

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

NATÁLIA DE ANDRADE FARIA

**FERRAMENTA DE AUXÍLIO PARA O
DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
CONECTADOS À REDE ELÉTRICA E ISOLADOS**

MONOGRAFIA

CURITIBA - PR

2017

NATÁLIA DE ANDRADE FARIA

**FERRAMENTA DE AUXÍLIO PARA O
DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
CONECTADOS À REDE ELÉTRICA E ISOLADOS**

Monografia de Especialização apresentada ao Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior

CURITIBA – PR

2017

TERMO DE APROVAÇÃO

NATÁLIA DE ANDRADE FARIA

FERRAMENTA DE AUXÍLIO PARA O DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA E ISOLADOS

Esta Monografia de Especialização foi apresentada no dia 24 de maio de 2017, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Energia Renováveis – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior

Coordenador de Curso de Especialização em Energias Renováveis

Prof. Romildo Alves dos Prazeres

Chefe do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior
Orientador - UTFPR

Me. Juliana D'Angela Mariano
Membro Externo

Prof. Esp. Carlos Henrique Karam Salata
UTFPR

| |
|---|
| O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso |
|---|

Dedico esse trabalho à minha família,
principalmente ao meu marido André Tiengo
e meu filho, Gabriel.

AGRADECIMENTOS

A elaboração deste trabalho de conclusão só foi possível graças ao apoio da minha família durante todo o curso. Agradeço aos meus pais, José Antônio e Carmen Lúcia, aos meus irmãos, Victor e Júnior, ao meu marido, André e meu filho Gabriel pelo incentivo.

Agradeço também ao meu orientador Prof. Dr. Jair Urbanetz Júnior.

Aos meus colegas que contribuíram para minha evolução durante o curso de Especialização de Energias Renováveis, principalmente ao Paulo Sava e Richard Stambuk.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta monografia.

RESUMO

FARIA, Natália de Andrade. **Ferramenta de auxílio para o dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica e Isolados**. 2017. 95 pg. Monografia de Especialização em Energias Renováveis - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

A energia solar vem ganhando seu espaço no cenário nacional por ser uma alternativa de energia renovável, considerada limpa e de fonte inesgotável. O Brasil tem grande potencial para a geração de energia a partir do Sol ainda pouco explorada. A tendência é que com o avanço tecnológico, a redução dos preços dos equipamentos e os incentivos fiscais, cada vez mais empreendimentos sejam viabilizados, desde pequenos autoprodutores até usinas de grande porte. Este trabalho apresenta uma ferramenta para auxiliar o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, que visa disponibilizar para o usuário uma prévia das estimativas de geração e potência instalada para atender uma demanda específica. Como resultado final, são apresentados relatórios com gráficos que possuem um visual amigável facilitando o entendimento do sistema fotovoltaico. Essa estimativa prévia pode dar subsídio para a decisão de instalação de um sistema fotovoltaico seja ele conectado à rede ou isolado, antes de realizar um orçamento formal.

Palavras-chave: Sistema Solar Fotovoltaico, Energia Solar, Dimensionamento de sistema solar, Energia Renovável.

ABSTRACT

FARIA, Natália de Andrade. **Tool for sizing of on-grid and off-grid Solar systems.** 2017. 95 pg. Renewable Energy Degree Specialization - Federal Technology University - Curitiba, Paraná, 2017.

Solar Energy has beginning to assume an important place in nacional scenario because is an alternative of renewable energy, clean and of inexhaustible source. Brazil has great untapped potential for the generation of Photovoltaic Energy. The tendency is that with technological advance, lowering equipment costs and fiscal incentives, more solar plants are feasible from small self-producers to large power plants. This study presents a tool to assist the sizing of photovoltaic systems, which aims to provide the user with preview of the generetion and installed power estimates to meet a specific demand. As a final result, graphical reports are presented that have a user-friendly visual that facilitates the understanding of the photovoltaic system. This preliminar estimate can give subsidy to the decision to install a photovoltaic system on-grid or off-grid befor making a budget.

Keywords: Photovoltaic Solar System, Solar Energy, Sizing Solar System, Renewable Energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1: Top mercado global de energia fotovoltaica..... | 21 |
| Figura 2: Usinas do Brasil (operando, em construção e capacidade do Brasil) | 24 |
| Figura 3: Comparação da curva de geração FV típica e carga residência típica | 25 |
| Figura 4: Espalhamento dos raios solares em diferentes superfícies. | 27 |
| Figura 5: Composição da radiação solar..... | 28 |
| Figura 6: Perfil de irradiância solar ao longo do dia | 29 |
| Figura 7: Irradiação no plano horizontal e inclinado em Curitiba – PR..... | 31 |
| Figura 8: Efeito da inclinação nos painéis fotovoltaicos | 32 |
| Figura 9: Trajetória do movimento aparente do Sol ao longo do ano..... | 33 |
| Figura 10: Principais componentes de um sistema fotovoltaico | 34 |
| Figura 11: Componentes de um sistema fotovoltaico isolado | 36 |
| Figura 12: Efeito causado pela variação da temperatura no painel..... | 37 |
| Figura 13: Exemplo lingote de silício monocristalino..... | 38 |
| Figura 14: Células fotovoltaicas de silício monocristalino | 39 |
| Figura 15: Diferença entre célula de silício monocristalino e policristalino..... | 40 |
| Figura 16: Estimativa de composição do custo total de um SFV..... | 41 |
| Figura 17: Componentes de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica..... | 44 |
| Figura 18: Exemplo de curva típica de eficiência | 47 |
| Figura 19: Exemplo de um SFVI | 50 |
| Figura 20: Exemplos de sistemas fotovoltaicos conectados à rede | 56 |
| Figura 21: Vista frontal do EV de UTFPR e detalhe dos painéis e inversor | 57 |
| Figura 22: Esquema das etapas de dimensionamento de um SFV..... | 61 |
| Figura 23: Tela inicial da ferramenta | 62 |
| Figura 24: Pesquisa por coordenadas do local | 63 |
| Figura 25: Pesquisa por Município | 63 |
| Figura 26: Valores de Irradiação no plano Global e Inclinado..... | 64 |
| Figura 27: Localização geográfica do ponto escolhido..... | 65 |
| Figura 28: Botão Imprimir página inicial | 66 |
| Figura 29: Exemplo de relatório gerado em formato PDF | 67 |
| Figura 30: Escolha dimensionamento SFVI ou SFVCR | 68 |
| Figura 31: Valor típico de irradiação em Florianópolis - SC | 69 |

| | |
|---|----|
| Figura 32: Localização ponto escolhido | 70 |
| Figura 33: Atalho Dimensionamento SFVI | 71 |
| Figura 34: Telas RADIASOL | 72 |
| Figura 35: Resultado RADIASOL para Florianópolis inclinação 38° e azimuth 0° | 72 |
| Figura 36: Dados RADIASOL inseridos na ferramenta | 73 |
| Figura 37: Potência painel fotovoltaico SFVI..... | 73 |
| Figura 38: Estimativa da área necessária para instalar o sistema isolado | 74 |
| Figura 39: Atalho para inserir informações de novos painéis | 74 |
| Figura 40: Inserir informações de novos painéis | 75 |
| Figura 41: Atalho painéis para retornar à página de dimensionamento SFVI | 75 |
| Figura 42: Escolha do painel fotovoltaico | 76 |
| Figura 43: Definição do número de painéis a ser adotado | 76 |
| Figura 44: Atalho para atualizar a potência instalada do projeto..... | 76 |
| Figura 45: Resultado gráfico da estimativa de geração | 77 |
| Figura 46: Atalho para inserir informações de novos inversores..... | 77 |
| Figura 47: Inserir informações de novos inversores | 78 |
| Figura 48: Atalho inversores para retornar à página de dimensionamento SFVI | 78 |
| Figura 49: Escolha do inversor | 78 |
| Figura 50: Dimensionamento das baterias | 79 |
| Figura 51: Dimensionamento dos condutores | 79 |
| Figura 52: Atalho para gerar relatório em PDF SFVI..... | 80 |
| Figura 53: Exemplo relatório SFVI gerado em formato PDF | 81 |
| Figura 54: Atalho SFVI para retornar à página inicial..... | 82 |
| Figura 55: Valor típico de irradiação em Curitiba - PR | 83 |
| Figura 56: Atalho Dimensionamento SFVCR | 84 |
| Figura 57: Sistema otimizado – opção SIM ou NÃO | 85 |
| Figura 58: Dados de irradiação inseridos manualmente | 85 |
| Figura 59: Estimativa inicial de potência instalada SFVCR..... | 86 |
| Figura 60: Estimativa da área necessária para instalar o sistema SFVCR | 86 |
| Figura 61: Retornar para a página de dimensionamento SFVCR | 87 |
| Figura 62: Número de painéis a serem instalados | 88 |
| Figura 63: Atalho para atualizar a potência instalada do projeto..... | 88 |
| Figura 64: Resultado gráfico da estimativa de geração | 89 |
| Figura 65: Atalho para retornar à página de dimensionamento..... | 89 |

| | |
|---|----|
| Figura 66: Dimensionamento dos condutores | 90 |
| Figura 67: Atalho para gerar relatório SFVCR..... | 90 |
| Figura 68: Exemplo de relatório SFVCR gerado em formato PDF | 91 |
| Figura 69: Atalho para página inicial | 91 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Empreendimentos em operação no Brasil..... | 22 |
| Tabela 2: Empreendimentos em construção e com construção não iniciada..... | 23 |
| Tabela 3: Tabela resumo dos principais componentes de um sistema fotovoltaico .. | 35 |
| Tabela 4: Comparação entre tecnologias de painéis fotovoltaicos..... | 40 |
| Tabela 5: Tipos de inversores | 47 |
| Tabela 6: Características mínimas para escolha do inversor e painel FV | 53 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Gráfico 1: Previsão de aumento na geração de energia no mundo | 19 |
| Gráfico 2: Previsão de custos de geração de energia de novos empreendimentos.. | 20 |
| Gráfico 3: Evolução Potência instalada usinas fotovoltaicas (2000-2015) | 20 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|-------|---------------------------------------|
| EV | Escritório Verde |
| FV | Fotovoltaico |
| SFV | Sistema Fotovoltaico |
| SFVCR | Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede |
| SFVI | Sistema Fotovoltaico Isolado |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|-------|--|
| CA | Corrente Alternada |
| CC | Corrente Contínua |
| CIGS | Cobre-Índio-Gálio-Selênio |
| DPS | Dispositivos de Proteção Contra Surtos |
| EPE | Empresa de Pesquisa Energética |
| ICMS | Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Serviços |
| MPPT | <i>Maximum Power Point Tracking</i> |
| ONS | Operador Nacional do Sistema |
| SPDA | Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas |
| UTFPR | Universidade Tecnológica Federal do Paraná |

LISTA DE ACRÔNIMOS

| | |
|-------|--|
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| BIG | Banco de Informações de Geração |
| NASA | <i>National Aeronautics and Space Administration</i> |
| SWERA | <i>Solar and Wind Energy Resource Assessment</i> |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1 | TEMA | 15 |
| 1.1.1 | Delimitação do Tema | 15 |
| 1.2 | PROBLEMAS E PREMISSAS | 16 |
| 1.3 | OBJETIVOS | 16 |
| 1.3.1 | Objetivo Geral | 16 |
| 1.3.2 | Objetivos Específicos | 16 |
| 1.4 | JUSTIFICATIVA | 17 |
| 1.5 | PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS | 17 |
| 1.6 | ESTRUTURA DO TRABALHO | 17 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 19 |
| 2.1 | ENERGIA SOLAR NO BRASIL E NO MUNDO | 19 |
| 2.2 | RECURSO SOLAR | 26 |
| 2.3 | ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA | 26 |
| 2.3.1 | Radiação Solar | 27 |
| 2.3.2 | Irradiância Solar | 29 |
| 2.3.3 | Irradiação Solar | 29 |
| 2.3.4 | Banco de Dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar | 30 |
| 2.3.5 | Inclinação dos Painéis Solares | 31 |
| 2.3.6 | Desvio Azimutal dos Painéis | 32 |
| 2.4 | SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO | 34 |
| 2.4.1 | Sistema Fotovoltaico Isolado | 36 |
| 2.4.2 | Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede | 43 |
| 3 | METODOLOGIA | 49 |
| 3.1 | DIMENSIONAMENTO DE SFVI | 49 |
| 3.1.1 | Estimativa do Recurso Solar | 51 |
| 3.1.2 | Estimativa do Consumo Médio Diário de Energia | 51 |
| 3.1.3 | Dimensionamento dos Painéis Fotovoltaicos | 51 |
| 3.1.4 | Dimensionamento dos Inversores | 52 |
| 3.1.5 | Dimensionamento do Banco de Baterias | 53 |
| 3.1.6 | Dimensionamento do Controlador de Carga | 54 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.1.7 | Dimensionamento dos Condutores | 55 |
| 3.2 | DIMENSIONAMENTO DE SFVCR..... | 55 |
| 3.2.1 | Estimativa do Recurso Solar | 57 |
| 3.2.2 | Estimativa do Consumo Médio Diário de Energia | 58 |
| 3.2.3 | Dimensionamento dos Painéis Fotovoltaicos | 58 |
| 3.2.4 | Dimensionamento dos Inversores | 58 |
| 3.2.5 | Dimensionamento dos Condutores | 59 |
| 4 | TUTORIAL DE UTILIZAÇÃO DA FERRAMENTA..... | 60 |
| 4.1 | ESCOLHA DO LOCAL DE INTERESSE | 62 |
| 4.2 | DIMENSIONAMENTO DE UM SFVI | 68 |
| 4.3 | DIMENSIONAMENTO DE UM SFVCR | 82 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 93 |

1 INTRODUÇÃO

O aumento da demanda energética em conjunto com a possibilidade de redução da oferta de combustíveis convencionais e a crescente preocupação com a preservação do meio ambiente estão impulsionando a comunidade científica a pesquisar e desenvolver fontes alternativas de energia menos poluentes, renováveis e que produzam pouco impacto ambiental (PEREIRA *et al.*, 2006).

O aproveitamento da energia gerada pelo Sol, inesgotável na escala terrestre de tempo, tanto como fonte de calor quanto de luz, é hoje uma das alternativas energéticas mais promissoras para promover a energia necessária ao desenvolvimento humano. Quando se fala em energia, deve-se lembrar que o Sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia na Terra (PINHO; GALDINO, 2014).

A energia proveniente do Sol vem sendo empregada pelo homem ao longo de toda sua história. Através dele, por exemplo, são supridas necessidades básicas de aquecimento, iluminação e alimentação (via fotossíntese e cadeias alimentares). No entanto, o uso do Sol como fonte direta para a produção de eletricidade é relativamente recente, datando de meados do século passado (TOLMASQUIM, 2016).

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta de luz em eletricidade (Efeito Fotovoltaico), sendo a célula fotovoltaica, um dispositivo fabricado com material semicondutor, a unidade fundamental desse processo de conversão (PINHO; GALDINO, 2014).

No Brasil, o aproveitamento do Sol para geração elétrica esteve historicamente ligado à geração fotovoltaica. No final do século passado o Brasil começou a desenvolver programas de eletrificação rural fazendo uso dessa tecnologia. Mas somente na década atual é que ela começou a ganhar abrangência nacional, com a regulamentação da geração distribuída conectada à rede e a realização de leilões específicos para sua contratação na forma de plantas centralizadas (TOLMASQUIM, 2016).

No que se refere aos sistemas conectados à rede, associados a unidades consumidoras, alguns projetos pilotos começaram a ser instalados no país no final dos anos 90, principalmente em universidades e centros de pesquisa (PINHO; GALDINO, 2014). No entanto, somente em 2012 essa modalidade de geração foi

regulamentada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), através da Resolução Normativa nº 482/2012, que estabelece as condições gerais para o acesso de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, e o sistema de compensação de energia elétrica.

A utilização da energia solar traz benefícios a longo prazo para o país, viabilizando o desenvolvimento de regiões remotas onde o custo de eletrificação pela rede convencional é demasiadamente alto com relação ao retorno financeiro do investimento, regulando a oferta de energia em períodos de estiagem, diminuindo a dependência do mercado de petróleo e reduzindo as emissões de gases poluentes à atmosfera (PEREIRA *et al.*, 2006).

1.1 TEMA

O estudo em questão tem como tema base o dimensionamento de sistema solar fotovoltaico isolado ou conectado à rede no Brasil. Foram utilizadas as séries médias temporais de radiação solar disponibilizados pelo banco de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar vinculado ao Projeto *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA).

1.1.1 Delimitação do Tema

Desenvolver ferramenta de auxílio no dimensionamento de sistema solar fotovoltaico conectado à rede ou isolado situado no Brasil, através da inserção de dados básicos, como local de interesse e demanda a ser atendida. O estudo não irá abranger a confiabilidade ou assertividade do banco de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

O caminho crítico para o dimensionamento de um sistema fotovoltaico, seja ele conectado à rede ou isolado, é o conhecimento a respeito dos reais valores de irradiação no local de interesse. A ferramenta desenvolvida, visa facilitar a estimativa de irradiação, e, conseqüentemente, geração de energia solar fotovoltaica, a partir de dados simples e conhecidos pelo usuário, como exemplo, a cidade de interesse e o seu consumo de energia mensal.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Criar uma ferramenta que facilite o pré-dimensionamento de um sistema de aproveitamento solar fotovoltaico, seja ele conectado à rede ou isolado. A ferramenta será disponibilizada de forma gratuita com finalidade de atender o maior número de pessoas, e auxiliar no desenvolvimento de novos conhecimentos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- ✓ Estudar métodos de dimensionamento de sistema fotovoltaico conectado à rede (SFVCR) e sistema fotovoltaico isolado (SFVI);
- ✓ Com base em ferramentas computacionais aplicar os métodos de dimensionamentos visando obter estimativa do potencial fotovoltaico, e/ou energia elétrica diária, mensal e anual, para atender um determinado consumo;
- ✓ Criar telas de interface amigável, e rotinas de geração de relatórios que apresentem os resultados de forma gráfica e de fácil entendimento.

1.4 JUSTIFICATIVA

Com o crescimento da procura por geração de energia solar fotovoltaica principalmente pequenos aproveitamentos de geração distribuída, uma ferramenta para estimativa prévia da geração de energia sem custo para o interessado é importante.

A ferramenta poderá ser utilizada em sala de aula para auxiliar o entendimento dos alunos a respeito do dimensionamento de sistemas de geração de energia a partir de fonte solar, possibilitando várias interações, obtendo resultados de maneira rápida e clara.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O procedimento metodológico utilizado foi a pesquisa documental, realizada em fontes como tabelas, dados históricos, legislação, Atlas Brasileiro de Energia Solar, documentos de repartições públicas como Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e Operador Nacional do Sistema (ONS), e material didático ministrado no curso de Especialização em Energias Renováveis.

Os dados utilizados para realização do trabalho são públicos, e foram compilados utilizando o *software* MSEXcel.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 1 é apresentada uma introdução, abordando brevemente o tema deste trabalho, a delimitação do tema, problemas e premissas, objetivos do trabalho, justificativas e procedimentos metodológicos.

No Capítulo 2 é abordada a revisão bibliográfica relacionada ao dimensionamento de sistema solar fotovoltaico conectado à rede e isolado.

No Capítulo 3 é reportado o detalhamento dos procedimentos metodológicos para dimensionamento do sistema solar fotovoltaico.

No Capítulo 4 é apresentado um tutorial de utilização da ferramenta.

No Capítulo 5 é dedicado às conclusões, considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, são apresentadas as referências utilizadas para execução da pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENERGIA SOLAR NO BRASIL E NO MUNDO

A demanda por energia no mundo vem aumentando, assim como a conscientização a respeito do impacto ambiental causado pela geração da mesma. Segundo a Petrolífera britânica BP, as energias renováveis contabilizam 40% na previsão de crescimento na geração de energia, conforme mostrado no Gráfico 1, e vem tomando destaque no cenário mundial.

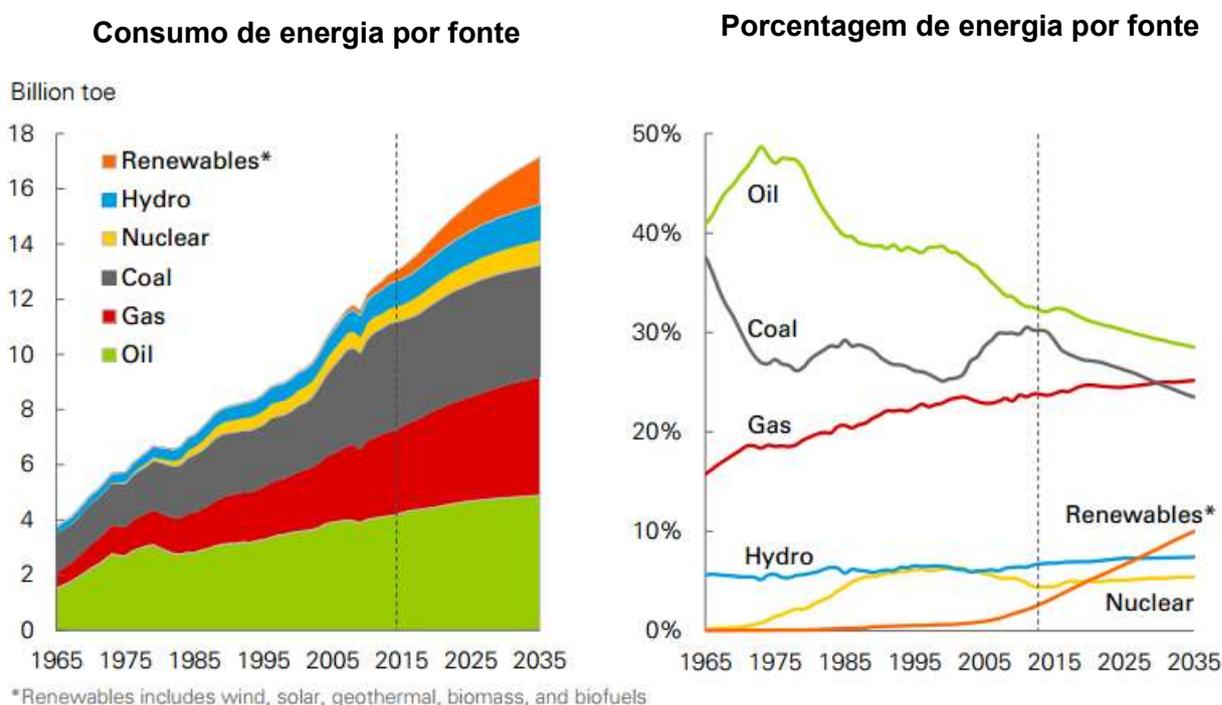
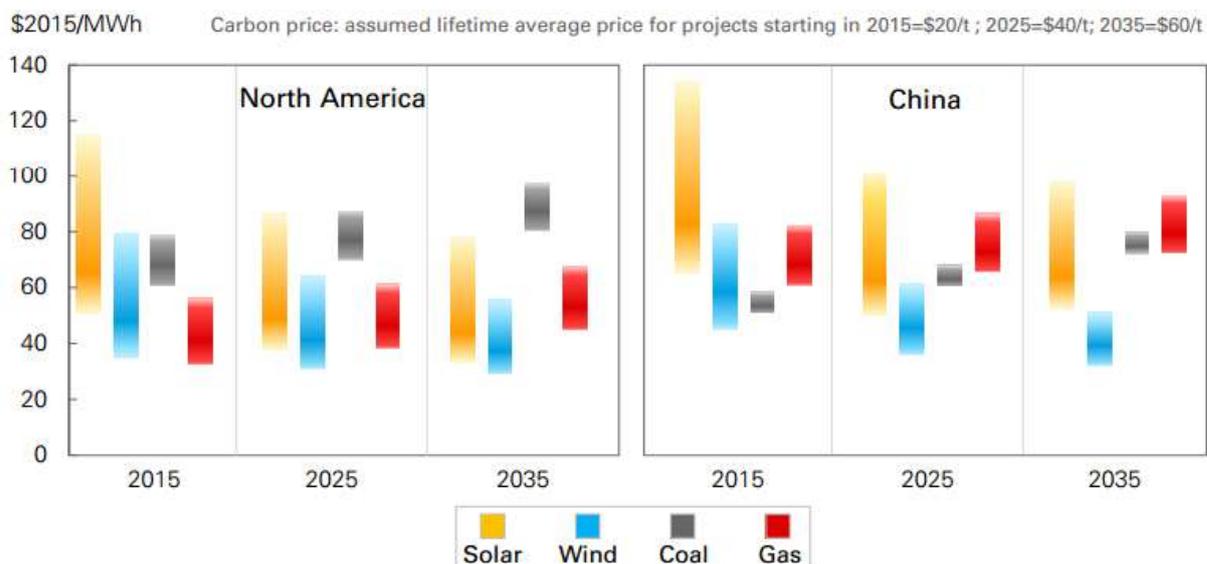


Gráfico 1: Previsão de aumento na geração de energia no mundo

Fonte: Adaptado de BP, 2017

O grande crescimento das energias renováveis é sustentado pela melhora na competitividade financeira. Conforme demonstrado no Gráfico 2, as previsões realizadas pela Petrolífera Britânica (BP, 2017) mostram que os custos de energia solar e eólica devem continuar caindo nos próximos anos, tornando-as cada vez mais viáveis e atrativas. No caso dos custos da energia solar o declínio se deve principalmente à redução no valor dos painéis solares.

Custo da geração para novos empreendimentos



*Levelized cost of power over the lifetime of a plant. Ranges reflect the impact of low/high estimates for: cost of capital; load factors for solar and wind; fuel prices for gas and coal. Solar and wind include estimates of system integration costs

Gráfico 2: Previsão de custos de geração de energia de novos empreendimentos

Fonte: BP, 2017

A fonte solar representou uma parcela de apenas 1% do total da energia elétrica produzida no mundo em 2014 (SOLARPOWER EUROPE, 2015). No entanto, conforme mostrado no Gráfico 3, a perspectiva é de crescimento nos próximos anos.

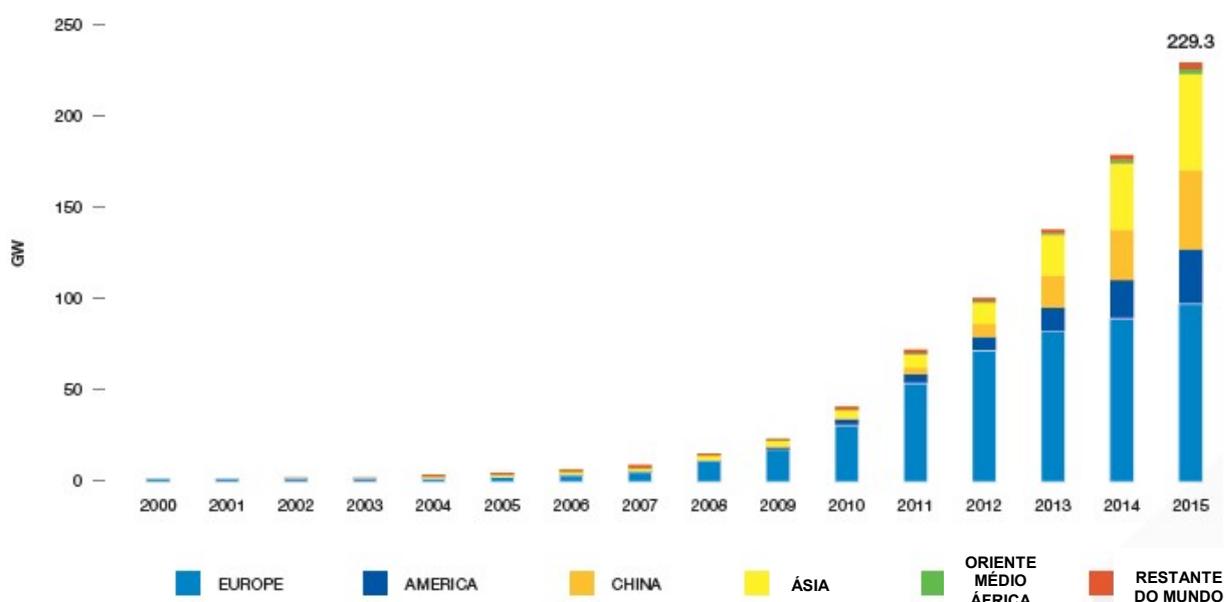


Gráfico 3: Evolução Potência instalada usinas fotovoltaicas (2000-2015)

Fonte: SolarPower Europe, 2016

Segundo o relatório de 2016 da SolarPower Europe (Figura 1) a perspectiva é que até 2020 o Brasil chegue à 6,5GW de potência instalada em energia solar fotovoltaica. Significa um crescimento de 149% entre 2015 e 2020.

| | 2015 | 2020 | 2016 - 2020 | 2016 - 2020 | |
|---------------|-----------------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------------|---|
| | Capacidade Total (MW) | Capacidade Cenário 2020 (MW) | Capacidade Adicional (MW) | Porcentagem de incremento (MW) | Suporte Político |
| China | 43,381 | 130,381 | 87,000 | 25% |  |
| USA | 25,910 | 85,310 | 59,400 | 27% |  |
| India | 5,048 | 57,398 | 52,350 | 63% |  |
| Japan | 34,347 | 63,347 | 29,000 | 13% |  |
| Pakistan | 610 | 9,985 | 9,375 | 75% |  |
| Mexico | 205 | 9,080 | 8,875 | 114% |  |
| Australia | 5,093 | 12,248 | 7,155 | 19% |  |
| Brazil | 69 | 6,509 | 6,440 | 149% |  |
| Korea | 3,421 | 9,821 | 6,400 | 23% |  |
| Egypt | 16 | 4,859 | 4,843 | 214% |  |
| Philippines | 156 | 3,956 | 3,800 | 91% |  |
| Canada | 2,371 | 6,056 | 3,685 | 21% |  |
| Chile | 854 | 4,509 | 3,655 | 39% |  |
| Thailand | 1,444 | 4,654 | 3,210 | 26% |  |
| Algeria | 268 | 3,053 | 2,785 | 63% |  |
| Taiwan | 1,176 | 3,726 | 2,550 | 26% |  |
| South Africa | 1,122 | 3,457 | 2,335 | 25% |  |
| Saudi Arabia | 100 | 2,285 | 2,185 | 87% |  |
| UAE | 24 | 1,786 | 1,763 | 138% |  |
| Israel | 870 | 2,220 | 1,350 | 21% |  |

Figura 1: Top mercado global de energia fotovoltaica

Fonte: Adaptado de SOLARPOWER EUROPE, 2016

No Brasil, o sistema de compensação de energia criado pela ANEEL, similar ao *net metering*, tem contribuído desde 2012 para o desenvolvimento do setor de energia solar fotovoltaica. Este benefício foi criado a partir da Resolução Normativa 482/2012, da ANEEL, e aprimorada pela Resolução Normativa 687/2015 em vigor desde março de 2016. Segundo a resolução o proprietário de um gerador de fonte renovável com uma potência de até 5MW pode injetar na rede a energia que não for

consumida no momento da geração, recebendo créditos (em kWh) na conta de luz. Os créditos possuem validade de 60 meses, e o consumidor pagará a cada mês somente a diferença entre a energia consumida da rede pública e a que foi gerada por ele (IDEAL, 2016).

