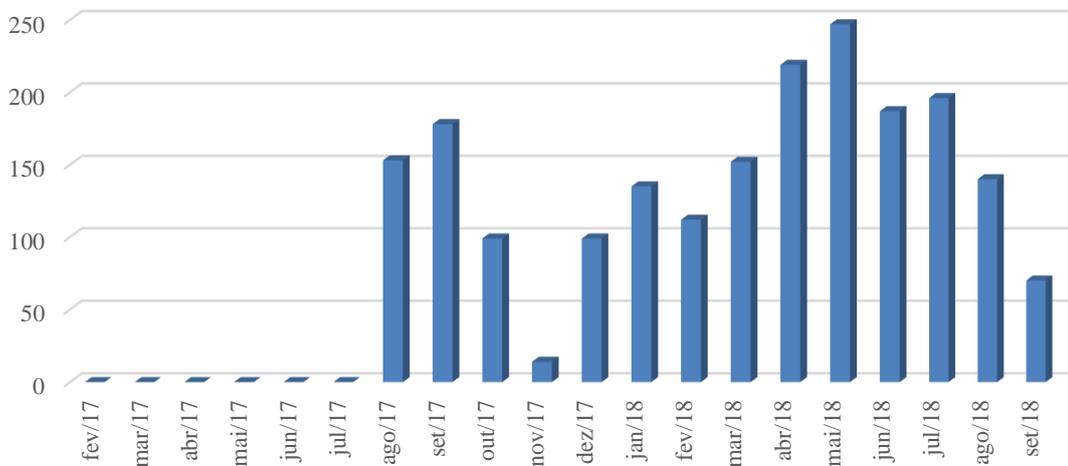
Casa 5 - Consumo (kWh)



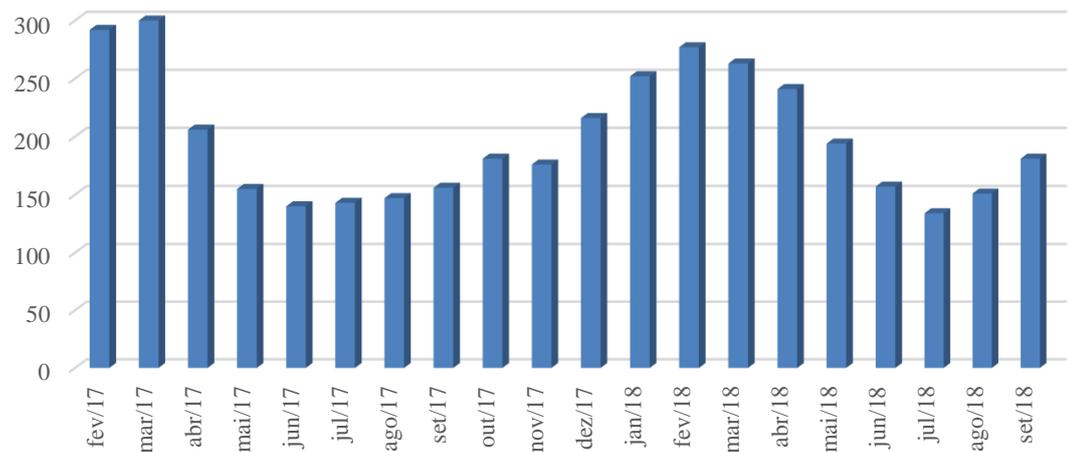
Casa 6 - Consumo (kWh)



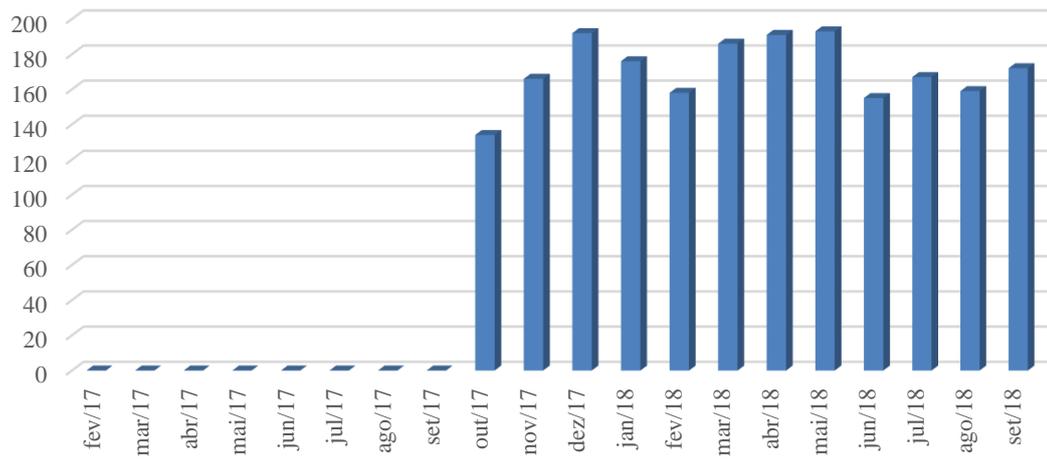
Casa 7 - Consumo (kWh)