O Brasil está situado em uma região com incidência mais vertical dos raios solares. Esta condição favorece elevados índices de irradiação em quase todo o território nacional. Adicionalmente, a proximidade à linha do Equador faz com que haja pouca variação na incidência solar ao longo do ano. Dessa forma, mesmo no inverno pode haver bons níveis de irradiação (TOLMASQUIM, 2016). Essas condições conferem ao país algumas vantagens para o aproveitamento energético do recurso solar, que ainda é pouco explorado, mas, tem perspectivas de crescimento nos próximos anos.

Segundo informações do Banco de Informações de Geração (2017) o Brasil possui um total de 4.650 empreendimentos em operação, totalizando 151,6 GWh de potência instalada. Sendo que apenas 23MW são de usinas fotovoltaicas, não chega à 1% dos empreendimentos em operação, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Empreendimentos em operação no Brasil

| Empreendimentos em Operação | | | | |
|------------------------------------|-------------------|--------------------------------|----------------------------------|------------|
| Tipo | Quantidade | Potência Outorgada (kW) | Potência Fiscalizada (kW) | % |
| UHE | 219 | 101.138.278 | 92.605.229 | 61,07 |
| CGH | 588 | 488.250 | 489.911 | 0,32 |
| PCH | 438 | 4.945.659 | 4.935.063 | 3,25 |
| EOL | 416 | 10.219.738 | 10.468.142 | 6,9 |
| UFV | 42 | 27.008 | 23.008 | 0,02 |
| UTE | 2.945 | 42.784.598 | 41.122.599 | 27,12 |
| UTN | 2 | 1.990.000 | 1.990.000 | 1,31 |
| Total | 4.650 | 161.593.531 | 151.633.952 | 100 |

Fonte: BIG, 2017

Porém, analisando os dados de empreendimento em construção e com construção a ser iniciada, é notável o crescimento da parcela de contribuição das usinas solares, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2: Empreendimentos em construção e com construção não iniciada

| Tipo | Empreendimentos em Construção | | | Empreendimentos com Construção não iniciada | | |
|--------------|-------------------------------|-------------------------|------------|---|-------------------------|------------|
| | Quantidade | Potência Outorgada (kW) | % | Quantidade | Potência Outorgada (kW) | % |
| UHE | 6 | 1922100 | 22,74 | 8 | 731.540 | 4,46 |
| CGH | 1 | 848 | 0,01 | 35 | 24531 | 0,15 |
| PCH | 29 | 384.129 | 4,54 | 122 | 1.666.530 | 10,17 |
| EOL | 134 | 3.076.300 | 36,39 | 202 | 4.721.870 | 28,8 |
| UFV | 12 | 346.000 | 4,09 | 99 | 2.634.397 | 16,07 |
| UTE | 26 | 1.374.530 | 16,26 | 142 | 6.615.326 | 40,35 |
| UTN | 1 | 1.350.000 | 15,97 | - | - | - |
| Total | 209 | 8.453.907 | 100 | 609 | 16.394.244 | 100 |

Fonte: BIG, 2017

Aproveitamentos fotovoltaicos são 27MW instalado, 346MW em construção e 2,63GW de empreendimentos com construção ainda não iniciada. Usinas fotovoltaicas representam 16% da potência de empreendimentos previstos com construção ainda não iniciada.

Na Figura 2 é apresentado um resumo dos dados disponibilizados pelo BIG (Banco de Informações de Geração – ANEEL) para enfatizar o crescimento representativo dos aproveitamentos de fonte eólica e solar nos novos empreendimentos.

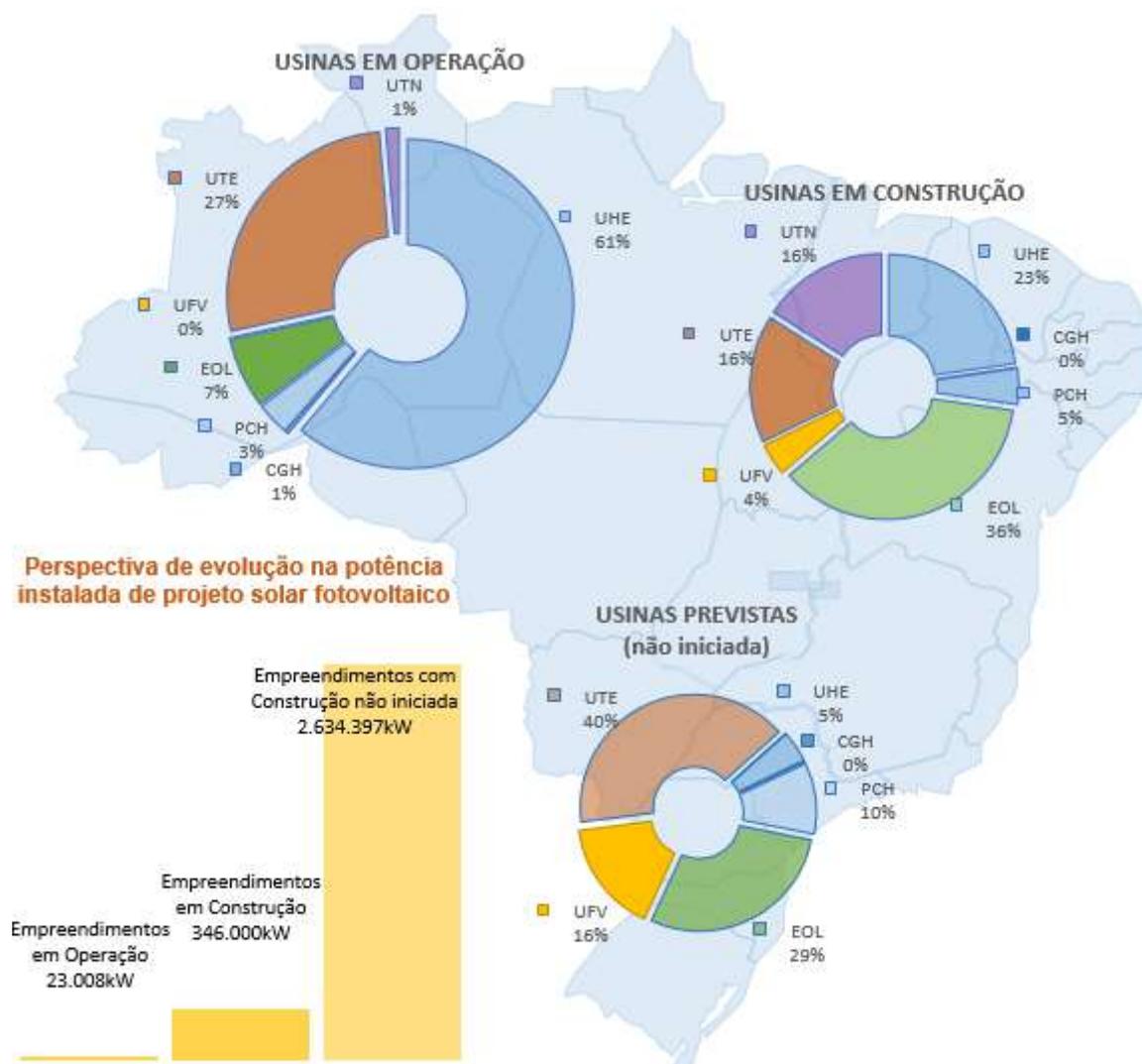


Figura 2: Usinas do Brasil (operando, em construção e capacidade do Brasil)

Fonte: Autoria própria à partir dos dados do BIG (2017)

Mudanças no meio regulatório também trazem impacto significativo na evolução da energia solar fotovoltaica. Em 2015 a Resolução 482 passou por uma revisão que originou a REN 687/2015. A nova resolução ampliou as possibilidades da micro e minigeração, aumentando o limite de potência, criando mecanismo de compartilhamento de geração, reduzindo prazos para respostas das distribuidoras, entre outras providências (TOLMASQUIM, 2016). Essas novas regras estimularam o desenvolvimento de novos pequenos aproveitamentos na geração distribuída.

O sistema de compensação adotado no Brasil pode reduzir os ganhos para o proprietário do sistema nos estados que ainda não aderiram a isenção Imposto sobre Circulação de Mercadoria e Serviço (ICMS) como benefício, e a produção de energia não é simultânea ao consumo. É necessário então verificar qual percentual de energia

é exportada para a rede, quanto maior esse percentual, maior será a tributação, impactando negativamente na paridade tarifária, e, conseqüentemente, na viabilidade do empreendimento.

A Figura 3 apresenta comparação entre as curvas típicas de produção de um SFVCR e consumo da residência. Nesse exemplo hipotético, 65% da geração é exportada, apenas 35% é consumida no momento da geração:

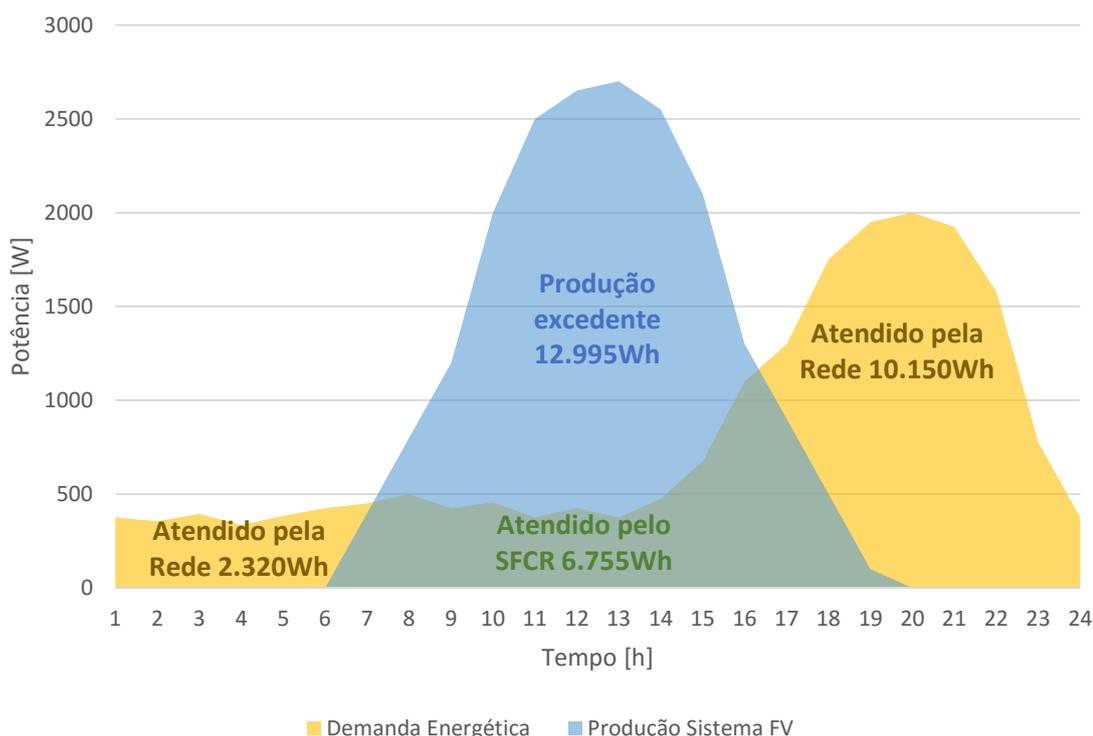


Figura 3: Comparação da curva de geração FV típica e carga residência típica

Fonte: Adaptado de Zilles *et al.* (2012)

Nesse caso o consumidor tem um custo evitado quando a geração é simultânea ao consumo (atendido pelo SFVCR), porém, sem o benefício fiscal, mesmo no sistema de compensação, o consumidor paga imposto sobre a energia consumida da rede.

Durante o dimensionamento de um projeto de geração fotovoltaico, é de extrema importância o desenvolvedor ter pleno conhecimento a respeito da legislação vigente no local da instalação, além das questões técnicas a respeito do recurso solar, variação da geração e demanda energética.

2.2 RECURSO SOLAR

O Sol é a principal fonte de energia do planeta. A superfície da Terra recebe anualmente uma quantidade de energia solar, nas formas de luz e calor, suficiente para suprir milhares de vezes as necessidades mundiais durante o mesmo período. Apenas uma pequena parcela dessa energia é aproveitada (VILLALVA, 2015).

Segundo Villalva (2015), a energia do Sol é transmitida para nosso planeta através do espaço na forma de radiação eletromagnética.

2.3 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Diariamente incide sobre a superfície da terra mais energia vinda do sol do que a demanda total de todos os habitantes do planeta em um ano. Dentre as diversas aplicações da energia solar, a geração direta de eletricidade através do efeito fotovoltaico se apresenta como uma das mais elegantes formas de gerar potência elétrica (RÜTHER, 2004).

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (efeito fotovoltaico), sendo a célula fotovoltaica um dispositivo fabricado com material semicondutor, a unidade fundamental desse processo de conversão (PINHO; GALDINO, 2014).

O efeito fotovoltaico é um fenômeno físico de conversão da energia contida na radiação luminosa em energia elétrica. Observado primeiramente pelo físico francês Edmond Becquerel em 1839, o efeito fotovoltaico ocorre em certos materiais semicondutores com capacidade de absorver a energia contida nos fótons presentes na radiação luminosa incidente, transformando-a em eletricidade. Os semicondutores utilizados nos dispositivos de conversão fotovoltaica são compostos de elementos capazes de absorver a energia da radiação solar e transferir parte para os elétrons, produzindo, assim pares de portadores de carga (ZILLES *et al.* 2012).

O semicondutor mais usado é o silício, abundante na crosta terrestre. Seus átomos se caracterizam por possuírem quatro elétrons que se ligam aos vizinhos, formando uma rede cristalina (TOLMASQUIM, 2016).

2.3.1 Radiação Solar

A radiação solar varia de acordo com a posição terrestre que influencia no ângulo de incidência dos raios solares. As regiões mais próximas à linha do Equador além de apresentarem menor variação ao longo do ano, ainda possuem intensidade de irradiação anual superior às regiões mais distantes (PINHO; GALDINO, 2014). Como pode ser visto na Figura 4, a incidência solar que atinge as duas superfícies é a mesma, porém, a área da superfície B é superior, fazendo com que a intensidade por unidade de área (irradiância) nessa superfície seja inferior (TOLMASQUIM, 2016).

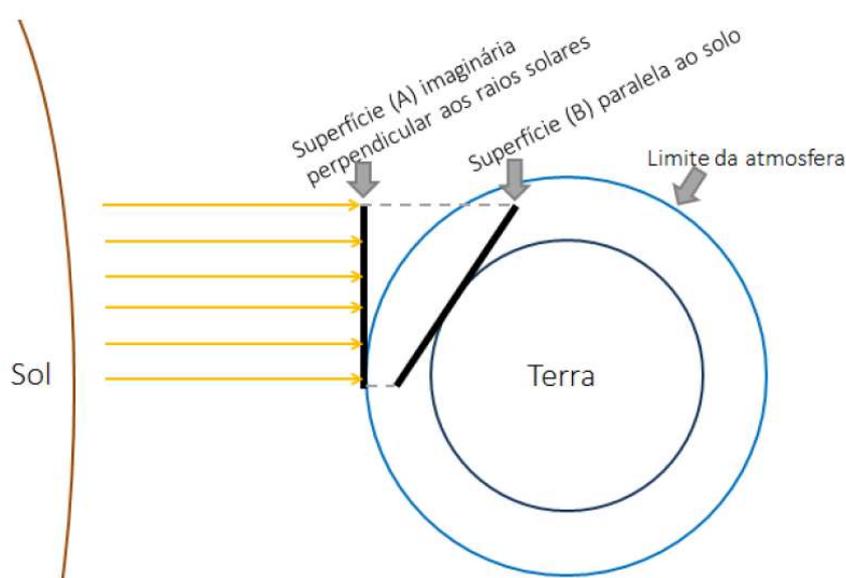


Figura 4: Espalhamento dos raios solares em diferentes superfícies.

Fonte: Tolmasquim, (2016).

O aproveitamento solar pode ser otimizado através da orientação dos painéis. O efeito da inclinação dos coletores é mais relevante quanto maior a latitude. O ângulo que usualmente é considerado como ótimo é igual à latitude do local, orientado para o Norte no Hemisfério Sul (TOLMASQUIM, 2016).

Como ilustra a Figura 5, a radiação solar é composta pela radiação solar direta, radiação solar difusa e radiação devida ao albedo.

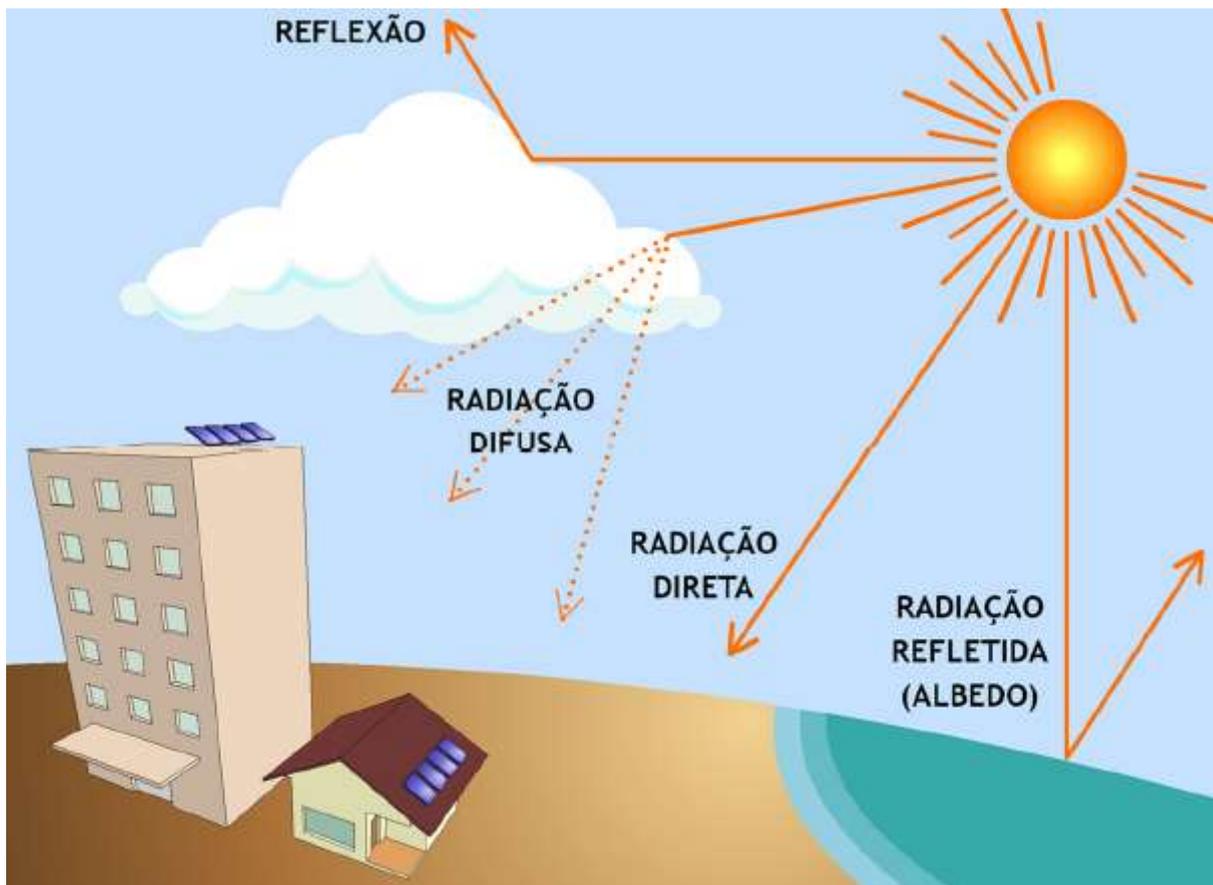


Figura 5: Composição da radiação solar

Fonte: VIANA, (2010).

A radiação direta corresponde aos raios solares que chegam diretamente do Sol em linha reta e incidem sobre o plano horizontal (VILLALVA, 2015).

A radiação difusa corresponde aos raios solares que chegam indiretamente ao plano. É resultado da difração na atmosfera e da reflexão da luz na poeira, nas nuvens e em outros objetos (VILLALVA, 2015).

O albedo corresponde à fração da radiação refletida nos arredores e no solo (VILLALVA, 2015).

Segundo Tolmasquim (2016) a radiação solar que atinge a superfície da terra pode ser decomposta em dois planos:

- ✓ Plano horizontal: no qual a radiação global consiste na soma das componentes direta e difusa;
- ✓ Plano inclinado: além da radiação direta e difusa, à a parcela da radiação refletida na superfície e nos elementos do entorno.

2.3.2 Irradiância Solar

A irradiância é uma grandeza empregada para quantificar a radiação solar, expressa em unidade de potência por área (W/m^2). A potência é uma grandeza física que expressa a energia transportada durante um certo intervalo de tempo, ou a taxa de variação da energia com o tempo.

A Figura 6 demonstra a irradiância solar ao longo de um dia hipotético, onde em cada instante de tempo é realizada uma medida. Calculando-se a área embaixo da curva, obtém-se o valor da energia recebida do Sol durante o dia por unidade de área, denominada irradiação.

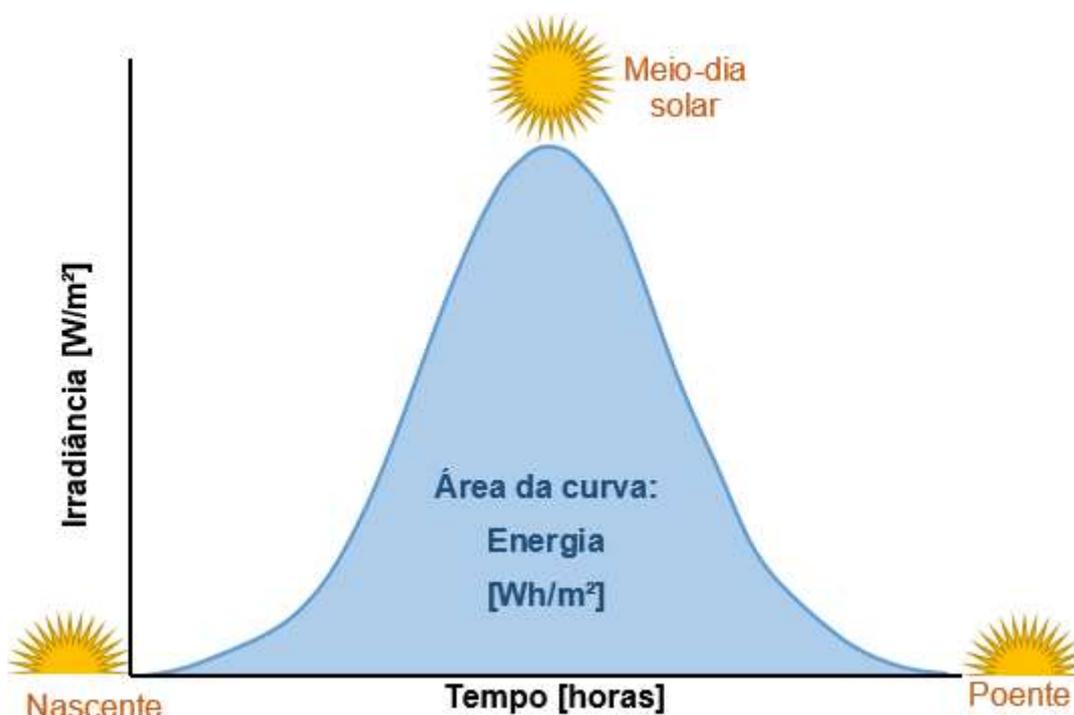


Figura 6: Perfil de irradiância solar ao longo do dia

Fonte: Adaptado de Villalva, 2015.

2.3.3 Irradiação Solar

Segundo Villalva, (2015), a irradiação é a grandeza utilizada para expressar a energia solar que incide sobre uma determinada área de superfície plana ao longo de

um determinado intervalo de tempo. Sua unidade é o Wh/m² (watt-hora por metro quadrado), que expressa a densidade de energia por área.

A informação de irradiação no local é imprescindível para o dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico. No caso de grandes empreendimentos, é recomendado que se realize medições de irradiação no local, entretanto, no caso de pequenos sistemas fotovoltaicos, existem bancos de dados públicos que disponibilizam dados de irradiação em diversos pontos no globo. Um desses bancos é disponibilizado pelo banco de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar vinculado ao projeto SWERA.

2.3.4 Banco de Dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar

O banco de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar possui informações de recursos energéticos renováveis para diversos pontos em todo território brasileiro. Uma das informações disponíveis é a irradiação solar. Os dados de irradiação solar são disponíveis no plano global horizontal e inclinado, em médias mensais e anuais na unidade de kWh/m²/dia.

A irradiação global horizontal se refere à energia solar recebida por uma superfície posicionada horizontalmente ao solo. Essa informação pode ser utilizada no dimensionamento de projetos quando a inclinação dos painéis é diferente da latitude do local, ou o desvio azimutal diferente de 0°.

A irradiação no plano inclinado se refere à energia solar recebida por uma superfície posicionada com inclinação igual latitude do local. Essa informação pode ser utilizada o dimensionamento de projetos quando a inclinação dos painéis é igual latitude do local e o desvio azimutal igual a 0.

A irradiação solar é diferente em cada dia ou mês do ano. A Figura 7 ilustra a comparação entre a sazonalidade da irradiação durante os meses e estações do ano para o plano horizontal e inclinado. Nota-se que no plano inclinado, a variação é menor entre os meses, sendo que o valor médio anual é superior. Já no plano horizontal, os valores tendem a serem superiores nos períodos de primavera e verão, porém são bem inferiores no outono e inverno.