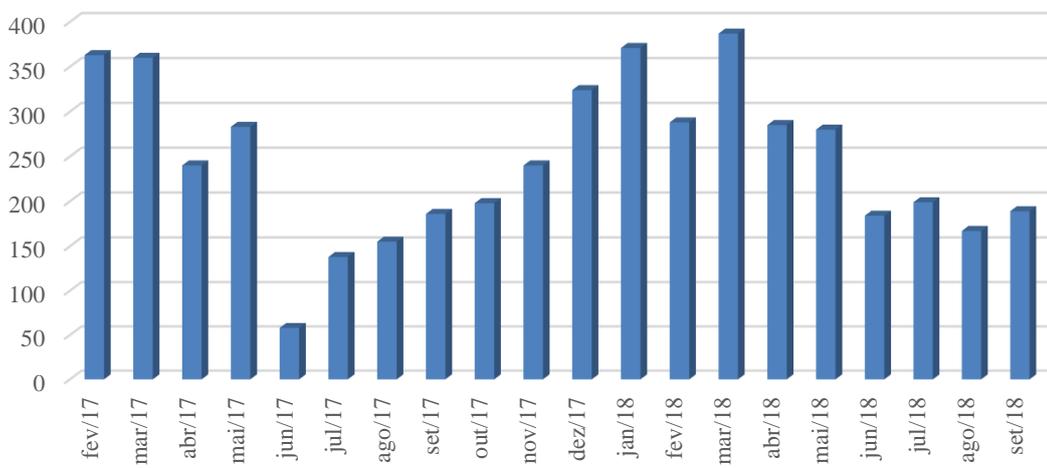
Casa 8 - Consumo (kWh)



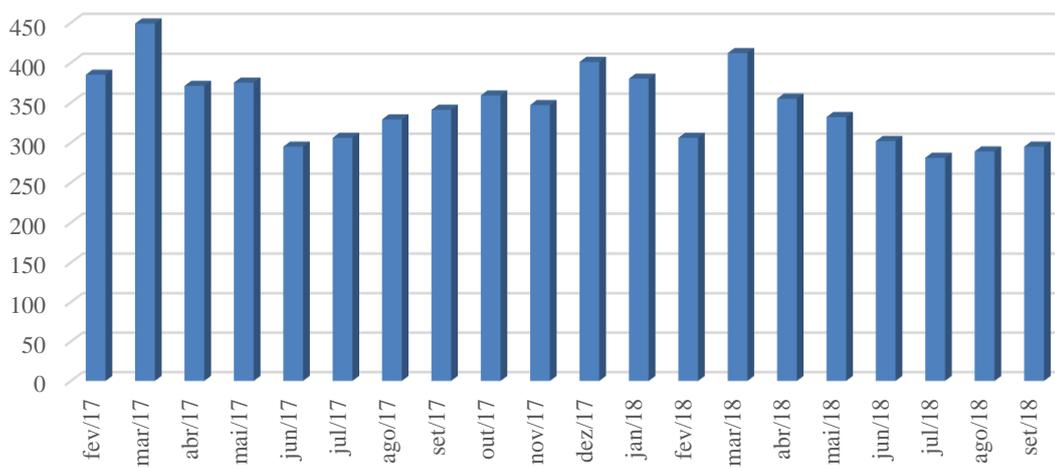
Casa 9 - Consumo (kWh)



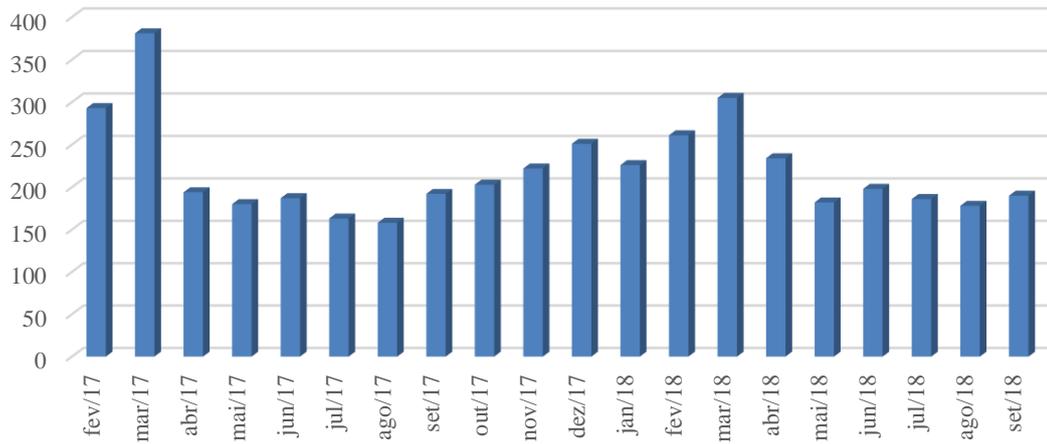
Casa 10 - Consumo (kWh)



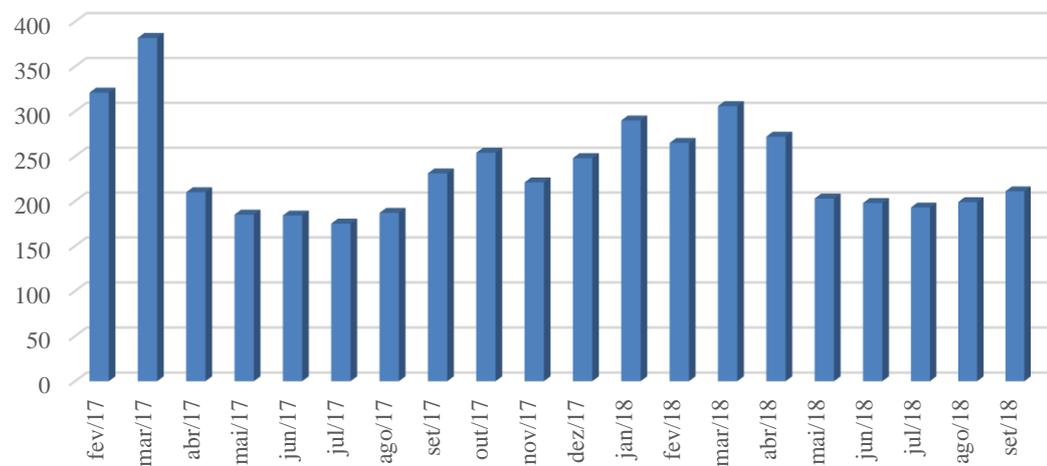
Casa 11 - Consumo (kWh)



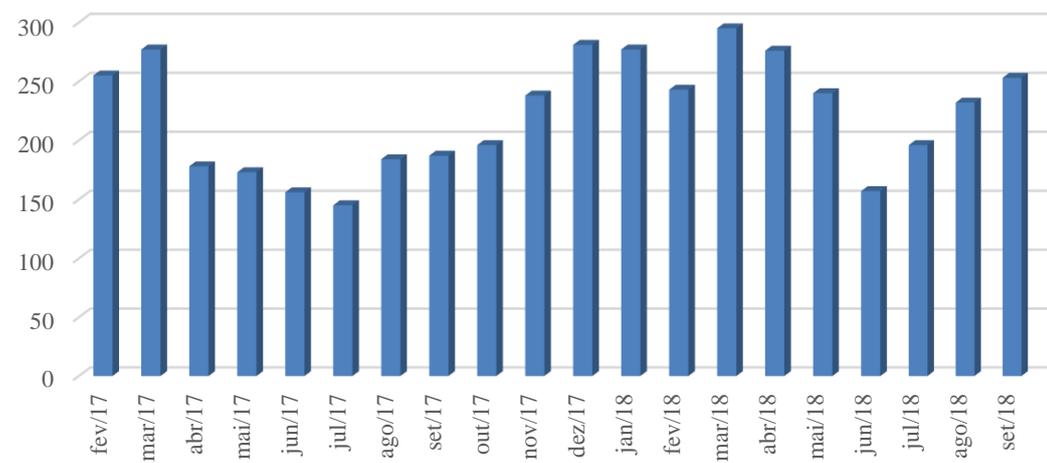
Casa 12 - Consumo (kWh)



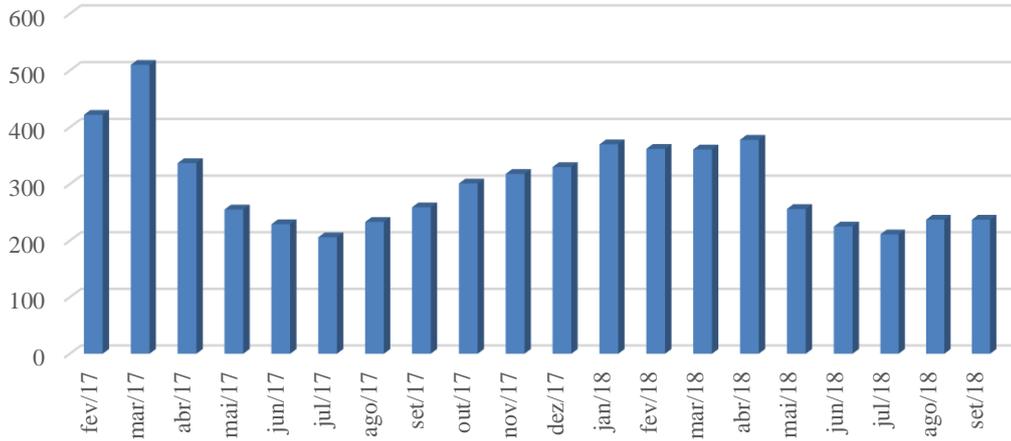
Casa 13 - Consumo (kWh)