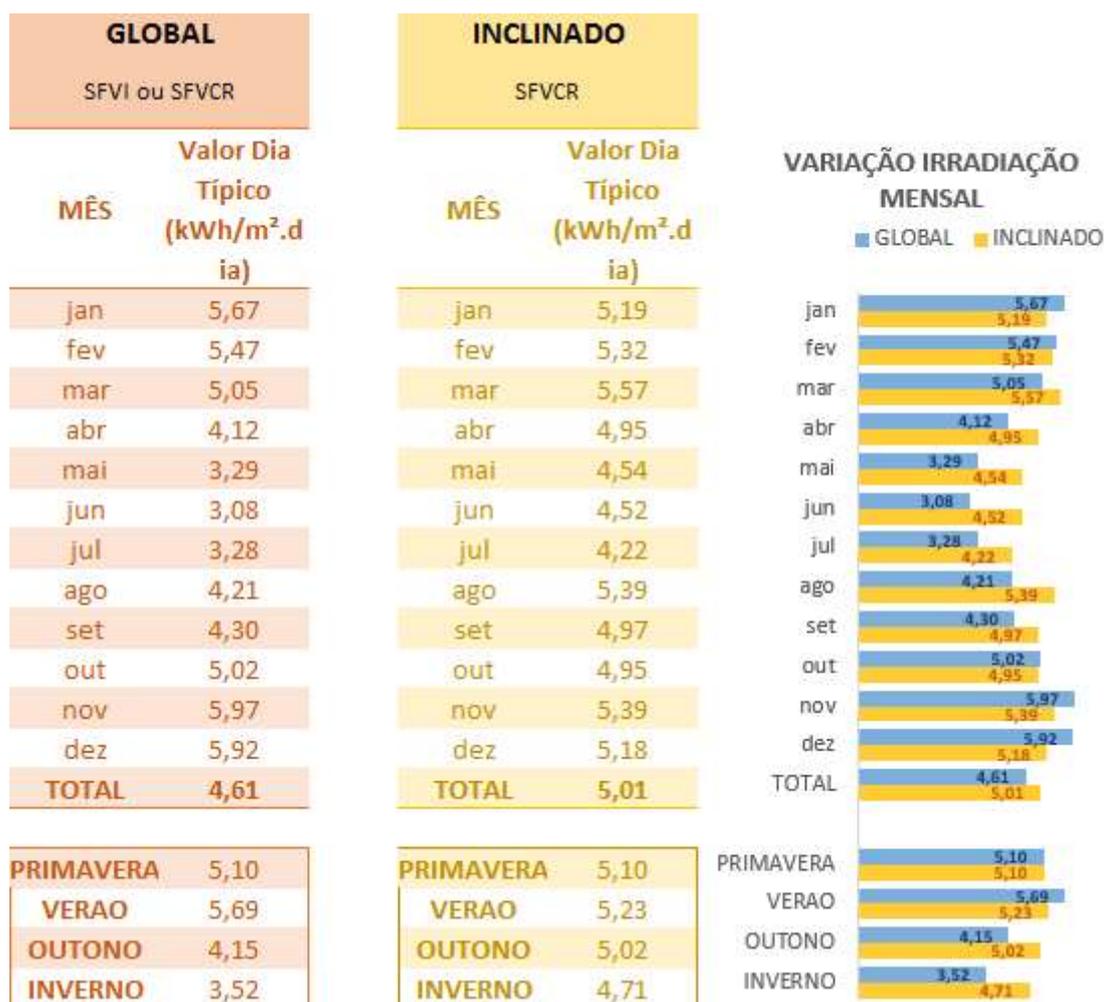


Figura 7: Irradiação no plano horizontal e inclinado em Curitiba – PR

Fonte: PEREIRA, (2006).

2.3.5 Inclinação dos Painéis Solares

A radiação difusa chega ao solo de maneira irregular, tornando-se difícil otimizar a captação da mesma. Já no caso da radiação direta, é possível maximizar seu aproveitamento através do conhecimento do comportamento da radiação solar do local.

Em cada ponto do planeta a radiação direta incide no solo com uma inclinação diferente, sendo que essa inclinação também varia ao longo dos dias e meses do ano (VILLALVA, 2015). Para otimizar o aproveitamento anual da irradiação solar do local, adota-se que o ângulo de inclinação dos painéis com o solo deve ser igual à latitude

do local. Na Figura 8 está ilustrado como a inclinação nos painéis pode modificar a quantidade de energia captada pelos painéis. No primeiro exemplo que segue, os raios solares se encontram na perpendicular da face do painel solar, então, o aproveitamento dos raios solares ao longo do dia durante o ano é maximizada. No segundo quadro, é demonstrado um exemplo onde o ângulo é inferior ao ângulo ótimo, de tal forma que a produção é prejudicada quando avaliado a média anual.

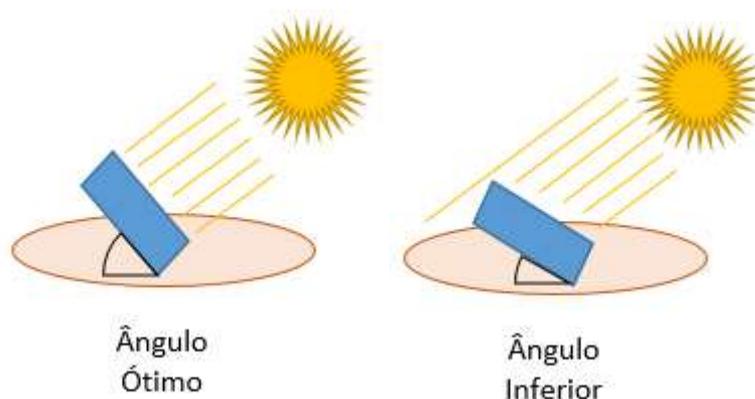


Figura 8: Efeito da inclinação nos painéis fotovoltaicos

Fonte: Modificado de Villalva, 2015

Embora considerado como ideal, o posicionamento em ângulo igual à latitude do local não é regra absoluta. Se for desejado maximizar a irradiação em determinada estação ou mês do ano, é possível orientar os painéis ao ângulo que favoreça a aplicação. Em aplicações de aquecimento, por exemplo, pode ser desejado maximizar a irradiação sobre os coletores nos meses de inverno, sendo possível com a alteração dos painéis para um ângulo maior que a latitude do local. Ainda quanto à inclinação, destaca-se que mesmo em regiões próximas à linha do Equador é desejável que se empregue um ângulo mínimo de 10° nos projetos, de forma a evitar o acúmulo de sujeira sobre os painéis, bem como para facilitar a limpeza natural por meio da chuva (PINHO; GALDINO, 2014).

2.3.6 Desvio Azimutal dos Painéis

No caso da energia solar fotovoltaica, o azimute representa o ângulo de orientação dos raios solares com relação ao norte geográfico. No hemisfério Sul, quando o ângulo do azimute solar coincide com o norte polar da Terra, diz-se que o

ângulo azimutal é igual a 0. O inverso ocorre quando no hemisfério Norte, o ângulo azimutal é medido em relação ao sul geográfico (VILLALVA, 2015).

A instalação correta de um painel solar fotovoltaico deve levar em conta o movimento diário do Sol. Um painel instalado com sua face voltada para o Leste, fará o aproveitamento solar somente no período da manhã. No período da tarde, após o meio-dia solar, os raios solares vão deixar de incidir sobre a face do painel e sua energia não será aproveitada (VILLALVA, 2015).

Para maximizar o aproveitamento da energia solar em uma instalação no hemisfério Sul, é recomendado que os painéis sejam instalados com desvio azimutal igual a 0, ou seja, voltados para o norte geográfico. Dessa maneira se tem o melhor aproveitamento da energia ao longo do dia e do ano. A Figura 9 demonstra as diferenças nas trajetórias do Sol durante um dia no inverno e verão em uma instalação hipotética no hemisfério Sul com painéis voltados para o Norte.

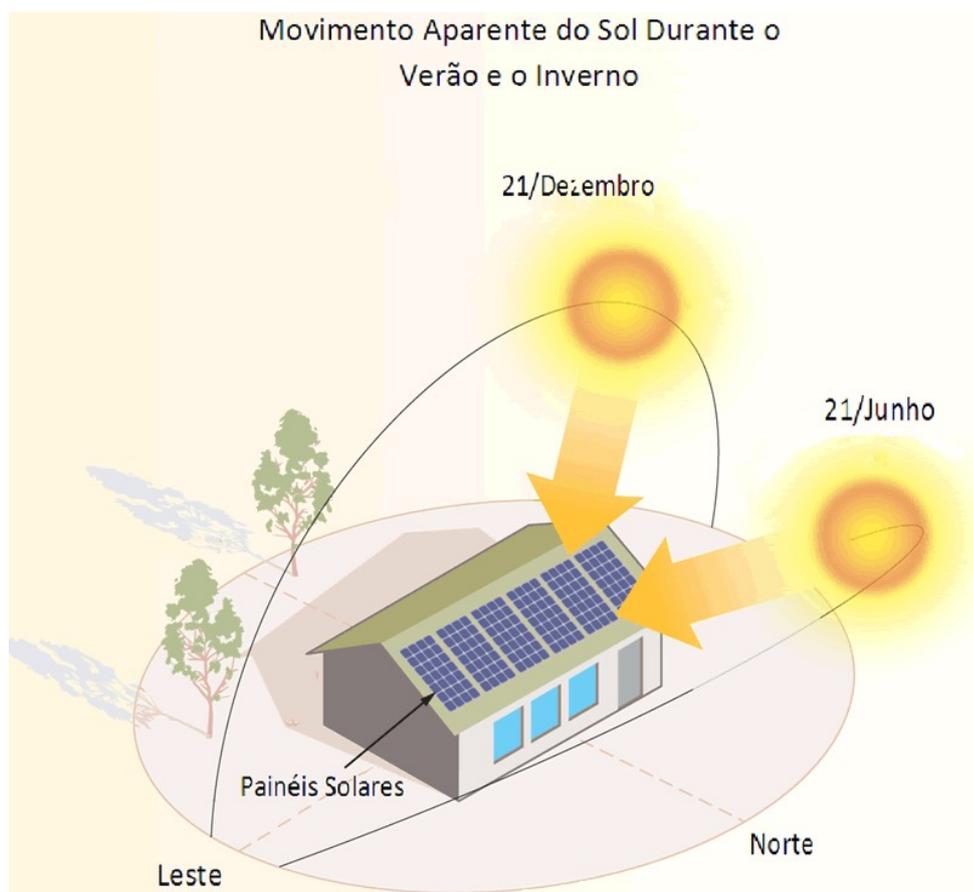


Figura 9: Trajetória do movimento aparente do Sol ao longo do ano

Fonte: OPTPOWER, (2017).

2.4 SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

Um sistema fotovoltaico é constituído por um bloco gerador, um bloco de condicionamento de potência e, opcionalmente, um bloco de armazenamento (PINHO; GALDINO, 2014).

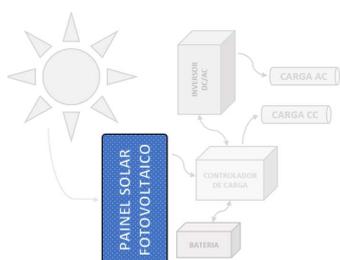


Figura 10: Principais componentes de um sistema fotovoltaico

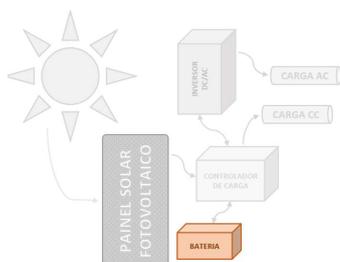
Fonte: Autoria própria

Segundo Villalva, (2015), os sistemas fotovoltaicos exigem pouca manutenção, são silenciosos, ecológicos e não precisam de abastecimento de combustível. No caso de sistemas fotovoltaicos isolados, podem ser aplicados em fazendas, ilhas e comunidades isoladas da Amazônia, substituir geradores movidos à diesel, reduzindo seu ruído e poluição.

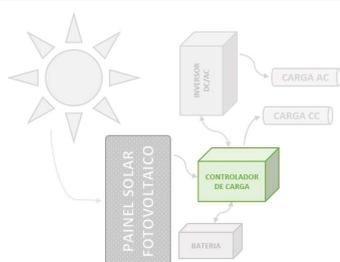
A Tabela 3 apresenta um resumo da função dos principais componentes de um sistema fotovoltaico de geração de energia.

Tabela 3: Tabela resumo dos principais componentes de um sistema fotovoltaico**PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

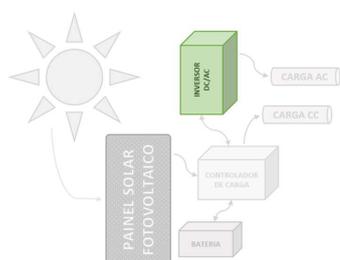
Tem como função gerar energia elétrica que abastece o sistema. Os painéis possuem propriedade de transformar a radiação solar em corrente elétrica contínua.

**BATERIAS**

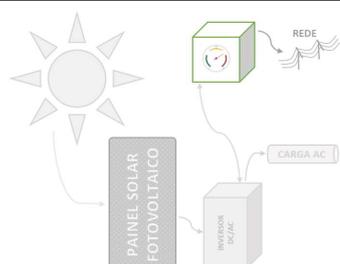
Tem como função garantir o fornecimento de energia mesmo à noite ou em dias chuvosos quando a geração não supri a demanda.

**CONTROLADORES DE CARGA**

Tem como função efetuar os processos de carga e descarga das baterias de forma segura, evitando sobrecargas e descargas profundas que reduzem vida útil das mesmas.

**INVERSORES**

Tem função de transformar corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA), e elevar a tensão.

**DISPOSITIVO DE CONTROLE**

Tem função de contabilizar o fluxo de energia nos dois sentidos, energia injetada na rede e energia consumida.

Fonte: Autoria própria

2.4.1 Sistema Fotovoltaico Isolado

Segundo Zilles *et al.* (2012), as primeiras aplicações terrestres da tecnologia fotovoltaica ocorreram principalmente em sistemas isolados, capazes de abastecer cargas distantes da rede convencional de distribuição de eletricidade.

Os sistemas fotovoltaicos isolados (SFVI) são aplicados em locais remotos que não existe conexão com rede elétrica da distribuidora. A principal diferença de um sistema conectado à rede e um isolado, é que no SFVI é imprescindível um dispositivo de armazenamento de energia para manter a disponibilidade em momentos que a geração não atende à demanda energética.

Em resumo, um sistema fotovoltaico isolado é composto por painel fotovoltaico, controlador de carga, bateria e inversor, conforme ilustra a Figura 11:

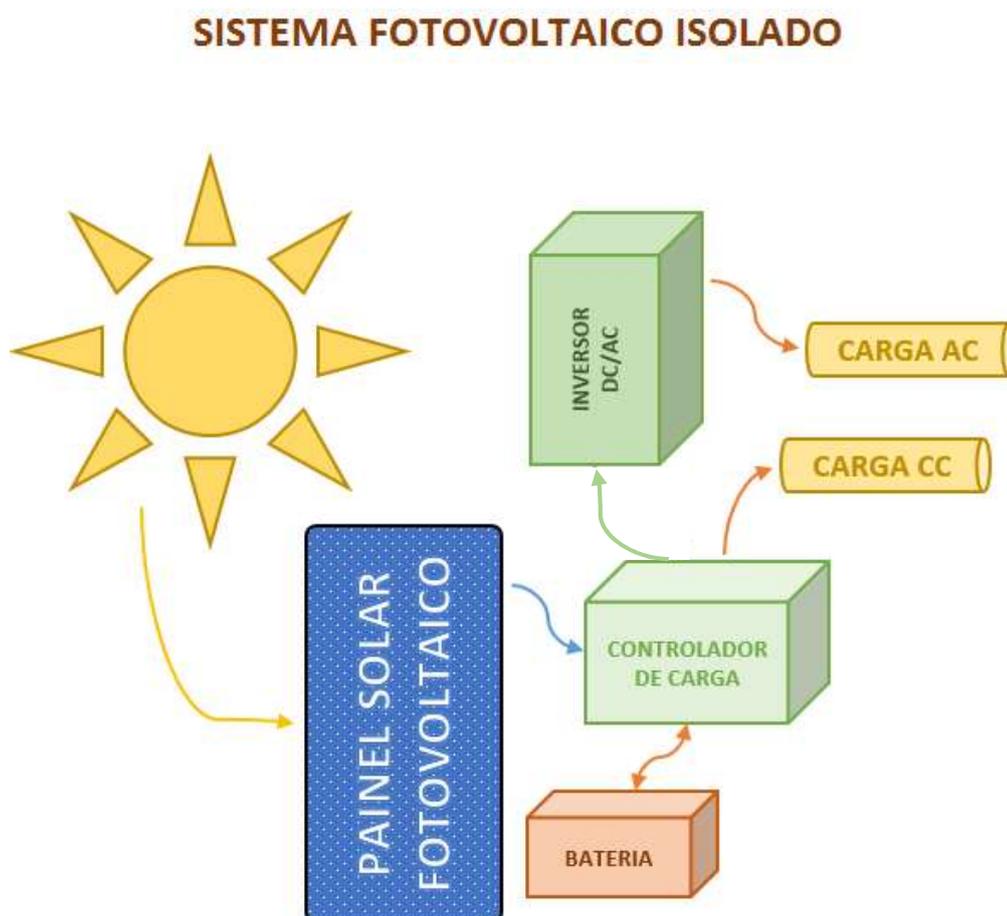


Figura 11: Componentes de um sistema fotovoltaico isolado

Fonte: Autoria própria

Painéis fotovoltaicos

A célula fotovoltaica é o principal elemento para a geração de energia solar. Um painel 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 (PINHO; GALDINO, 2014).

De maneira semelhante ao que ocorre com as células fotovoltaicas, o desempenho dos painéis fotovoltaicos é fundamentalmente influenciado pela irradiância solar e pela temperatura das células. A corrente elétrica gerada pelo painel é maximizada com o aumento da irradiância solar, já o aumento da temperatura nas células provoca uma queda de tensão considerável (PINHO; GALDINO, 2014).

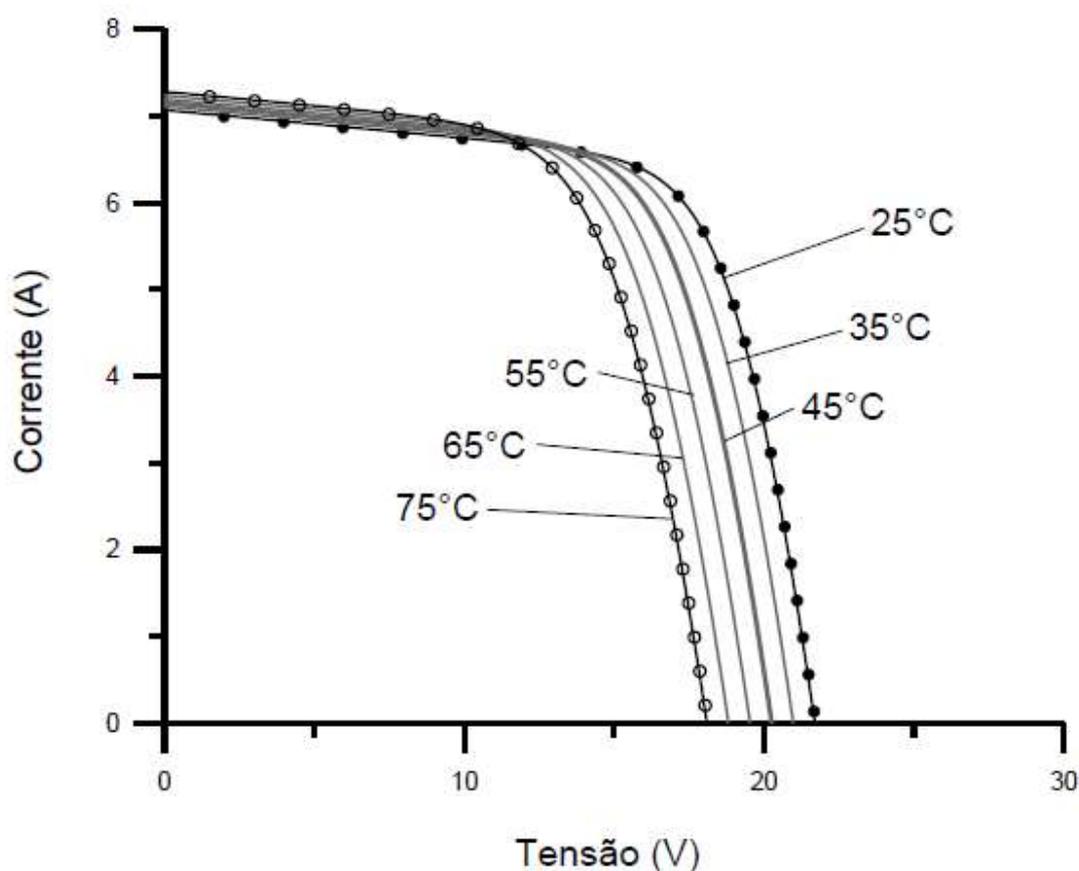


Figura 12: Efeito causado pela variação da temperatura no painel

Fonte: PINHO; GALDINO, (2014).

Uma célula fotovoltaica é composta tipicamente pela junção de duas camadas de material semicondutores, uma do tipo P e outra N. O material N possui um excedente de elétrons e o material P apresenta falta de elétrons. Devido à diferença

de concentração de elétrons nas duas camadas de materiais, os elétrons da camada N fluem para a camada P e criam um campo elétrico (VILLALVA, 2015).

Uma célula fotovoltaica sozinha produz pouca energia e apresenta uma tensão elétrica muito baixa, precisam ser conectadas em série para fornecer uma grande quantidade de energia elétrica e uma tensão mais elevada (VILLALVA, 2015).

Segundo Villalva, (2015), as células fotovoltaicas produzidas em larga escala e disponíveis comercialmente são constituídas de silício monocristalino, policristalino ou amorfo.

O silício é o material semicondutor mais usado devido ao fato de sua tecnologia de fabricação já estar bem desenvolvida e sua matéria-prima ser barata, não tóxica e abundante (VILLALVA, 2015).

O silício empregado na fabricação de células fotovoltaicas é extraído do mineral quartzo, e, o Brasil é um dos principais produtores desse minério, apesar da purificação do material não ser feita no Brasil.

Segundo Villalva, (2015), o silício monocristalino é formado a partir de blocos de silício ultrapuro, que são aquecidos em altas temperaturas e submetidos a um processo de formação de cristal chamado método de *Czochralski*. O produto resultante desse processo é o lingote de silício monocristalino, que é constituído de uma estrutura cristalina única e possui organização molecular homogênea, o que lhe oferece aspecto brilhante e uniforme.



Figura 13: Exemplo lingote de silício monocristalino

Fonte: Pinterest, (2017)

O lingote é cerrado e fatiado para produzir *wafers*, que são finas bolachas de silício puro. Eles são submetidos a processos químicos nos quais recebem impurezas em ambas as faces, formando as camadas de silício P e N que constituem a base

para o funcionamento da célula fotovoltaica. Por último, a célula semiacabada recebe uma película metálica em uma das faces, uma grade metálica na outra face e uma camada de material antireflexivo na face que vai receber luz. O produto final é a célula fotovoltaica monocristalina (VILLALVA, 2015).

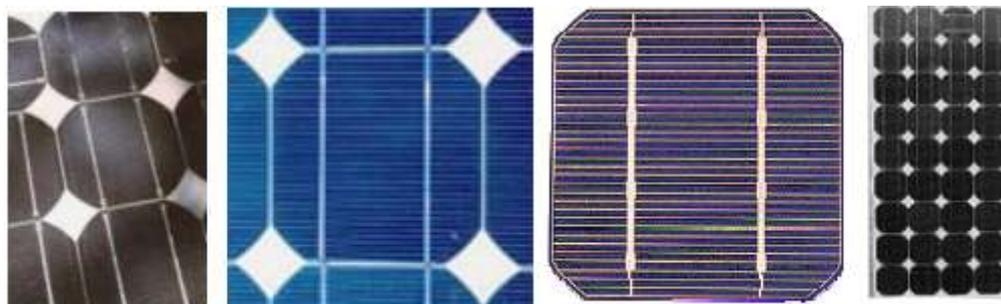


Figura 14: Células fotovoltaicas de silício monocristalino

Fonte: Ghensev, 2006

Segundo Villalva, (2015), as células de silício monocristalino são as mais eficientes produzidas em larga escala. Alcançam eficiência de 15% a 18%, mas têm um custo de produção mais elevado do que outros tipos de células. São células rígidas e quebradiças, que precisam ser montadas em painéis para adquirir resistência mecânica para o uso prático.

O silício policristalino é fabricado por um processo mais barato do que aquele empregado na fabricação do monocristalino. É formado por um aglomerado de pequenos cristais, com tamanhos e orientações diferentes. O lingote policristalino também é serrado para produzir *wafers*, que posteriormente se transformam em células fotovoltaicas (VILLALVA, 2015).

As células de silício policristalino apresentam manchas devido ao tipo de silício empregado em sua fabricação. Segundo Villalva, (2015), elas possuem eficiência entre 13% e 15%, e seu custo de fabricação é menor do que as células monocristalinas, tendo melhor custo benefício.

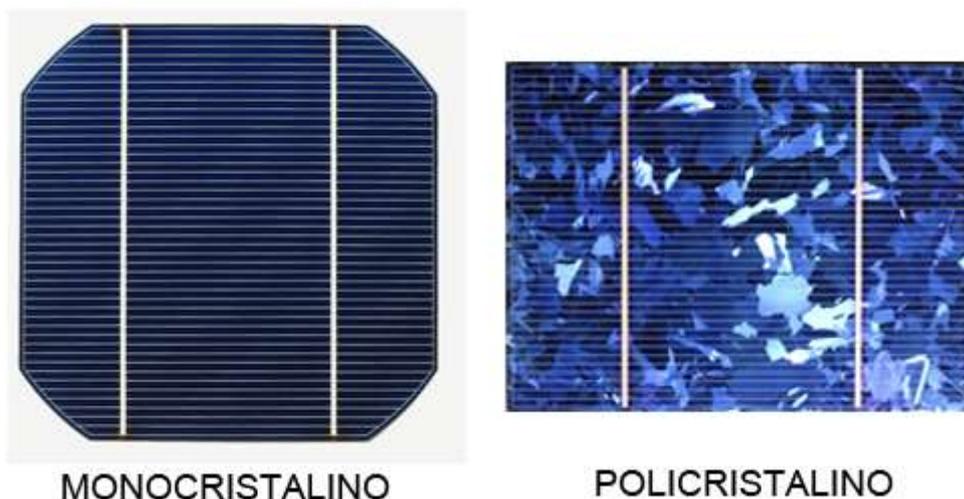


Figura 15: Diferença entre célula de silício monocristalino e policristalino

Fonte: Energia Solar, (2017)

Diferente das células cristalinas que são produzidas a partir de fatias de lingotes de silício, os dispositivos de filmes finos são fabricados através da deposição de finas camadas de materiais (silício e outros) sobre uma base que pode ser rígida ou flexível (VILLALVA, 2015).

O processo de deposição permite que pequenas quantidades de matéria-prima sejam empregadas para fabricar os painéis, evitando desperdícios que ocorrem na serragem dos *wafers* cristalinos e reduzindo os custos. Seu processo de fabricação consome também menos energia, minimizando ainda mais os custos dessa tecnologia (VILLALVA, 2015).

O nome filme fino é usado para designar diferentes tecnologias que existem atualmente, como silício amorfo, o silício microcristalino, a tecnologia de telureto de cádmio e a cobre-índio-gálio-selênio (CIGS) (VILLALVA, 2015).

A Tabela 4 apresenta as características das tecnologias fotovoltaicas de silício cristalino e filmes finos:

Tabela 4: Comparação entre tecnologias de painéis fotovoltaicos

| Silício Cristalino c-Si | Filmes finos |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Mais tradicional • Lâminas cristalinas (diâmetro 15cm) • Espessa (100-300µm) • Maior limitação em redução de custos | <ul style="list-style-type: none"> • Aplicação no entorno da construção • Baixos custos de produção • Quantidade inferior de material envolvido • Pequena quantidade de energia envolvida na produção |

Fonte: Modificado de Rüter, (2004)

O silício cristalino se consolidou no mercado por sua extrema robustez e confiabilidade (RÜTHER, 2004). Por ser mais eficiente, essa tecnologia tem maior aderência em locais que existe uma limitação na área disponível.

Referente aos custos de instalação de um sistema fotovoltaico, o painel fotovoltaico é o item de maior custo, corresponde à aproximadamente 42% do valor total. A Figura 16 mostra a estimativa de composição dos custos de um sistema fotovoltaico, após os painéis fotovoltaicos, os inversores possuem o maior valor com 23% do custo, seguido do demais componentes (18%) e projeto e instalação (17%).

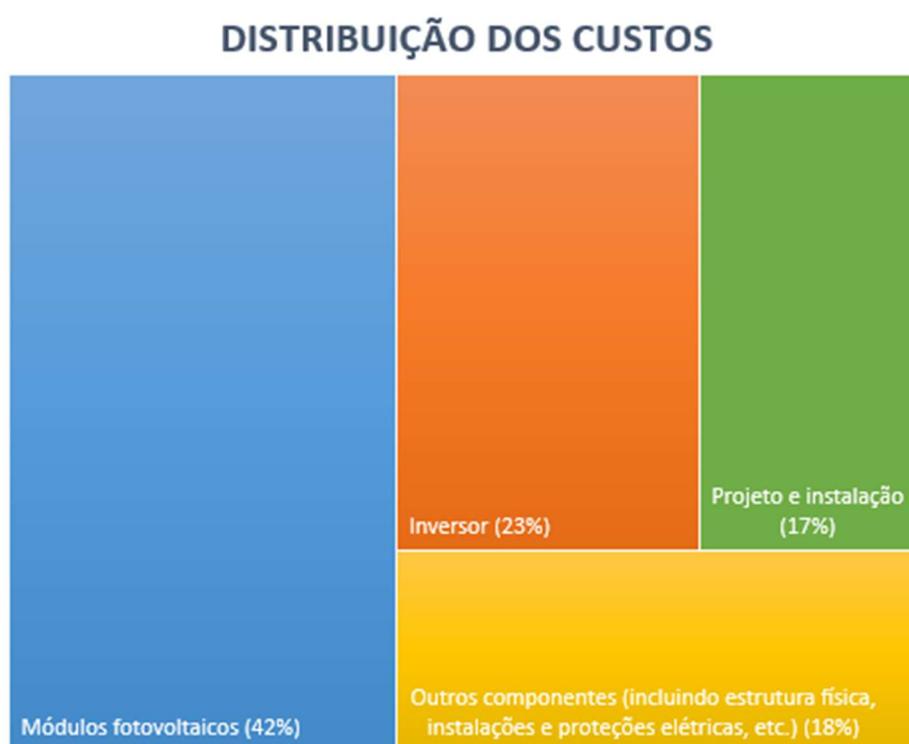


Figura 16: Estimativa de composição do custo total de um SFV

Fonte: Modificado de IDEAL, (2016).

Grande parte dos sistemas fotovoltaicos isolados opera na tensão de 12V, portanto, inversores, baterias e controladores de carga para 12V são os mais encontrados no mercado (VILLALVA, 2015).

Acumuladores Elétricos - Baterias

Nos sistemas fotovoltaicos isolados, a geração de energia nem sempre é simultânea ao consumo, sendo necessário um acumulador de energia. O acumulador

mais utilizado é o banco de baterias, que são baterias agrupadas em série e/ou paralelo dependendo do arranjo aplicado.

A palavra “bateria” refere-se a um grupo de células eletroquímicas conectadas eletricamente em série e/ou paralelo, para produzir tensão e/ou corrente mais elevadas do que a que pode ser obtida por uma única célula. A bateria é um dispositivo eletroquímico que converte energia química em energia elétrica e vice-versa (PINHO; GALDINO, 2014).

O objetivo do banco de baterias é atender à demanda energética em períodos nos quais a geração é nula ou insuficiente. Assim, parte da energia solar convertida em energia elétrica pelos painéis fotovoltaicos durante o dia é armazenada para ser utilizada em outros momentos e atender à demanda (PINHO; GALDINO, 2014).

A bateria eletroquímica ainda é o dispositivo mais utilizado em sistemas fotovoltaicos isolados, por ser uma forma conveniente e eficiente de armazenamento de energia elétrica (PINHO; GALDINO, 2014).

A bateria de chumbo ácido estacionária com eletrólito líquido é o tipo mais difundido no mercado devido ao seu custo reduzido e é o mais empregado nos sistemas fotovoltaicos autônomos (VILLALVA, 2015).

A vida útil de uma bateria é determinada pelo número de ciclos de carga e descarga que ela pode realizar. Dois fatores que influenciam no número máximo de ciclos da bateria são: temperatura de utilização e profundidade de descarga. Quanto maior a temperatura e/ou profundidade de descarga, menor será a vida útil das baterias.

No que se refere à profundidade de descarga, que corresponde à porcentagem da carga máxima da bateria quando descarregada, o controlador de carga pode minimizar os riscos de descarga excessiva das baterias.

Controladores de carga

Controladores de carga são incluídos na maioria dos SFVI com o objetivo de proteger a bateria (ou banco de baterias) contra cargas e descargas excessivas, aumentando sua vida útil (PINHO; GALDINO, 2014).

Os controladores de carga devem desconectar o gerador fotovoltaico quando a bateria atingir carga plena e interromper o fornecimento de energia quando o estado de carga da bateria atingir um nível mínimo de segurança (PINHO; GALDINO, 2014).

Alguns controladores mais sofisticados ainda possuem o recurso de rastreamento do ponto de máxima potência do painel ou do conjunto de painéis fotovoltaicos, possibilitando aumentar a eficiência do sistema fotovoltaico (VILLALVA, 2015).

Com o uso de controlador com buscador de máxima potência (MPPT) o painel fotovoltaico pode operar com a tensão necessária para encontrar-se em seu ponto de máxima potência, independentemente do valor de tensão nos terminais da bateria (VILLALVA, 2015).

Inversores Elétricos

Os painéis fotovoltaicos geram energia em corrente contínua (CC), sendo assim, torna-se necessário o uso dos inversores para alimentar a grande maioria dos aparelhos domésticos que foram construídos para funcionar na rede elétrica de tensão alternada (CA tensão de 127 ou 220V e frequência 60Hz).

Os inversores são equipamentos de alta eficiência (até 98%) utilizados para converter a corrente contínua (CC) em alternada (CA) (PINHO; GALDINO, 2014). No caso de aparelhos que são ligados em corrente contínua, podem ser conectados diretamente no controlador de carga, dispensando o inversor.

Inversores eletrônicos para sistemas fotovoltaicos isolados estão disponíveis no mercado em uma vasta gama de potências e tensões de entrada, tipicamente 12V, 24V ou 48V (VILLALVA, 2015).

2.4.2 Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

O sistema fotovoltaico conectado à rede (SFVCR) trabalha em conjunto com a rede elétrica da distribuidora de energia. Quando a demanda de energia é superior à geração dos painéis, é utilizada a energia da rede disponibilizada pela distribuidora. Se, a energia gerada é superior à demanda, o sistema irá injetar energia na rede. Portanto, é necessário um medidor bidirecional que registre a energia consumida e gerada.

Segundo Zilles *et al.*, (2012), o fato de um SFVCR ser conectado diretamente à rede elétrica dispensa a necessidade do uso de armazenamento de energia. O SFVI, dependendo do dimensionamento, pode desperdiçar capacidade de geração nos momentos em que os acumuladores estiverem completamente cheios e não houver carga, porque o controlador de carga desconecta os geradores nesses momentos. Isso não ocorre nos sistemas conectados à rede, pois toda a energia excedente é injetada na rede. Como decorrência, os SFVCR possuem um melhor desempenho, melhorando a relação custo / benefício.

SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE

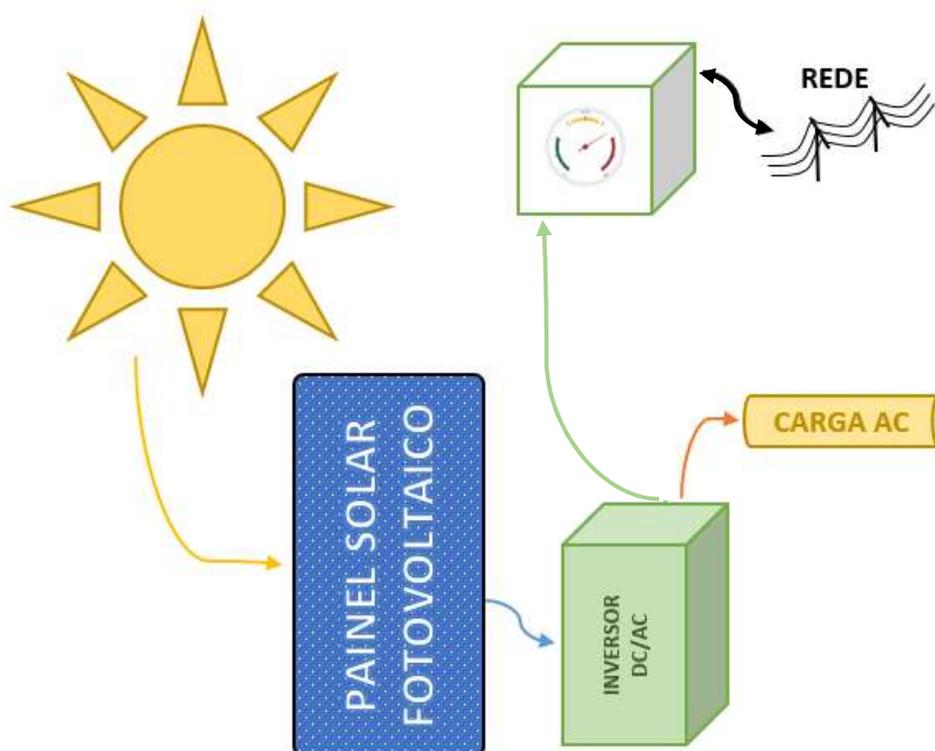


Figura 17: Componentes de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica

Fonte: Autoria própria

Segundo Rüter (2004), os sistemas solares fotovoltaicos conectados à rede oferecem uma série de vantagens para o sistema elétrico, muitas das quais estão relacionadas a custos evitados, dentre elas, podem-se destacar:

- ✓ Perdas por transmissão e distribuição de energia são minimizadas;

- ✓ Investimentos em linhas de transmissão e distribuição são reduzidos;
- ✓ Não apresentam necessidade de área livre, já que a área necessária é a própria edificação;

Os aproveitamentos de energia solar fotovoltaica possuem diversas aplicações e podem ser de grande ou pequeno porte. Porém, os aproveitamentos de pequeno porte, em geração distribuída, são os que apresentam maior perspectiva de crescimento nos próximos anos.

A resolução 482 de 2012 da ANEEL apresenta algumas definições, entre elas os conceitos de micro e minigeração distribuída:

Microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

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

Os sistemas de minigeração são mais adequados para aplicação em indústrias e comércios com objetivo de suprir ou reduzir a demanda externa de energia. Apesar das vantagens ambientais, o maior atrativo desse tipo de empreendimento é o benefício econômico, com a redução da dependência de energia da distribuidora.

Já os sistemas de microgeração são adequados para consumidores com demanda energética inferior, como exemplo residências e pequenas empresas. O objetivo é basicamente o mesmo que o da minigeração, suprir ou reduzir a demanda externa de energia.

Painéis fotovoltaicos

As características dos painéis fotovoltaicos estão apresentadas no item 2.4.1. De maneira geral, os painéis para sistemas fotovoltaicos conectados à rede diferem

dos usados nos sistemas autônomos apenas em seu tamanho e pela potência, geralmente maiores (VILLALVA, 2015).

Inversores Elétricos

Os inversores para sistemas conectados à rede, assim como os inversores de sistemas isolados, têm como principal objetivo, converter a corrente contínua (CC) em alternada (CA).

Nos sistemas fotovoltaicos isolados, os inversores CC-CA fornecem tensões elétricas alternadas nos seus terminais, preferencialmente na forma de onda senoidal pura, para a alimentação dos consumidores. Nos sistemas conectados à rede os inversores CC-CA funcionam como fontes de corrente. Sendo assim, funcionam apenas quando conectados a uma rede elétrica (VILLALVA, 2015).

Na ausência ou falha no fornecimento de eletricidade da concessionária de energia o inversor desliga-se por duas razões:

1. Não foi projetado para operar sem rede elétrica
2. Não deve, em hipótese nenhuma, continuar conectado à instalação elétrica, por questões de segurança de equipamentos e pessoas que no momento manuseiam a instalação elétrica.

Os inversores proporcionam características necessárias (frequência, conteúdo de harmônicos, forma de onda, etc.) para satisfazer as condições impostas pela rede elétrica pública, possibilitando assim a conexão à rede (RÜTHER, 2004)

Os inversores podem ser classificados em três tipos: inversores centrais, *string* e microinversores (PINHO; GALDINO, 2014).

Tabela 5: Tipos de inversores

| INVERSORES CENTRAIS | STRING | MICROINVERSORES |
|---|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Inversores de Grande porte (centenas de kW ATÉ MW) • Utilizados majoritariamente em grandes usinas • Nele são conectados vários arranjos de painéis | <ul style="list-style-type: none"> • Utilizado em instalações residenciais e comerciais • Grupo de painéis conectado em cada inversor de pequeno porte | <ul style="list-style-type: none"> • Inversores individuais, projetados para serem acoplados em cada painel • Produção de cada painel é maximizada • Efeitos de sombreamento ou defeito no painel são isolados, sem prejudicar a produção de todo arranjo • Desvantagem é o elevado custo |

Fonte: Autoria própria

Quando se refere à eficiência dos inversores, deve ser levado em consideração as perdas em *standby* (RÜTHER, 2004). A Figura 18 ilustra a curva característica típica de eficiência de um inversor em função da potência. Nota-se que a eficiência máxima não necessariamente coincide com a potência máxima:

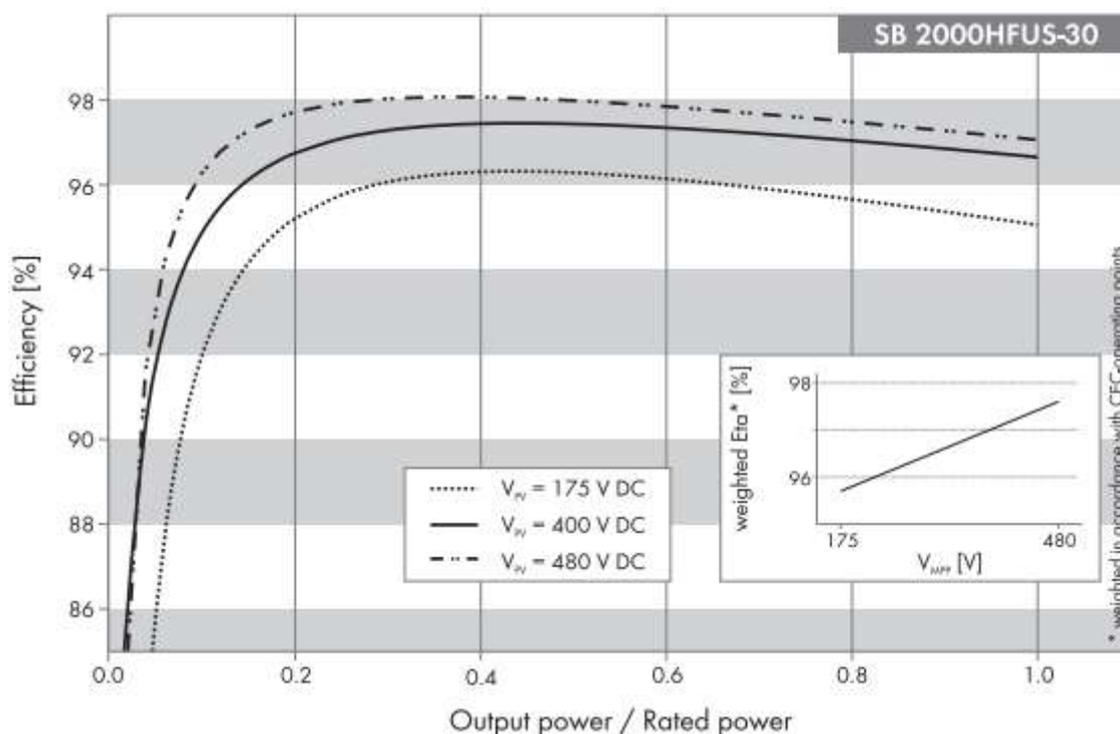


Figura 18: Exemplo de curva típica de eficiência

Fonte: SMA, (2017).

Dispositivos de proteção, supervisão e controle

Tanto os sistemas fotovoltaicos isolados quanto os conectados à rede são bastante confiáveis. No entanto, existem diversos dispositivos auxiliares que objetivam reduzir a possibilidade de falhas e, na ocorrência destas, devem notificar imediatamente o operador do sistema (PINHO; GALDINO, 2014).

Seguem alguns exemplos de dispositivos de proteção: anti-ilhamento, disjuntores, dispositivos de proteção contra surtos (DPS), sistema de aterramento e sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA).

Nas instalações conectadas à rede é adotado um medidor bidirecional nas instalações consumidoras residenciais e comerciais com finalidade de registrar a energia gerada e consumida (RÜTHER, 2004).

3 METODOLOGIA

Os principais fatores que envolvem um dimensionamento de um sistema fotovoltaico são: orientação dos painéis, disponibilidade de área, estética, disponibilidade do recurso solar e demanda a ser atendida (PINHO; GALDINO, 2014).

O foco desse trabalho são sistemas de aproveitamento de energia solar fotovoltaica de pequeno porte, na geração distribuída, seja ele conectado à rede da distribuidora, ou isolado.

Segundo Pinho e Galdino (2014) as principais etapas do projeto de um Sistema Fotovoltaico são as seguintes:

- ✓ Levantamento adequado do recurso solar disponível no local da aplicação;
- ✓ Definição da localização e configuração do sistema;
- ✓ Levantamento adequado de demanda e consumo de energia elétrica;
- ✓ Dimensionamento do gerador fotovoltaico;
- ✓ Dimensionamento dos equipamentos de condicionamento de potência que, no caso dos SFVCRs, se restringe ao inversor para interligação com a rede;
- ✓ Dimensionamento do sistema de armazenamento, usualmente associado aos sistemas isolados

Outro ponto importante que deve ser levantado pelo desenvolvedor antes de iniciar o dimensionamento de um sistema fotovoltaico (SFV), é referente às questões legais e regulatórias vigente no local de instalação e contrato de fornecimento de energia com a distribuidora. Questões como regras para instalação de um aproveitamento fotovoltaico, benefícios fiscais admissíveis (ICMS) e valor mínimo de contrato por disponibilidade devem ser avaliadas de maneira a otimizar o SFV.

3.1 DIMENSIONAMENTO DE SFVI

Os sistemas fotovoltaicos isolados são indicados para locais remotos onde a conexão com a rede pública se torna inviável, seja por questões financeira com custo demasiado de conexão, e/ou restrições ambientais. Como exemplo, esses sistemas são amplamente aplicados em telemetria, sistema de coleta de dados em anemométricos na prospecção da energia eólica (Figura 19).

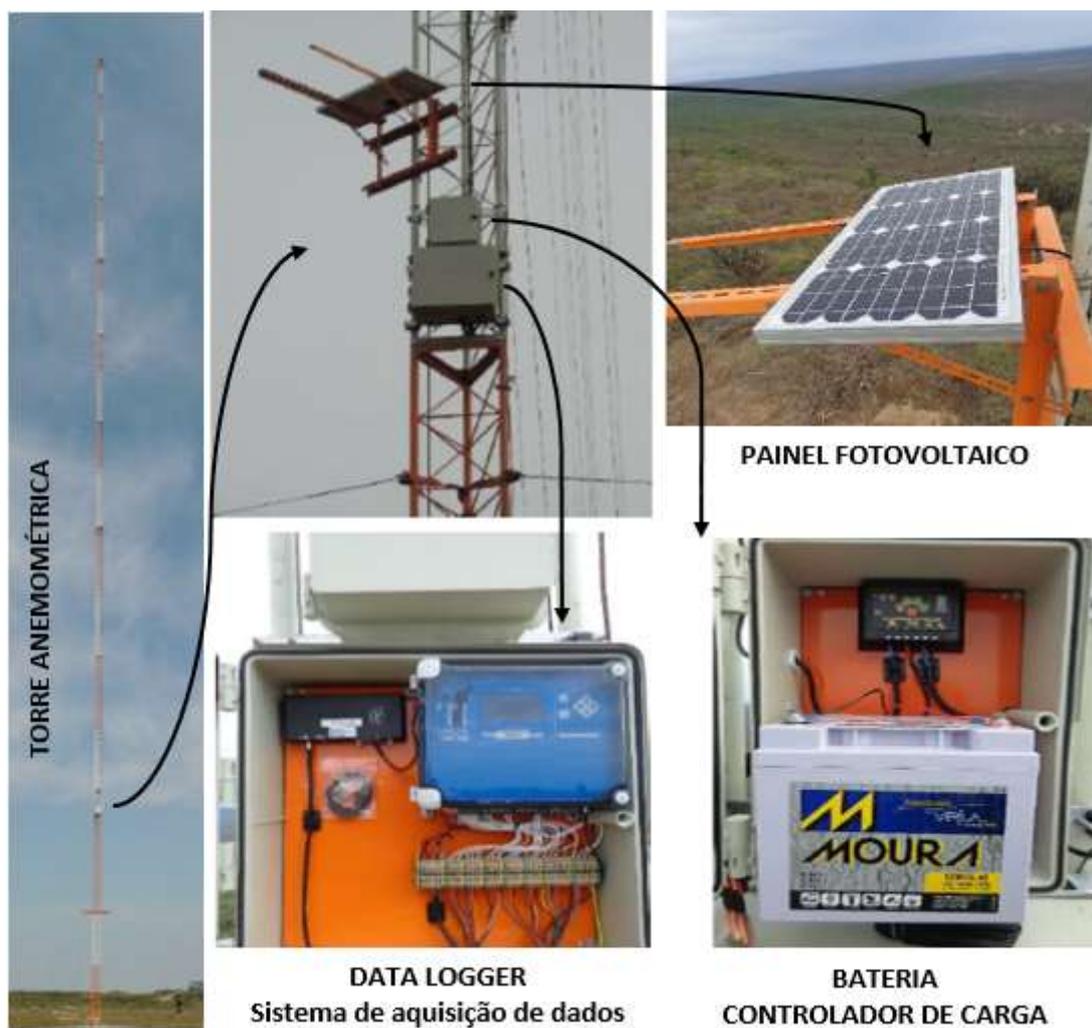


Figura 19: Exemplo de um SFVI

Fonte: acervo da autora

Em dimensionamento de sistemas fotovoltaicos isolados é fundamental estimar a demanda energética com precisão para que o sistema projetado produza a energia necessária.

Os sistemas fotovoltaicos isolados, além da necessidade de um banco acumulador de energia, também devem ser dimensionados levando-se em consideração o pior caso de oferta solar e a sazonalidade que ocorre na maioria das regiões do globo. Sendo assim, para alguns períodos do ano, o sistema fotovoltaico isolado frequentemente estará superdimensionado, o que eleva seus custos de instalação (RÜTHER, 2004).

3.1.1 Estimativa do Recurso Solar

O método do mês crítico consiste na realização do dimensionamento do SFVI considerando as condições médias mais desfavoráveis para o sistema. Então, o dimensionamento é feito tomando-se como base o mês de pior irradiação solar no ano (PINHO; GALDINO, 2014).

Para estimativa da irradiação no plano que maximize a geração no período do inverno, é necessário utilizar um programa como o RADIASOL que calcula a irradiação para diferentes ângulos de inclinação e desvio azimutal, a partir dos valores de irradiação global horizontal (banco de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar).

3.1.2 Estimativa do Consumo Médio Diário de Energia

Para definir o consumo médio do local de estudo, é necessário ter conhecimento dos equipamentos instalados, da sua potência e período de utilização no dia. Segundo Urbanetz (2016), a fórmula (Equação 1) para calcular o consumo de uma residência é:

$$E = P_e \cdot N_d \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

E – Consumo médio diário de energia em Wh/dia;

P_e – Potência nominal do equipamento em W (dado pelo fabricante);

N_d – Número médio de horas diárias de utilização do equipamento.

3.1.3 Dimensionamento dos Painéis Fotovoltaicos

A partir do valor do consumo a ser atendido, é possível definir a potência necessária do painel fotovoltaico para atender à demanda energética. Segundo Urbanetz (2016) a Equação 2 para calcular a potência necessária é a descrita na Equação 2:

$$P_{FV} = \frac{E \cdot G}{H_{TOT} \cdot R} \cdot F_{CARREG} \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

P_{FV} – Potência instalada necessária em Wp

E – Energia a ser gerada (demanda) em Wh

G – Irradiância na condição STC (1.000 W/m²)

H_{TOT} – Irradiação diária em Wh/m² (mínima considerando o mês crítico)

R – Rendimento do conjunto de equipamentos do SFV (65% a 75%)

F_{CARREG} – Fator de carregamento das baterias (ex. 1,1)

Segundo Urbanetz (2016), a estimativa da área necessária para atender essa potência instalada, pode ser calculada através da Equação 3 que segue:

$$A = \left(\frac{P_{FV}}{E_{FF}} \right) \cdot 100 \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde:

A – Área a ser ocupada em m²

P_{FV} – Potência instalada necessária em kWp

E_{FF} – Eficiência da tecnologia em %

3.1.4 Dimensionamento dos Inversores

A escolha do inversor depende diretamente da escolha do painel fotovoltaico e arranjo adotado e vice-versa. A Tabela 6 apresenta um resumo dos principais fatores que devem ser levados em consideração:

Tabela 6: Características mínimas para escolha do inversor e painel FV

| PAINES FOTOVOLTAICOS | INVERSORES |
|--|---|
| Potência Total | |
| <p style="text-align: center;">$P_{CC} = n \cdot P_{FV}$ Eq. (4)</p> <p>Onde: P_{CC} – Potência total em Wp n – Número de painéis P_{FV} – Potência nominal do painel W</p> | <p>Potência total do arranjo deve ser inferior à potência máxima admitida pelo inversor</p> |
| Tensão Circuito Aberto | |
| <p style="text-align: center;">$V_{m\acute{a}x} = n_{serie} \cdot V_{OC_{painel}}$ Eq. (5)</p> <p>Onde: $V_{m\acute{a}x}$ – Tensão de circuito aberto em V n_{serie} – Número de painéis em série V_{OC} – Tensão circuito aberto painel</p> | <p>Tensão de circuito aberto deve ser inferior à tensão máxima CC admitida pelo inversor</p> |
| Tensão Máxima Potência | |
| <p style="text-align: center;">$V_{MPP} = n_{serie} \cdot V_{MPP_{painel}}$ Eq. (6)</p> <p>Onde: V_{MPP} – Tensão de máxima potência em V n_{serie} – Número de painéis em série $V_{MPP_{painel}}$ – Tensão de potência máxima do painel</p> | <p>O inversor deve trabalhar com range de tensão que inclua a tensão de máxima potência calculada do sistema.</p> |
| Corrente Máxima Potência | |
| <p style="text-align: center;">$I_{MPP} = n_{paralelo} \cdot I_{MPP_{painel}}$ Eq. (7)</p> <p>Onde: I_{MPP} – Corrente de Máxima Potência em A $n_{paralelo}$ – Número de painéis em paralelo $I_{MPP_{painel}}$ – Corrente de máxima potência do painel</p> | <p>Inversor deve ter capacidade para suportar a máxima corrente calculada para o sistema.</p> |

Fonte: Adaptado de Urbanetz, 2016

3.1.5 Dimensionamento do Banco de Baterias

Segundo Urbanetz (2016), o dimensionamento do banco de baterias pode ser realizado a partir dos resultados das equações 8 à 12:

- ✓ Consumo em Ah/dia:

$$\text{Consumo em Ah/dia} = \frac{\text{Consumo diário de energia (Wh/dia)}}{\text{Tensão no barramento CC}} \quad \text{Eq. (8)}$$

- ✓ Capacidade preliminar não ajustada:

$$\text{Capacidade preliminar (Ah)} = \text{Consumo em Ah/dia} \times \text{dias de autonomia} \quad \text{Eq. (9)}$$

- ✓ Capacidade ajustada em função da máxima profundidade de descarga:

$$\text{Capacidade preliminar (Ah)} \times \text{máx. prof. de descarga} \quad \text{Eq. (10)}$$

- ✓ Capacidade ajustada em função da máxima profundidade de descarga diária:

$$\text{Consumo em (Ah/dia)} \times \text{máx. prof. de descarga diária} \quad \text{Eq. (11)}$$

- ✓ Capacidade ajustada em função da profundidade de descarga: maior valor entre capacidade ajustada em função da máxima profundidade de descarga e da máxima profundidade de descarga diária

- ✓ Capacidade ajustada em função do fator de segurança:

$$\text{Capacidade ajustada (Ah)} \times \text{fator de segurança} \quad \text{Eq. (12)}$$

O banco de baterias deve atender no mínimo à capacidade ajustada em função do fator de segurança.

3.1.6 Dimensionamento do Controlador de Carga

A partir das informações do arranjo dos painéis, do inversor e do banco de baterias, é possível definir o controlador de carga que melhor se adequa ao sistema.