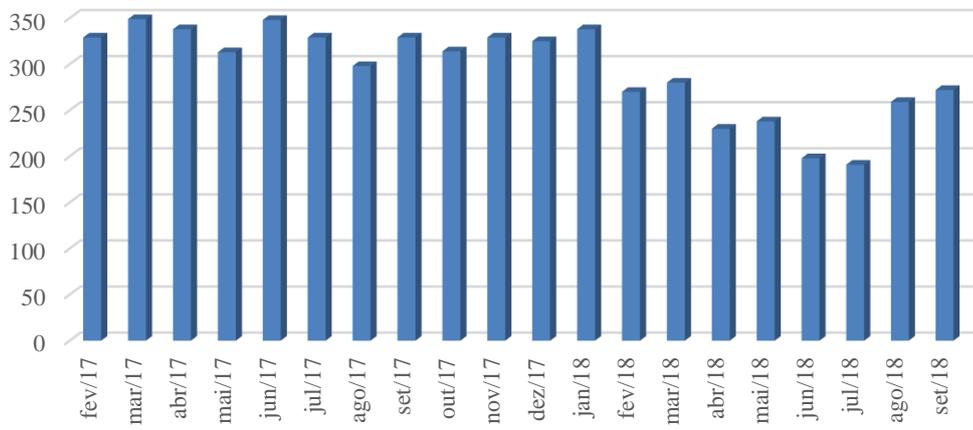
Casa 14 - Consumo (kWh)



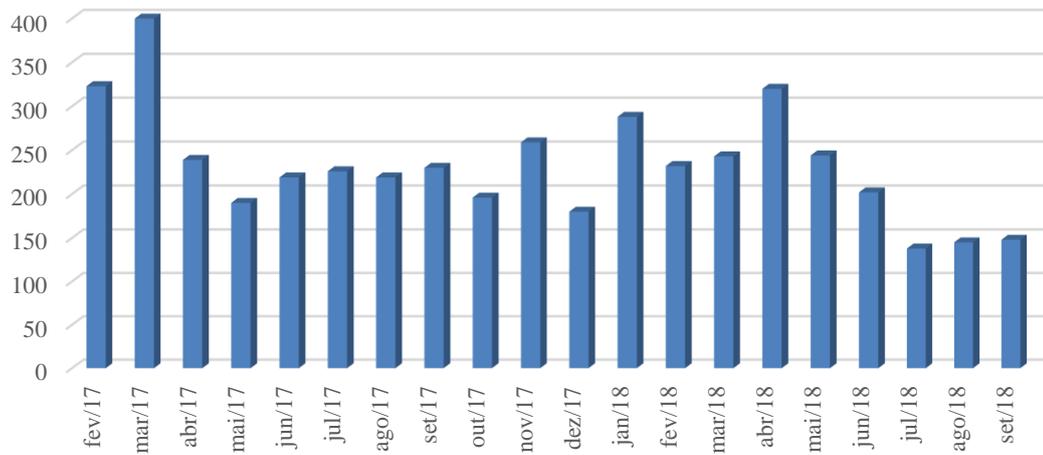
Casa 15 - Consumo (kWh)



Casa 16 - Consumo (kWh)



Casa 17 - Consumo (kWh)



APÊNDICE II

Carta de solicitação da conta de energia entregue aos moradores que forneceram sua conta de energia elétrica para colaborar com este trabalho.



APOIO PARA PESQUISA DE MESTRADO

Prezado Morador (a),

Eu, Luiz Eduardo Benevides, aluno de Mestrado na UFRJ, venho solicitar cópia de 1 (uma) conta de energia para utilizar no meu trabalho final. O objetivo desta coleta de dados é saber o valor médio mensal de consumo de energia numa residência construída no Programa Minha Casa Minha Vida.

O objetivo da minha pesquisa é analisar a viabilidade de geração fotovoltaica conforme ilustração abaixo.



As informações serão confidenciais. Me comprometo a não divulgar seus dados pessoais.

Contando com a sua colaboração autorização, fico à sua disposição para qualquer esclarecimento.

Em anexo segue meu comprovante de matrícula na UFRJ.