Algumas informações são essenciais como:

- ✓ Intervalo de tensão do controlador de carga deve atender à tensão nominal de saída do banco de baterias;
- ✓ Máxima tensão do controlador deve ser superior à tensão de circuito aberto do arranjo dos painéis FV;
- ✓ Corrente admitida pelo controlador deve ser superior à corrente de máxima potência do sistema;

3.1.7 Dimensionamento dos Condutores

Em um sistema fotovoltaico isolado, os condutores são divididos em 3 trechos:

1. TRECHO 1 – conexão entre painéis, controlador de carga e baterias
2. TRECHO 2 – conexão entre banco de baterias e inversor
3. TRECHO 3 – conexão entre inversor e carga CA

Segundo Urbanetz (2016), o dimensionamento dos condutores se dá pela fórmula dada na Equação 13:

$$S_{cond} = \left(\frac{2.l.P.0,0178}{V^2.\Delta V} \right) \quad \text{Eq. (13)}$$

Onde:

S_{cond} – Área da seção transversal do condutor em mm²;

l – Comprimento do condutor em m;

P – Potência do painel ou inversor em W;

V – Tensão de operação CC ou CA em V;

ΔV – Queda de tensão admissível em %.

Para o dimensionamento do trecho 1 são considerados os dados de potência total dos painéis fotovoltaicos e tensão de operação do barramento CC.

Para o dimensionamento do trecho 2 são considerados os dados de potência do inversor e tensão de operação do barramento CC.

Para o dimensionamento do trecho 3 são considerados os dados de potência do inversor e tensão de operação do barramento CA.

3.2 DIMENSIONAMENTO DE SFVCR

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede dispensam os sistemas acumuladores de energia (banco de baterias) normalmente utilizados em instalações solares fotovoltaicas do tipo isolada, reduzindo assim consideravelmente o custo total da instalação. Além disso, contam com a rede elétrica como um *backup* quando a demanda excede a geração, não sendo necessário superdimensionar o sistema para

atender a demanda sob períodos prolongados de baixa incidência solar (RÜTHER, 2004).

Para dimensionamento da potência do SFVCR, é importante ter o entendimento do sistema de compensação regulamentado na região, questões tarifárias, e os tributos envolvidos (PINHO; GALDINO, 2014). No caso da energia gerada ser superior à energia consumida, a distribuidora cobrará, o valor referente ao custo de disponibilidade ou demanda contratada. Logo, para se dimensionar o gerador de forma otimizada, deve-se levantar o consumo médio diário anual da edificação (Wh/dia) descontando o valor da disponibilidade mínima de energia.

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede têm grande potencial para instalação em ambientes urbanos, com geração próxima ao ponto de consumo minimizando os custos e perdas em transmissão. Os aproveitamentos podem ser de grande ou pequeno porte, conforme mostrado na Figura 20.

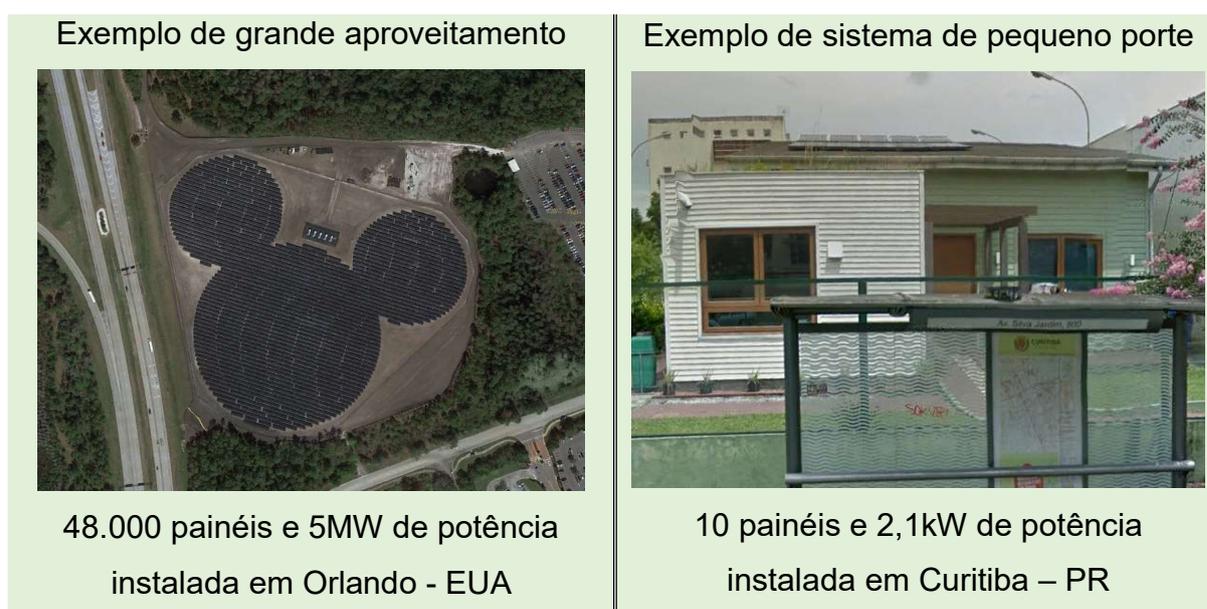


Figura 20: Exemplos de sistemas fotovoltaicos conectados à rede

Fonte: Google Earth (2017), DUKE ENERGY (2017), URBANETZ, CASAGRANDE, (2012).

Os sistemas fotovoltaicos possuem elevada confiabilidade e operam de forma limpa e silenciosa (URBANETZ; CASAGRANDE, 2012). O sistema instalado no Escritório Verde (EV) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) é um exemplo de SFVCR de pequeno porte com 2,1kWp de potência instalada:



Figura 21: Vista frontal do EV de UTFPR e detalhe dos painéis e inversor

Fonte: URBANETZ e CASAGRANDE, (2012).

O dimensionamento de um SFVCR difere do SFVI, pois no conectado à rede não é necessário instalar banco de baterias. As demais etapas são similares.

3.2.1 Estimativa do Recurso Solar

No sistema fotovoltaico conectado à rede utiliza-se a média de irradiação diária como base do cálculo do dimensionamento dos painéis e inversores.

Se existe a possibilidade de instalar os painéis nas condições ótimas de aproveitamento dos raios solares (inclinação igual latitude e voltado para o Norte), a irradiação média anual pode ser retirada diretamente do banco de dados do plano inclinado do Atlas Brasileiro de Energia Solar.

Se for necessário instalar os painéis em qualquer outra condição de inclinação ou desvio, será necessário estimar a irradiação no plano desejado utilizando um programa como o RADIASOL, que calcula a irradiação para diferentes ângulos de

inclinação e desvio azimutal, a partir dos valores no plano global horizontal (banco de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar).

3.2.2 Estimativa do Consumo Médio Diário de Energia

A estimativa de consumo médio do local de estudo é realizada da mesma maneira que indicada no 3.1.2, na Equação 1.

3.2.3 Dimensionamento dos Painéis Fotovoltaicos

Para o SFVCR o dimensionamento dos painéis fotovoltaicos é feito de maneira diferenciada, já que não tem o item de fator de carregamento das baterias e o valor de irradiação (H_{TOT}) é o valor médio anual, e no SFVI é adotado o valor mínimo. Segundo Urbanetz (2016), a potência instalada dos painéis se dá pela Equação 14:

$$P_{FV} = \frac{E.G}{H_{TOT}.PR} \quad \text{Eq. (14)}$$

Onde:

- P_{FV} – Potência instalada necessária em Wp
- E – Energia a ser gerada (demanda) em Wh
- G – Irradiância na condição STC (1.000 W/m²)
- H_{TOT} – Irradiação média diária em Wh/m²
- PR – *Performance ratio* do SFVCR (70% a 80%)

Segundo Urbanetz (2016), a estimativa da área necessária para atender essa potência instalada, pode ser calculada através da Equação 3 do item 3.1.3.

3.2.4 Dimensionamento dos Inversores

Da mesma maneira como descrito no item 3.1.4, a escolha do inversor depende diretamente da escolha do painel fotovoltaico e arranjo adotado e vice-versa, de acordo com requisitos descritos na Tabela 6.

3.2.5 Dimensionamento dos Condutores

Em um sistema fotovoltaico conectado à rede, os condutores são divididos em 2 trechos:

1. TRECHO 1 – conexão entre painéis e inversor
2. TRECHO 2 – conexão entre inversor e carga CA

Segundo Urbanetz (2016), o dimensionamento dos condutores na metodologia adotada, se dá pela Equação 13.

No trecho 1, são utilizadas: potência dos painéis fotovoltaicos e tensão de operação CC.

No trecho 2, são utilizadas: potência do inversor e tensão de operação no barramento CA.

4 TUTORIAL DE UTILIZAÇÃO DA FERRAMENTA

A ferramenta foi elaborada em formato Excel 2016 (xlsm), sendo que seu arquivo possui aproximadamente 70MB e seu *Download* pode ser realizado através do link: <<http://nataliafaria.me/energiasolar>>. Para facilitar o entendimento dos processos envolvidos na utilização da ferramenta criada, e sua funcionalidade, o dimensionamento foi subdividido em 7 etapas, conforme visto no esquema ilustrado na Figura 22.

1. Local de Interesse - Escolha do local onde pretende-se instalar o sistema, através das coordenadas do local, ou cidade da residência por exemplo. Ao escolher o local, a ferramenta irá trazer os valores de irradiação do banco de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar no plano global e inclinado.
2. Tipo de SFV - Existe a possibilidade de dimensionamento diferenciado para sistemas fotovoltaico conectados à rede (SFVCR) e sistemas fotovoltaico isolados (SFVI).
3. Dados de Irradiação - Caso seja necessário estimar a irradiação em um plano diferente do global ou inclinado, é necessário utilizar um programa adicional para realizar essa avaliação.
4. Painéis FV - A escolha dos painéis fotovoltaicos e de sua configuração deve ser feita levando-se em consideração os produtos disponíveis no mercado que atendam à demanda energética. Painéis e inversores devem ser escolhidos em conjunto, pois as suas características devem ser compatíveis.
5. Inversores - Escolha do inversor é influenciada diretamente pelo arranjo dos painéis.
6. Banco de baterias - Estimativa do banco de baterias a partir da informação de consumo de energia e configuração do sistema.
7. Condutores - Dimensionar condutores necessários para atender a queda de tensão máxima admitida pelo sistema.

LOCAL DE INTERESSE

Definir local para instalação do sistema

Pesquisados pelas coordenadas geo (lat e long)

ou

Pesquisa por Estado e Município



TIPO DE SFV

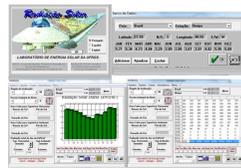
Escolher tipo de dimensionamento SFVI ou SFVCR



DADOS IRRADIAÇÃO

Os dados de irradiação do banco de dados do Atlas Brasileiro serão disponibilizados

Caso seja necessário instalação em outras condições necessário RADIASOL para estimativa dos dados de irradiação



| MÊS | H _{opt} (h) | H _{opt} (condições não ideais) (h) | E (kWh/m²) |
|-------|----------------------|---|------------|
| jan | 5,71 | 5,238 | 114 |
| fev | 5,54 | 5,124 | 104 |
| mar | 5,11 | 4,868 | 106 |
| abr | 4,54 | 4,57 | 96 |
| mai | 3,79 | 4,066 | 88 |
| jun | 2,89 | 3,764 | 79 |
| jul | 2,85 | 3,53 | 77 |
| ago | 3,67 | 4,312 | 94 |
| set | 3,97 | 4,194 | 88 |
| out | 4,82 | 4,758 | 103 |
| nov | 5,95 | 5,492 | 115 |
| dez | 5,89 | 5,328 | 116 |
| TOTAL | 4,45 | 4,604 | 1.179 |



PAINÉIS FV

Possibilidade de realizar uma estimativa inicial de potência instalada necessária para atender a demanda

Escolha do painel comercialmente disponível



| Modelo | Voltagem (V) | Potência (Wp) | Comprimento (m) | Largura (m) | Área (m²) |
|----------|--------------|---------------|-----------------|-------------|-----------|
| Modelo 1 | 12V | 100W | 1,0 | 0,5 | 0,5 |
| Modelo 2 | 24V | 200W | 1,5 | 0,75 | 1,125 |
| Modelo 3 | 48V | 400W | 2,0 | 1,0 | 2,0 |

INVERSORES

Escolha do inversor que se adeque ao painel e arranjo escolhido

Talvez necessário mudar o painel ou configuração para compatibilizar o SF



| Modelo | Voltagem (V) | Potência (Wp) | Comprimento (m) | Largura (m) | Área (m²) |
|----------|--------------|---------------|-----------------|-------------|-----------|
| Modelo 1 | 12V | 100W | 1,0 | 0,5 | 0,5 |
| Modelo 2 | 24V | 200W | 1,5 | 0,75 | 1,125 |
| Modelo 3 | 48V | 400W | 2,0 | 1,0 | 2,0 |

BANCO DE BATERIAS

No caso de SFVI é necessário um sistema de armazenamento de energia

Estimativa da capacidade das baterias para atender à demanda e com isso dimensionar o banco

| Modelo | Voltagem (V) | Capacidade (Ah) | Potência (Wp) | Comprimento (m) | Largura (m) | Altura (m) |
|----------|--------------|-----------------|---------------|-----------------|-------------|------------|
| Modelo 1 | 12V | 100Ah | 1200W | 1,0 | 0,5 | 0,5 |
| Modelo 2 | 24V | 200Ah | 4800W | 1,5 | 0,75 | 0,75 |
| Modelo 3 | 48V | 400Ah | 19200W | 2,0 | 1,0 | 1,0 |



CONDUTORES

Estimativa dos condutores



| TRECHO 1 - Painel FV/Con Capa/Bateria | Comprimento do condutor (m) | Potência caso do Painel FV (Wp) | Tensão do bancoamento CC (V) | Queda de tensão admittida (%) |
|---------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 3 | 100 | 1000 | 12 | 1,16 |

| TRECHO 2 - Bateria / Inversor | Comprimento do condutor (m) | Potência Inversor (Wp) | Tensão do bancoamento CC (V) | Queda de tensão admittida (%) |
|-------------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 3 | 100 | 4000 | 12 | 2,32 |

| TRECHO 3 - Condutor CA | Comprimento do condutor (m) | Potência Inversor (Wp) | Tensão do bancoamento CA (V) | Queda de tensão admittida (%) |
|------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 3 | 100 | 4000 | 120 | 0,17 |

Figura 22: Esquema das etapas de dimensionamento de um SFV

Em seguida exemplos de dois dimensionamentos de sistemas fotovoltaicos, um isolado e outro conectado à rede como maneira de ilustrar os passos a serem seguidos desde a tela inicial, até a emissão dos relatórios finais.

4.1 ESCOLHA DO LOCAL DE INTERESSE

A Figura 23 Mostra a tela inicial da ferramenta, onde o usuário poderá escolher como pretende pesquisar os dados de radiação. Existem duas opções:

- ✓ Coordenadas georeferenciadas em graus decimais: essa escolha pode ser utilizada caso o usuário tenha conhecimento da coordenada que deseja pesquisar;
- ✓ Estado e Cidade: Nesse caso o usuário não precisa necessariamente ter as coordenadas, apenas a cidade de interesse.

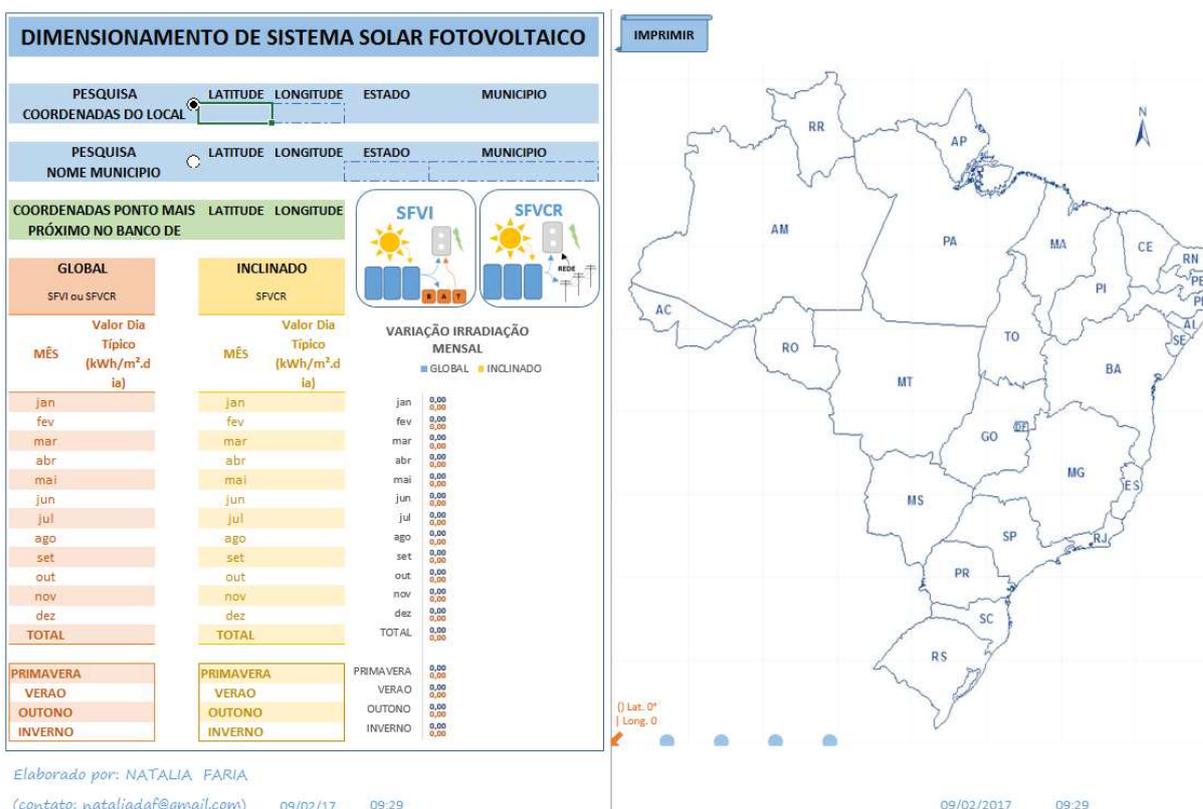


Figura 23: Tela inicial da ferramenta

A Figura 24 apresenta o exemplo de pesquisa por coordenada do local. O usuário deverá entrar com as informações de latitude e longitude em graus decimais e a ferramenta irá informar qual o Município e Estado para essa coordenada:

| DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO | | | | |
|---|----------|-----------|--------|-----------|
| PESQUISA | LATITUDE | LONGITUDE | ESTADO | MUNICIPIO |
| COORDENADAS DO LOCAL | -25,4° | -49,3° | PR | CURITIBA |
| PESQUISA | LATITUDE | LONGITUDE | ESTADO | MUNICIPIO |
| NOME MUNICIPIO | | | | |

Figura 24: Pesquisa por coordenadas do local

A Figura 25 apresenta o exemplo de pesquisa por nome do Município. Nesse caso deve-se inserir as informações de Estado e Município e a ferramenta irá informar as coordenadas correspondentes para essa localidade:

| DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO | | | | |
|---|----------|-----------|--------|-----------|
| PESQUISA | LATITUDE | LONGITUDE | ESTADO | MUNICIPIO |
| COORDENADAS DO LOCAL | | | | |
| PESQUISA | LATITUDE | LONGITUDE | ESTADO | MUNICIPIO |
| NOME MUNICIPIO | -13,01° | -38,49° | BA | SALVADOR |

Figura 25: Pesquisa por Município

Após inserir as informações da localização de interesse, a ferramenta irá buscar no banco de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar o ponto mais próximo, e indicar seus valores típicos de irradiação diária (kWh/m².dia) em cada mês e estações do ano. Será gerado também um gráfico comparativo entre as irradiações no plano global e inclinado conforme demonstrado na Figura 26.

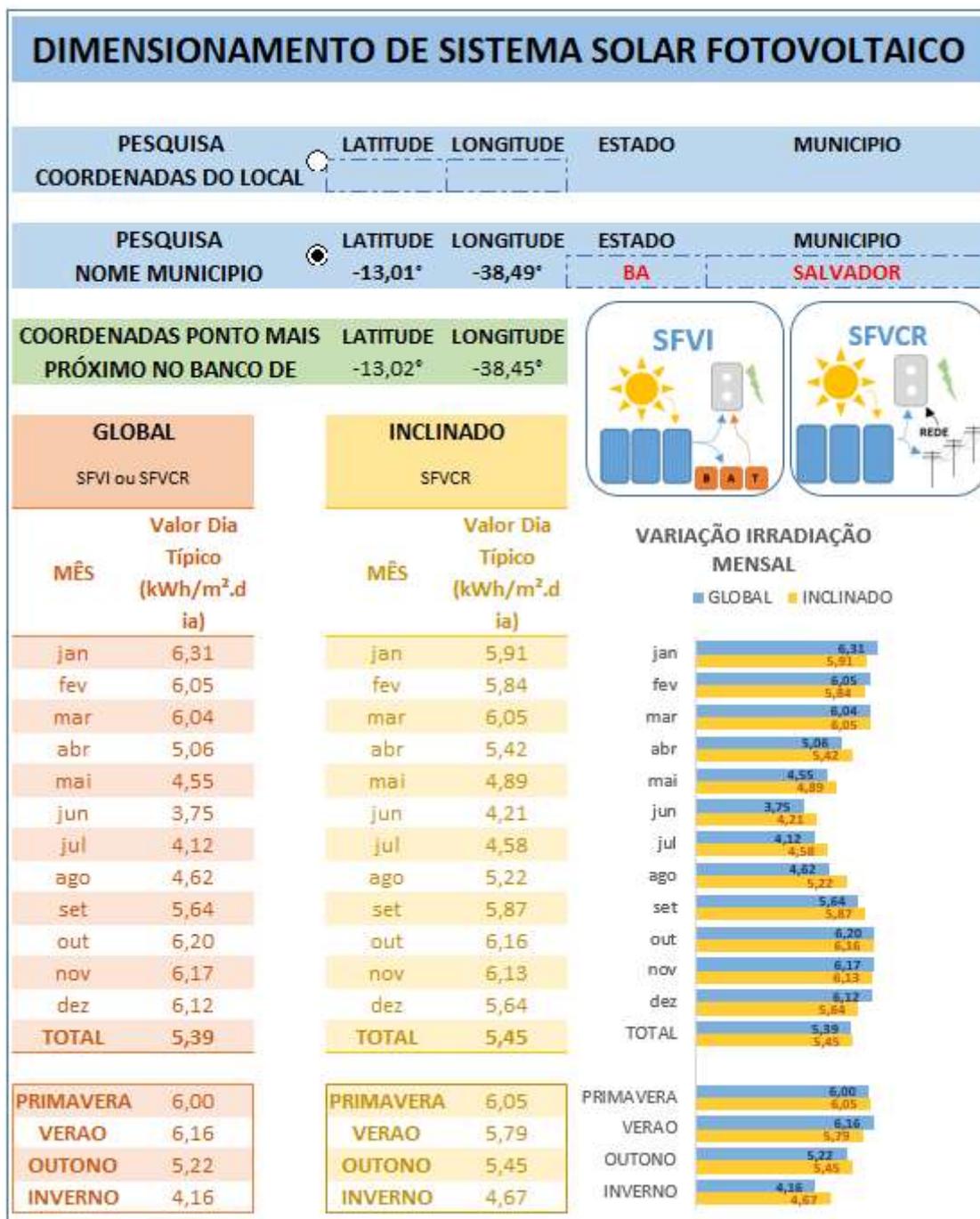


Figura 26: Valores de Irradiação no plano Global e Inclinado

Também terá uma indicação de localização do ponto escolhido no mapa do Brasil e quais são os pontos mais próximos do local escolhido, conforme Figura 27.

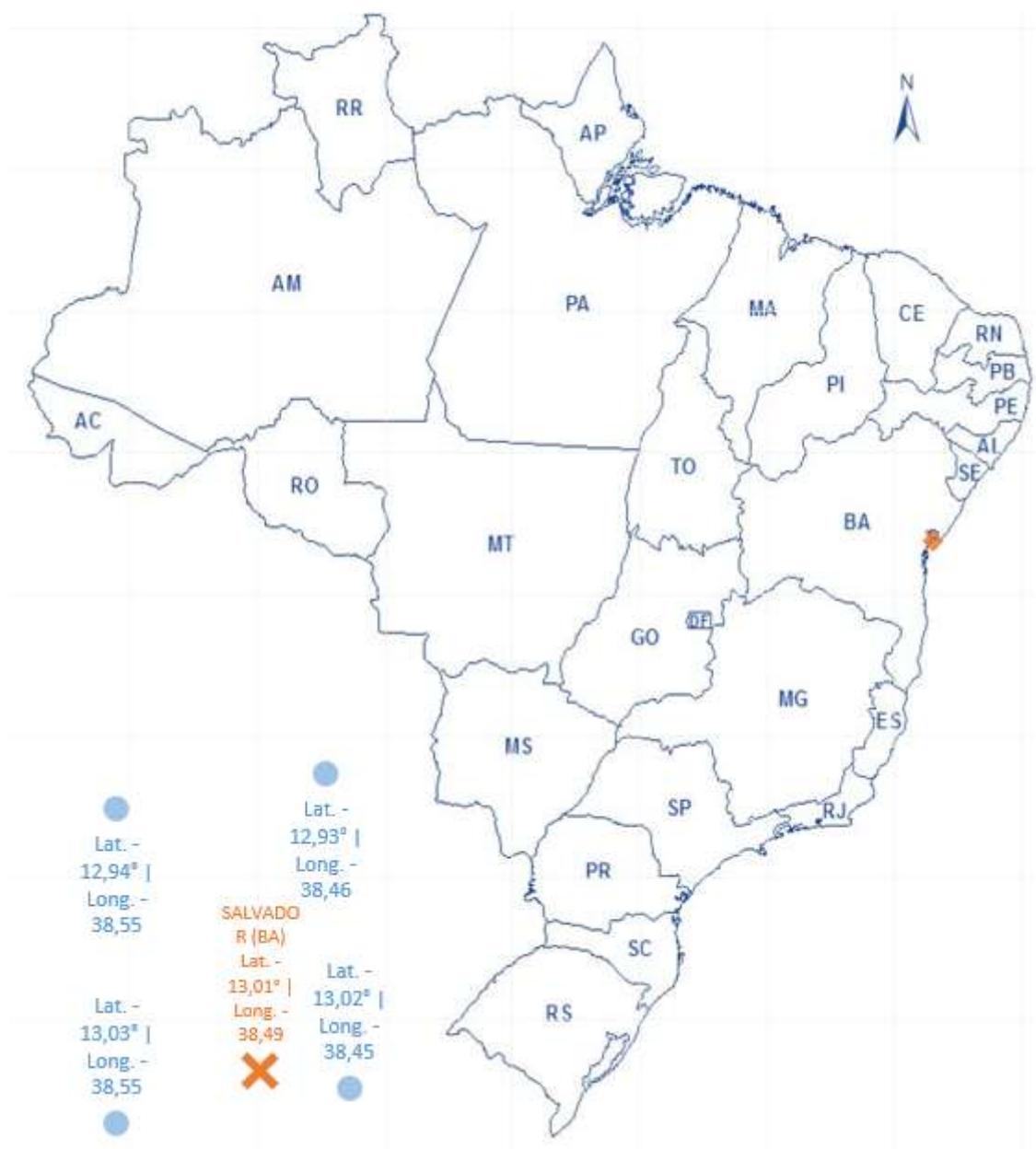


Figura 27: Localização geográfica do ponto escolhido

É possível gerar um arquivo em formato PDF com os resultados obtidos nessa página inicial clicando no botão IMPRIMIR (na parte superior central da página), como indicado na Figura 28.

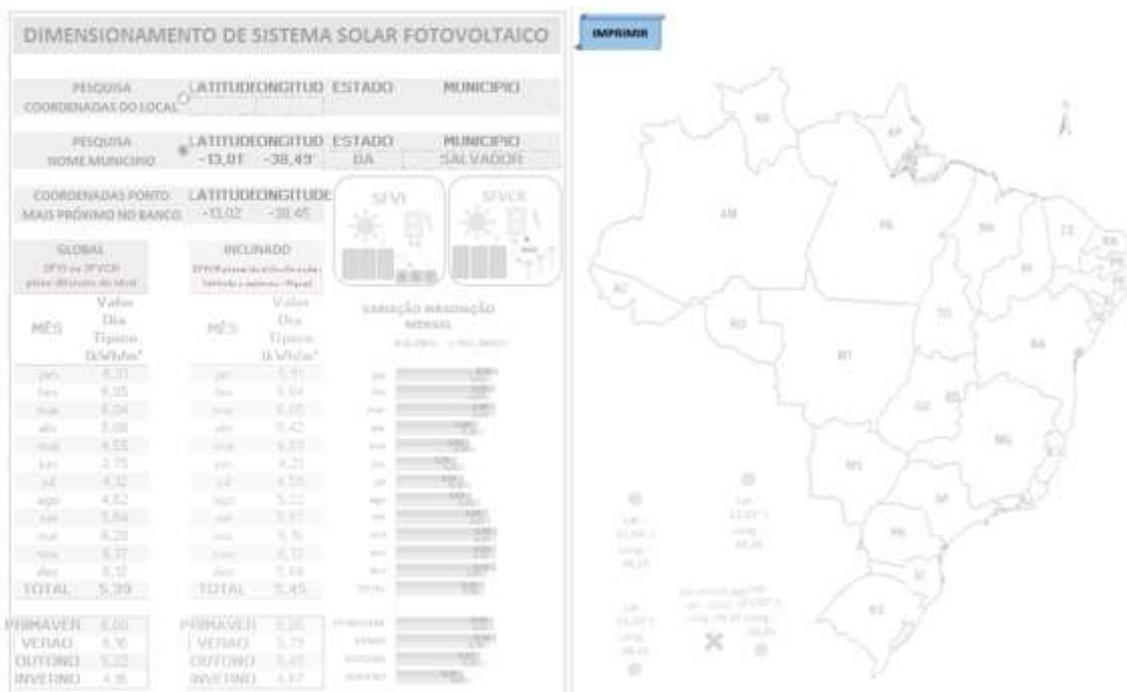


Figura 28: Botão Imprimir página inicial

O arquivo será salvo em formato PDF (Figura 29) na mesma pasta de origem onde está salvo o arquivo principal Excel, com o nome, data e hora conforme exemplo que segue: “*Dimensionamento SFVI e SFVCR – Inicial – dd-mmm-aaaa hh-mm*”.

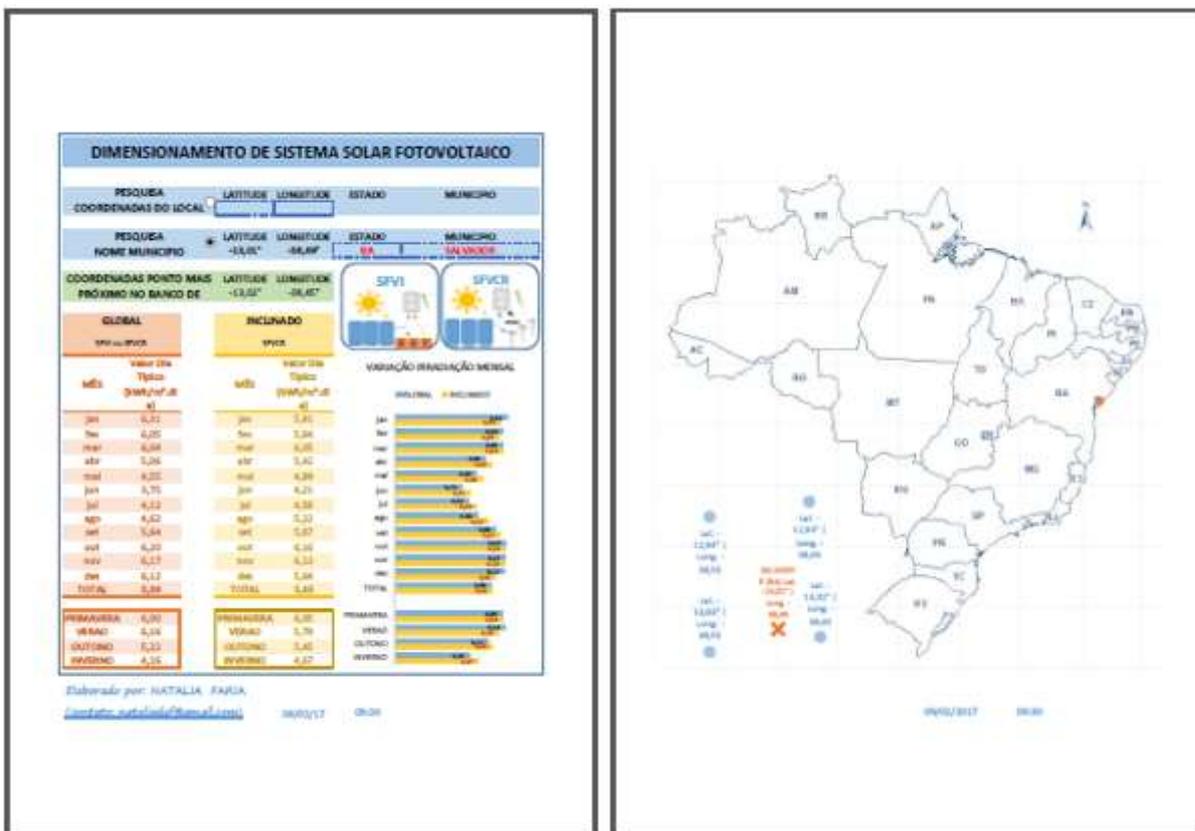


Figura 29: Exemplo de relatório gerado em formato PDF

Após escolha do local de interesse, é possível escolher se será um dimensionamento de um sistema fotovoltaico isolado ou conectado à rede, conforme Figura 30.

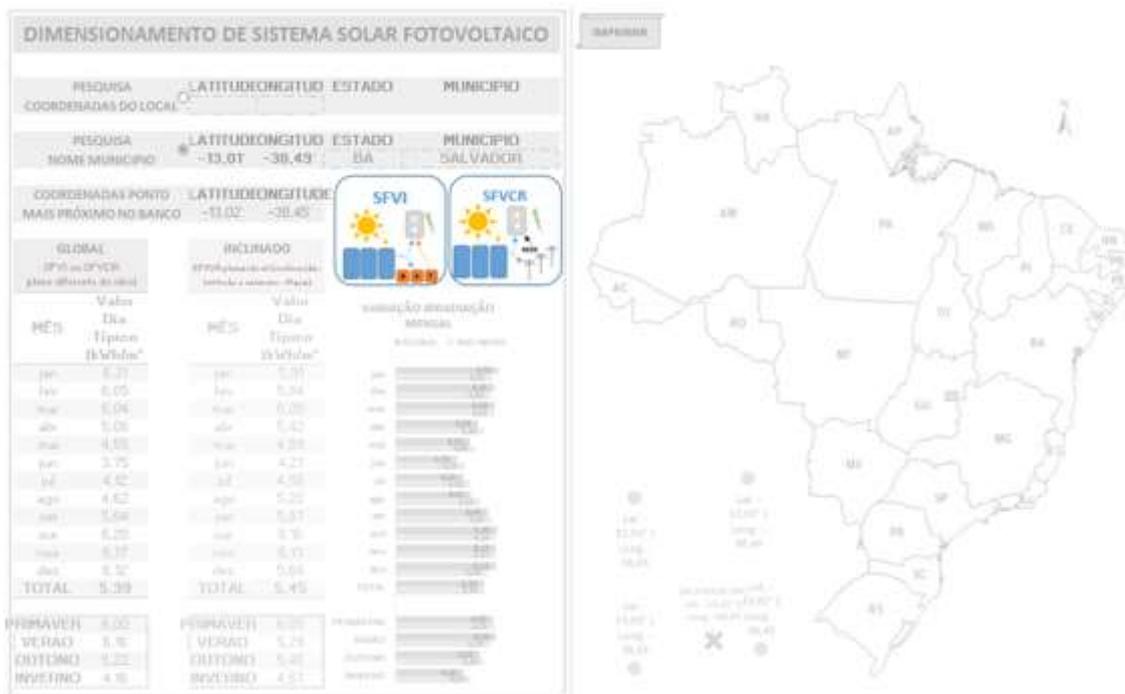


Figura 30: Escolha dimensionamento SFVI ou SFVCR

4.2 DIMENSIONAMENTO DE UM SFVI

Para ilustrar, inicialmente, segue um exemplo hipotético de dimensionamento de um sistema fotovoltaico isolado em Florianópolis – SC, conforme mostrado na Figura 31 e Figura 32.

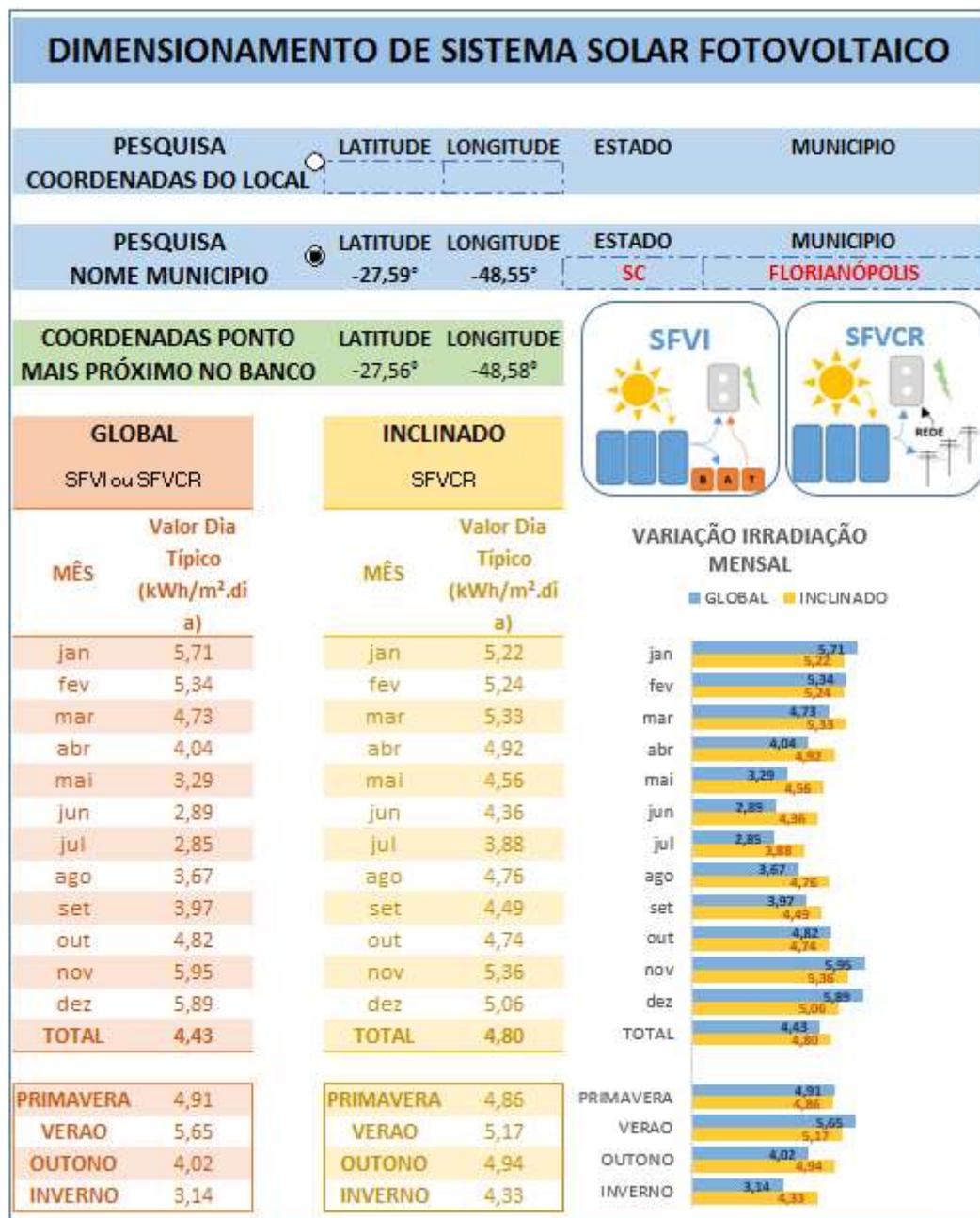


Figura 31: Valor típico de irradiação em Florianópolis - SC

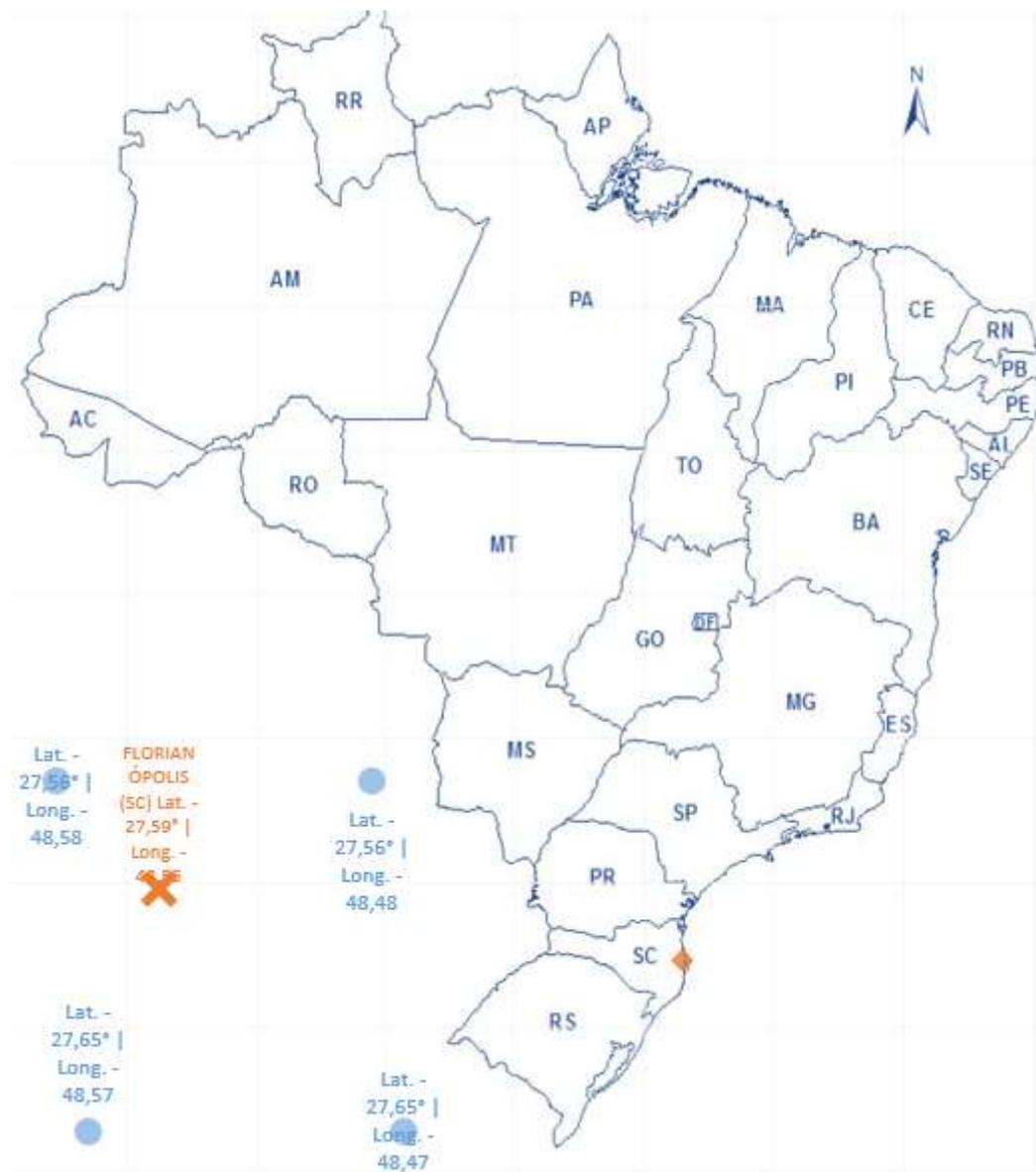


Figura 32: Localização ponto escolhido

Para seguir com o dimensionamento, existe um atalho que leva à planilha de Sistema Fotovoltaico Isolado (SFVI), como visto na Figura 33:

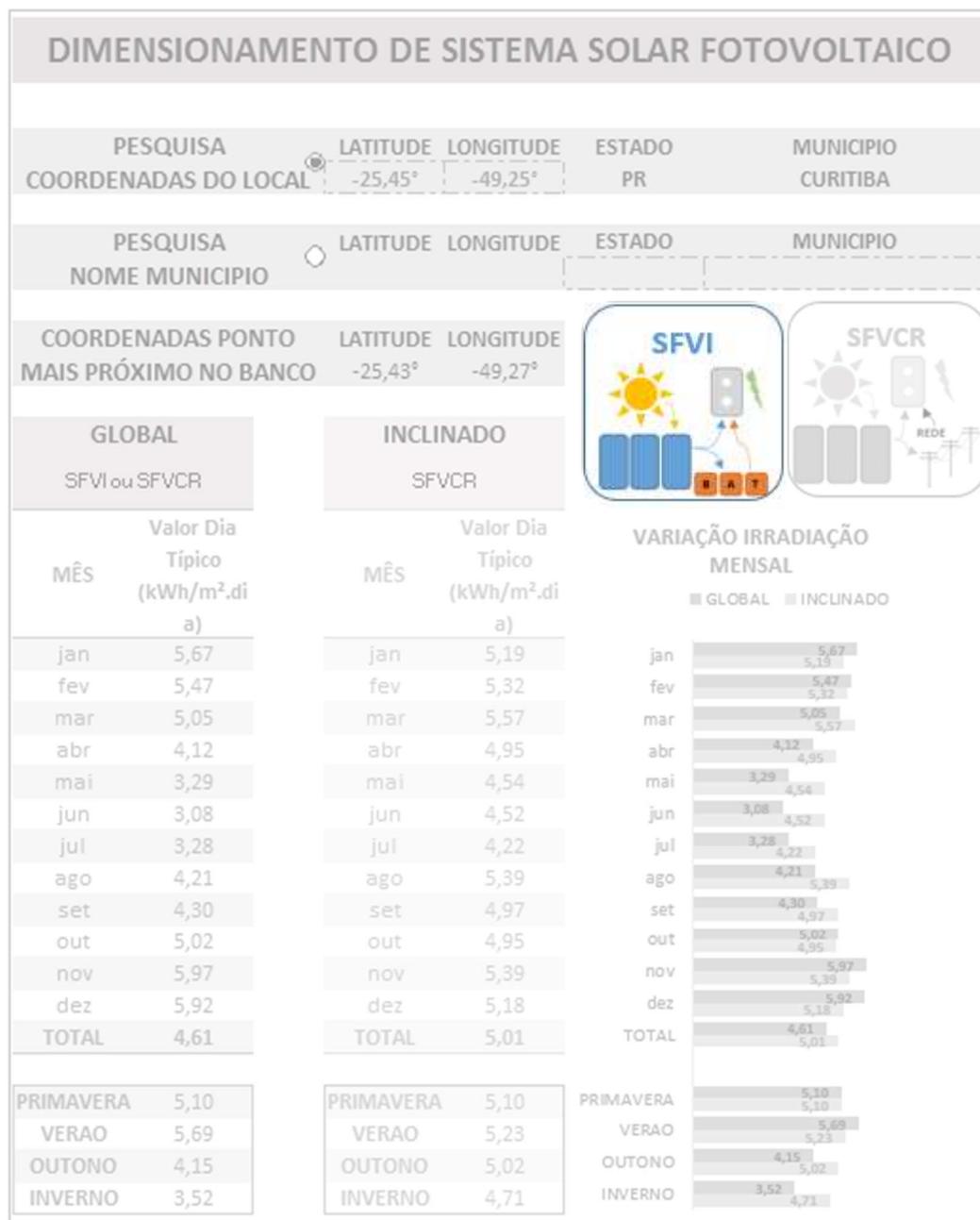


Figura 33: Atalho Dimensionamento SFVI

Visando maximizar a geração no período do inverno, já que se trata de um sistema fotovoltaico isolado, foi considerado que a inclinação dos painéis seria igual à latitude do local adicionando 10°, ou seja, 38°. Para obter a estimativa de irradiação é necessário utilizar um *software* complementar, nesse caso será utilizado como exemplo, o RADIASOL.

O RADIASOL estima os valores de irradiação para diferentes ângulos de inclinação e desvio azimutal. Para o caso em questão, é necessário inserir os dados

de irradiação Global, com inclinação igual 38° e desvio azimutal 0° . Têm-se o seguinte resultado, conforme apresentado na Figura 34 e Figura 35.

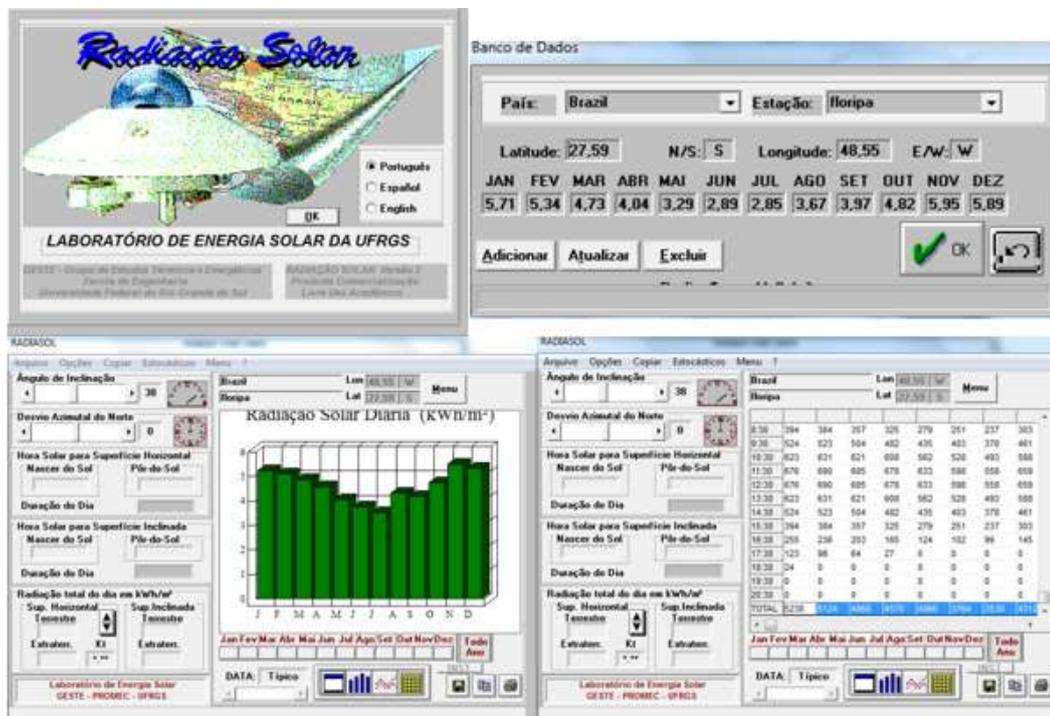


Figura 34: Telas RADIASOL

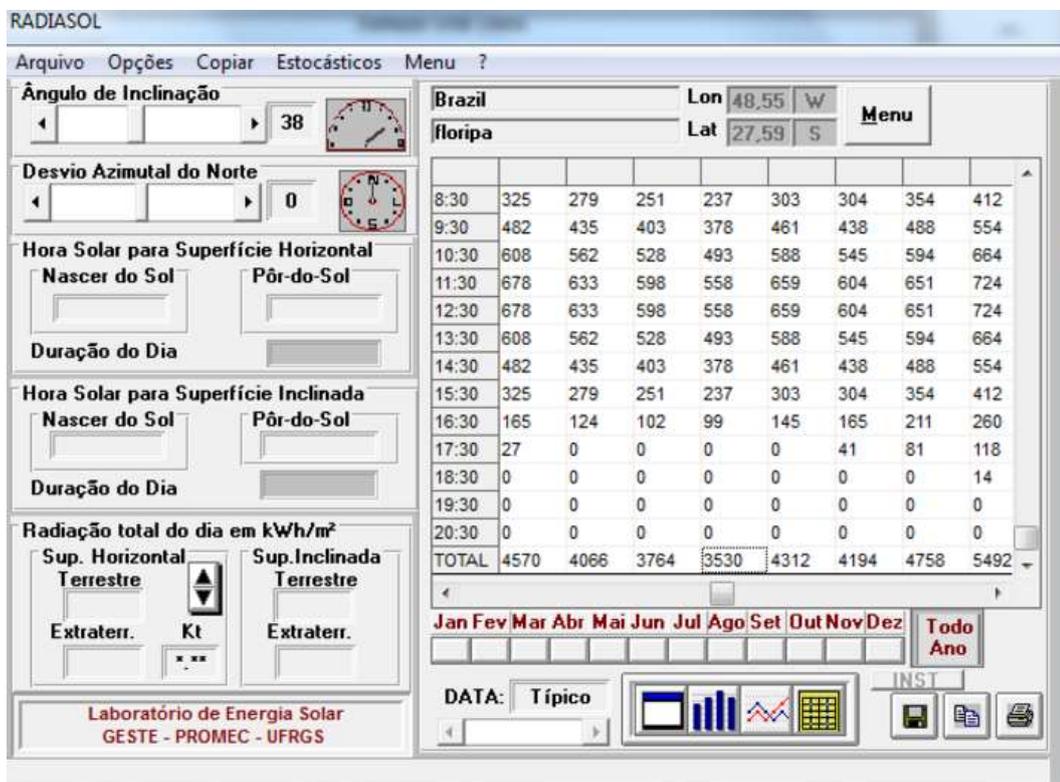


Figura 35: Resultado RADIASOL para Florianópolis inclinação 38° e azimute 0°

Os resultados finais de irradiação obtidos no RADIASOL devem ser inseridos na coluna conforme Figura 36 (dados em kWh/m².dia):



Figura 36: Dados RADIASOL inseridos na ferramenta

Como se trata de um sistema fotovoltaico isolado, será considerado o mês com menor índice de irradiação, nesse caso, julho 3,53kWh/m².dia.

Para realizar uma estimativa inicial de potência instalada necessária para atender o consumo, na caixa “POTÊNCIA DO PAINEL FOTOVOLTAICO” deve-se inserir os dados de energia demandada diária, fator de carregamento diário das baterias e rendimento do sistema (Figura 37).

| POTÊNCIA DO PAINEL FOTOVOLTAICO | |
|---|---|
| Valores Adotados para projeto | |
| 2.200 | E - energia demandada pelas cargas diariamente (Wh/dia) |
| 3.530 | H_{TOT} - irradiação solar incidente no plano dos módulos FV (Wh/m ² .dia) |
| 1,1 | F_{CARREG} - fator de carregamento diário das baterias (ex: 1,1) |
| 70% | R - rendimento do conjunto de aparelhos e componentes do sistema (ex: 65%) |
| $P_{FV} =$ | 0,979 kWp |
| $P_{FV} = \frac{E \cdot G}{H_{TOT} \cdot R} \cdot F_{CARREG}$ | |

Figura 37: Potência painel fotovoltaico SFVI

É possível também ter uma estimativa da área em que o sistema irá ocupar inserindo a informação de eficiência de conversão da tecnologia que pretende ser utilizada (Figura 38).

| ESTIMATIVA DA ÁREA NECESSÁRIA PARA INSTALAR ESTA POTÊNCIA FV | | |
|--|--|----------------|
| 14% | EFF - eficiência de conversão da tecnologia fotovoltaica adotada (ex: 15%) | |
| A = | 7,0 | m ² |
| $A = \left(\frac{P_{FV}}{EFF} \right) \times 100$ | | |

Figura 38: Estimativa da área necessária para instalar o sistema isolado

Tendo conhecimento da potência estimada do sistema para atender o consumo da residência, pode-se seguir em frente e escolher o painel fotovoltaico. Existem duas opções:

- ✓ Escolher um dos painéis já disponíveis no banco de dados da ferramenta;
- ✓ Criar um novo painel de acordo com a necessidade.

Para inserir os dados de um novo painel fotovoltaico é necessário clicar no botão em formato de “+” em destaque na Figura 39:

| ESCOLHA PAINEL | | | | | |
|-------------------------|----------------|---------------------|---|---|----------------------------|
| PAINEL | ESCOLHA PAINEL | TIPO | - | | |
| POTÊNCIA | - | Número de Painéis | - | | Potência Total - |
| Tensão Circuito Aberto | - | Número Escolhido | | ✘ | Tensão Circuito Aberto - |
| Tensão Máxima Potência | - | Painéis em Série | | ✘ | Tensão Máxima Potência - |
| Corrente Curto Circuito | - | Painéis em Paralelo | - | | Corrente Máxima Potência - |
| COMPRIENTO | - | LARGURA | - | | ÁREA - |

Figura 39: Atalho para inserir informações de novos painéis

Informações básicas como nome do Painel, tipo de tecnologia, potência instalada, tensão e corrente devem ser inseridas na primeira coluna em branco nesse banco de dados, conforme Figura 40:

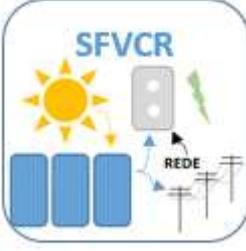
| | | | | |
|---|-------------------------|----------------|----------------|--|
|  | PAINEL | SPT280 | HR-250P | |
| | TIPO | POLICRISTALINO | POLICRISTALINO | |
|  | POT | 280 W | 250 W | |
| | Tensão Circuito Aberto | 44,8 V | 37,4 V | |
| | Tensão Máxima | 35,2 V | 30,0 V | |
| | Corrente Curto Circuito | 7,95 A | 8,79 A | |
| | Comprimento | 1675 mm | 1636 mm | |
| | Largura | 1001 mm | 992 mm | |
| | Peso | 22,0 kg | 19,5 kg | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

Figura 40: Inserir informações de novos painéis

Para retornar para a página de dimensionamento de sistema isolado, deve-se clicar no botão “SFVI” conforme ilustra a Figura 41:

| | | | | |
|---|-------------------------|----------------|----------------|--|
|  | PAINEL | SPT280 | HR-250P | |
| | TIPO | POLICRISTALINO | POLICRISTALINO | |
|  | POT | 280 W | 250 W | |
| | Tensão Circuito Aberto | 44,8 V | 37,4 V | |
| | Tensão Máxima | 35,2 V | 30,0 V | |
| | Corrente Curto Circuito | 7,95 A | 8,79 A | |
| | Comprimento | 1675 mm | 1636 mm | |
| | Largura | 1001 mm | 992 mm | |
| | Peso | 22,0 kg | 19,5 kg | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

Figura 41: Atalho painéis para retornar à página de dimensionamento SFVI

Após inseridos os dados necessários, pode-se então escolher qual painel deseja utilizar, (Figura 42).

| ESCOLHA PAINEL | | | | |
|-------------------------|----------------|---------------------|---|--------------------------|
| PAINEL | ESCOLHA PAINEL | TIPO | - | + |
| POTÊNCIA | ESCOLHA PAINEL | Número de Painéis | - | Potência Total |
| Tensão Circuito Aberto | ESCOLHA PAINEL | Número Escolhido | - | Tensão Circuito Aberto |
| Tensão Máxima Potência | ESCOLHA PAINEL | Painéis em Série | - | Tensão Máxima Potência |
| Corrente Curto Circuito | ESCOLHA PAINEL | Painéis em Paralelo | - | Corrente Máxima Potência |
| COMPRIENTO | - | LARGURA | - | ÁREA |
| | | | | |

Figura 42: Escolha do painel fotovoltaico

Após escolha do modelo do painel, será sugerido um número indicativo de painéis para atender à demanda de energia da residência. Pode-se, então, escolher a quantidade e o arranjo que será adotado tomando como base esse número, (Figura 43).

| ESCOLHA PAINEL | | | | |
|-------------------------|---------|---------------------|----------------|--------------------------|
| PAINEL | HR-250P | TIPO | POLICRISTALINO | + |
| POTÊNCIA | 250 W | Número de Painéis | 3,9 | Potência Total |
| Tensão Circuito Aberto | 37,4 V | Número Escolhido | 4 | Tensão Circuito Aberto |
| Tensão Máxima Potência | 30,0 V | Painéis em Série | 4 | Tensão Máxima Potência |
| Corrente Curto Circuito | 8,79 A | Painéis em Paralelo | 1 | Corrente Máxima Potência |
| COMPRIENTO | 1,636 m | LARGURA | ,992 m | ÁREA |
| | | | | 6,5 m ² |

Figura 43: Definição do número de painéis a ser adotado

Com finalidade de atualizar os gráficos iniciais de estimativa de geração mensal de energia com a configuração adotada, é necessário clicar no botão conforme destaque na Figura 44:

| ESCOLHA PAINEL | | | | |
|-------------------------|---------|---------------------|----------------|--------------------------|
| PAINEL | HR-250P | TIPO | POLICRISTALINO | + |
| POTÊNCIA | 250 W | Número de Painéis | 3,9 | Potência Total |
| Tensão Circuito Aberto | 37,4 V | Número Escolhido | 4 | Tensão Circuito Aberto |
| Tensão Máxima Potência | 30,0 V | Painéis em Série | 4 | Tensão Máxima Potência |
| Corrente Curto Circuito | 8,79 A | Painéis em Paralelo | 1 | Corrente Máxima Potência |
| COMPRIENTO | 1,636 m | LARGURA | ,992 m | ÁREA |
| | | | | 6,5 m ² |


ATUALIZAR POTÊNCIA PROJETO INICIAL

Figura 44: Atalho para atualizar a potência instalada do projeto

Na parte superior da página o dado de potência instalada do sistema será atualizado de acordo com a configuração adotada. A Figura 45 demonstra um exemplo do resultado encontrado:

SIMULAÇÃO ENERGIA SFVI

$$E = \frac{P_{FV} \cdot H_{TOT} \cdot R}{G \cdot F_{CARREG}}$$

Valores de Projeto

| | |
|------|--|
| 1,0 | P_{FV} - Potencia do painel FV (kW) |
| 3,53 | H_{TOT} - irradiação solar incidente no plano dos módulos FV (kWh/m ² .dia) |
| 70% | R - Rendimento do conjunto (ex. 65%) |
| 1,1 | F_{CARREG} - fator de carregamento diário das baterias (ex: 1,1) |

| | | |
|-----|--------|---------|
| E = | 2,25 | kWh/dia |
| | 67,39 | kWh/mês |
| | 819,92 | MWh/ano |

| MÊS | H_{TOT} Global [kWh/m ² .dia] | $H_{TOT} 2$ (condições não ideais) [kWh/m ² .dia] | E [kWh/mês] |
|-------|--|---|-------------|
| jan | 5,71 | 5,238 | 114 |
| fev | 5,34 | 5,124 | 104 |
| mar | 4,73 | 4,868 | 106 |
| abr | 4,04 | 4,57 | 96 |
| mai | 3,29 | 4,066 | 88 |
| jun | 2,89 | 3,764 | 79 |
| jul | 2,85 | 3,53 | 77 |
| ago | 3,67 | 4,312 | 94 |
| set | 3,97 | 4,194 | 88 |
| out | 4,82 | 4,758 | 103 |
| nov | 5,95 | 5,492 | 115 |
| dez | 5,89 | 5,328 | 116 |
| TOTAL | 4,43 | 4,604 | 1.179 |

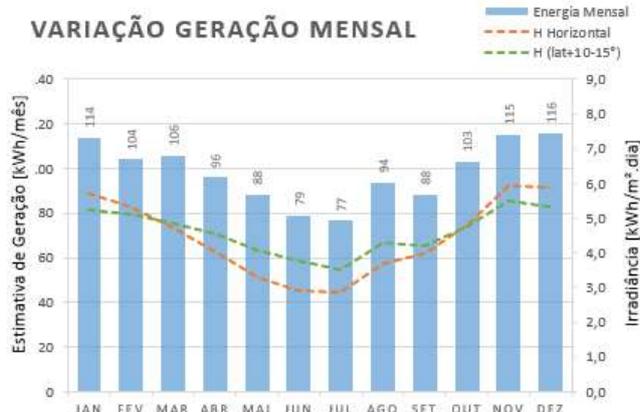


Figura 45: Resultado gráfico da estimativa de geração

Próximo passo é definir o inversor. Da mesma maneira que ocorre com o painel, é possível inserir dados de novos inversores, ou selecionar um que se encontra no banco de dados, conforme Figura 46, Figura 47, Figura 48 e Figura 49.

| ESCOLHA INVERSOR | | | | | |
|------------------|---|-----------------------|---|---------------------|---|
| INVERSOR: | | Potência Máxima C | - | Potência Nominal CA | - |
| | | Tensão Máxima CC | - | Tensão Nominal CA | - |
| ESCOLHA INVERSOR | + | Tensão Nominal CC | - | Frequência | - |
| | | Tensão Recomendada CC | - | Eficiência | - |
| | | Corrente Máxima C | - | Efi Euro | - |

Figura 46: Atalho para inserir informações de novos inversores

|  SFVI | INVERSOR | SMA Sunny Boy 4000LT | SMA Sunny Boy 5000LT |
|---|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | Potência Máxima CC | | 4200 W |
| Tensão Máxima CC | | 500,0 V | 1000,0 V |
| Tensão Nominal CC | | 125 V - 440 V | 245 V - 800 V |
| Tensão Recomendada CC | | 175 V - 440 V | |
| Corrente Máxima CC | | 2 x 15 A | 11 A |
| Potência Nominal CA | | 4000 W | 5000 W |
| Tensão Nominal CA | | 220 V - 240 V / 180 V - 280 V | 220 V - 380 V / 220 V - 400 V |
| Frequência | | 50 Hz, 60 Hz | 50 Hz, 60 Hz |
| Eficiência | | 97,0% | 98,1% |
| Efi Euro | | 96,4% | 97,5% |

Figura 47: Inserir informações de novos inversores

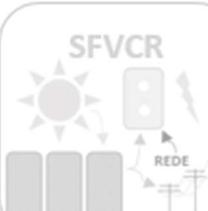
|  SFVI |  SFVCR | INVERSOR | SMA Sunny Boy 4000LT | SMA Sunny Boy 5000LT |
|--|--|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | | Potência Máxima CC | | |
| Tensão Máxima CC | | | 500,0 V | 1000,0 V |
| Tensão Nominal CC | | | 125 V - 440 V | 245 V - 800 V |
| Tensão Recomendada CC | | | 175 V - 440 V | |
| Corrente Máxima CC | | | 2 x 15 A | 11 A |
| Potência Nominal CA | | | 4000 W | 5000 W |
| Tensão Nominal CA | | | 220 V - 240 V / 180 V - 280 V | 220 V - 380 V / 220 V - 400 V |
| Frequência | | | 50 Hz, 60 Hz | 50 Hz, 60 Hz |
| Eficiência | | | 97,0% | 98,1% |
| Efi Euro | | | 96,4% | 97,5% |

Figura 48: Atalho inversores para retornar à página de dimensionamento SFVI

| ESCOLHA INVERSOR | |
|------------------|-----------------------|
| INVERSOR: | Potência Máxima C |
| | Tensão Máxima CC |
| | Tensão Nominal CC |
| | Tensão Recomendada CC |
| | Corrente Máxima C |

Figura 49: Escolha do inversor

A ferramenta também possibilita realizar estimativas relativo ao banco de baterias. É necessário entrar com as informações de tensão no barramento, autonomia desejada, máxima profundidade de descarga e fator de segurança (Figura 50).

| BATERIAS | | | |
|----------|--|--------|--|
| 2.200 | Consumo diário de energia (Wh/dia) | 45,83 | Consumo em Ah/dia |
| 48,0 V | Tensão do barramento CC (V) | 91,67 | Capacidade preliminar não ajustada |
| 2 | Autonomia desejada (dias) | 183,33 | Capacidade ajustada em função da máx. prof. de descarga |
| 50% | Máxima profundidade de descarga (%) | 229,17 | Capacidade ajustada em função da máx. prof. de descarga diária |
| 20% | Máxima profundidade de descarga diária (%) | 229,17 | Capacidade ajustada em função da profundidade de descarga |
| 10% | Fator de Segurança (Ex: 10%) | 252,08 | Capacidade ajustada em função do fator de segurança (Ah) |

Figura 50: Dimensionamento das baterias

Os condutores também podem ser estimados, sendo necessário apenas ter o comprimento dos trechos e queda de tensão máxima admitida (Figura 51):

| TRECHO 1 - Painel FV/Cont Carga/Bateria | | | |
|---|----------------------------------|--|------|
| 3 | Comprimento do condutor (m) | | |
| 1000 W | Potência total do Painel FV (Wp) | | 1,16 |
| 48,0 V | Tensão do barramento CC (V) | | |
| 4% | Queda de tensão admitida (%) | | |
| TRECHO 2 - Bateria / Inversor | | | |
| 2 | Comprimento do condutor (m) | | |
| 3000 W | Potência Inversor (Wp) | | 2,32 |
| 48,0 V | Tensão do barramento CC (V) | | |
| 4% | Queda de tensão admitida (%) | | |
| TRECHO 3 - Condutor CA | | | |
| 3 | Comprimento do condutor (m) | | |
| 3000 W | Potência Inversor (Wp) | | 0,17 |
| 220,0 V | Tensão do barramento CA (V) | | |
| 4% | Queda de tensão admitida (%) | | |

Figura 51: Dimensionamento dos condutores

Na parte superior da página existe um botão para gerar um relatório em formato PDF do trabalho realizado, conforme ilustra a Figura 52:

SIMULAÇÃO ENERGIA SFVI

IMPRIMIR

$$E = \frac{P_{FV} \cdot H_{TOT} \cdot R}{G \cdot F_{CARREG}}$$

Valores de Projeto

| | |
|------|--|
| 1,0 | P_{FV} - Potencia do painel FV (kW) |
| 3,53 | H_{TOT} - Irradiação solar incidente no plano dos módulos FV (kWh/m ² .dia) |
| 70% | R - Rendimento do conjunto (ex. 65%) |
| 1,1 | F_{CARREG} - fator de carregamento diário das baterias (ex: 1,1) |

| | | |
|-----|--------|---------|
| E = | 2,25 | kWh/dia |
| | 67,39 | kWh/mês |
| | 819,92 | MWh/ano |

| MÊS | H_{TOT} Global [kWh/m ² .dia] | H_{TOT} 2 (condições não ideais) [kWh/m ² .dia] | E [kWh/mês] |
|-------|--|---|-------------|
| jan | 5,71 | 5,238 | 114 |
| fev | 5,34 | 5,124 | 104 |
| mar | 4,73 | 4,868 | 106 |
| abr | 4,04 | 4,57 | 96 |
| mai | 3,29 | 4,066 | 88 |
| jun | 2,89 | 3,764 | 79 |
| jul | 2,85 | 3,53 | 77 |
| ago | 3,67 | 4,312 | 94 |
| set | 3,97 | 4,194 | 88 |
| out | 4,82 | 4,758 | 103 |
| nov | 5,95 | 5,492 | 115 |
| dez | 5,89 | 5,328 | 116 |
| TOTAL | 4,43 | 4,604 | 1.179 |



Figura 52: Atalho para gerar relatório em PDF SFVI

Segue exemplo de relatório gerado (Figura 53). O arquivo será salvo em formato PDF na mesma pasta de origem onde está salvo o arquivo principal Excel, com o nome, data e hora conforme exemplo que segue: “*Dimensionamento SFVI – dd-mmm-aaaa hh-mm*”.

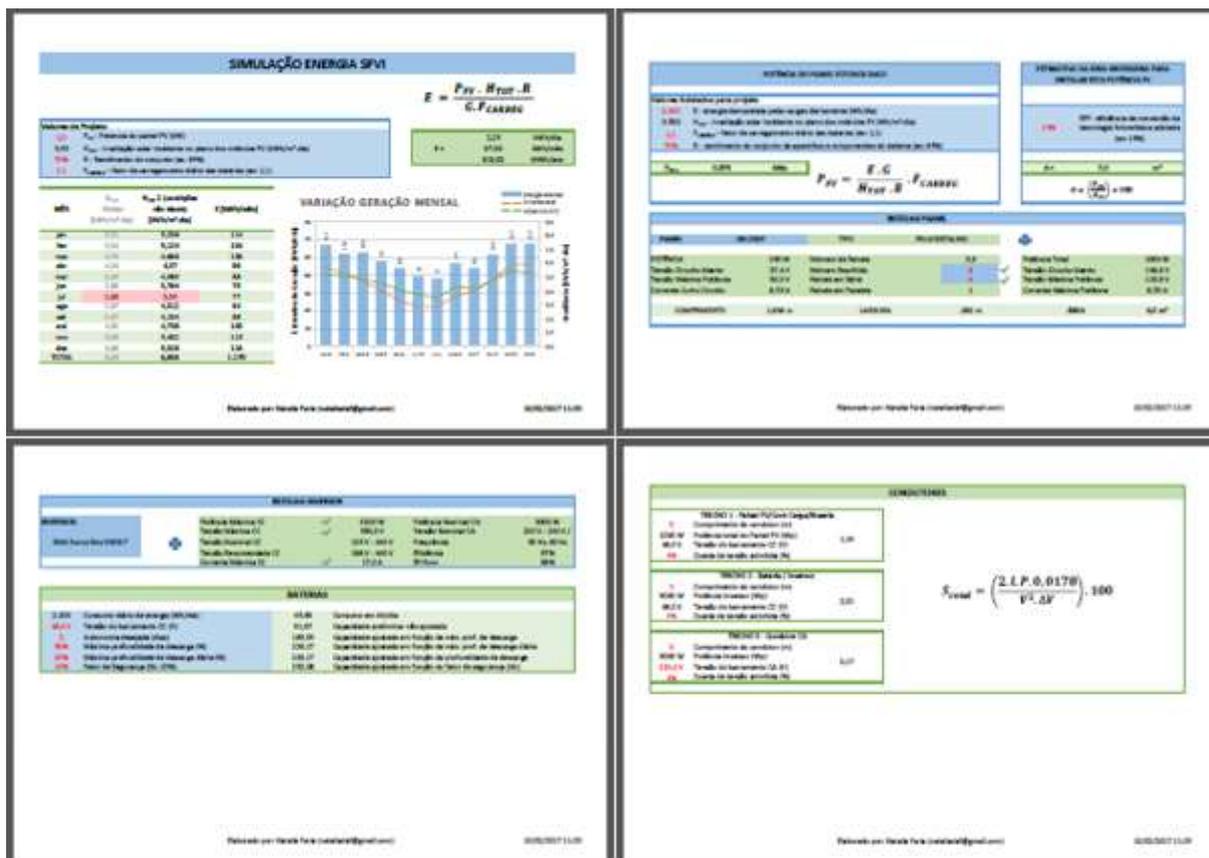


Figura 53: Exemplo relatório SFVI gerado em formato PDF

Para retornar à página inicial é necessário clicar no botão “MAPA INICIAL” conforme ilustra a Figura 54:

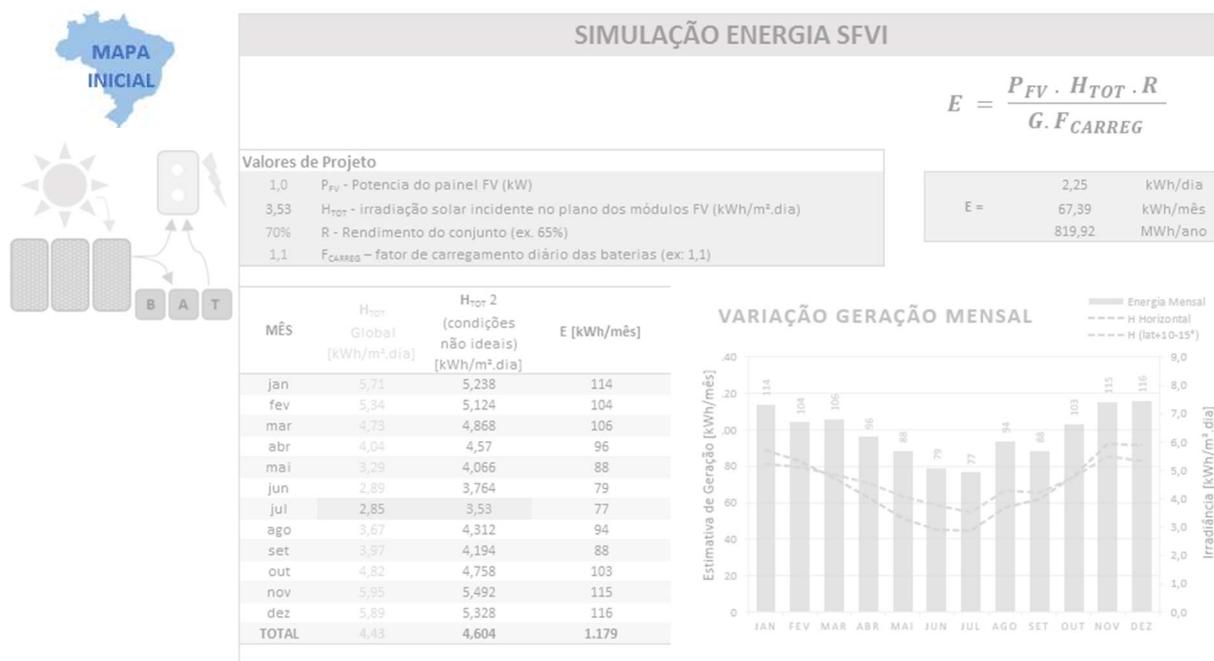


Figura 54: Atalho SFVI para retornar à página inicial

4.3 DIMENSIONAMENTO DE UM SFVCR

A ferramenta também torna possível o dimensionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede. No exemplo que segue será utilizada a Cidade de Curitiba (Figura 55).

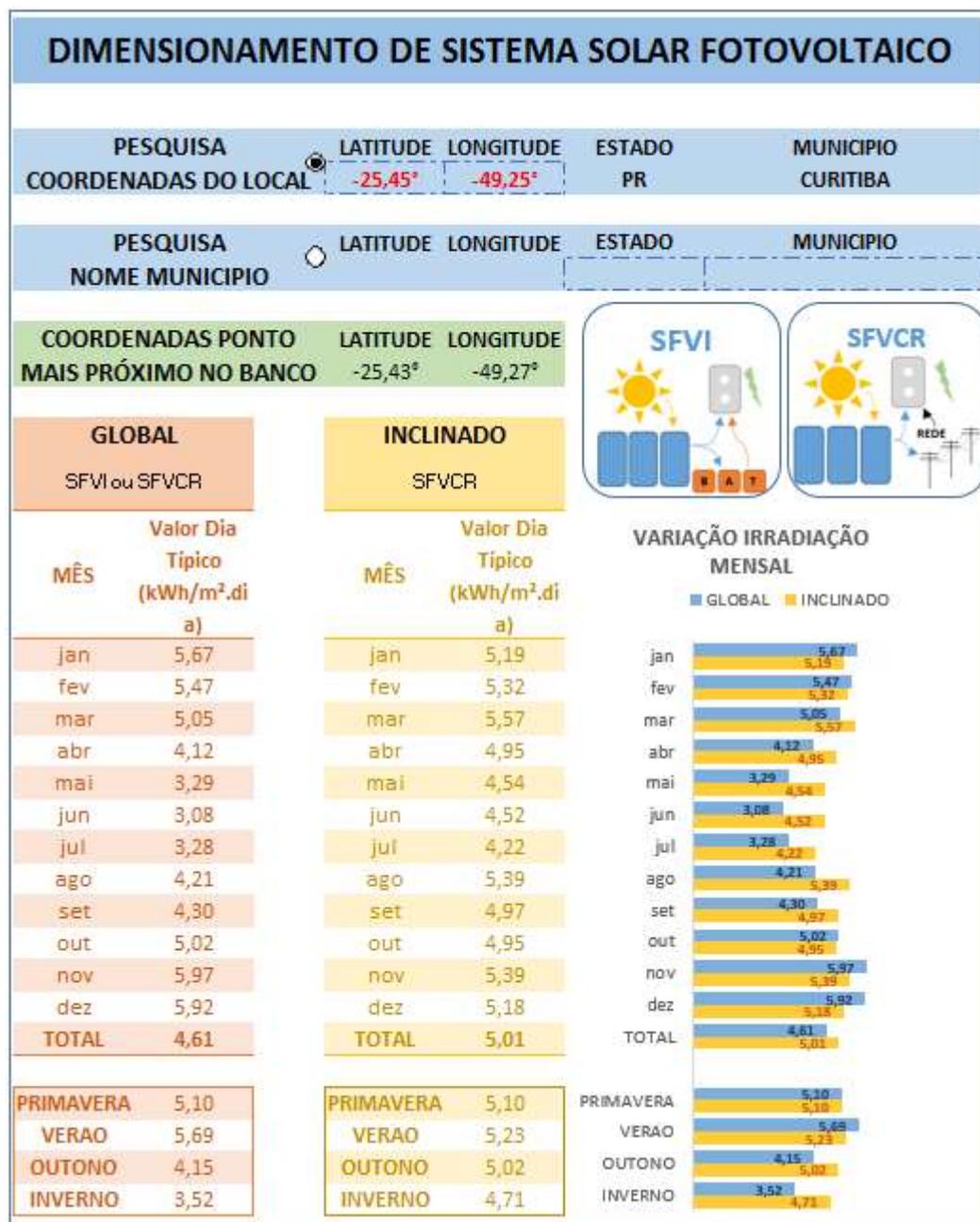


Figura 55: Valor típico de irradiação em Curitiba - PR

A fim de maximizar a geração anual em um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica, a inclinação dos painéis deve ser correspondente à latitude do local, e orientado para o Norte. Então podem-se utilizar os valores de irradiação direto do banco de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar no plano inclinado.

Para seguir com o dimensionamento, existe um atalho que leva à planilha de Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFVCR), como visto na Figura 56.

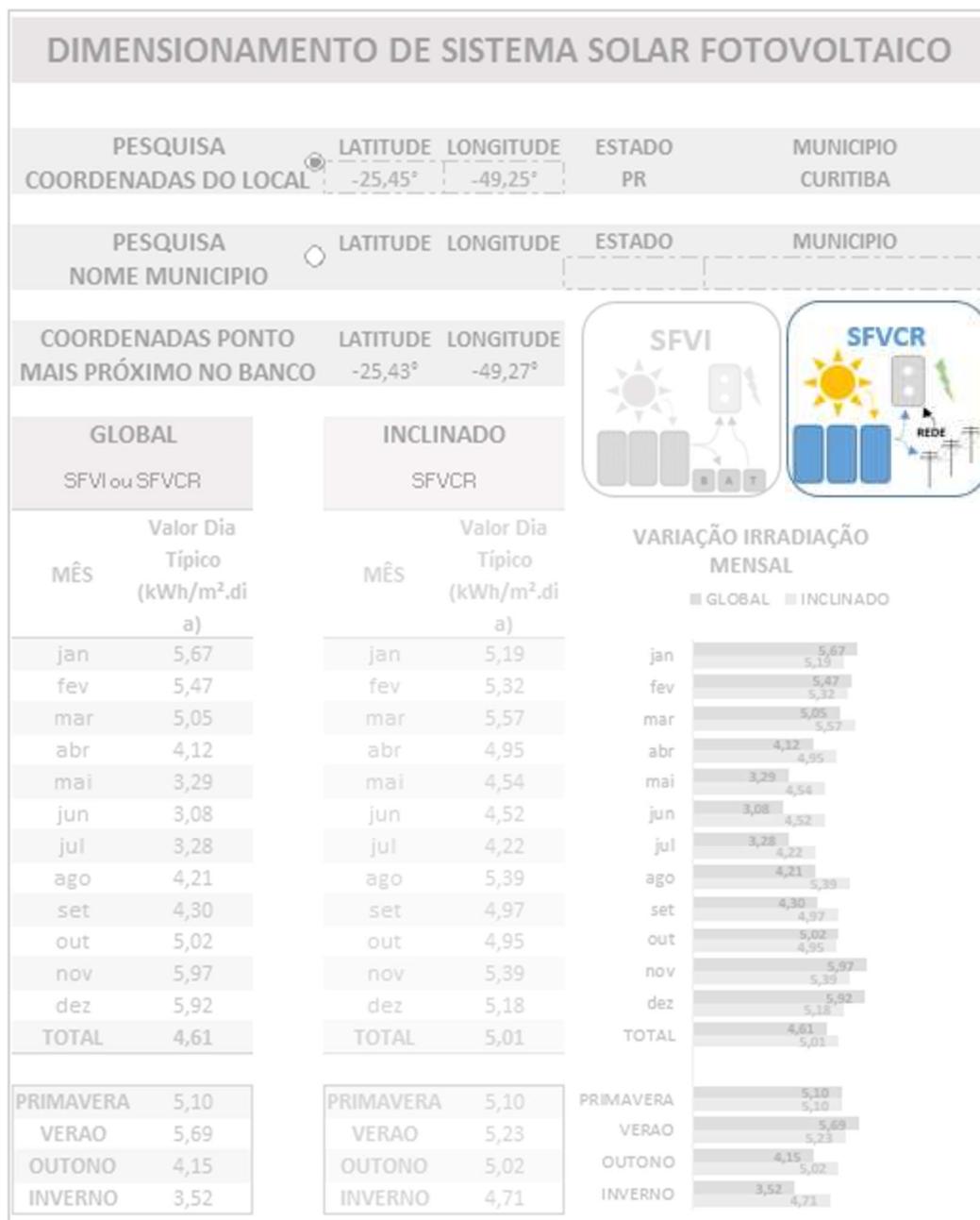


Figura 56: Atalho Dimensionamento SFVCR

Na etapa de dimensionamento de SFVCR o primeiro dado que precisa ser adicionado é referente ao plano de instalação dos painéis. Se o sistema possui inclinação igual latitude e desvio igual a 0° (direção Norte caso de Curitiba - Brasil), a ferramenta já vai buscar os valores de irradiação do banco de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar no plano inclinado, conforme Figura 57.

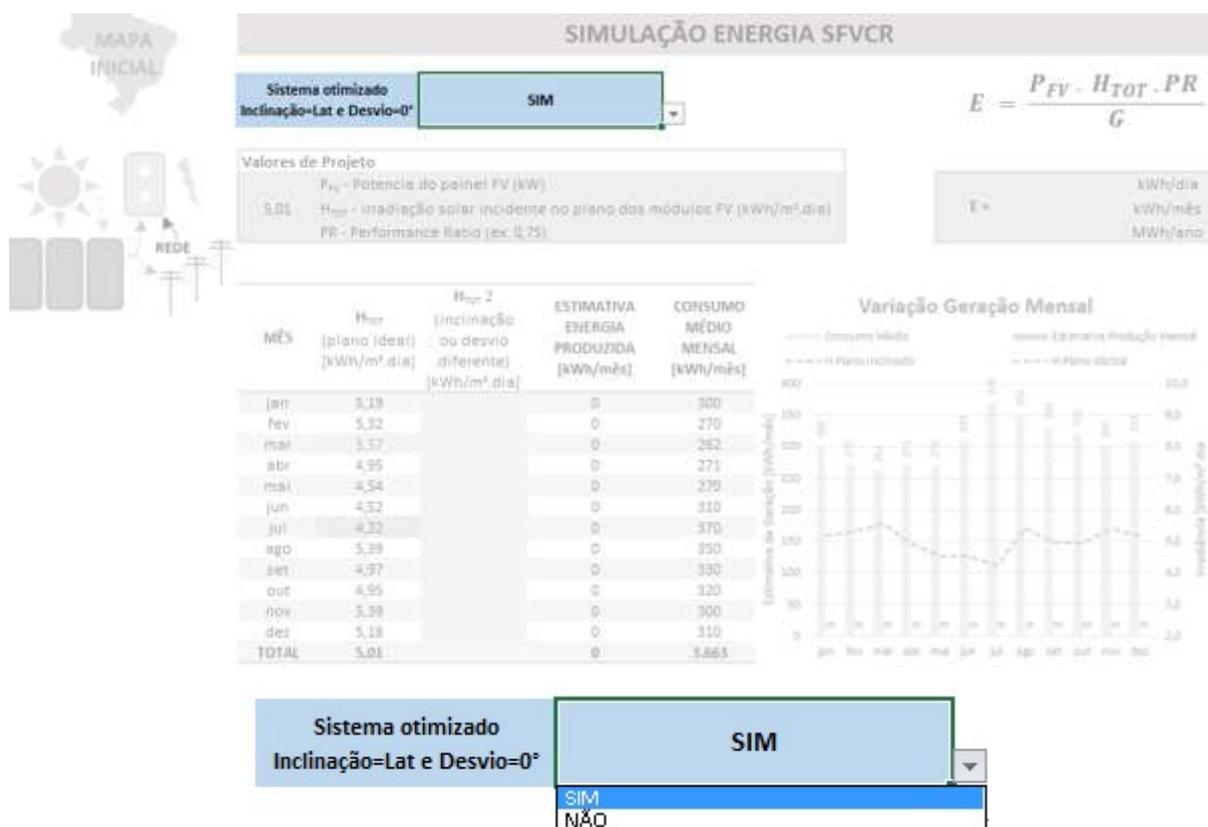


Figura 57: Sistema otimizado – opção SIM ou NÃO

Caso o sistema não seja instalado no plano otimizado, e sua latitude e desvio sejam diferentes dos ideais, o usuário poderá inserir manualmente os dados de irradiação específicos para seu aproveitamento, conforme Figura 58.

| MÊS | H_{TOT} (plano ideal) [kWh/m ² .dia] | $H_{TOT} 2$ (inclinação ou desvio diferente) [kWh/m ² .dia] | ESTIMATIVA ENERGIA PRODUZIDA [kWh/mês] | CONSUMO MÉDIO MENSAL [kWh/mês] |
|-------|---|--|---|---|
| jan | 5,19 | | 351 | 300 |
| fev | 5,32 | | 337 | 270 |
| mar | 5,57 | | 377 | 262 |
| abr | 4,95 | | 324 | 271 |
| mai | 4,54 | | 307 | 270 |
| jun | 4,52 | | 296 | 310 |
| jul | 4,22 | | 286 | 370 |
| ago | 5,39 | | 365 | 350 |
| set | 4,97 | | 326 | 330 |
| out | 4,95 | | 335 | 320 |
| nov | 5,39 | | 353 | 300 |
| dez | 5,18 | | 351 | 310 |
| TOTAL | 5,01 | | 4.009 | 3.663 |

Figura 58: Dados de irradiação inseridos manualmente

No exemplo apresentado a simulação será feita com os painéis nas condições ideais, ou seja, inclinação igual 25° e orientação para o Norte.

No bloco “*POTÊNCIA DO PAINEL FOTOVOLTAICO*” é possível realizar uma avaliação prévia do sistema que deve ser instalado para atender um consumo de uma residência. Como exemplo foi considerado uma residência com consumo médio de 300 kWh/mês (10kWh/dia). Na tabela deve-se entrar com os valores de energia diária a ser gerada em kWh/dia e *Performance Ratio* do sistema (Figura 59).

| POTÊNCIA DO PAINEL FOTOVOLTAICO | |
|---|---|
| Valores Adotados para projeto | |
| 10 | E - energia diária a ser gerada (kWh/dia) |
| 5,01 | H _{TOT} - irradiação solar incidente no plano dos módulos FV (kWh/m ² .dia) |
| 78% | PR - Performance Ratio (ex: 75%) |
| P_{FV} = | 2,559 kWp |
| $P_{FV} = \frac{E \cdot G}{H_{TOT} \cdot PR}$ | |

Figura 59: Estimativa inicial de potência instalada SFVCR

É possível também ter uma estimativa da área que o sistema irá ocupar inserindo a informação de eficiência de conversão da tecnologia que pretende ser utilizada (Figura 60).

| ESTIMATIVA DA ÁREA NECESSÁRIA PARA INSTALAR ESTA POTÊNCIA FV | |
|--|--|
| 15% | EFF - eficiência de conversão da tecnologia fotovoltaica adotada (ex: 15%) |
| A = | 17,060 m² |
| $A = \left(\frac{P_{FV}}{EFF} \right) \times 100$ | |

Figura 60: Estimativa da área necessária para instalar o sistema SFVCR

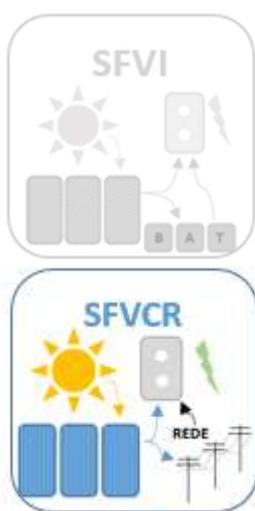
Tendo conhecimento da potência estimada do sistema para atender o consumo da residência, pode-se seguir em frente e escolher o painel fotovoltaico que se pretende utilizar. Existem duas opções:

- ✓ Escolher um dos painéis já disponíveis no banco de dados da ferramenta
- ✓ Criar um novo painel de acordo com necessidade

Para inserir os dados de um novo painel fotovoltaico, é necessário clicar no botão em formato de “+” em destaque na Figura 39.

Informações básicas como nome do Painel, tipo de tecnologia, potência instalada, tensão e corrente devem ser inseridas na primeira coluna em branco nesse banco de dados, conforme Figura 40.

Para retornar para a página de dimensionamento de sistema conectado à rede, deve-se clicar no botão “SFVCR” conforme ilustra a Figura 61:



| PAINEL | SPT280 | HR-250P |
|-------------------------|----------------|----------------|
| TIPO | POLICRISTALINO | POLICRISTALINO |
| POT | 280 W | 250 W |
| Tensão Circuito Aberto | 44,8 V | 37,4 V |
| Tensão Máxima | 35,2 V | 30,0 V |
| Corrente Curto Circuito | 7,95 A | 8,79 A |
| Comprimento | 1675 mm | 1636 mm |
| Largura | 1001 mm | 992 mm |
| Peso | 22,0 kg | 19,5 kg |

Figura 61: Retornar para a página de dimensionamento SFVCR

Após inseridos os dados necessários, pode-se então escolher qual painel deseja utilizar, conforme visto na Figura 42.

Após a escolha do painel, será sugerido o número indicativo de painéis para atender a demanda de energia da residência. O usuário pode então escolher a quantidade e o arranjo que será adotado tomando como base esse número (Figura 62).

| ESCOLHA PAINEL | | | |
|-------------------------|--------|---------------------|----------------|
| PAINEL | SPT280 | TIPO | POLICRISTALINO |
| POTÊNCIA | 280 W | Número de Paineis | 9,1 |
| Tensão Circuito Aberto | 44,8 V | Número Escolhido | 10 ✓ |
| Tensão Máxima Potência | 35,2 V | Paineis em Série | 5 ✓ |
| Corrente Curto Circuito | 7,95 A | Paineis em Paralelo | 2 |

Figura 62: Número de painéis a serem instalados

Com finalidade de atualizar os gráficos iniciais de estimativa de geração mensal de energia com a configuração adotada, é necessário clicar no botão conforme destaque na Figura 63:

| ESCOLHA PAINEL | | | | | | |
|-------------------------|---------|---------------------|----------------|--|--------------------------|---------|
| PAINEL | SPT280 | TIPO | POLICRISTALINO | | | |
| POTÊNCIA | 280 W | Número de Paineis | 9,1 | | Potência Total | 2800 W |
| Tensão Circuito Aberto | 44,8 V | Número Escolhido | 10 ✓ | | Tensão Circuito Aberto | 224,0 V |
| Tensão Máxima Potência | 35,2 V | Paineis em Série | 5 ✓ | | Tensão Máxima Potência | 176,0 V |
| Corrente Curto Circuito | 7,95 A | Paineis em Paralelo | 2 | | Corrente Máxima Potência | 15,90 A |
| COMPRIMENTO | 1,675 m | LARGURA | 1,001 m | | ÁREA | 16,8 m² |


ATUALIZAR POTÊNCIA PROJETO INICIAL

Figura 63: Atalho para atualizar a potência instalada do projeto

Na parte superior da página o dado de potência instalada do sistema será atualizado de acordo com a configuração adotada. A Figura 64 demonstra um exemplo do resultado encontrado:

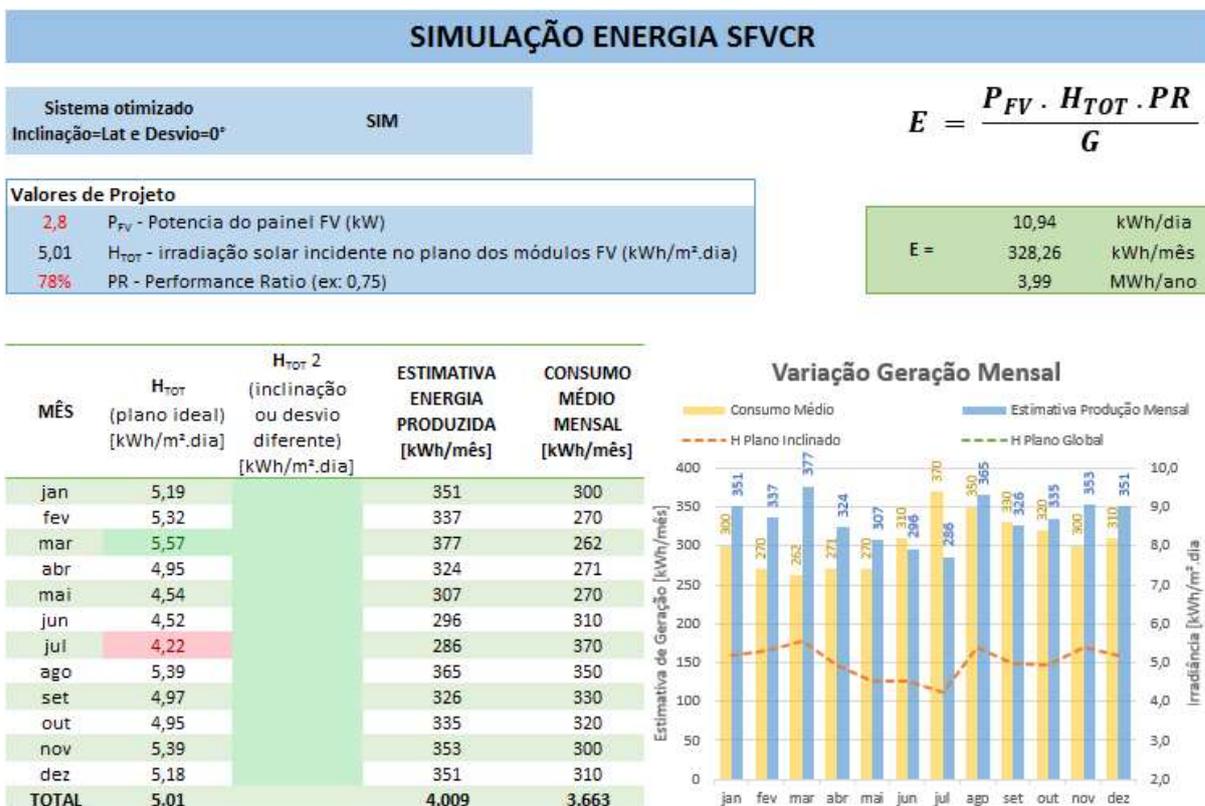


Figura 64: Resultado gráfico da estimativa de geração

Próximo passo ainda nessa mesma página pode-se definir qual inversor será aplicado. Da mesma maneira que ocorre com os painéis, é possível inserir dados de novos inversores, ou selecionar um que se encontra no banco de dados, conforme visto na Figura 46, Figura 47, Figura 49 e Figura 65.

| | INVERSOR | SMA Sunny Boy 4000LT | SMA Sunny Boy 5000LT |
|---|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|  | Potência Máxima CC | 4200 W | 5100 W |
| | Tensão Máxima CC | 500,0 V | 1000,0 V |
| | Tensão Nominal CC | 125 V - 440 V | 245 V - 800 V |
| | Tensão Recomendada CC | 175 V - 440 V | |
| | Corrente Máxima CC | 2 x 15 A | 11 A |
| | Potência Nominal CA | 4000 W | 5000 W |
|  | Tensão Nominal CA | 220 V - 240 V / 180 V - 280 V | 220 V - 380 V / 220 V - 400 V |
| | Frequência | 50 Hz, 60 Hz | 50 Hz, 60 Hz |
| | Eficiência | 97,0% | 98,1% |
| | Efi Euro | 96,4% | 97,5% |

Figura 65: Atalho para retornar à página de dimensionamento

A ferramenta torna possível também realizar uma estimativa dos condutores, para isso é necessário ter as informações de comprimento em cada trecho (CC e CA), e queda de tensão máxima admitida. A Figura 66 mostra a tela para dimensionamento dos condutores:

| ESCOLHA CONDUTOR | | |
|---------------------------------------|----------------------------------|------|
| TRECHO 1 - PAINEL FV/INVERSOR | | |
| 20 | Comprimento do condutor (m) | |
| 2800 W | Potência total do Painel FV (Wp) | 2,15 |
| 176,0 V | Tensão do barramento CC (V) | |
| 3% | Queda de tensão admitida (%) | |
| TRECHO 2 - INVERSOR / CARGA CA | | |
| 10 | Comprimento do condutor (m) | |
| 3000 W | Potência Inversor (Wp) | 0,74 |
| 220,0 V | Tensão do barramento CA (V) | |
| 3% | Queda de tensão admitida (%) | |

$$S_{cond} = \left(\frac{2 \cdot I \cdot P \cdot 0,0178}{V^2 \cdot \Delta V} \right) \cdot 100$$

Figura 66: Dimensionamento dos condutores

Na parte superior da página existe um botão para gerar um relatório em formato PDF do trabalho realizado, conforme ilustra a Figura 67:

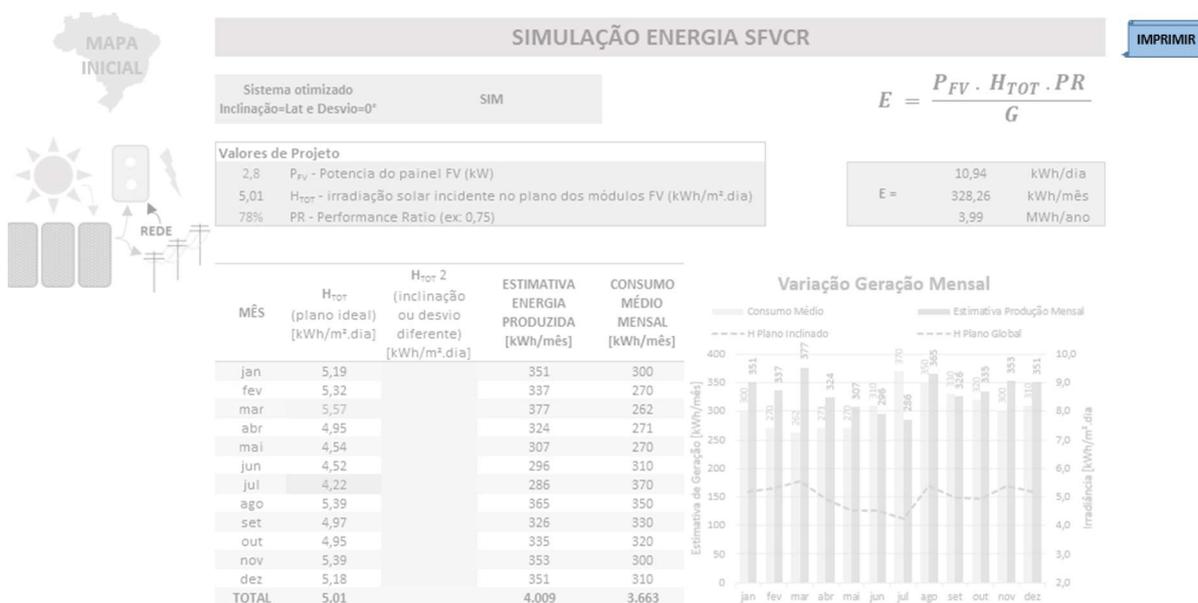


Figura 67: Atalho para gerar relatório SFVCR

Segue exemplo de relatório gerado (Figura 68). O arquivo será salvo em formato PDF na mesma pasta de origem onde está salvo o arquivo principal Excel,

com o nome, data e hora conforme exemplo da Figura 68: “Dimensionamento SFVCR – dd-mmm-aaaa hh-mm”.

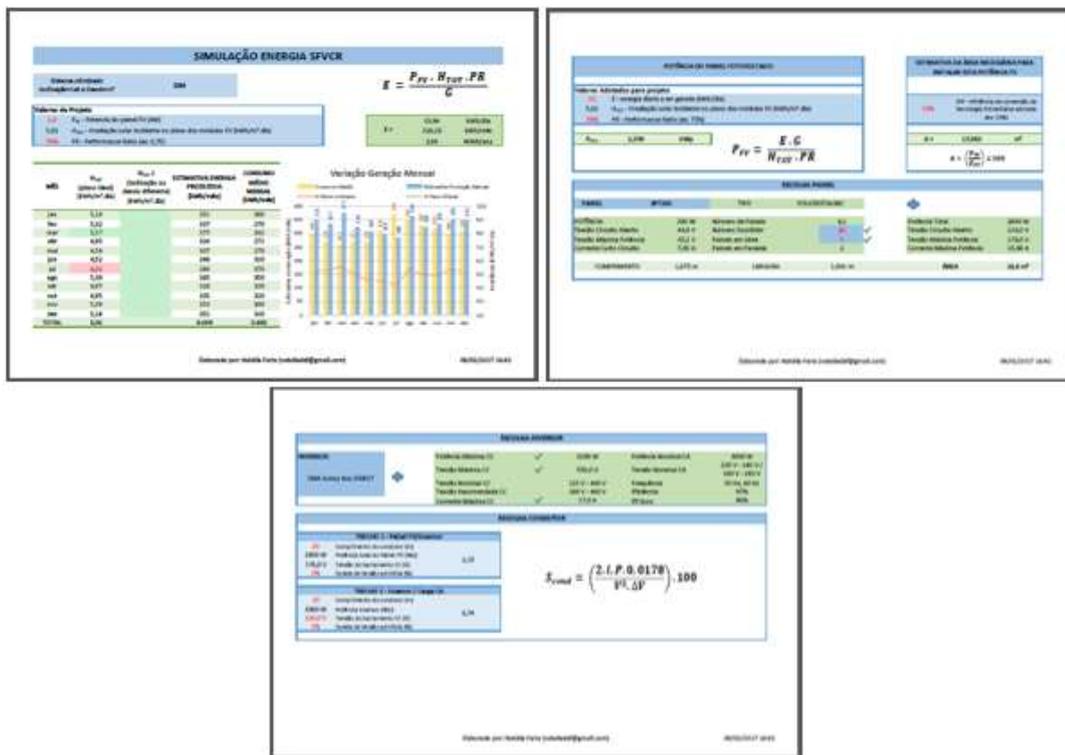


Figura 68: Exemplo de relatório SFVCR gerado em formato PDF

Para retornar à página inicial, necessário clicar no botão “MAPA INICIAL” conforme ilustra a Figura 69:

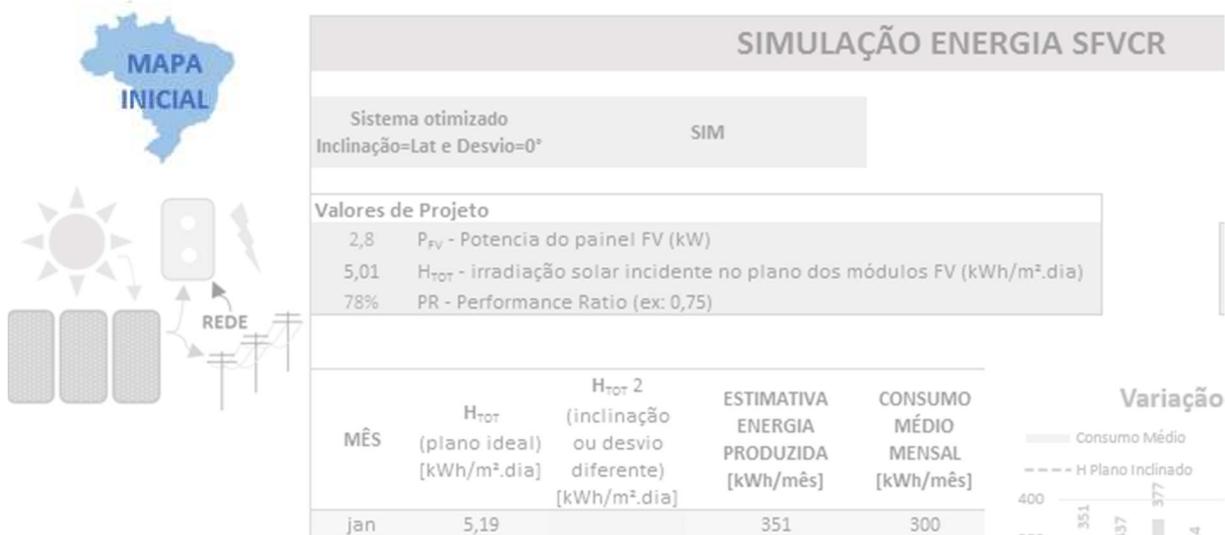


Figura 69: Atalho para página inicial

O projeto, após finalizado, pode ser salvo com outro nome em formato Excel, sendo possível realizar atualizações ou alterações se necessário.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do mercado de energia solar vem cada dia ganhando mais espaço, por suas vantagens ambientais quando comparada à outras fontes convencionais. A energia solar é considerada renovável, de fonte inesgotável, que não emite gases poluentes durante a geração e também não apresenta poluição sonora. Além das questões de apelo ambiental, um sistema solar fotovoltaico pode ser instalado junto ao ponto de consumo reduzindo as perdas na transmissão, e aproveitando a estrutura disponível do local. O presente trabalho contribui de forma prática com a disseminação de conhecimento na área de energia solar fotovoltaica.

No presente trabalho foi desenvolvida uma ferramenta de auxílio para dimensionamento de sistemas solares fotovoltaicos. O sistema criado é de fácil acesso, apresentando uma estimativa preliminar de energia a partir de dados simples como coordenadas do local ou nome da cidade e município de interesse.

Como resultado principal, nos relatórios finais da ferramenta são apresentadas as estimativas de geração média anual, mensal e diária do sistema a partir das informações inseridas. Os resultados também são apresentados através de gráficos de comparação entre consumo e geração o que facilita no entendimento visual.

Através da ferramenta é possível estimar qual a potência instalada necessária para atender a uma determinada demanda energética. Assim como, cadastrar novos equipamentos, painéis e conversores, de acordo com os que estão comercialmente acessíveis no momento, deixando a planilha customizada.

Os dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar utilizados para as estimativas de geração são os de 2006, disponíveis no momento da construção do projeto. Porém, esse banco de dados pode e deve ser atualizado assim que as informações sejam disponibilizadas.

Neste trabalho foi considerada ainda a utilização do *software* RADIASOL para estimativa de radiação em plano que não seja o diretamente disponibilizado pelo banco de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar (inclinado ou horizontal). Para trabalhos futuros fica como sugestão incluir na ferramenta o cálculo para diferentes inclinações e desvios azimutais, tornando desnecessária o apoio de outro *software* para essa estimativa de irradiação em planos diferentes do inclinado.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **REN 482, 12 de Abril de 2012.** Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 23/02/2017.

BIG, **Banco de Informações de Geração, ANEEL.** Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 09/02/2017.

BP, **Petrolífera britânica BP.** Disponível em: <www.bp.com>. Acesso em: 23/02/2017.

DUKE ENERGY. **Current Solar Projects.** Disponível em: <<https://www.duke-energy.com>>. Acesso em: 16/02/2017.

ENERGIA SOLAR. **Tipos de Células fotovoltaicas.** Disponível em: <<https://pt.solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/tipos-celulas-fotovoltaicas>>. Acesso em: 20/02/2017.

GHENSEV, Almir. **Materiais e Processos de Fabricação de Células Fotovoltaicas.** Universidade Federal de Lavras – UFLA. Minas Gerais. 2006

GOOGLE. **Google Earth Pro.** Versão 7.1.7.2600. Data da compilação: 25/08/2016. Data da consulta: 16/02/2017.

IDEAL. **O mercado brasileiro de geração distribuída fotovoltaica** - Edição 2016, 2016. Disponível em: <https://issuu.com/idealeco_logicas/docs/estudofv2016_final>. Acesso em: 15/02/2017

MIRANDA, Arthur Biagio Canedo Montesano. **Análise de Viabilidade Econômica de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, março de 2014.

NAUKAS. Figura lingote de silício policristalino. Disponível em: <<http://naukas.com/2011/12/13/cuestion-de-impurezas/>>. Acesso em: 23/02/2017.

OPTPOWER. **Imagem Incidência solar.** Disponível em: <<http://www.optpower.com>>. Acesso em: 22/02/2017.

PEREIRA, Enio Bueno; MARTINS, Ferrnando Ramos; ABREU, Samuel Luna; RUTHER, Ricardo. **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** INPE, São José dos Campos, São Paulo, 1º Edição, 2006.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos.** Rio de Janeiro, RJ, Março de 2014.

PINTEREST. **Figuras de Painéis Solares.** Disponível em: <<https://br.pinterest.com>>. Acesso em: 22/02/2017.

REN21. **Annual Report 2016**. REN21 Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. 2016.

RUTHER, Ricardo. **Edifícios Solares Fotovoltaicos** – O Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Interligada à Rede Elétrica Pública no Brasil. Editada UFSC / LABSOLAR, Florianópolis, SC, 2004.

SOLARPOWER EUROPE. **Global Market Outlook 2016-2020**, 2016.

SOLARPOWER EUROPE. **Global Market Outlook 2015-2019**, 2015.

SWERA, **Solar and Wind Energy Resource Assessment**, Disponível em: <<http://en.openei.org/apps/SWERA/>>. Acesso em: 15/02/2017.

SMA, **Technical Information, Efficiency and Derating**, SUNNY BOY, Disponível em: <<http://files.sma.de/dl/4246/WKG-Derating-US-TI-en-16.pdf>>. Acesso em: 14/02/2017.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. EPE, Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2016.

URBANETZ JUNIOR, J.; CASAGRANDE JUNIOR, E. F. **Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica do Escritório Verde da Universidade Tecnológica Federal do Paraná**. VIII CBPE: Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 12 a 15 janeiro 2012. Disponível em: <<http://www.escriptorioverdeonline.com.br>>. Acesso em 16/02/2017.

URBANETZ JUNIOR, J. **Apostila de Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos do curso de Especialização em Energias Renováveis**. UTFPR, 2016.

VIANA, Trajano de Souza. **Avaliação da irradiação solar direta e do potencial da geração solar fotovoltaica com sistemas com concentração no Brasil**. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2010.

VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia solar fotovoltaica: Conceitos e aplicações, sistemas isolados e conectados à rede**. 2ª edição. São Paulo. Editora Ética, 2015.

ZILLES, R.; MACÊDO, W. N.; GALHARDO, M. A. B.; OLIVEIRA, S. H. F. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**. Oficina de Textos, São Paulo, 2012.